

SLOVENSKÁ INOVAČNÁ A ENERGETICKÁ AGENTÚRA

v spolupráci so

ŠTÁTNYM GEOLOGICKÝM ÚSTAVOM DIONÝZA ŠTÚRA



**METODIKA NA POSUDZOVANIE UDRŽATEĽNOSTI
ENERGETICKÁHO POTENCIÁLU ZDROJOV
GEOTERMÁLNEJ ENERGIE V REGIÓNOCH PRE POTREBY
REGIONÁLNEHO ENERGETICKÉHO PLÁNOVANIA**

Vyhotovenie:

15. novembra 2023

Tento materiál bol vypracovaný pre Slovenskú inovačnú a energetickú agentúru so sídlom Bajkalská 27, 827 99 Bratislava 27, na základe Dohody o vykonaní práce č. 44-2023 pre potreby regionálnych centier energetického plánovania a udržateľnej energetiky (RCUE) a Memoranda o spolupráci medzi Slovenskou inovačnou a energetickou agentúrou a Štátnym geologickým ústavom Dionýza Štúra so sídlom Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava.

VYPRACOVAL:

Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD.

Oddelenie Hydrogeológie a geotermálnej energie, Štátny geologický ústav Dionýza Štúra

Mlynská dolina 1

817 04 Bratislava

branislav.fricovsky@geology.sk

POĎAKOVANIE ZA SPOLUPRÁCU:

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, doc. Ing. Ladislav Vizi, PhD., Mgr. František Bottlík

V: Bratislava

Dňa: 15. 11 2023

PREHLÁSENIE

Predmetná metodická príručka bola pripravená ako teoretický a podkladový materiál na základe dohody o vykonaní práce podpísanej medzi Slovenskou inovačnou a energetickou agentúrou (ďalej SIEA) a Ing. Branislavom Fričovským, M.S., PhD č. 44-2023 v pracovnej úlohe experta zo dňa 30. 06 2023, a na základe Memoranda o spolupráci medzi a Štátnym geologickým ústavom Dionýza Štúra (ŠGÚDŠ)

Spracovanie metodickej príručky kvalitatívne a kvantitatívne podlieha príslušnej Dohode o vykonaní práce, ktorú obe strany schválili svojim podpisom a podlieha duševnému vlastníctvu zamestnávateľa (SIEA)

Metodická príručka je koncipovaná ako usmernenie pre pracovníkov vznikajúcich regionálnych centier udržateľnej energetiky (ďalej RCUE) v zmysle oboznámenia sa so základnými princípmi prírodných aspektov formovania a prítomnosti, respektíve charakteristík zdrojov geotermálnej energie a následne s technickými aspektmi ich udržateľného, obnoviteľného a účinného (efektívneho) využívania; spolu s presnou špecifikáciou podkladov a kontaktov, ktoré zamestnanci RCUE môžu – a mali by – pri posudzovaní projektov spojených s geotermálnou energiou využívať pre konzultácie, spoluprácu, a vyvodenie záverov.

Predkladaná metodická príručka nemá, vzhľadom na komplexnosť a interdisciplinaritu rezervoárového inžinierstva, ako hlavného vedno-technického oboru venujúceho sa zdrojom geotermálnej energie, právnu, ani koncepcnú ambíciu vytvoriť ucelený workflow kvalifikácie projektov (viď odstavec vyššie)

Prezentácia a publikácia materiálov a súčasti predmetnej príručky je na plnom zvážení objednávateľa / zamestnávateľa, t.j. SIEA

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

AGES	Asociácia geotermálnej energie Slovenska
CU	národný report o využití a využívaní geotermálnej energie
EGA	európska geotermálna asociácia
EGC	Európsky geotermálny kongres
EGS	stimulované geotermálne systémy
GTE	geotermálna energia (zdroje geotermálnej energie)
HDR	systémy horúcej suchej skaly
HDS	hydrodynamické skúšky (čerpacie, stúpacie)
HWR	systémy horúcej vlhkej skaly
IGA	medzinárodná geotermálna asociácia
LCOE	vyrovnané energetické náklady
LWD	meranie počas vrtania (logging while drilling)
LWP	meranie počas produkcie (logging while pumping)
MŽP SR	Ministerstvo životného prostredia SR
ORC	binárne elektrárne ORC (organic-rankine-cycle) typu
RIAM	matica aktívneho hodnotenia komplexných dopadov
ŠGÚDŠ	Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
TUR	(konceptia) trvalo udržateľného rozvoja
TURM	(konceptia) trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu
TURP	(konceptia) trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie
ÚGV	útvary geotermálnych vôd
WGC	Svetový geotermálny kongres

Obsah

1	Anotácia	1
2	Všeobecné pojmy, definície a charakteristiky	3
2.1	Geotermálna energia a zdroje geotermálnej energie	3
2.1.1	Geotermálna energia	3
2.1.2	Hierarchia pojmov zdrojov geotermálnej energie	4
2.2	Klasifikačné schémy zdrojov geotermálnej energie	6
2.2.1	Geotektonická pozícia a hydrogeologický režim	7
2.2.2	Charakteristiky zdrojov geotermálnej energie	18
2.2.3	Technická využiteľnosť	31
2.2.4	Energetický potenciál	35
2.2.5	Vybrané pojmy v energetike zdrojov geotermálnej energie	57
3	Charakteristika technológií využívania geotermálnej energie	69
3.1	Priame využitie geotermálnej energie	73
3.1.1	Segment centrálného a individuálneho zásobovania teplom	74
3.1.2	Segment poľnohospodárstva – skleníkové hospodárstvo	77
3.1.3	Segment poľnohospodárstva – výroba, príprava, spracovanie produktov	79
3.1.4	Segment akvakultúry	81
3.1.5	Segment chovu poľnohospodárskych zvierat	81
3.1.6	Segment priemyslu	82
3.1.7	Segment baníctva	84
3.2	Nepriame využitie geotermálnej energie	86
3.2.1	Priame (suchopárne) geotermálne elektrárne	91
3.2.2	Jedno-stupňové expanzné geotermálne elektrárne	94
3.2.3	Viac-stupňové expanzné geotermálne elektrárne	96
3.2.4	Binárne elektrárne typu ORC	99
3.2.5	Binárne elektrárne typu Kalina	104
3.3	Typy geotermálnych vrtov	108

3.4	Reinjektáž.....	116
4	Koncepcia trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie.....	127
4.1	Udržateľnosť zdrojov geotermálnej energie.....	128
4.1.1	Definícia trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie	128
4.1.2	Faktor časovej zložky definície TURP.....	130
4.1.3	Kategórie produkcie geotermálnej energie podľa vzťahu k udržateľnosti.....	131
4.1.4	Manažment produkcie vo vzťahu k udržateľnej kapacite rezervoáru	132
4.1.5	Udržateľná rezervoárová kapacita.....	138
4.1.6	Možnosti stanovenia udržateľnej rezervoárovej kapacity	140
4.2	Obnoviteľnosť zdrojov geotermálnej energie	143
4.2.1	Obnovovacia kapacita rezervoárového prostredia	144
4.2.2	Regeneračná kapacita rezervoárového prostredia	148
4.3	Rezervoárová odozva a monitoring zdrojov geotermálnej energie.....	151
4.3.1	Rezervoárový manažment v zmysle koncepcie TURM / TURP.....	151
4.3.2	Monitoring fyzikálnych parametrov.....	154
4.3.3	Monitoring chemických parametrov	156
4.3.4	Výstupy a prínos koncepčného monitoringu.....	157
4.3.5	Rezervoárová odozva dlhodobej produkcie	159
5	Zdroje geotermálnej energie na Slovensku.....	169
5.1	Stručný prehľad geologickej stavby Západných Karpát	169
5.1.1	Externidy a bradlové pásmo	170
5.1.2	Internidy	170
5.2	Výskyt, rozšírenie a charakteristika zdrojov geotermálnej energie.....	181
5.2.1	Útvary geotermálnych vôd	181
5.2.2	Geologická charakteristika	186
5.2.3	Hydrogeologická charakteristika.....	187
5.2.4	Hydrogeochemická charakteristika	194
5.2.5	Geotermická charakteristika.....	195
5.2.6	Rezervoárová dynamika vo vybraných rezervoárových prostrediach	199

5.2.7	Fázová charakteristika.....	201
5.2.8	Koncepcná klasifikácia	203
5.3	Využitie a využívanie geotermálnej energie	206
5.3.1	Využitie zdrojov geotermálnej energie	207
5.3.2	Využívanie zdrojov geotermálnej energie.....	213
5.3.3	Aktuálne perspektívy rozvoja produkcie geotermálnej energie	217
6	Energetický potenciál zdrojov geotermálnej energie na Slovensku	221
6.1	Diskrétné metódy hodnotenia zdrojov geotermálnej energie na Slovensku	222
6.1.1	Bilančná metóda (heat budget method).....	222
6.1.2	USGS objemová metóda (volumetric / heat-in-place method)	223
6.2	Pravdepodobnostný model odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľnej rezervoárovej kapacity zdrojov geotermálnej energie na Slovensku - 2024.....	227
6.2.1	Princípy konštrukcie pravdepodobnostného modelu	227
6.2.2	Klasifikačné schémy zdrojov geotermálnej energie na základe udržateľnosti a perspektivity rozvoja produkcie	229
6.2.3	Mapovacie schémy citlivosti a udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie	240
6.2.4	3D klasifikačná schéma perspektivity zdrojov geotermálnej energie	248
7	Rizikové faktory a manažment útvarov geotermálnych vôd	259
7.1	Rezervoárový manažment v špecifických prípadoch	259
7.1.1	Manažment pri rezervoárovej strate tlaku (produktivity)	260
7.1.2	Manažment pri ochladzovaní rezervoáru	265
7.1.3	Manažment vo vzťahu k rezervoárovej konvekcii	271
7.2	Rezervoárový manažment v špecifických prípadoch	275
7.2.1	Princípy prístupu k rozvoju produkcie geotermálnej energie v rizikových útvaroch geotermálnych vôd	275
7.2.2	Princípy prístupu k rozvoju produkcie geotermálnej energie v ochranných pásmach minerálnych a termo-minerálnych vôd	277
8	Matica aktívneho hodnotenia komplexných dopadov projektov geotermálnej energie	280
8.1	Teoretický koncept matice dopadu RIAM	281

8.2	Návrhy posudzovaných aspektov a sub-aspektov hodnotenia pre potreby RCUE	286
8.2.1	Fyzikálno-chemické komponenty / aspekty (PC)	287
8.2.2	Biologicko-ekologické komponenty / aspekty (BE)	293
8.2.3	Kultúrno-spoločenské komponenty / aspekty (SC).....	296
8.2.4	Ekonomicko-technické komponenty (EO).....	300
8.3	Termalpark Bešeňová – príklad aplikácie matice RIAM	303
8.3.1	Príklad 1 – thermalpark Bešeňová	304
9	Schéma predbežného posúdenia zmysluplnosti energetického využitia geotermálnej energie pre potreby RCUE	327
9.1	Posudzovanie projektov prieskumu a produkcie	327
9.1.1	Kritéria posudzovania projektovej prípravy a dokumentácie.....	328
9.1.2	Úroveň geologického a geotermického poznania	336
9.1.3	Geotermické a energetické podmienky rezervoárového prostredia	348
9.1.4	Perspektivita produkcie zdrojov geotermálnej energie	367
9.2	Posudzovanie projektov rozširovania produkcie zdrojov geotermálnej energie	379
9.2.1	Účel produkcie geotermálnej energie	380
9.2.2	Realizácia produkcie geotermálnej energie.....	391
9.3	Systém vyhodnocovania	402
10	Všeobecné a doplňujúce informácie pre potreby RCUE	405
10.1	Základné legislatívne rámce prieskumu a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku	405
10.1.1	Geologický zákon.....	405
10.1.2	Vyhláška 51/2008 Z.z. ktorou sa vykonáva geologický zákon v znení vyhlášky 22/2015 Z.z.	416
10.1.3	Vodný zákon	431
10.1.4	Vyhláška č. 418/2010 Z. z. o vykonaní niektorých znení vodného zákona	437
10.1.5	Kúpeľný zákon	440
10.2	Relevantné inštitúcie v procese posudzovania, hodnotenia, výskumu a prieskumu zdrojov geotermálnej energie na Slovensku.....	447
10.2.1	Inštitúcie v rámci štátnej služby a štátnej správy	447

	10.2.2 Akademické inštitúcie s relevantnou činnosťou a praxou.....	448
	10.2.3 Vybrané súkromné spoločnosti	449
11	Zhrnutie.....	451
12	Zoznam použitej literatúry	453

1 ANOTÁCIA

Predkladaný materiál je koncipovaný z troch základných okruhov (častí), ktorých zoradenie má za cieľ čo najefektívnejšie a najprehľadnejšie vysvetliť problematiku zdrojov geotermálnej energie s jej následným priemetom do praktického využitia pri predbežných kvantifikáciách a hodnoteniach projektov geotermálnej energie vo vzťahu ku regionálnemu energetickému plánovaniu v centrách RCUE.

PRVÁ ČASŤ (Kapitola 2 až Kapitola 4) je prevažne lexikologického a teoretického charakteru. Jej cieľom je vysvetliť všetky relevantné pojmy, ich využívanie, a vzájomné vzťahy súvisiace s prítomnosťou zdrojov geotermálnej energie, podmienkami jej formovania, a využitím / využívaním. **Kapitola 2** je zameraná na vysvetlenie elementárnych pojmov a rozdielov medzi geotermálnou energiou, zdrojmi geotermálnej energie, a rôznymi pohľadmi na ich klasifikáciu, vrátane praktických aspektov pri ich prieskume, využívaní a plánovaní. V **Kapitole 3** je pozornosť zameraná na technické aspekty využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie, predovšetkým základné systémy produkcie elektrickej energie a tepla, vrátane nevyhnutných podmienok pre ich termodynamicky efektívne a energeticky účinné využívanie tak, aby poverení experti RCUE boli dostatočne teoreticky vybavení pre posudzovanie zámerov využívania geotermálnej energie v pridelených regiónoch. **Kapitola 4** je venovaná tzv. Koncepcii trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie, t.j. koncepcie globálne prijatej Medzinárodnou geotermálnou asociáciou (IGA), regionálnymi geotermálnymi asociáciami, a OSN. Vymedzuje teoretické východiská, a následne špecifikuje rozdiely medzi udržateľnosťou, obnoviteľnosťou, účinnosťou, a efektívnosťou produkcie a využívania geotermálnej energie (ktoré sú v podmienkach Slovenska konvenčne – a nesprávne – synonymizované), spolu s princípmi monitorovania, hodnotenia, modelovania, a vyhodnocovania rezervoárovej odozvy na dlhodobú rezervoárovú produkciu.

DRUHÁ ČASŤ (Kapitola 5 a Kapitola 6) je prehľadovým celkom o stave preskúmanosti zdrojov geotermálnej energie na Slovensku, ich prírodných aspektov a aktuálneho stavu využitia a využívania (**Kapitola 5**), avšak najzásadnejšia pozornosť je venovaná aktuálnemu, pravdepodobnostnému hodnoteniu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľného energetického potenciálu útvarov geotermálnych vôd (**Kapitola 6**), ktorý je výsledkom viacročného výskumného projektu Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra, a z ktorých

výsledkov sa odvíjajú postupy a princípy hodnotenia zmysluplnosti a udržateľnosti produkcie geotermálnej energie v sfére posudzovania RCUE.

TRETIA ČASŤ (Kapitola 7 až Kapitola 10) je orientovaná prakticky. Z pohľadu predkladaného materiálu ide o časť, ktorá využíva poznatky získané v predchádzajúcich kapitolách, a ktorej cieľom je priniesť pohľad na možnosti posudzovania, a aplikáciu posudzovačných postupov RCUE pri hodnotení projektov na prieskum a využívanie zdrojov geotermálnej energie. V **Kapitole 7** sú sumarizované všetky relevantné podklady, ktoré by mali mať pracovníci RCUE k dispozícii pred spustením samotného procesu vyhodnocovania – a to z pohľadu vlastnej prípravy, tak aj z pohľadu potenciálnych žiadateľov, respektíve z pohľadu dostupnosti údajov vo verejných zdrojoch a inštitúciách. Pre doplnenie celkového obrazu je špeciálna **Kapitola 8** venovaná takzvanej matici RIAM, ako nástroja pre komplexné a interdisciplinárne hodnotenie účelov a projektov so zameraním na geotermálnu energiu, vrátane svetových a Slovenských príkladov, a ktorej realizácia je jednoduchá a zvládnuteľná v rámci širšieho kolektívu RCUE – a – po dohode s vybranými inštitúciami, aj v rámci širšej spolupráce. V **Kapitole 9** je pozornosť orientovaná na samotné postupy a možnosti posudzovania projektov na prieskum a využívanie zdrojov geotermálnej energie tak, aby pracovníci RCUE mali možnosť ich predbežného hodnotenia a prípravy materiálov pre širšiu spoluprácu pri ich posudzovaní (komplexnosť samotného posudzovania a interdisciplinarita sú akcentované v predkladanom materiáli opakovane, aj s možnými riešeniami spolupráce). Posledná **Kapitola 10** sa venuje prehľadu relevantnej legislatívy z pohľadu projektov výskumu, prieskumu a využívania zdrojov geotermálnej energie, ako aj špecifikáciám ich limitov, najmä vo vzťahu ku koncepcii Trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu, a prináša stručný prehľad pripravovanej legislatívy – tzv. geotermálnemu zákonu. Súčasťou kapitoly je aj prehľad relevantných verejných inštitúcií s kapacitami teoretickej a praktickej spolupráce pri hodnotení a posudzovaní projektov na využitie a využívanie, respektíve výskum a prieskum zdrojov geotermálnej energie.

Súčasťou predkladaného materiálu sú vo vhodnej miere príklady z praxe, alebo „skúšobné príklady“ pre overenie si postupu, ale aj správneho pochopenia opisovanej problematiky.

2 VŠEOBECNÉ POJMY, DEFINÍCIE A CHARAKTERISTIKY

Posledné roky je čoraz viac akcentovaná problematika výskumu, prieskumu, a predovšetkým využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku. Ako samotná geotermálna energia, tak aj zdroje geotermálnej energie sú opakovane synonymizované, pričom však poukazujú na rozdielne kvality a objekty záujmu. Preto je v prvom rade potrebné precízne lexikologicky definovať všetky pojmy, ktoré pri posudzovaní projektov zameraných na geotermálnu energiu prichádzajú do úvahy.

2.1 Geotermálna energia a zdroje geotermálnej energie

Úplným základom je presné vymedzenie pojmov, a rozdielu medzi tým, čo je geotermálna energia, a čo sú zdroje geotermálnej energie.

2.1.1 Geotermálna energia

Geotermálna energia (geothermal energy) je synonymom **tepelnej energie**, ktorej pôvod je v prevažne procesoch, ktoré prebiehajú v celom telese Zeme (GRANT – BIXLEY, 2011) – tzv. endogénnych procesoch. Na základe ich času pôsobenia, je možné následne rozlíšiť (EPPELBAUM ET AL., 2014):

- konečné procesy = prebiehali v minulosti, predovšetkým v čase formovania geologického telesa Zeme, a podieľajú sa viac ako 90 % na kumulatívnom množstve aktuálnej tepelnej energie planéty
 - akrcia telesa, diferenciácia zemských vrstiev, rozpad rádioaktívnych prvkov s krátkym polčasom rozpadu
- prebiehajúce procesy = dlhodobo, a aktuálne prebiehajú vo všetkých vrstvách Zeme
 - rozpad rádioaktívnych prvkov s dlhým polčasom rozpadu, procesy v astenosfére, protismerná rotácia zemského jadra, platňová tektonika, vulkanizmus a magmatizmus.

V konečnom dôsledku samotný pojem geotermálna energia vychádza z gréckych slov geo(s) = Zem a termæ = teplo (DICKSON – FANELI, 2004), takže syntaktický preklad doslova znie „zemské teplo“. V každom prípade – geotermálna energia = teplo = tepelná energia.

Zdroje geotermálnej energie (geothermal resources) je termín, ktorý zahŕňa (GRANT – BIXLEY, 2011):

- charakteristiku priestoru, v ktorom sa vyskytuje rezervoárové médium; a
- rezervoárové médium s jeho vlastnými geotermickými, fázovými a geochemickými charakteristikami, vrátane jeho vlastnej histórie a ktoré je **produkované** z rezervoárového prostredia
- možnosti jeho využitia, respektíve využívania.

2.1.2 Hierarchia pojmov zdrojov geotermálnej energie

Keďže je rezervoárové inžinierstvo, ako primárny iterdisciplinárny vedecko-technický odbor založený na empirických vedách, a ich kombinácii, t.j. geológii, hydraulike, fyzike, chémii, mechanike, je prirodzené, že jedným zo základných konceptov je exaktne daná systematická hierarchia pojmov (Obr. 2.1), ktoré pri opise zdrojov geotermálnej energie využíva (GRANT ET AL., 1982; DICKSON – FANELI, 2004; GRANT – BIXLEY, 2011; GRANT, 2014B; BODEN, 2017):

Rezervoárové médium (reservoir media, reservoir resource, geothermal fluids) = médium vyskytujúce sa v rezervoári, ktoré je pri istých technických a technologických parametroch možné produkovať, a ktoré slúži na exploitovanie tepelnej energie z rezervoáru, a jej využitie na povrchu.

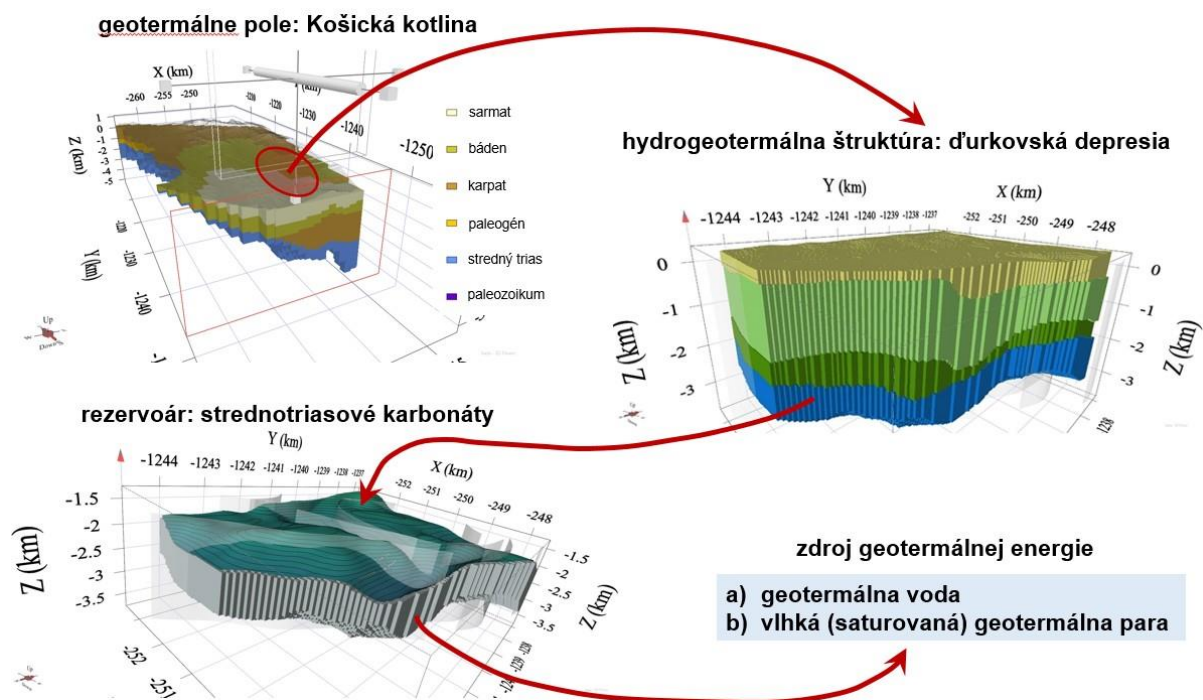
Rezervoár (reservoir, geothermal reservoir) = časť geologického prostredia, ktorej geologické, hydrogeologické, geotermické a geochemické podmienky umožňujú ekonomicky výhodnú produkciu rezervoárového média pre výrobu chladu, tepla, alebo elektrickej energie pri súčasných technických a technologických podmienkach. V širšom slova zmysle je ako rezervoár možné vnímať celé teleso priepustnej horniny (eventuálne celej formácie), ktoré

umožňuje pohyb a akumuláciu rezervoárového média (v anglickej literatúre aquifer). Definíciu rezervoáru v širšom slova zmysle v slovenskej literatúre často zastupuje pojem kolektor (geotermálnych vôd) alebo kolektorová hornina.

Hydrogeotermálny systém / hydrogeotermálna štruktúra (geothermal system, hydrogeothermal structure) = geologicky, hydrogeologicky, a geotermicky vymedzená časť územia v rámci širšieho geotermálneho poľa, v ktorej je zabezpečený obeh a akumulácia rezervoárového média, a tepelný tok je dostatočne intenzívny na tvorbu zdroja geotermálnej energie. Znamená to, že každý hydrogeotermálny systém musí obsahovať: zdroj tepla a mechanizmus transportu tepla, rezervoárové prostredie, a rezervoárové médium. Premenené na drobné, jednotlivé vymedzenia hydrogeotermálneho systému / štruktúry znamenajú:

- geologické vymedzenie = zvyčajne zlomami, alebo tektonickými, či litologickými kontaktmi, ktoré priestorovo vytyčujú možnosti akumulácie a prúdenia geotermálnych vôd, a v rámci ktorého vymedzenia je tvorba tepla a jeho prestup / transport, špecifický voči okoliu
- hydrogeologické vymedzenie = vymedzenie režimu prúdenia a akumulácie geotermálnych vôd a rezervoárového média podľa hydrogeologického typu obehových štruktúr (viď 2.2.1 a 5.2.3.3), t.j. rezervoárové prostredia má voči okoliu priestorovo vymedzené podmienky akumulácie, dopĺňania alebo vyprázdňovania a komunikáciu s okolím
- geotermické vymedzenie = priestorová a vertikálna distribúcia teploty, hustoty tepelného toku, rezervoárovej dynamiky, intenzity a spôsobov transportu tepla, ktorá systém odlišuje od jeho okolia.

Geotermálne pole (geothermal field) = hierarchicky najvyššia jednotka, v rámci ktorej je možné vymedziť niekoľko hydrogeotermálnych systémov, a ktorá je voči svojmu okoliu štandardne vymedzená hydrogeologicky (podľa regionálnych režimov prúdenia) alebo geotermicky (geotermickou aktivitou, spôsobmi transportu tepla).



Obrázok 2.1 Názorné vymedzenie základných pojmových jednotiek v geotermálnej energii. Upravené podľa: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

2.2 Klasifikačné schémy zdrojov geotermálnej energie

Komplexnosť zdrojov geotermálnej energie postupom času viedla ku zavedeniu desiatok klasifikačných schém, z ktorých niektoré sa v odbornej literatúre vyskytujú štandardne pri opise rezervoárového prostredia, hydrogeotermálnych systémov, alebo geotermálnych polí, prípadne pri charakteristike zdrojov geotermálnej energie alebo možností ich využitia a využívania. Pre zoriento vanie sa v problematike zdrojov geotermálnej energie je nevyhnutné uviesť aspoň niekoľko z nich. Všeobecne je zdroje geotermálnej energie možné hodnotiť podľa:

- geotektonickej pozície a hydrogeologického režimu (2.2.1)
- geotermickej charakteristiky rezervoárového prostredia (2.2.2)
- technického prístupu k zdrojom geotermálnej energie (2.2.3); a
- energetického potenciálu zdrojov geotermálnej energie (2.2.4).

2.2.1 Geotektonická pozícia a hydrogeologický režim

Geotektonická pozícia ako klasifikačné kritérium na opis prostredí zdrojov geotermálnej energie vychádza zo vzťahu geotermálnych polí, alebo (hydro)geotermálnych štruktúr k aktívnym prejavom vulkanizmu (alebo plutonizmu, ak sa deje pod povrchom). Nemusí pritom nevyhnutne ísť o blízkosť aktívnych geodynamických zón, ako sú oceánske riftové zóny (napr. Azory), subdukčné zóny (napr. Čile), alebo transformné rozhrania (napr. Kalifornia). Aktívne prejavy magmatizmu je možné nájsť aj hlboko vo vnútrozemí – napríklad sibírska oblasť v Rusku, alebo oblasť takzvaného východoafrického riftu v Keni, či Schwarzwald v Nemecku. Práve geotektonická pozícia pritom ovplyvňuje viacmenej všetky aspekty súvisiace so zdrojmi geotermálnej energie:

- geologickú stavbu geotermálnych systémov (litológiu, mineralógiu, distribúciu puklinových zón, vertikálne členenie horninového prostredia na kolektory, izolátory...)
- hydrogeologické režimy (typy priepustnosti, otvorenosť, smery prúdenia, možnosti prúdenia, akumulácie, distribúciu rezervoárových tlakov)
- ale rozhodujúcim spôsobom definuje prítomnosť zdrojov tepla a spôsoby jeho transportu pod povrchom a smerom ku povrchu.

Podľa samotnej geotektonickej pozície (Tabuľka 2.1) je možné vymedziť (GRANT – BIXLEY, 2011; GLASSLEY, 2015; BODEN, 2017):

- **vulkanické (a magmatické / plutonické) systémy (volcanic, plutonic, magmatic)** a polia zdrojov geotermálnej energie, ktoré sú lokalizované priamo vo vulkanických alebo magmatických systémoch, alebo v horninách, ktoré boli prerážajúcou magmou ovplyvnené, pričom práve pre ich blízky vzťah ku vulkanizmu sú zvyčajne strednotepelné až vysokotepelné, s vysokými hodnotami priemernej hustoty tepelného toku (100 až $n\text{-}100 \text{ mW.m}^{-2}$) a geotermického gradientu najmä v nadloží rezervoárov nad $150 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$
- **bazénové systémy (sedimentary, basin-sedimentary)** sú zvyčajne lokalizované na stabilných kontinentoch, eventuálne na dne oceánov, s pomerne monotónnou geotermickou aktivitou, nakoľko doplnkové zdroje tepla typické pre vulkanické systémy, v tomto prípade chýbajú – a na rozdiel od vulkanických systémov sú rezervoáre lokalizované v sedimentárnych horninách.

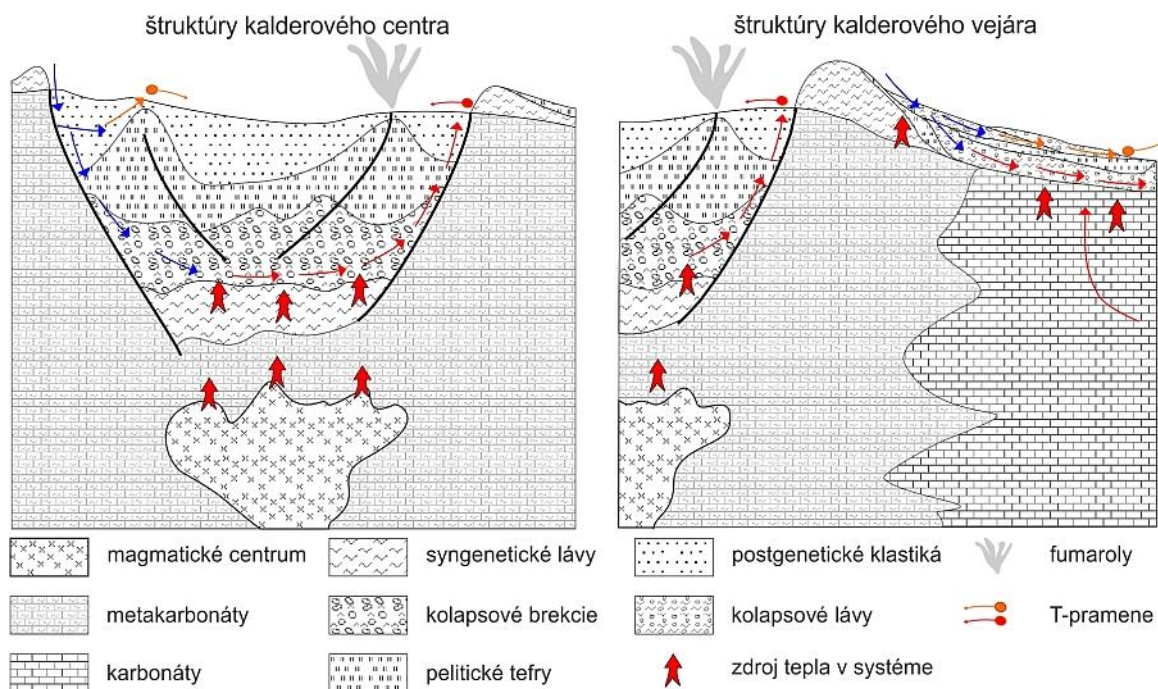
Tabuľka 2.1 Prevládajúce charakteristiky vulkanických a bazénových systémov

parameter	vulkanické systémy	bazénové systémy
Litológia rezervoárov	tektonicky rozpukané lávové prúdy, lávové brekcie, tufy, hyaloklastiká, magmaticky/vulkanicky prerážané pôvodné horniny, tektonicky rozpukané magmatity	štandardne sedimentárne horniny (pieskovce, zlepenec, brekcie, dolomity, vápence) a ich nespevnené varianty (piesky, štrky), menej vulkanoklastiká, alebo magmatity
Hustota tepelného toku	40 – 600 mW.m ⁻²	10 – 200 mW.m ⁻²
Geotermický gradient	20 – 200 °C.km ⁻¹	5 – 90 °C.km ⁻¹
Koncové členy transportu tepla	prevláda konvekcia	prevláda kondukcia
Rezervoárová teplota	do 370 °C	do 280 °C
Rezervoárová fáza	geotermálna voda, vlhká para, dvojité fáza s prevahou vody, dvojité fáza s prevahou pary, suchá geotermálna para	geotermálna voda, vlhká para, dvojité fáza s prevahou vody,
Priemerná hĺbka rezervoárov s dvojistou fázou	1 – 2 km	2,5 – 4 km
Spôsoby využitia zdrojov GTE	priame využitie štandardne v kogenerácii, kaskádové systémy veľkej mierky, suchopárne elektrárne, expanzné elektrárne, binárne elektrárne zvyčajne po sériovom napojení	Priame využitie ako primárny účel, 1- až 3-stupňové expanzné elektrárne, prevažne binárne elektrárne

Na klasifikáciu geotektonickej pozície nadväzuje klasifikácia zdrojov geotermálnej energie na vychádzajúca z **hydrogeologického režimu**. Samotný režim kontroluje predovšetkým smer, hĺbku, čas, a možnosti prúdenia, alebo akumulácie rezervoárového média, a tým aj jeho teplotu, tlak, fázovú povahu, a chemické zloženie (KJARAN – ELIASSON, 2008).

Vo vulkanických systémoch sú najčastejšími obehovými (hydrogeologickými) režimami najmä:

- **kalderové štruktúry** (Obr. 2.2), režim sa viaže na explóziou zničené pozostatky starších vulkanických centier, a ich geotermická aktivita (teploty, spôsoby transportu tepla, fázové pomery rezervoárového média) závisí na tom, či najnovšia vulkanická fáza, ktorá viedla ku vytvoreniu kaldery prebieha, alebo prebehla pred viacerými geologickými obdobiami (SMITH – SHAW, 1975; WOHLTZ – HEIKEN, 1992; GLASSLEY, 2015):
 - **štruktúry kalderového centra** sa vyvíjajú v brekciových lávach a vulkanoklastikách krátera, zvyčajne sú otvorené až polo-otvorené, plytké systémy nízkoteplotné (< 150 °C), s geotermálnou vodou a vlhkou parou, hlboké systémy skôr strednoteplotné (150 – 230 °C), dvojfázové s prevahou vody, zriedkavo s prevahou pary
 - **štruktúry kalderového vejára** sa viažu na svahové časti a predpolie kaldery, zvyčajne v tufoch a hyaloklastoch, menej rozpukaných lávových prúdoch, štandardne sú hydrogeologicky otvorené, a teplota, miera rezervoárovej konvekcie, a frakcia pary štandardne klesajú so vzdialenosťou od kaldery

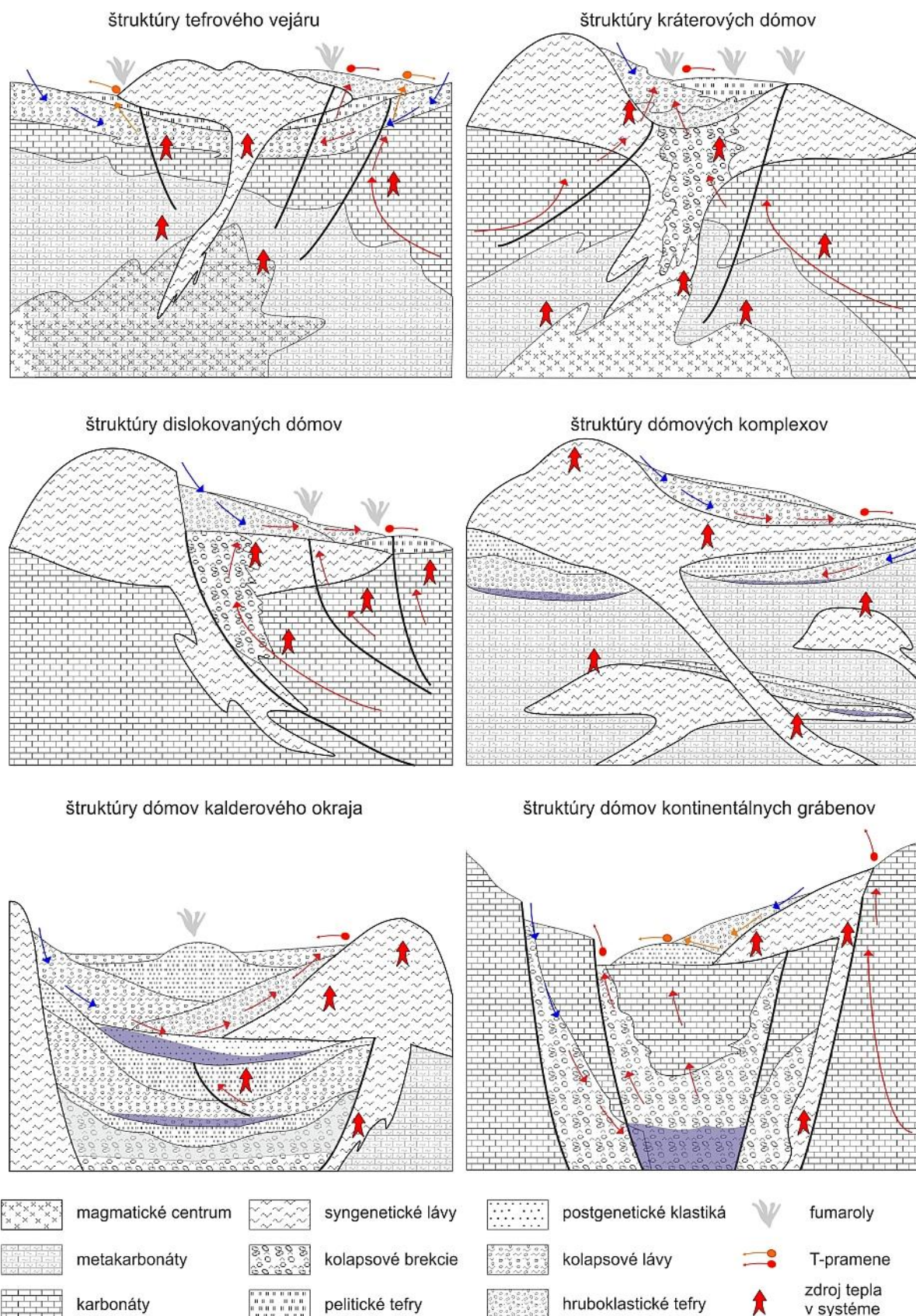


Obrázok 2.2 Konceptné modely režimu kalderových systémov. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

- štruktúry vulkanických dómov** (Obr. 2.3) sa viažu na vulkanické dómy, teda vulkanické telesá rôznych rozmerov, ktoré vznikajú postupným výstupom lávy k povrchu a jej vylievaním do okolia, pričom explozívna aktivita je skôr minimálna, a početnosť a rozhlaha priepustných vrstiev závisí od sprievodnej tektoniky (zlomovej aktivity) a striedania výlevných (nepriepustné) a explozívnych (priepustné) fáz; geotermická aktivita dómov závisí na komplexnosti: jednoduché dómy rýchlo chladnú a prostredie je skôr konduktívne, dómy s vývojom parazitických dómových štruktúr, sú naopak geotermicky veľmi aktívne (WOHLETZ – HEIKEN, 1992; KJARAN – ELIASSON, 2008; GRANT – BIXLEY, 2011; GLASSLEY, 2015; RAGNARSSON ET AL., 2020):
 - štruktúry tefrového vejára** sa vyvíjajú na okrajoch vulkanických dómov v hrubozrnných pyroklastikách, alebo v prerazených, priepustných sedimentárnych horninách – štandardne sú hydrogeologicky otvorené – priamo vo vejári dómov prevládajú geotermálne vody – v prerázanom prostredí intenzívnym zahrievaním pribúda podiel frakcie parnej fázy a narastajú teploty
 - štruktúry kráterových dómov** sa formujú ak mierna explozívna aktivita rozruší vulkanické centrum dómov, a ku obehu a akumulácii geotermálnych vôd dochádza v nahromadených, štandardne pyroklastických horninách kráteru – plytké

rezervoáre sú zvyčajne konduktívne, s geotermálnou vodou, smerom ku vulkanickému komínu narastá konvekcia a podiel parnej frakcie.

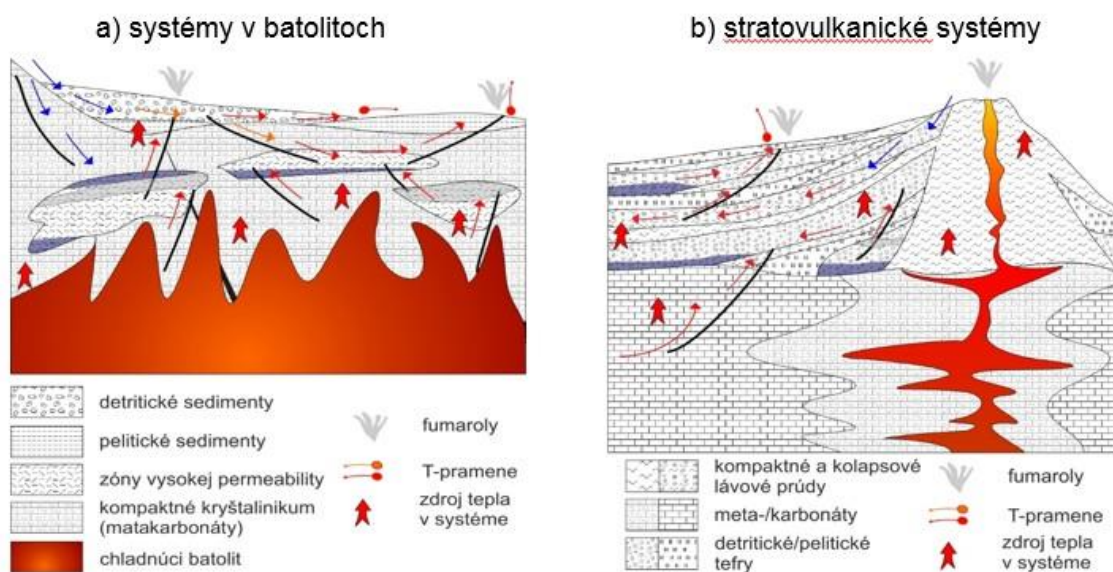
- takzvané **štruktúry dislokovaných dómov** vznikajú, ak regionálne tektonické pohyby vedú k pomalému posunu časti dómu na zlomových líniách, a tvorbe lokálnych brekcií, ktoré môžu byť následne rezervoárom zdrojov geotermálnej energie – tieto systémy sú zvyčajne nízкотeplotné, pretože k masívnym pohybom dochádza po konsolidácii dómov, a tak chýba zdroj tepla, štandardne polo-otvorené až otvorené, obvykle s geotermálnou vodou, menej vlhkou parou
- **štruktúry dómových komplexov** sa viažu na primárne a ich parazitické dómy, ktoré vznikajú etapovitým striedaním explozívnej (hrubozrnné pyroklastiká a rozrušené lávové prúdy) a výlevnej (pevné vulkanity, izolátory) aktivity, vo vulkanicky aktívnych oblastiach – časté sú otvorené až uzavreté štruktúry, a vysoké teploty kvôli aktívnej sopečnej činnosti, rezervoáre sú často dvojfázové s prevahou vody až dvojfázové, s prevahou parnej frakcie
- **štruktúry dómov na kalderovom okraji** vznikajú v prípade, ak deštrukcia kaldery zároveň vyvolá formovanie dómu na zlomoch, ktoré ju lemujú – následne lávové prúdy prekryjú pôvodné formácie (vzniknú polo-otvorené, polo-uzavreté až uzavreté štruktúry) a výrazne prehrievajú rezervoárové prostredie, čím vznikajú strednotepločné až vysokotepločné systémy s dvojitou fázou a častokrát prevahou parnej frakcie
- **štruktúry dómov na kontinentálnych riftoch** vznikajú pri etapovitom formovaní rozsiahlych grábenov, pri ktorých sa priestor rozširuje, územie poklesáva, redukuje sa hrúbka kontinentálnej kôry, a na okrajových zlomoch prenikajú magmy, respektíve lávy a vylievajú sa na povrch, alebo v sedimentárnych horninách podložia – rezervoáre sú zvyčajne v pôvodnom sedimentárnom prostredí, štandardne uzavreté (izolujú ich prieniky magiem) alebo otvorené až uzavreté priamo na povrchu – štandardne vysokoentálpické, s prevahou parnej frakcie, respektíve takmer suchopárne
- **štruktúry stratovulkánov** (Obr. 2.4) sú spojené s rozsiahlymi vulkanickými komplexmi typického centra a jeho predpolia, v ktorom sa striedajú nepriepustné horniny výlevného vulkanizmu (lávové prúdy, lávové sklá) a explozívneho vulkanizmu (hyaloklasty, tufy, brekcie), a pri ktorých je zároveň charakteristická stratifikácia rezervoárov vo viacerých vrstvách – štruktúry sú zvyčajne otvorené až uzavreté, zvyčajne aj v plytkých polohách



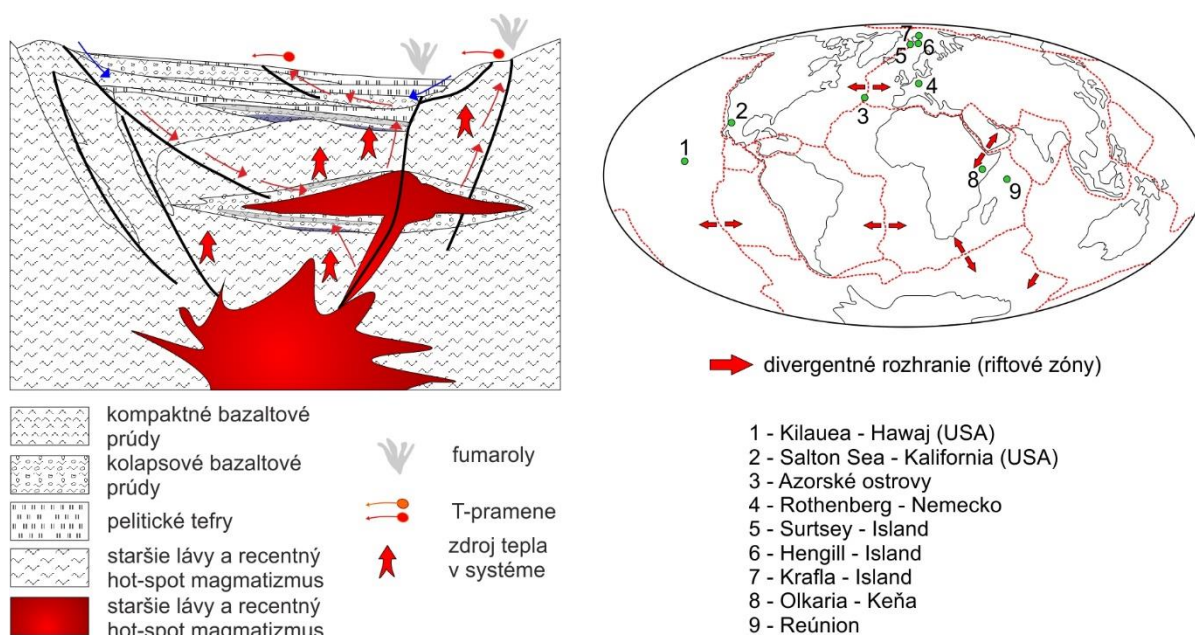
Obrázok 2.3 Konceptné modely režimu vulkanických dómov. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

s jednofázovou geotermálnou vodou, podiel parnej frakcie a jej voľnosť štandardne stúpajú s hĺbkou uloženia, rezervoáre spolu niekedy komunikujú cez zlomové systémy, zvyčajne hlbšie rezervoáre prehrievajú plytšie, ktoré pre nich predstavujú sekundárne akumulácie, čo spôsobuje termické anomálie zachytávané pri povrchovom prieskume (WOHLETZ – HEIKEN, 1992; BOGIE ET AL., 2005)

- **štruktúry batolitov** (Obr. 2.4) sa viažu na vývoj mohutných krbových a žilových komplexov n100 až n1000 km v zemskej kôre, v priestoroch pôvodnej horniny, a ich obehový alebo akumulačný režim je viazaný na pôvodné, najčastejšie sedimentárne komplexy – s hĺbkou vývoja batolitových štruktúr klesá ich otvorenosť, naopak stúpa teplota, charakteristická je rozsiahla konvekcia a odparovanie, pričom vznikajú zvyčajne dvojfázové rezervoárové média aj s prevahou parnej frakcie, alebo rezervoáre suchej pary (SAEMUNDSSON, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011; GUNNARSON – ARASDÓTTIR, 2014)
- **štruktúry bazaltového vulkanizmu** (Obr. 2.5) sa viažu na vývoj rozsiahlych bazaltových komplexov, ktoré pochádzajú priamo z astenosféry, a preto bývajú spojené s dlhodobou vulkanickou činnosťou, výrazne prehrievajúcou horninové prostredie – častokrát v oblastiach oceánskych alebo kontinentálnych riftov – štandardne spojené s rezervoármi v tenkých vrstvách štruktúrne porušených lávových prúdoch, menej v hyaloklastoch – otvorené až uzavreté – zvyčajne dvojfázové, s prevahou vody alebo geotermálnej pary – len povrchové rezervoáre s hĺbkou do 1 – 1,5 km obsahujú geotermálnu vodu až vlhkú paru (WOHLETZ – HEIKEN, 1992; KJARAN – ELIASSON, 2008)



Obrázok 3.4 Koncepčné modely režimu stratovulkánov a batolitov. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

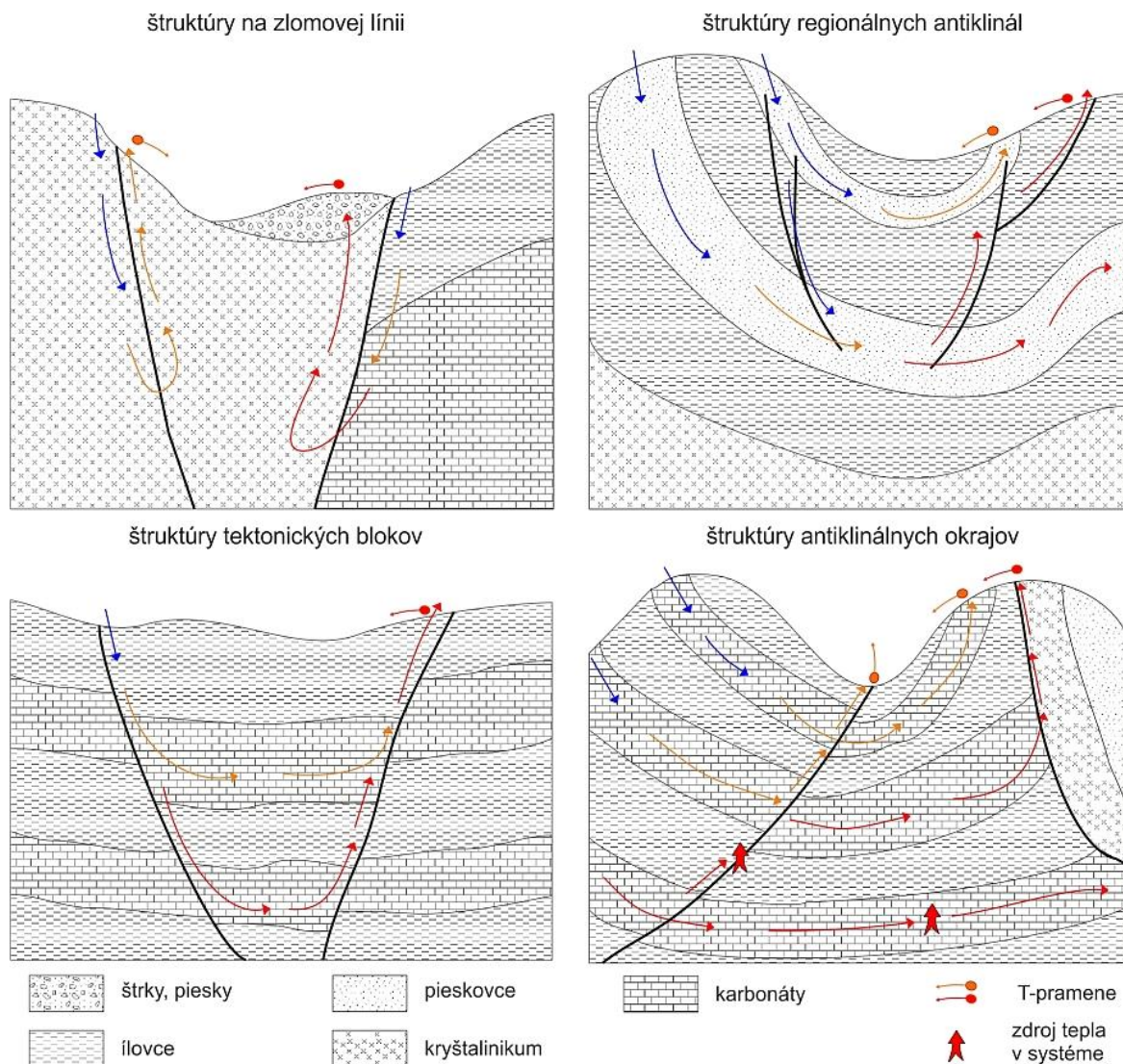


Obrázok 2.5 Koncepčné modely režimu bazaltového vulkanizmu. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

Naopak **bazénové systémy** nemajú žiaden vzťah ku aktívnym geodynamickým zónam, magmatizmu, ani vulkanizmu. Vyvíjajú sa v prostredí veľkých sedimentárnych paniev (na Slovensku napríklad Podunajská nížina) alebo lokálnych vnútrohorských kotlín a depresii (napríklad Bánovská kotlina). Zdrojom tepla je predovšetkým astenosféra, odkiaľ je teplo konduktívne vedené k povrchu – a teda, v prenesenom význame, hĺbka. Bazénové systémy sú štandardne konduktívne, pretože prenos a transport tepla prevláda nad konvekciou, aj napriek lokálnym prúdeniam geotermálnych vôd. Výnimky predstavujú geotermálne vody zúčastňujúce sa hlbokých a dlhých obehov po tektonických líniách a hlboko uložených rezervoároch (HOBBA ET AL., 1979; GRANT ET AL., 1982; SOREY ET AL., 1982; HISCOCK, 2005; GRANT – BIXLEY, 2011; GLASSLEY, 2015). V bazénových systémoch je vymedzených niekoľko štandardných režimov:

- **systémy s prevládajúcou cirkuláciou** (Obr. 2.6) charakterizuje hydrogeologická otvorenosť štruktúr, a minimálna doba zdržania geotermálnych vôd v rezervoárovom prostredí, plytká hĺbka uloženia, a geotermálna voda ako rezervoárové médium, a ich produkcia je mimoriadne citlivá na objem rezervoárového prostredia, ktorým prechádzajú, a na dotovaní zrážkami:
 - **štruktúry na zlomových líniách** sa viažu na krátkodobý obeh pozdĺž jednej zlomovej línie, kde prebieha infiltrácia, zostup, možno krátkodobá akumulácia, výstup a vyvieranie, zdroje geotermálnej energie sú geotermálne vody s pomerne nízkou teplotou, často do 80 °C podľa dĺžky a hĺbky obehu

- **štruktúry tektonických blokov** sú typické pre lokálne depresie a kotliny, v ktorých rezervoár je tvorený jednou, alebo viacerými horninami, priestorovo vymedzenými otvorenými zlomami, a kde miera akumulácie je bezvýznamná, avšak dochádza k dlhodobému kontinuálnemu pohybu v horninovom prostredí – zdroje GTE sú geotermálne vody, ktorých teplota narastá s hĺbkou tektonického bloku, do ktorého prenikajú
- **štruktúry regionálnych vrás** predstavujú obehové systémy na vzdialenosť niekoľkých kilometrov vo vrásovom prostredí, v ktorom sa neustále mení hĺbka obehu, a v ktorom čas obehu (doba zdržania) býva ovplyvnený zlomami, a v ktorých sa vyskytujú ako zdroje geotermálnej energie nízкотеплотné geotermálne vody, často s mineralizáciou nad 10 g.l^{-1}

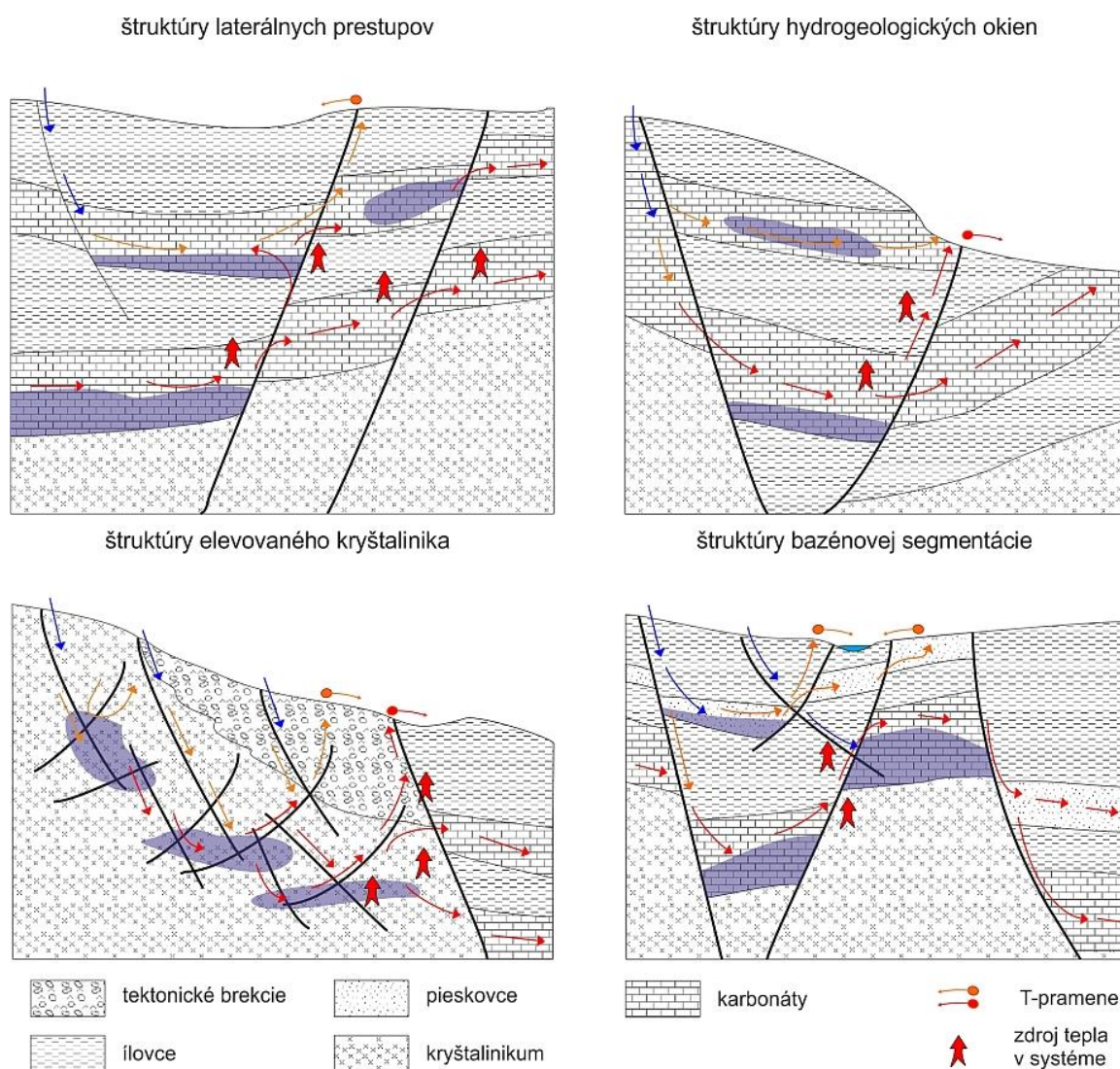


Obrázok 2.6 Koncepčné modely obehových bazénových štruktúr. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

- **štruktúry vrásových okrajov** sú typické predovšetkým rozsiahle zlomové, alebo plošné výverové oblasti s tepelnými anomáliami, nakoľko sú dotované geotermálnymi vodami vyvierajúcimi po obehu vo vrásovom prostredí z väčšej hĺbky a po dlhšom čase zdržania, a tým aj s vyššou mineralizáciou nad 10 g.l⁻¹, napriek tomu s celkovo nízkou produktivitou
- **obehovo-akumulačné štruktúry** (Obr. 2.7) sú charakteristické vytvorením akumuláčnej zóny v štruktúre, t.j. rezervoárového prostredia, v ktorom dochádza k výraznému zdržaniu a nahromadzovaniu geotermálnych vôd, čo umožňuje v porovnaní s obehovými systémami vyššie teploty, variabilitu rezervoárových tlakov a hydraulických parametrov, a tým aj formovanie parnej frakcie v rôznych formách viazanosti na geotermálnu vodu (RENNER ET AL., 1975; BRECKENRIDGE ET AL., 1978; MUFFLER ET AL., 1979; SOREY ET AL., 1982; ZHAO ET AL., 2008; PERSON ET AL., 2015; BIELICKI ET AL., 2016; BODEN, 2017)
 - **štruktúry laterálneho preostupu** sú charakteristické prestupom geotermálnych vôd, zvyčajne po zlomových systémov, do okolitých priepustných hornín (rezervoárov), alebo prienikom časti geotermálnych vôd do plytkých rezervoárov počas ich výstupu k povrchu, čím menia chemické zloženie a prehrievajú plytké rezervoáre – štandardne mineralizácia a teplota rastú s hĺbkou – hlboké rezervoáre nad 2 km môžu obsahovať vlhkú paru alebo 2-fázové médium s prevahou geotermálnej vody – charakteristické sú termominerálne pramene pri zlomoch
 - **štruktúry elevovaného kryštalinika** sa viažu na obehové, zvyčajne otvorené systémy, kde infiltračné a tranzitné oblasti tvorí zvetrané alebo rozpukané kryštalinikum v kontakte so sedimentárnou výplňou kotliny alebo priľahlej nížiny, a k akumulácii dochádza v miestach takzvaných puklinových hniezd (fissure swarms), previazaných s povrchom systémov križujúcich sa zlomov – štandardne málo produktívne a závislé na prirodzenom a umelom dopĺňaní – zvyčajne obsahujú viac priestorovo izolovaných a objemom obmedzených rezervoárov – médium je geotermálna voda – časť vôd môže laterálnymi prestupmi dotovať obehové a akumulačné štruktúry v susednej kotline alebo nížine
 - **štruktúry hydrogeologických okien** vznikajú tektonickými pohybmi, kde rezervoárová hornina sa dostáva k povrchu, alebo eróziou ich nepriepustného nadložia, čím okamžite dôjde k ich vyprázdňovaniu – štandardne otvorené – nízkoteplotné – veľmi nízke mineralizácie pod 5 g.l⁻¹ – rezervoárové médium je

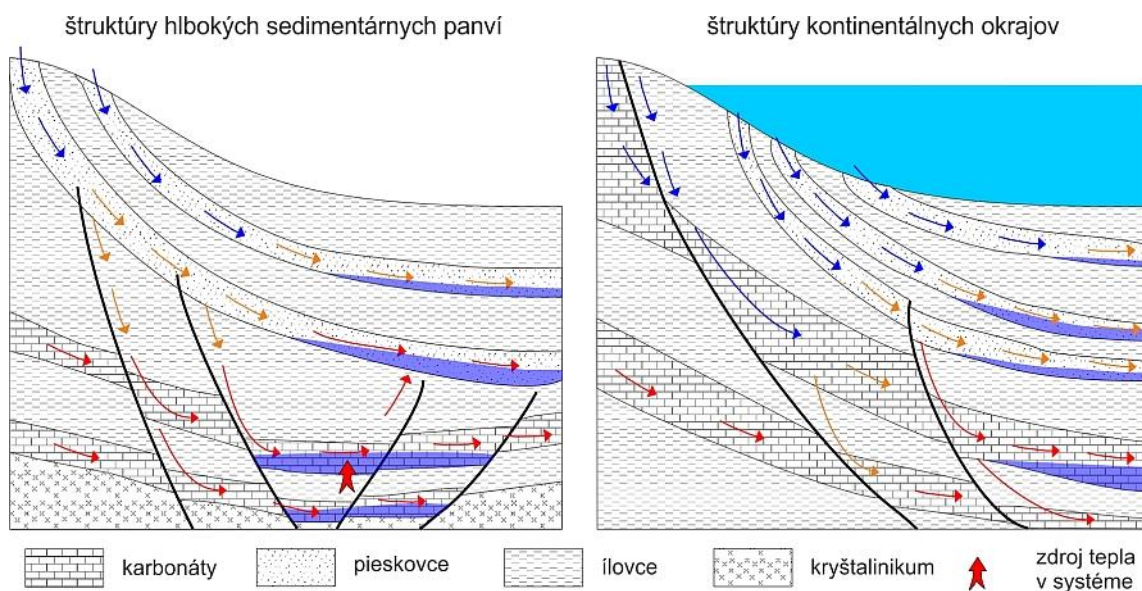
geotermálna voda – môžu byť dotované vertikálne z hlbokých rezervoárov kvôli otvorenej, aktívnej tektonike

- **štruktúry bazénovej segmentácie** sú najkomplexnejším typom, ktorý charakterizujú otvorené až uzavreté systémy prúdenia s viacerými rezervoármi, ktoré sú horizontálne oddelené zlomami, a vertikálne nepriepustnými horninami, kde predovšetkým zostupné a zostupné prúdenie je závislé na zlomových líniách, smery prúdenia sú rôzne, a nezriedka dochádza k premiešavaniu rezervoárového média, najmä v plytkých polohách – teplota, mineralizácia a podiel, respektíve viazanosť parnej frakcie sú funkciou hĺbky a zmien priepustnosti v hlbokých rezervoároch pod 2 km, štandardne hlboké rezervoáre dosahujú teploty nad 100 °C



Obrázok 2.7 Konceptné modely obehovo-akumulačných bazénových štruktúr. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

- **štruktúry hlbokých sedimentárnych panví** (Obr. 2.8) predstavujú systémy s prevládajúcou akumuláciou, častokrát polo-zatvorené až zatvorené, ktoré obsahujú viacero vekovo, geneticky a litologicky rozdielnych rezervoárov, ktoré spolu zvyčajne vôbec nekomunikujú (výnimku predstavuje komunikácia po zlomoch) – do 3 km prevláda kondukcia, následne sa pomer konvekcie môže zvyšovať ak sú vytvorené hydraulické podmienky – hlboké rezervoáre s vlhkou parou alebo dvojfázové s prevahou geotermálnej vody do 280 °C – celková mineralizácia môže dosiahnuť aj nad 100 g.l⁻¹
- **štruktúry kontinentálnych okrajov** (Obr. 2.8) sa špecificky viažu na poklesávajúce kontinentálne okraje pod morskú hladinu, s čím rastie hĺbka akumulácie a doba zdržania – vyvinuté exkluzívne v sedimentárnych horninách, zvyčajne izolované od povrchu – vysoké mineralizácie nad 50 g.l⁻¹ – teplota a fázové pomery sú funkciou hĺbky a hydraulických pomerov – rezervoárové médium je pri hĺbke nad 3 – 3,5 km dvojité fáza s prevahou geotermálnej vody – vplyvom pozície náročné na produkciu respektíve reinjektážny manažment (problémy s lokalizáciou vrtov) – sporadicky je zdrojom geotermálnej energie priamo vsakovaná morská voda



Obrázok 2.8 Konceptné modely obehovo-akumulačných bazénových štruktúr. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

2.2.2 Charakteristiky zdrojov geotermálnej energie

Opakovane využívanými kritériami pri opise a hodnotení zdrojov geotermálnej energie vychádzajú z ich základných charakteristík:

- rezervoárovej teploty (respektíve entalpie)
- koncových členov transportu tepla prevládajúcich v rezervoárovom prostredí
- rezervoárovej fázy.

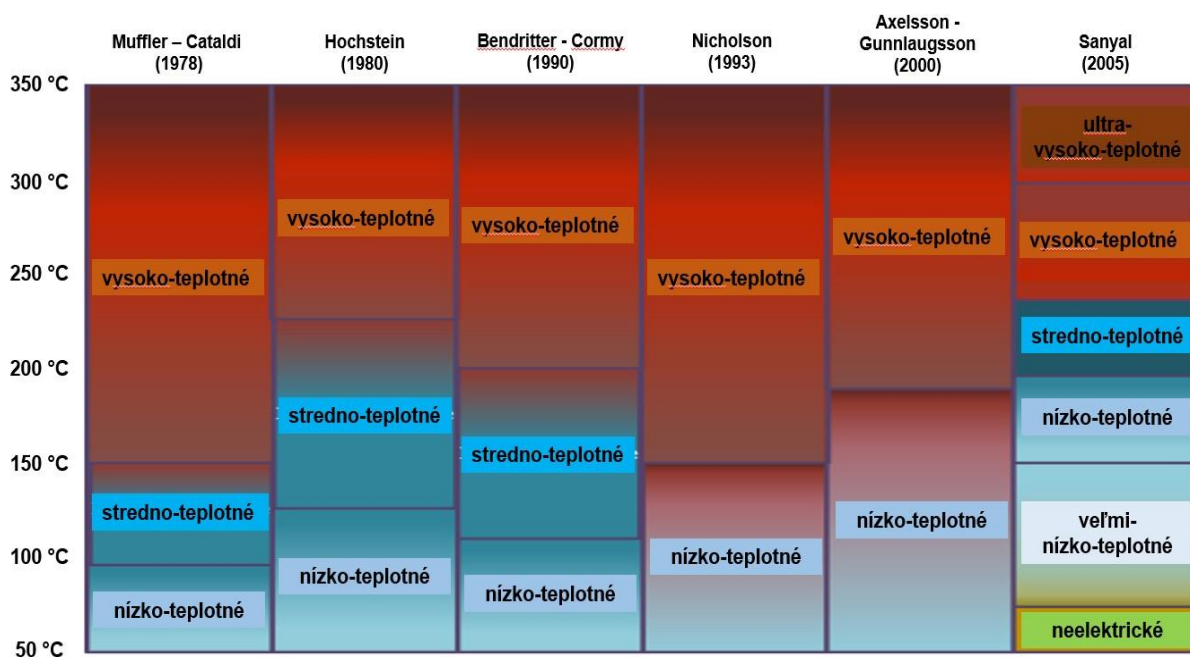
2.2.2.1 Klasifikácia zdrojov geotermálnej energie na základe teploty

Či už v odbornej, alebo viac publikačnej literatúre, je **teplota** využívaná ako pravdepodobne najčastejšie klasifikačné kritérium, nakoľko je najľahšie merateľná, a zároveň jej hodnoty sú ľahko premietnuté aj na takzvaný Lindalov diagram potenciálu využívania zdrojov geotermálnej energie (Obr. 3.1). Najpoužívanjšie z nich (MUFFLER – CATALDI, 1978; HOCHSTEIN, 1990; BENDERITTER – CORMY, 1990; NICHOLSON, 1993; AXELSSON – GUNNLAUGSSON, 2000; SANYAL, 2005A) uvádzame graficky nižšie (Obr. 2.9).

Na druhej strane, klasifikácia zdrojov geotermálnej energie podľa teploty naráža na niekoľko zrejmých nedostatkov:

- klasifikácie častokrát vychádzajú z lokálnych pomerov v danej krajine, regióne, alebo sledovaných tektonických pozíciách
- klasifikácie vznikajú za rôznym účelom teplotného vymedzenia zdrojov geotermálnej energie
- teplota nad 100 °C neznamena automaticky prítomnosť voľnej parnej fázy v rezervoári, keďže tú ovplyvňuje salinita (mineralizácia) geotermálnej vody, tlakové pomery, rezervoárová dynamika.

Ani v rámci hodnotenia zdrojov geotermálnej energie na Slovensku neexistuje absolútna jednota (Obr. 2.9). Štandardný 3-stupňový systém rozoznávajúci nízko- (20 – 100 °C), stredno- (100 – 150 °C) a vysoko- (150 – 200 °C) zdroje geotermálnej energie (FRANKO ET AL., 1995) bol, reflektujúc globálny nárast záujmu o takzvanú „plytkú geotermálku“, t.j. systémy tepelných čerpadel voda-voda a podzemných výmenníkov tepla (LUND ET AL., 2010) nahradený 4-stupňovým (FENDEK ET AL., 2011)



Obrázok 2.9 Klasifikácie zdrojov geotermálnej energie na základe teploty. Zdroj: Williams et al. (2011)

Za účelom vymedzenia zdrojov geotermálnej energie ale prichádza do úvahy aj schéma kombinujúca nielen teplotu, ale v konečnom dôsledku aj fázovú povahu:

- veľmi-nízko-teplotné zdroje GTE = 4 – 20 °C (horná hranica zodpovedá legislatívnej definícii zdrojov geotermálnej energie)
- nízko-teplotné zdroje GTE = 20 – 180 °C (horná hranica štandardne zodpovedá teplote formovania separovanej parnej fázy už v rezervoárovom prostredí, t.j. v globálnom kontexte tvorbu rezervoárov s dvojistou fázou, aj keď pri prevahe vodnej zložky)
- vysokoteplotné zdroje GTE = nad 180 °C.

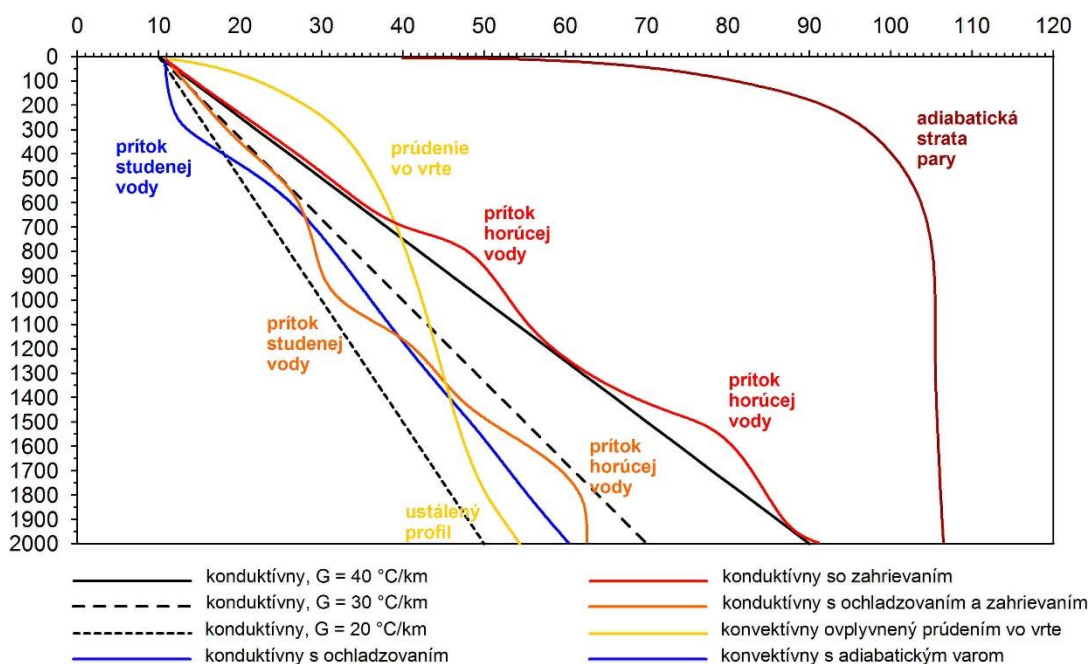
2.2.2.2 Klasifikácia zdrojov geotermálnej energie podľa tepelného režimu

Keďže sú zdroje geotermálnej energie energetickou surovinou, a vychádzajú z distribúcie tepla v geologickom prostredí („podzemí“), jednou z kľúčových charakteristík je ich hodnotenie a rozlišovanie na základe spôsobov, ktorými sa teplo v štruktúrach prenáša do prostredia, alebo ktorými do štruktúr preniká. Podľa tohto kritéria je možné vymedziť (GRANT – BIXLEY, 2011):

- zdroje geotermálnej energie s prevládajúcou konvekciou
- zdroje geotermálnej energie s prevládajúcou kondukciou

- **štruktúry s prevládajúcou konvekciou (convection-dominated)** sa v zahraničnej literatúre častokrát označujú ako **hydrotermálne (hydrothermal)**, pretože práve pohyb geotermálnej vody, respektíve produktov magmatizmu, výrazne ovplyvňuje distribúciu tepla, teploty, a rezervoárovej fázy v celom systéme (GRANT – BIXLEY, 2011). Pod samotným pojmom **konvekcie** je možné chápať vertikálne, uklonené, menej horizontálne prúdenie rezervoárového média v hostiteľskej hornine, alebo mimo nej (v susedných vrstvách, podloží, nadloží, po zlomových líniách). Prúdenie je vyvolané prehrievaním geotermálnej vody na báze, alebo zo strán, čo spôsobuje zníženie jej hustoty a následný vztlak, ktorý je podporený aj viazaním parnej fázy vo vode pri teplotách nad 100 °C. Vertikálne pohyby prestanú, ak výstupné smery spôsobia ochladenie geotermálnej vody pod kritickú mieru kontrolujúcu vzťah medzi vztlakom a vzlínaním, stúpne hustota, a geotermálna voda začne „gravitačne“ padať na bázu rezervoáru, alebo keď sa zmení priepustnosť horninového prostredia (JAUPART – MARESCHAL, 2010). Ak je vertikálne prúdenie rýchle (napríklad po krasových komínoch, zlomových líniách), ochladenie geotermálnej vody je šokové, čím prudko poklesne tlak, a okamžite sa separuje parná fáza. Zároveň geotermálna voda zvýši svoju hustotu, ochladne, a opäť začne gravitačne klesať. Rovnako môže nastať situácia, kedy výstupné smery sú natoľko pomalé, až dôjde k prieniku geotermálnych vôd do vyššie položených rezervoárov, prípadne do nich uniká geotermálna para, ktorá kondenzuje. Práve konvekcia spôsobuje anomálne vysoké teploty v plytkých polohách, výrazne odlišné od lokálneho statického (konduktívneho) gradientu teploty, takže zvyčajne v teplotných profiloch pozorujeme extrémne vysoký gradient teploty medzi povrchom a stropom rezervoáru, a takmer zanedbateľné teploty v rámci samotného rezervoáru, alebo zóny prúdenia, keďže konvekciou sa horninové prostredie kontinuálne prehrieva (Obr. 2.10). Základnými podmienkami (GLASSLEY, 2015, BODEN, 2017) pre formovanie konvektívnych štruktúr je teda kombinácia dodatočného zdroja tepla, ktoré by rezervoár, alebo jeho bázu, výrazne prehrievalo (najčastejšie vulkanizmus a magmatizmus a jeho prejavy), a dostatočná priepustnosť v zóne, ktorá je prehrievaná, prípadne prehrievanie bázy rezervoáru z bokov (susednými konvekčnými bunkami). Preto:
- hydrotermálne systémy sú typické predovšetkým pre vulkanické / magmatické prostredie
- prevažujú strednoteplotné alebo vysokoteplotné zdroje geotermálnej energie s vlhkou parou, dvojistou fázou, respektíve suchou geotermálnou parou
- priestorovo sú výrazne obmedzené, v porovnaní s konduktívnymi systémami.

- **štruktúry s prevládajúcou kondukciou (conduction-dominated)** sa niekedy synonymicky označujú – najmä vo svetovej literatúre – ako **hydrogeotermálne (hydrogeothermal)**, pričom práve „geo“ zdôrazňuje ich základnú črtu – viacmenej lineárny (v závislosti na termofyzikálnych parametroch horninového prostredia) nárast teploty v zemskej kôre s hĺbkou (GRANT – BIXLEY, 2011). V slovenskej odbornej literatúre sa však pojem „hydrogeotermálny“ používa bez akýchkoľvek odkazov na koncový člen transportu tepla. Priestorová distribúcia teploty a tepla v systéme ale okrem termofyzikálnych vlastností hornín (tepelná vodivosť, tepelná difuzivita) závisí aj od množstva tepla vstupujúceho do systému, tzn. vzdialenosti od astenosféry (hrúbka zemskej kôry), a zároveň aj od rádiogénneho tepla, ktoré produkuje rozpad prvkov, najmä U, Th a K v horninách hydrogeotermálnych štruktúr (GLASSLEY, 2015). Teplotné profily hydrogeotermálnych štruktúr (Obr. 2.10) zvyčajne narastajú lineárne, a k zmenám dochádza až pri zmene litológie, prípadne nasýtenia hornín rezervoárovým médiom, ktoré tepelnú disperziu a konduktivitu upravujú. Keďže však kondukcia sa uplatňuje spolu s disperziou tepla, konduktívne prostredie „oslabuje“ jeho absolútne množstvo, ktoré horninou prestupuje. Zvyčajne preto, v porovnaní s hydrotermálnymi štruktúrami, v porovnateľnej hĺbke je teplota hydrogeotermálnych štruktúr nižšia (GRANT – BIXLEY, 2011). Prevládajúca kondukcia rozhodne neznamena, že v rezervoárovom prostredí, alebo jeho okolí, nedochádza k pohybu geotermálnych vôd. Okrem pohybu kontrolovaného tlakom a gravitáciou (napríklad na zlomoch, uklonených kolektoroch), aj v konduktívnych rezervoároch dochádza ku pohybu, prestupom, dokonca konvekcií. Rozdiel je v množstve transportovaného tepla oboma procesmi a ich intenzite, a v tom, ako ovplyvňujú procesy v rezervoári (KJARAN – ELIASSON, 2008). Dokonca za priaznivých podmienok – opísaných vyššie – aj v konduktívnych prostrediach vznikajú konvekčné bunky, ale rozdiel je v tom, že zvyčajne sú veľmi izolované, napríklad v čiastkových tektonických blokoch, alebo obmedzené vertikálne (AXELSSON, 2012B). Hydrogeotermálne štruktúry sa síce môžu vyvíjať aj vo vulkanickom prostredí (na okrajoch vulkanických systémov alebo v plytkej hĺbke), typické sú ale najmä pre bazénové prostredia a prostredia – logicky – s nízkou geotermickou aktivitou. Preto zdrojom geotermálnej energie sú štandardne geotermálne vody, eventuálne aj geotermálne vody s vlhkou saturovanou parou a s teplotami málokedy presahujúcimi 200 °C v relevantnej (do 5 km) hĺbke (GRANT – BIXLEY, 2011; BODEN, 2017).



Obrázok 2.10 Profily charakterizujúce konduktívne a konvektívne prostredie. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

2.2.2.3 Klasifikácia zdrojov geotermálnej energie podľa rezervoárového média

Pochopenie / poznanie rozdielnosti fázovej povahy zdrojov geotermálnej energie je kritické pre pochopenie a možnosti hodnotenia spôsobov využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie, a zároveň dáva jasnú odpoveď pre posúdenie možností produkcie elektrickej energie (viď 3.2) zo zdrojov geotermálnej energie.

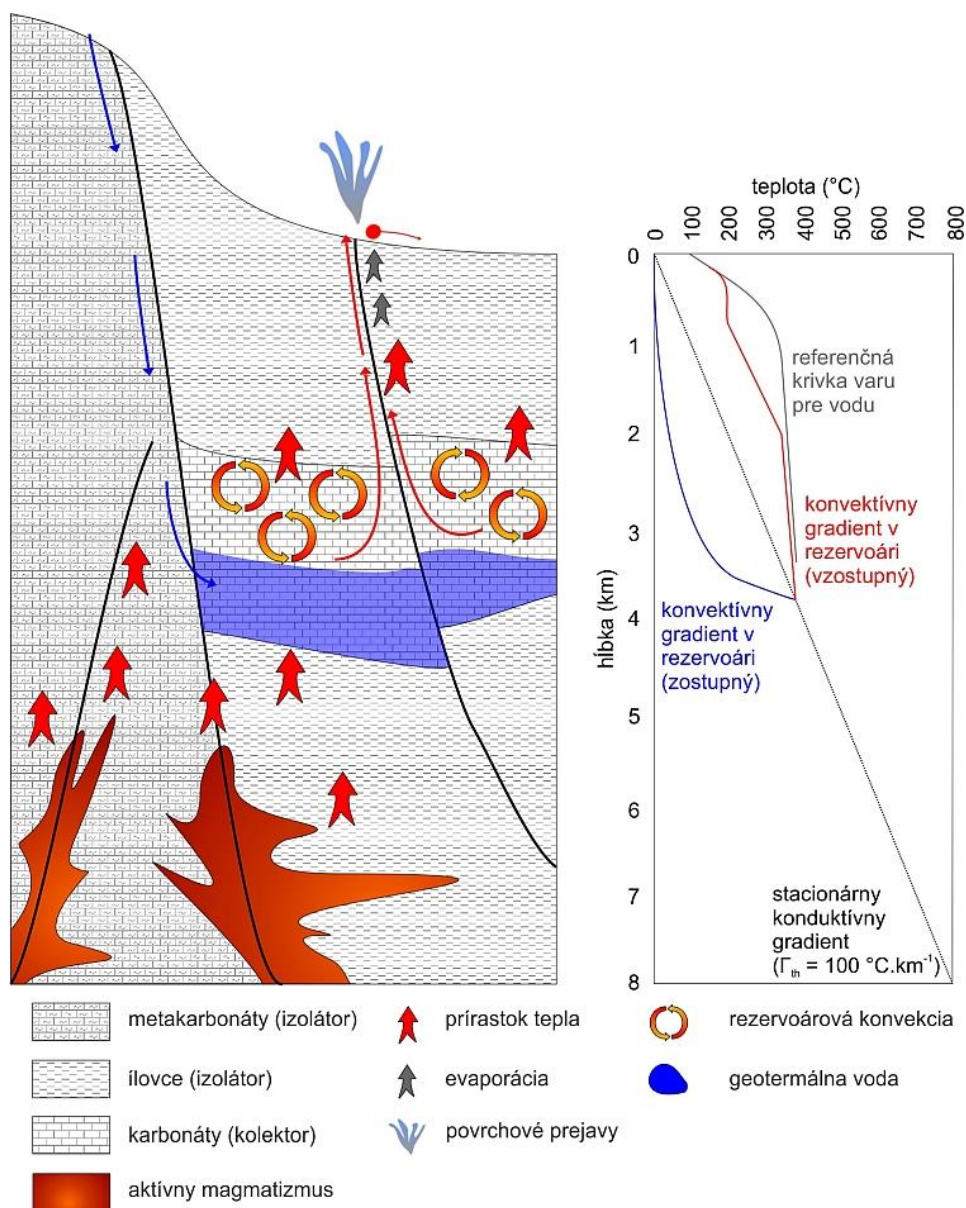
Zdroje geotermálnej energie podľa rezervoárovej fázy môžeme štandardne rozdeliť na (GRANT ET AL., 1982; ALLIS, 2000; GRANT – BIXLEY, 2011; KJARAN – ELIASSON, 2008; SAEMUNDSSON, 2009; AXELSSON, 2012B; STÖBER – BUCHER, 2013; GLASSLEY, 2015):

- 1-fázové zdroje geotermálnej energie (single-phase)
 - geotermálne vody
 - suchá geotermálna para
- 2-fázové zdroje geotermálnej energie (double-phase)
 - geotermálna voda + geotermálna para
 - 2-fázové zdroje geotermálnej energie s prevahou vody
 - 2-fázové zdroje geotermálnej energie s prevahou pary
- superkritické zdroje geotermálnej energie (supercritical);

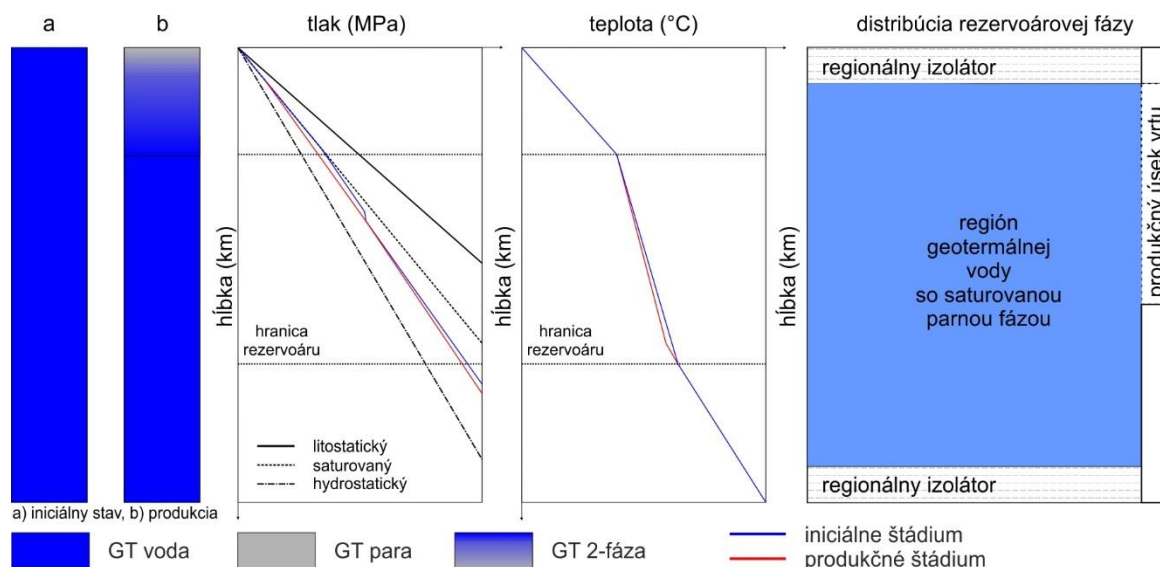
pričom zároveň platí, že v rámci jedného geotermálneho systému sa môžu vedľa seba, alebo nad sebou (stratifikovane) vyskytovať viaceré fázovo-typové zdroje, a:

- **zdroje s geotermálnou vodou (hot-water, hot-brine, water-dominated)** vznikajú prirodzene ako vo vulkanických, tak aj bazénových systémoch bez prítomnosti konvekcie, ktorá by podporovala rezervoárové odparovanie (takzvaný adiabatický var), a to pri teplotách štandardne do 100 °C, respektíve až 150 – 200 °C pri extrémnych tlakoch = hĺbke (rezervoárový tlak vysoko prevyšuje hydrostatický tlak), a pri vysokej mineralizácii, ktorá posúva bod varu vyššie. Mobilnou fázou v rezervoári je teda geotermálna voda s rôznou mineralizáciou, ktorá ovplyvňuje prítokové parametre do geotermálneho vrtu a dynamiku rezervoárových procesov. Existuje niekoľko spôsobov, akými rezervoáre s geotermálnou vodou vznikajú:
 - pri teplotách do 100 °C ako klasické obehové a akumulčné štruktúry, v ktorých nie sú vytvorené teplotné a tepelné podmienky pre vývoj a formovanie adiabatického varu (teda tvorby fázy)
 - pri teplotách nad 100 °C v prostredí s prevládajúcou kondukciou v prípade, ak rezervoárový tlak je výrazne väčší ako hydraulický kvôli veľkej hĺbke rezervoáru, alebo tiaži hornín z nadložia
 - pri teplotách nad 100 °C v prostredí s prevládajúcou konvekciou v prípade, ak majú zdrojové geotermálne vody vysokú celkovú mineralizáciu, alebo ak sa konvekcia odohráva pri vysokých tlakoch, a je natoľko pomalá, aby nedošlo k adiabatickému varu = formovaniu parnej fázy
 - ako rezervoárová odpoveď na reinjektáž, prípadne neočakávanú inváziu studených vôd do rezervoárov s dvojistou fázou, alebo suchou geotermálnou parou, pričom môže dôjsť alebo ku zmene tlakových pomerov (nárast tlaku) alebo ku ochladeniu rezervoáru, po čom oba spôsoby smerujú ku kondenzácii parnej fázy a jej zmene na vodnú zložku (opätovné obnovenie parnej fázy je vecou obnoviteľnosti a regeneračnej kapacity rezervoáru / systému, alebo manažmentu reinjektáže)
- **zdroje geotermálnej energie s vlhkou parou (wet-steam, wetsteam, saturated-vapor)** sú rovnako typické pre vulkanické aj bazénové prostredia, v rezervoároch s teplotou nad 100 °C. Za vlhkú paru sa pri tom považuje geotermálna voda s viazanou parnou frakciou, ktorá sa neuvolňuje pri danom rezervoárovom tlaku. Mobilnou fázou, t.j. fázou, ktorá kontroluje pohyb rezervoárového média k vrtom, alebo v rámci horniny, je geotermálna voda. Viazanosť spôsobuje tlak, ktorý pri daných teplotných podmienkach neumožňuje

spontánne oddelenie parnej frakcie od geotermálnej vody. K uvoľneniu parnej frakcie dochádza pri dramatickej zmene tlaku, v prirodzených podmienkach vo vrtoch, aj to tesne pri ich záhlaví (tesne pri povrchu), alebo pri výstupe saturovanej vody k povrchu, pričom sa tvoria známe solfatáry a fumaroly, alebo suché výrony plynu, a zároveň horúce termálne pramene. Priestorovo sa vyvíjajú v hĺbkach nad 2 – 3 km v sedimentárnych panvách, často v podloží 1-fázovej geotermálnej vody, ak sú rezervoáre izolované. Naopak, vo vulkanickom prostredí sa vyvíjajú v nadloží 2-fázových zdrojov geotermálnej energie, alebo na okrajoch vulkanických systémov.



Obrázok 2.11 Konceptný model hydrogeotermálnej štruktúry s vlhkou parou. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)



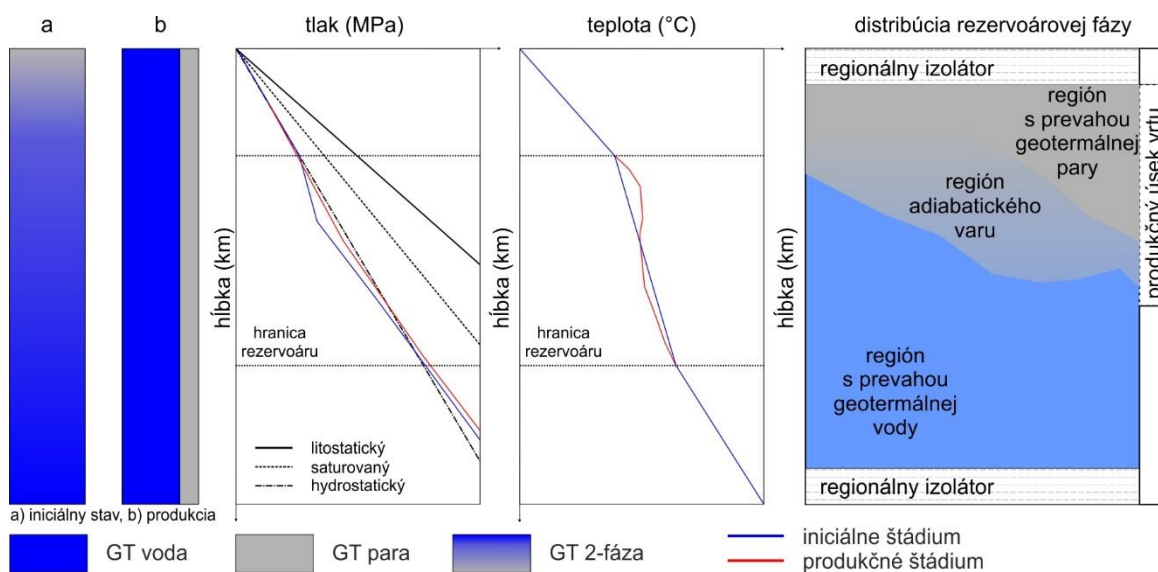
Obrázok 2.12 Profil zdrojov vlhkej pary. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

Pomer parnej fázy, v prípade jej absolútnej separácie, často nepredstavuje viac ako 10 – 20 % v pomere voči produktivite vodnej zložky, preto sú zdroje geotermálnej energie vlhkej pary využívané len ako podpora viacstupňových expanzných elektrární, alebo v binárnych cykloch pred-alebo-po technickom odparení, podľa chemického zloženia parnej a vodnej zložky. Štruktúry s vlhkou parou vznikajú väčšinou prirodzene. Vo výnimočných prípadoch vedie ochladzovanie rezervoárov k zmene dvojfázových zdrojov geotermálnej energie k premene na vlhkú paru. Štandardnejším procesom je skôr kondenzácia voľnej parnej frakcie zvýšením rezervoárového tlaku

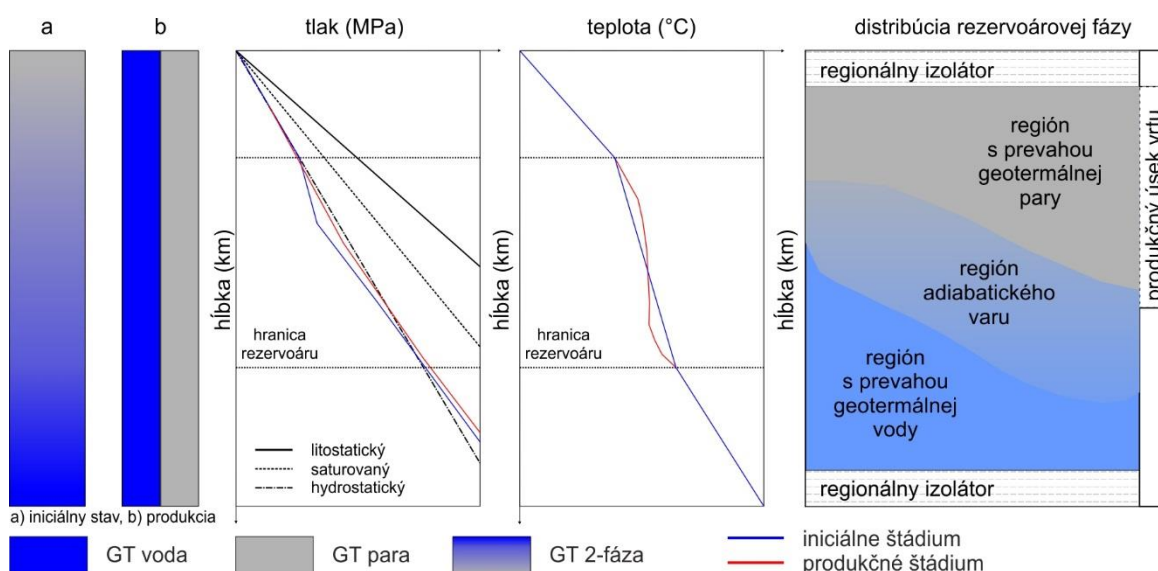
- **zdroje geotermálnej energie s dvojitou fázou (dual-phase, double-phase)**, sa rozlišujú na základe prevažujúcej mobilnej rezervoárovej frakcie, t.j. frakcie, ktorá kontroluje pohyb média v rezervoári, alebo jeho prítok ku vrtu – **s prevahou vodnej zložky (liquid-dominated)** alebo **s prevahou parnej zložky (vapor-dominated)**. Rozdiel oproti vlhkej pare je v tom, že obe frakcie, voda a para, sa v rezervoári hýbu samostatne, majú samostatný režim prúdenia, prítoku ku geotermálnym vrtom, a následne aj pohyb vo vrtoch smerom ku povrchu. Zdroje geotermálnej energie s dvojitou fázou (Obr. 2.13 a 2.14) vznikajú exkluzívne v prostredí (za prirodzených podmienok) s rezervoárovou konvekciou, ktorá umožňuje formovanie parnej fázy, avšak pri tlaku, ktorý zároveň neumožňuje absolútne vyparovanie ako pri zdrojoch suchej pary. Preto je zřejmé, že väčšina zdrojov s dvojitou

fázou sa formuje vo vulkanických alebo plutonických systémoch. Zjednodušene platí niekoľko pravidiel, ktoré určujú prevládajúcu frakciu, napríklad pre prevahu vodnej zložky:

- podiel vodnej zložky narastá so zvyšovaním tlaku smerom k atmosférickému
- podiel vodnej zložky klesá s nárastom teploty
- podiel vodnej zložky stúpa s poklesom priepustnosti prostredia
- podiel vodnej zložky stúpa s množstvom prirodzeného dotovania štruktúry.



Obrázok 2.13 Profil zdrojov dvojitej fázy s prevahou vody. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

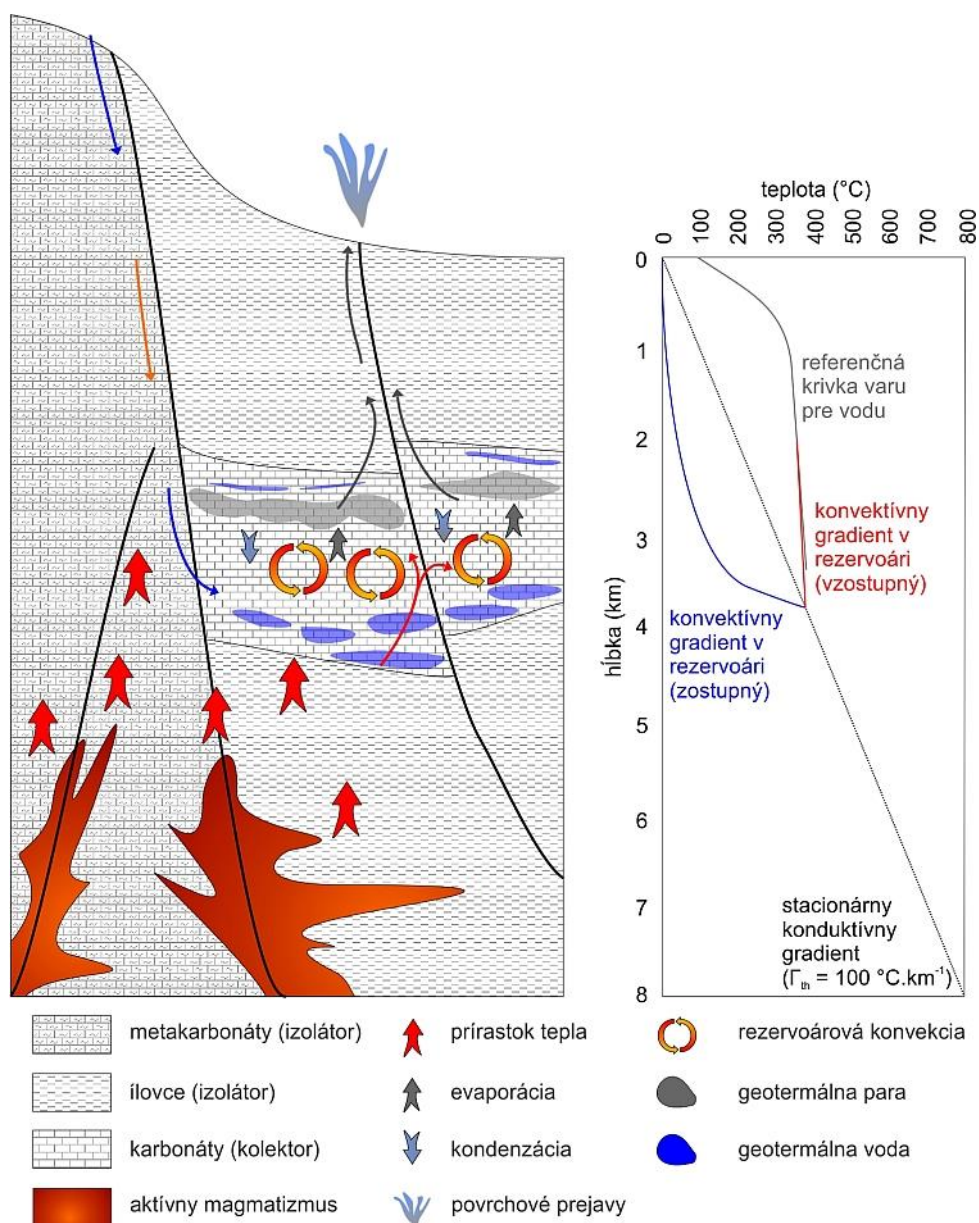


Obrázok 2.14 Profil zdrojov dvojitej fázy s prevahou pary. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

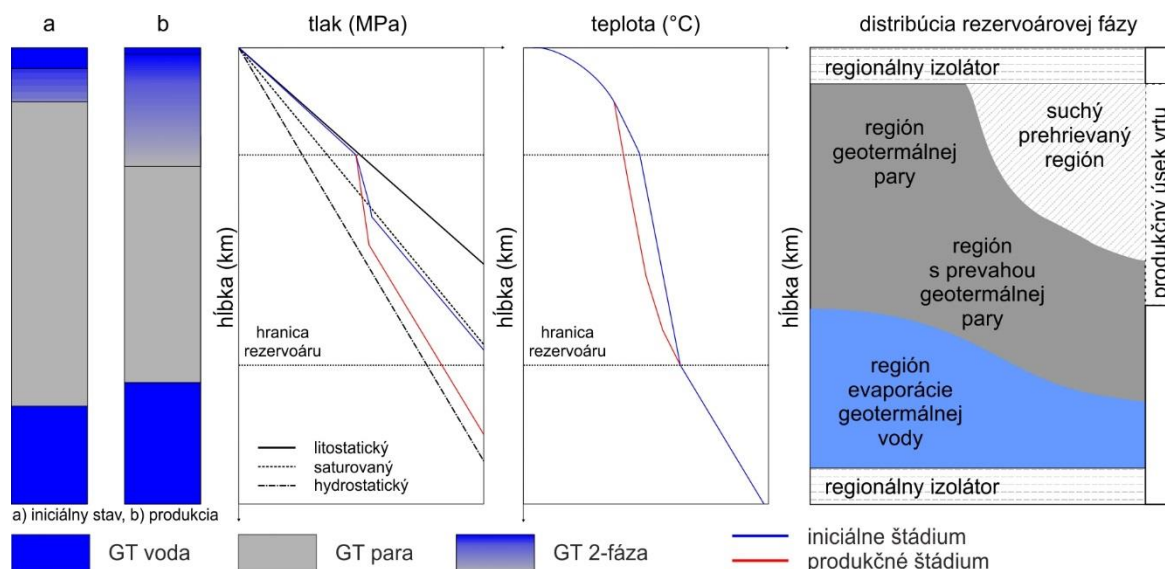
kým v bazénových systémoch je možná sporadicky očakávať zdroje s prevládajúcou parnou frakciou, vo vulkanických systémoch je prevládajúca parná frakcia štandardná. Častokrát nastáva situácia, kedy sú rezervoáre s rôznymi prevládajúcimi frakciami uložené nad sebou (komunikujúce, alebo nekomunikujúce), respektíve vedľa seba, alebo zóny s prevládajúcou frakciou sa vyvíjajú v rámci jediného vymedzeného rezervoáru. Citlivosť dvojfázových zdrojov geotermálnej energie na zmeny tlaku je potom kľúčovou výzvou rezervoárového manažmentu pri dlhodobej produkcii, pretože povrchová infraštruktúra (separátory, expandéry, turbíny) sú optimalizované na určité prietokové množstvá dvojitej fázy, alebo parnej frakcie

- **zdroje geotermálnej energie so suchou geotermálnou parou (dry-steam)** predstavujú najvzácnejšie formy zdrojov geotermálnej energie, nakoľko ich produkcia vedie k priamej výrobe elektrickej energie v suchopárnych elektrárnach (direct, dry-steam) – vid' 3.2.1, a zároveň ide o zdroje geotermálnej energie s najvyššou termodynamickou kvalitou, plus, vzhľadom na kritické podmienky ich vzniku, aj najvzácnejšie komerčne využívané. Suchá para predstavuje jedinú mobilnú fázu v rezervoári, ktorá ovplyvňuje prúdenie v hornine, respektíve prítoky rezervoárového média k produkčnému vrtu. Zo všetkých geotermálnych polí sú rezervoáre suchej pary overené na lokalitách Larderello-Travalle a Monte Amiata (Taliansko), The Geysers a Cove Fort (oba USA), Matsukawa (Japonsko), Poihipi (Nový Zéland) a polia Kamojang a Ulubelu v Indonézii. Suchopárne zdroje geotermálnej energie sa formujú vo vulkanických a konvektívnych systémoch s otvoreným hydrogeologickým režimom. Infiltračná a tranzitná zóna musí byť dostatočne nízkej priepustnosti na to, aby dopĺňanie rezervoáru bolo pomalé, a rezervoárový tlak nedosiahol úroveň hydrostatického tlaku pri extrémne vysokých teplotách nad 240 °C. Zároveň musí byť akumulčná oblasť spojená s povrchom vzostupnou tranzitnou a výverovou oblasťou s vysokou priepustnosťou, aby bol zabezpečený únik rezervoárového média a nedošlo k jeho akumulácii, ktorá by viedla k zvyšovaniu tlaku. Ešte komplikovanejšie je to v samotnej akumuláčnej zóne. Tá nevyhnutne potrebuje blízky, a extrémny zdroj tepla – napríklad rozsiahle plutonity, magmatické krby, alebo siete magmatických žíl, ktoré by nadmierne prehrievali rezervoár v hĺbkach často do 2 – 3 km. V spodnej časti rezervoáru akumuláčnej oblasti sa formuje takzvaná nádrž, kontinuálna, pomerne malá zóna s pomaly dopĺňanou geotermálnou vodou. Jej vysoká priepustnosť a intenzívne prehrievanie umožňuje formovanie konvekčných buniek, a ich prudký výstup smerom k stropu rezervoáru, čo znamená šokovú stratu tlaku a odparovanie = formovanie parnej frakcie. Prenikajúca para sa formuje v separovanej čiapke pri strope rezervoáru. Vodná frakcia zbavená pary chladne

a začína v konvekčnej bunke gravitačne prúdiť znovu k báze, nádrži. Strata pary vyvoláva zmenu chemického zloženia a saturácie minerálnych fáz, ktoré z roztoku okamžite začínajú vypadať, a tak postupne znižuje priepustnosť na strope rezervoáru na podmienky, kam dokáže preniknúť para, ale nie vodná frakcia. Takto dôjde k vytvoreniu suchopárnej, izolovanej čiapky, ktorá nekondenzuje a nechladne, lebo je kontinuálne prehrievaná unikajúcou parou z konvekčných buniek, a samotnými konvekčnými bunkami pri dosiahnutí ich „vrcholu“ (Obr. 2.15 – 2.16) .



Obrázok 2.15 Profil zdrojov suchej geotermálnej pary. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)



Obrázok 2.16 Profil zdrojov suchej geotermálnej pary. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

Týmto rozdelením sa v „čiapke“ vytvárajú podmienky paro-statického tlaku. Citlivosť systému spočíva v tom, že neúnosné zvýšenie rezervoárového tlaku by vyvolalo zmenu parostatického tlaku na hydrostatický, a zmenu suchej pary na dvojitú fázu. Prudký pokles tlaku, by viedol naopak ku takzvanému prehrievaniu (superheating, superheated-steam), čo je proces, pri ktorom dôjde k odpareniu celej „nádžže“, extrémnemu prehriatiu parnej frakcie v „čiapke“ a jej úniku k povrchu, alebo do nedostupných častí rezervoáru

Superkritické zdroje geotermálnej energie (supercritical, super-critical) predstavujú skutočne extrémny, a aj v súčasnosti len preskúmaný typ rezervoárového média, ktorého teplotno-tlakové podmienky definujú: teplota $> 374^{\circ}\text{C}$ a tlak aspoň 22,1 MPa, t.j. podmienky, ktoré definujú v klasickej fyzike takzvaný kritický bod. Udržiavaním teploty, alebo jej zvýšením, voda v kvapalnom stave nemôže existovať, a nie je možné ju kondenzovať ani ľubovoľnou zmenou tlaku. Zároveň ale nie je možné rozprávať o čistej pare, keďže látka je stále „mokrú“, avšak jej vlhkosť neformujú (ako v prípade suchej geotermálnej pary) kvapôčky vody. Pretože tie nemôžu jednoducho pri danej teplote existovať. So zvyšujúcou sa salinitou, množstvom rozpustených minerálov, sa teplota kritického bodu, a rovnako tlak, zvyšujú.

Médium, alebo zdroj geotermálnej energie v superkritických podmienkach, má, v porovnaní s takzvanými subkritickými zdrojmi (geotermálna voda, dvojité fázy, vlhká para, suchá geotermálna para) neporovnateľne výhodnejšie energeticko-ekonomické parametre. V prvom rade je difuzivita superkritickej látky desať- až stonásobne vyššia, ako difuzivita, rozťažnosť

zdrojov geotermálnej energie v subkritických podmienkach. Preto sa superkritické látky pohybujú vplyvom vztlaku, čo aj pri nízkej priepustnosti zabezpečuje podstatne väčšie prietoky oproti „konvenčným“ látkam. Následne, jednotkové množstvo látky v superkritických podmienkach má 5 až 10 násobne vyšší potenciál výroby elektrickej energie, ako rovnaké množstvo suchej geotermálnej pary. Dôvodom je podstatne vyššia celková energia superkritickej látky – entalpia. Priemerná hĺbka vrtov zachytávajúcich dvojité fázu alebo geotermálnu paru s teplotou 200 – 300 °C je približne 2000 – 3000 metrov, a priemerný výkon vrtu dosahuje 3 – 10 MWe pri jednotkovej cene za vrt 5 – 7 miliónov dolárov (HEŘMANSKÁ ET AL., 2020). Doteraz zachytené superkritické podmienky v hĺbke 3000 – 6000 m predstavujú síce zvýšenie nákladov na vrtanie o 1 – 3 milióny dolárov, avšak jednotkový výkon vrtu sa posúva na úroveň 5 – 25 MWe. Paradoxne tak vyššie náklady spojené s vrtaním majú kratšiu dobu návratnosti práve pre vyšší jednotkový výkon (ELDER ET AL., 2014). Doterajší stav poznania superkritických rezervoárov predpokladá ich viazanie na aktívne magmatické a vulkanické zóny (TSUCHYA ET AL., 2016). Preto ich objavovanie a zachytávanie má potenciál násobne zvýšiť produktivitu geotermálnych polí a štruktúr bez nutnosti rozširovania ich environmentálneho dopadu na krajinu. Zároveň pri ich objavovaní klesajú nároky na produktivitu vyšších, subkritických zdrojov geotermálnej energie, čo predlžuje životnosť a podporuje udržateľnosť produkcie geotermálnych polí (ELDER ET AL., 2014).

Doterajšie zistenia o superkritických zdrojoch geotermálnej energie predpokladajú ich postupné formovanie z pôvodne subkritických zdrojov, v koreňových systémoch vulkanických štruktúr, v tesnom okolí alebo na hranici aktívnej intrúzie, magmatického krbu, batolitu. Nevyhnutným procesom je adiabatický var subkritických médií v puklinových systémoch, ktoré neboli sekundárne vyplnené precipitáciou minerálov z extrémne horúcich roztokov. Var pri teplote prevyšujúcej 320 – 350 °C postupne spôsobuje odparovanie vodnej fázy konduktívnym zahrievaním, alebo prehrievaním geotermálnej pary, čo znižuje rezervoárový tlak. Tak sa fáza postupne posúva ku kritickému bodu. Izotopové výskumy naznačujú, že superkritické zdroje viazané na subdukčné zóny, majú svoj pôvod v zrážkových vodách infiltrujúcich do hlbokých obehových systémov, menšie zastúpenie majú magmatické vody (uvoľnené z magmy) a plyny. Naopak, v riftových zónach vykazujú všetky známky prevládajúcej magmatickej vody (HEŘMANSKÁ ET AL., 2020). K utesneniu pôvodných štruktúr došlo, s určitou, nárastom teploty a postupným vyzrážavaním sa minerálnych fáz v tranzitných, zostupných a vzostupných zónach, čím boli utesnené voči povrchu, a následne extrémne prehrievané (FRIDLEIFSSON – ELDER, 2017).

2.2.3 Technická využiteľnosť

Kritérium technickej využiteľnosti (alebo dostupnosti) zdrojov geotermálnej energie zohľadňuje inžiniersko-technologický prístup ku zdrojom geotermálnej energie a ich povahu (GRANT ET AL., 1982). Vo svojej podstate kritérium vychádza z rozlíšenia medzi rezervoárovým prostredím, ktoré existuje prirodzene, a rezervoárovým prostredím, ktoré je nevyhnutné vo vhodnej hornine vytvoriť (TESTER ET AL., 2006; GRANT – BIXLEY, 2011):

- **prirodzené zdroje geotermálnej energie (conventional resources)**, čiže zdroje a systémy, ktoré sa v geologickom, hydrogeologickom a geotermickom prostredí pri ich priaznivej kombinácii vyskytujú prirodzene; prirodzene v rezervári prítomné médium, ktoré je možné produkovať, a rovnako prirodzené sú aj hydraulické podmienky rezerváru, ktoré podporujú a umožňujú jeho prúdenie
 - hydrotermálne systémy (hydrothermal)
 - hydrogeotermálne systémy (hydrogeothermal)
- **stimulované geotermálne systémy (enhanced geothermal systems - EGS)**, čiže geotermálne systémy a štruktúry, v ktorých geologické, geotermické a hydrogeologické podmienky neumožňujú prirodzený výskyt rezervoárovej horniny, alebo rezervoárového média, a tieto dva základné aspekty musia byť zabezpečené technologickým zásahom
 - systémy horúcej suchej skaly (hot-dry-rock systems - HDR)
 - systémy horúcej vlhkej skaly (hot-wet-rock systems - HWR).

2.2.3.1 Všeobecná charakteristika EGS systémov

Prirodzeným, konvenčným zdrojom geotermálnej energie sa venovali predchádzajúce klasifikačné schémy. Takže v rámci opisu technického kritéria bude nasledujúca časť zameraná len na hodnotenie stimulovaných EGS systémov. Ich rezervoárovo-inžiniersky názov je aj **petrotermálne (petrothermal)**. EGS systémy boli dlhodobo – a nesprávne – predovšetkým v domácej literatúre označované ako HDR, pričom podľa 2.2.3.2 a 2.2.3.3 ide o technické koncepty s úplne inou charakteristikou.

V prirodzených podmienkach je distribúcia teploty a tepla kontrolovaná termofyzikálnymi vlastnosťami (tepelná vodivosť, tepelná difuzivita) a lokálnym geotermickým gradientom, takže ide viacmenej o konduktívne prostredia s minimálnym, alebo žiadnym podielom média. Nevyhnutnou podmienkou vytvorenia EGS systémov je vhodné geologické prostredie na

ekonomicky výhodnú stimuláciu, a zároveň gradient teploty, respektíve dostatok konduktívne transportovaného tepla v okolí, ktoré by bolo schopné udržať podmienky priaznivé pre udržateľnú produkciu – najčastejšie – elektrickej energie, respektíve tepla vo veľkých mierkach, schopných pokryť vstupné náklady (AXELSSON, 2012B). Preto je väčšina v súčasnosti testovaných, alebo prevádzkovaných EGS práve na lokalitách s recentným vulkanizmom, alebo v priestoroch malej hrúbky zemskej kôry, kde je prísun z astenosféry najväčší. Perspektívnymi oblasťami sú miesta s teplotou nad 150 °C v hĺbke do 2km, či 200 °C v hĺbke do 3 km. Minimálny objem horninového prostredia, efektívny pre fázovú zmenu vtlačanej vody na geotermálnu paru, sa odhaduje v rozsahu $1 - 2 \times 10^8 \text{ m}^3$ a vzdialenosť oboch vrtov dubletu by nemala byť menšia ako 1000 m (BROWN ET AL., 2012).

Hoci sú systémy EGS častokrát pertraktované a podsúvané ako riešenia budúcnosti (energetický potenciál môže byť nespochybniteľný), zároveň je nevyhnutné poznať ich základné charakteristiky, ktoré výrazne ovplyvňujú ekonomiku ich zariadenia, ekonomiku ich prevádzky, nároky na rezervoárový manažment, a v konečnom dôsledku nízku účinnosť a vyšší environmentálny dopad, než pri konvenčných systémoch (TESTER ET AL., 2006; BROWN ET AL., 2012; GLASSLEY, 2015):

- rezervoárové prostredie neexistuje = je potreba ho v hornine vytvoriť stimuláciou (environmentálne dopady, seizmicita, finančné náklady, optimalizácia, modelovanie)
- rezervoárové médium neexistuje (HDR) alebo existuje minimálne v prostredí s minimálnou / nedostatočnou priepustnosťou = je potrebné ho do geologického prostredia dostať = nevyhnutná reinjektáž
- formovanie puklín sa realizuje v 3D priestore = so vzdialenosťou medzi produkčným a reinjektážnym vrtom klesá účinnosť prepojenia puklín a účinnosť z pomeru vtlačeného množstva voči ekvivalentnému získanému množstvu média
- počas dlhodobej produkcie je rezervoárové prostredie konvektívne ochladzované oproti konduktívnemu (difúznemu, disperznému) prehrievaniu = nevyhnutný monitoring, obmedzené teplotné spády, stále riziko prieniku studeného frontu a ochladenia rezervoárového prostredia
- vyžadujú minimálne 2 vrtý v schéme jeden producent – jeden injektor, častokrát je však časom potrebné schémy upravovať navyšovaním (nerovnomerným) oboch typov vrtov, pričom možnosti aplikovania monitorovacích vrtov sú veľmi obmedzené
- požiadavky na frekventovaný monitoring počas samotnej produkcie.

Samotná **stimulácia horninového prostredia** (rock stimulation) je štandardne realizovaná štyrmi spôsobmi (SCHULTE ET AL., 2010; HUENGES, 2016):

- mechanicky = aplikovaním výbušnín a usmernených nábojov vo vrtoch
- hydromechanicky = aplikovanie extrémneho tlaku injektovaného vodného stĺpca
- termomechanicky / termicky = striedanie cyklov prehrievania a zmrazovania, respektíve prudkého ochladzovania horniny
- chemicky = aplikovanie kyselín podľa litológie horninového prostredia

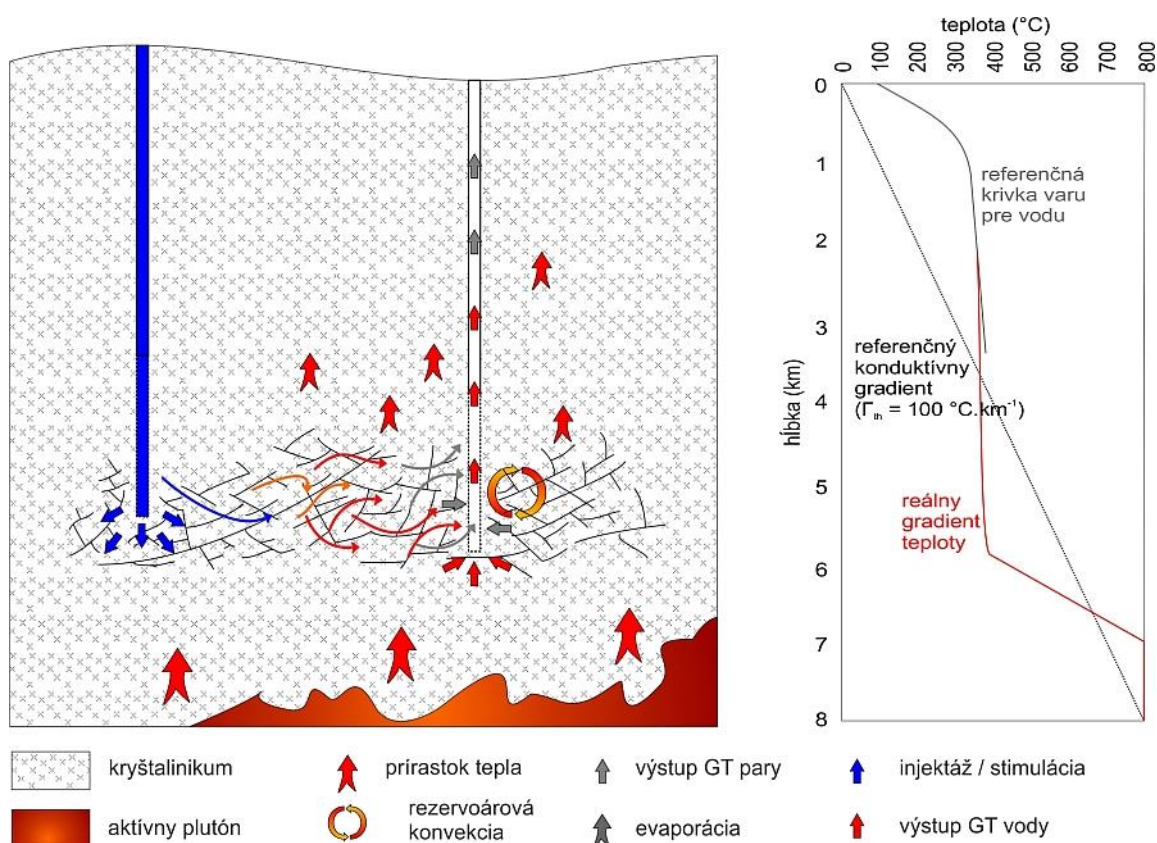
2.2.3.2 Štruktúry horúcej suchej skaly (hot-dry-rock; HDR)

Podľa oficiálnej definície prijatej Medzinárodnou geotermálnou asociáciou sú štruktúry horúcej suchej skaly (HDR) „systémy suchých horúcich hornín, v ktorých teplo uložené v horninovom prostredí v hĺbke do 10 km pri teplote do 650 °C nemôže byť prirodzene a ekonomicky extrahované prostredníctvom suchej pary a, alebo, geotermálnej vody“ (TESTER ET AL., 2006).

HDR štruktúry sú opisované ako umelo stimulované prostredie, so svojim okolím, kde v nepriepustnej, alebo extrémne nízko priepustnej hornine došlo k vytvoreniu rezervoárového prostredia, bez pôvodnej prítomnosti rezervoárového média. Okolie puklinového systému preto môžeme považovať za dokonalý izolátor, a celý obeh média, od jeho vtlačenia, cez fázovú premenu, až po jeho produkciu, prebieha v nepomerne úzkej sieti puklín a trhlín v porovnaní s rozmermi prostredia. Tento proces štandardne trvá roky (BROWN ET AL., 2012).

Tepelné prostredie rezervoáru a okolia je kontrolované konduktívnym zahrievaním. Teplo je dodávané zvyčajne z blízkych batolitov, plášťového diapirizmu – výstupu astenosféry bližšie k povrchu alebo anomálnymi, extrémne vysokými koncentráciami rádioaktívnych prvkov v zemskej kôre, najmä uránu, draslíka, a tória. Ideálnymi horninami sú tým pádom najmä magmatity, granity a granodiority (AXELSSON, 2012B).

Rezervoárové médium predstavuje voda pri teplotách štandardne 40 – 120 °C, ktorá je v produkčnom vrte vtlačaná do okolitej siete puklín – rezervoárového prostredia. Kontinuálnym vtlačaním dochádza k prestupu vody a postupu do systému rôzne prepojených puklín (Obr. 2.17), a zahrievaním z okolitých zdrojov tepla, alebo vplyvom samotnej hĺbke, k postupnej fázovej premene, najčastejšie na dvojitú fázu, výnimočne na suchú geotermálnu paru. Produkčnými vrtmi je následne médium prenášané na povrch, a jeho prítokové pomery k vrtu, podobne, ako v konvenčných systémoch, kontroluje mobilná rezervoárová fáza (BROWN ET AL., 2012; GLASSLEY, 2015).



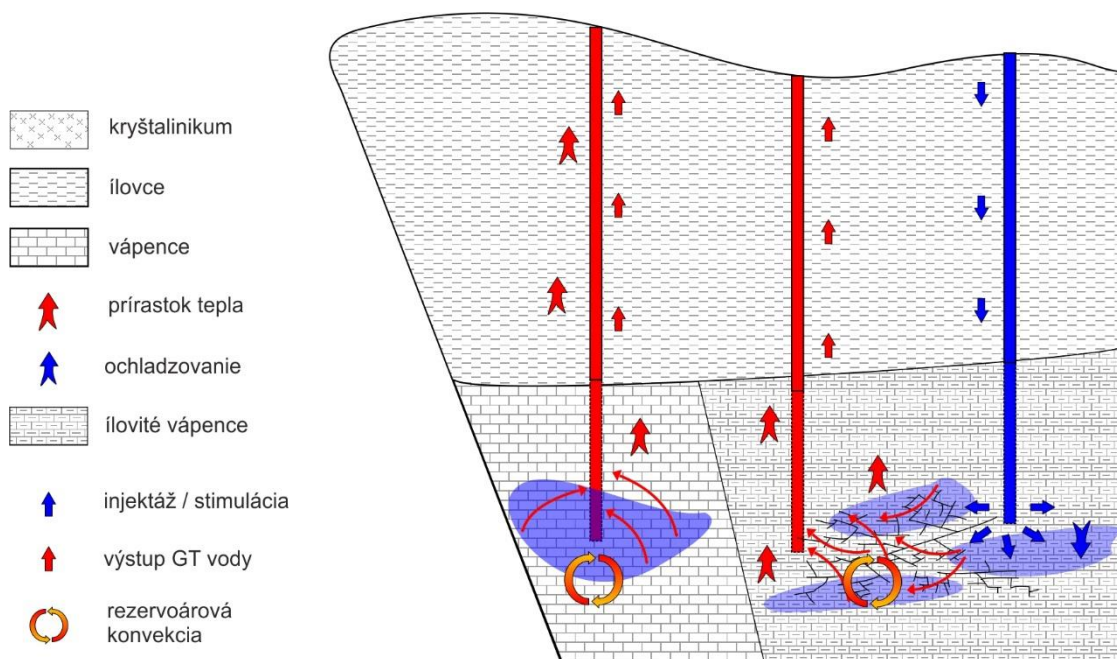
Obrázok 2.17 Schéma funkcie HDR systému. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025).

2.2.3.3 Štruktúry horúcej vlhkej skaly (hot-wet-rock; HWR)

Štruktúry HWR (Obr. 2.18) sa vyznačujú časťou geologického prostredia, v ktorom bola overená prítomnosť rezervoárového média, ale jeho nepriaznivé hydraulické podmienky (žiadna, alebo minimálna priepustnosť) neumožňujú jeho prúdenie, alebo produkciu. Z tohto dôvodu je nevyhnutné hydraulické pomery horniny stimulovať tak, aby bolo možné hovoriť o rezervoárovom prostredí. Úlohou stimulácie v tomto prípade je vytvoriť sieť vzájomne prepojených puklín v existujúcom systéme, alebo stimulačnými zásahmi podporiť ich vzájomnú prepojenosť, čo umožní ekonomickú a dlhodobú produkciu zdroja geotermálnej energie. Za samotný zdroj – rezervoárové médium, je považované ako primárne médium, ktorým môže byť geotermálna voda až vlhká geotermálna para (iné formy viazanosti pary nie sú možné kvôli vysokému tlaku v rezervoári), a zároveň médium, ktoré podlieha rezervoárovým procesom, alebo fázovej premene, počas postupnej produkcie a reinjektáže (TESTER ET AL., 2006; GRANT – BIXLEY, 2011).

Práve podmienka existencie rezervoárového média a možnosť čiastočnej priepustnosti horninového prostredia vytvára širšie možnosti pre rozvoj HWR štruktúr, nielen v horninách kryštalinika, ale aj v klasických sedimentárnych horninách, alebo karbonátoch. Hoci HWR systémy sú v pred-produkčnom štádiu petrotermálne, a teda konduktívne, z pohľadu prevládajúceho transportu tepla, ich dlhodobá produkcia a stimulácia môžu prirodzene viesť k zmene konduktívneho na konvektívny režim, alebo kombinovaný (BROWN ET AL., 2012).

Určitým špecifikom HWR systémov je to, že častokrát sú súčasťou konvenčných hydrotermálnych alebo hydrogeotermálnych štruktúr. V nich potom predstavujú pôvodne neperspektívnu, neproduktívnu oblasť, ktorá pre efektívne využívanie zdrojov geotermálnej energie musí byť umelo stimulovaná (GRANT – BIXLEY, 2011).



Obrázok 2.18 Schéma funkcie HWR (vľavo) a HDR (vpravo) systému. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025)

2.2.4 Energetický potenciál

Energetický potenciál predstavuje spôsob kombinovaného hodnotenia zdrojov geotermálnej energie, ktorý kombinuje častokrát kvalitatívne (popisné) triedy s určitými okrajovými podmienkami, a kvantitatívne kritériá.

Hodnotenie rôznych aspektov energetického potenciálu vo svete je pomerne štandardné, a rovnako, ako pri hodnotení teploty (2.2.2.1) je založené na účely, pre ktoré boli konkrétne klasifikačné schémy navrhnuté. Poznanie ich teoretických základov a definícií je preto nevyhnutné pri hodnotení zdrojov geotermálnej energie, ich udržateľnosti, potenciálu, ak ide najmä o porovnávanie projektov s dobrými príkladmi z praxe.

2.2.4.1 Termodynamická klasifikácia zdrojov geotermálnej energie

Termodynamická klasifikácia vychádza z konceptu exergie – termodynamickej kvality. Ako termodynamická veličina predstavuje **exergia** (respektíve **špecifická exergia**) množstvo užitočnej energie, ktorú je možné z termodynamického systému získať alebo ktorá môže byť užitočne konvertovaná na termodynamickú prácu, keď sa systém (geotermálna voda, dvojitá fáza, suchá geotermálna para) snaží získať termodynamickú rovnováhu medzi jej aktuálnym stavom (daná teplota, entalpia, tlak) a okolím (teplota pracovnej látky, tlak turbíny, nastavenie výmenníka tepla). Je to dané tým, že v zmysle druhého termodynamického zákona neexistuje ideálna práca, a pri vykonávaní akejkoľvek práce (odovzdávanie tepla, tlaková expanzia) je vždy časť energie, ktorú nie je možné využiť (MORAN – SHAPIRO, 2004; DIPIPO, 2005; DINCER – ROSEN, 2013; DINCER – OZTURK, 2021).

Koncept exergie nehodnotí popisné charakteristiky zdroja geotermálnej energie. Hodnotí jeho celkový potenciál konať prácu, a tým aj jeho vhodnosť pre jednotlivé procesy, v závislosti na jeho termodynamických parametroch (špecifickej entalpii a špecifickej entropii). Vychádza pri tom z porovnania termodynamických parametrov v jeho aktuálnych podmienkach (teplota, tlak) voči referenčným podmienkam, ktorými sú entalpia saturovanej pary v kritických podmienkach teploty $T = 303\text{ °C}$ a tlaku $p = 9\text{ MPa}$ (LEE, 1996), ktoré pri kvantitatívnom hodnotení premieta do vzťahu **indexu špecifickej exergie (specifix exergy index)** podľa vzťahu:

$$SExI = \frac{(h - 273,15 \cdot s)}{1192} \quad /2.1/$$

kde: h = špecifická entalpia zdroja geotermálnej energie pri rezervoárovom tlaku a teplote ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), s = špecifická entropia zdroja pri rezervoárovom tlaku a teplote ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), 273,15 = teplota v K pri 0 °C, a 1192 = konštanta špecifickej exergie saturovanej pary pri kritickom stave.

Následne je aj celá klasifikačná schéma (Tabuľka 2.2) založená na konkrétnych, exaktných okrajových podmienkach, ktoré definujú jednotlivé hraničné termodynamické kvality zdrojov geotermálnej energie (LEE, 1996, 2001):

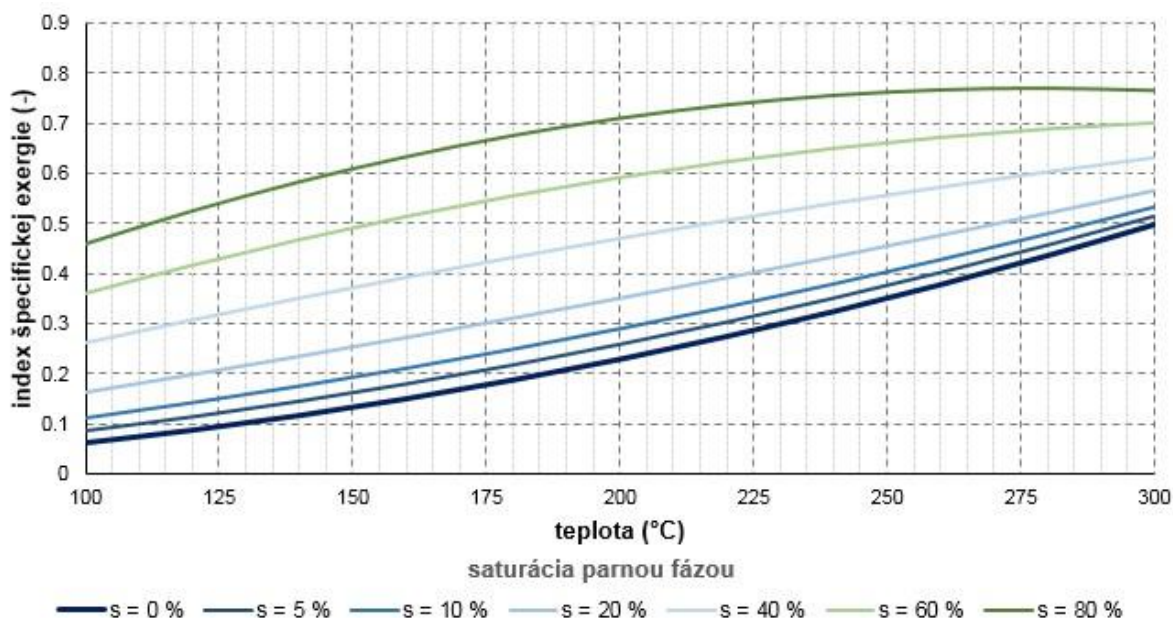
- **zdroje vysokej termodynamickej kvality:** $SE_{xI} > 0,5$; termodynamická kvalita zodpovedá podmienkam saturovanej pary $p = 0,1 \text{ MPa}$ a $T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; zvyčajne jednostupňové až dvojstupňové expanzné elektrárne a suchopárne elektrárne, produkcia tepla zo separovaného zvyškového tepla respektíve kondenzátu
- **zdroje strednej-vysokej termodynamickej kvality:** $SE_{xI} = 0,2 - 0,5$; termodynamická kvalita zodpovedá dvojfázovému médiu s rovnováhou, alebo prevahou geotermálnej pary pri $h > 1000 \text{ kJ.kg}^{-1}$ a $p > 20 \text{ Bar-abs}$; štandardne viacstupňové až jedno-stupňové expanzné elektrárne, výnimočne pri extrémnej prevahe vodnej frakcie aj suchopárne elektrárne, binárne cykly a produkcia tepelnej energie prichádza do úvahy v kaskádovom napojení, alebo zo separovaného zvyškového tepla (separovanej geotermálnej vody alebo kondenzátu)
- **zdroje nízkej-strednej termodynamickej kvality:** $SE_{xI} = 0,05 - 0,2$; termodynamická kvalita zodpovedá dvojfázovému médiu s prevahou geotermálnej vody definovanému podľa $h < 1000 \text{ kJ.kg}^{-1}$ a tlakom $p < 20 \text{ Bar-abs}$; zvyčajne priame systémy využitia geotermálnej energie veľkej mierky, binárne a viacstupňové expanzné elektrárne s napojením na kogeneračnú produkciu tepelnej energie
- **zdroje nízkej termodynamickej kvality:** $SE_{xI} < 0,05$; termodynamická kvalita zodpovedá jednofázovému médiu, saturovanej geotermálnej vode pri $p = 1 \text{ Bar}$ a $T = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$; štandardne priame využitie geotermálnej elektrárne a binárne cykly

Tabuľka 2.2 Klasifikácia zdrojov geotermálnej energie na základe termodynamickej kvality

interval SE_{xI}	v charakteristika exergie	geologické zaradenie zdrojov geotermálnej e.	rezervoárová fáza
< 0,05	nízka	bazénové	1-fázové, geotermálna voda
<0,05-0,2>	nízka-stredná	bazénové, vulkanické	2-fázové, s prevahou vody
<0,2-0,5>	stredná-vysoká	vulkanické, bazénové	2-fázové, s prevahou pary
>0,5	vysoká	vulkanické	1-fázové, geotermálna para

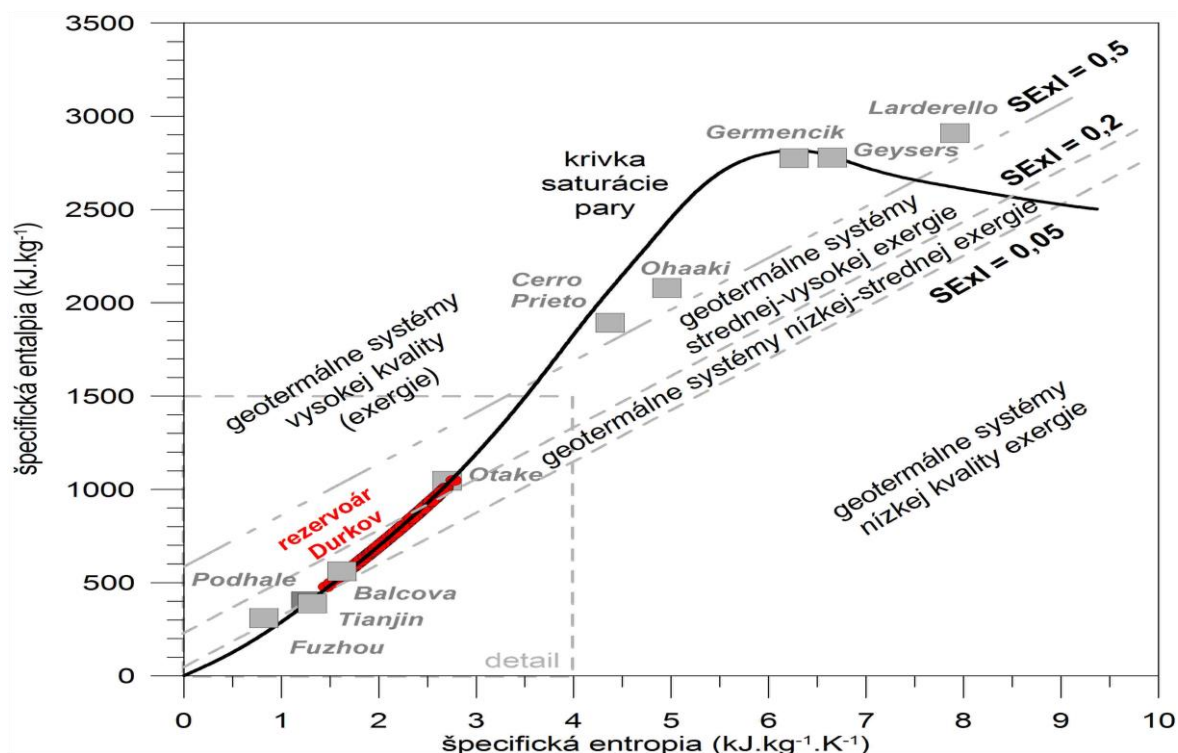
Nakoľko je index špecifickej exergie založený na termodynamických parametroch – špecifickej entalpii a entropii (ktorých funkcia je pre vodnú a parnú frakciu rozdielna v závislosti na teplote a tlaku), slúži SExI na jednoduché rozlíšenie medzi termodynamicky analogickými podmienkami (bez ohľadu na charakter geologického prostredia) a potenciálom zachyteného zdroja geotermálnej energie, respektíve na vylúčení určitých spôsobov využitia zdrojov geotermálnej energie, ktoré nie sú termodynamicky efektívne. To je výrazný rozdiel oproti Lindalovej schéme a jej diagramu (Obr. 3.1), ktorá túto možnosť nemá a je založená len na základe optimalizovaných teplotných intervalov pre jednotlivé segmenty využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie.

Znamená to, že zdroj geotermálnej energie pri $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ môže dosahovať hodnoty termodynamickej kvality $\text{SExI} = 0,2 - 0,75$ v závislosti na podiele saturovanej parnej fázy (Obr. 2.19). Ak by hypoteticky existovala pri tejto teplote geotermálna voda ($s = 0\%$), jej možnosti produkcie by zodpovedali jedine priamemu využitiu, alebo binárnym jednotkám – ak by nedošlo k poklesu tlaku počas produkcie, ktorý by vyvolal separáciu parnej zložky, avšak možnosti produkcie elektrickej energie by boli (aj premietnuté do MWe) výrazne vyššie ako funkcia zvyšovania podielu parnej frakcie. A naopak, možnosť jednostupňovej expanzie je rovnaká pre zdroj geotermálnej energie s 80% podielom parnej frakcie pri teplote $T = 155\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T = 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ s podielom pary 60% , čo sa častokrát odráža v potrebnej hĺbke a technologických nárokoch jednotlivých geotermálnych projektov.



Obrázok 2.19 Vývoj SExI ako funkcia rezervoárovej teploty pre jednotlivé stupne saturácie parnou fázou.

PRÍKLAD 2.1: Mapovanie termodynamickej kvality s využitím Mollierovho diagramu v rezervoárovom prostredí ďurkovskej depresie. Upravené podľa: Lee (2001); Fričovský et al. (2018b,2020b)



ZADANIE: Hydrogeotermálna štruktúra ďurkovskej depresie bola podrobená samostatnej termodynamickej analýze a mapovaniu termodynamickej kvality. V rezervoárovom prostredí boli identifikované geotermálne vody s minimálnym pomerom vlhkej saturovanej parnej frakcie. Špecifická entalpia rezervoárového prostredia sa pohybuje v intervale $394\text{--}1067 \text{ kJ.kg}^{-1}$, s priemerom 610 kJ.kg^{-1} , a hodnoty indexu špecifickej exergie sa hýbu v intervale $0,04\text{--}0,25$ s priemerom $0,11$, čo odkazuje na prostredie s prevažne nízkou-strednou termodynamickou kvalitou, s charakteristickým výskytom geotermálnych vôd a geotermálnych vôd so saturovanou vlhkou parou, prípadne dvojfázových zdrojov s prevahou geotermálnej vody.

INTERPRETÁCIA: Vychádzajúc z princípov mapovania termodynamickej kvality, sú rezervoárové hodnoty (červené štvorce) lokalizované medzi geotermálnymi poľami Balcova (Turecko) a Otake (Japonsko). Z pohľadu potenciálu využívania zdrojov geotermálnej energie je geotermálne pole Balcova (teploty $90\text{--}130^\circ\text{C}$, geotermálna voda + vlhká para) aktuálne využívané v systémoch centrálného zásobovania teplom napojením na rozsiahle kaskádové systémy sklenikového hospodárstva a vykurovania bazénov, t.j. 3-stupňový kaskádový systém. Referenčné pole Otake zastupuje plytký rezervoár systému Hatchobaru-Otake s teplotou do 120°C a geotermálnymi vodami s viazanou vlhkou parnou frakciou, ktorý slúži ako back-up pre hlboký dvojfázový rezervoárový systém s napojením na vykurovanie založenom na odpadovom teple. Geotermálne polia Podhale v Poľsku (teplota do 90°C , geotermálna voda) s viditeľne nižšou termodynamickou kvalitou slúži na centrálné zásobovanie teplom s kaskádovým napojením na priemyselné využitie zvyškového tepla.

ZÁVER: Z termodynamickej mapy jednoznačne vyplýva nevyhnutnosť kombinovaného, kaskádového využívania zdrojov geotermálnej energie ďurkovskej depresie najmä pre centralizované zásobovanie teplom, podľa možností s kombinovaným napojením na priemysel, alebo poľnohospodárstvo vysokej mierky. Naopak, zvažovanie systémov expanznej produkcie elektrickej energie (príklad geotermálneho poľa Ohaaki, Cerro Prieto) neprichádza pre zjavné rozdiely v termodynamickej kvalite do úvahy (aj z pohľadu rozdielnej fázovej povahy a frakčného zastúpenia parnej fázy).

2.2.4.2 Klasifikácia zdrojov geotermálnej energie na základe geologickej istoty (McKelveyova schéma)

Konštrukcie modelov, katalógov, hodnotení, alebo klasifikácií, či prehľadov **energetickej kapacity** geotermálnych štruktúr, polí, perspektívnych oblastí, respektíve útvarov geotermálnych vôd ako na lokálnej, tak aj na národnej úrovni je možné v zásade rozdeliť na dve základné skupiny (CIRIACO ET AL., 2020):

- **analogické metódy odhadu:** založené na neempirických postupoch vychádzajúcich z podobných odhadov hydrogeotermálnych systémov v rovnakých, alebo zodpovedajúcich geotermických a geometrických podmienkach
- **empirické modely odhadu:** založené na rôznej povahe, kvalite, hustote vstupných dát, ako aj realizácii matematicko-fyzikálneho aparátu, pričom do tejto skupiny patria:
 - *bilančné metódy odhadu;* ktoré môžu byť vhodné ako v pred-produkčnom, tak aj v produkčnom štádiu rezervoáru za podmienky dynamickej zmeny vstupných premenných bez ohľadu na jeho plošnú rozlohu (USGS objemová metóda, USGS tepelná metóda, metóda energetickej hustoty, metóda tepelnej straty, metóda magmatickej bilancie, metóda energetickej bilancie, metóda plošných puklín)
 - *dynamicke metódy odhadu;* ktoré sú vhodné v štádiu spoľahlivo monitorovanej produkcie, a ich aplikácia je limitovaná na podmienky konkrétneho systému, štruktúry, respektíve vrtného poľa (DCA – metóda stratových kriviek, lumpfitové modely, numerické rezervoárové simulácie produkcie, odozvy a predikcie.

Klasifikácia zdrojov geotermálnej energie **podľa McKelveyovej schémy** (MUFFLER – CATALDI, 1978) je sama o sebe bilančnou metódou hodnotenia, pretože vyjadruje kategórie (Tabuľka 2.3) tried podľa energetickej bilancie rezervoáru. Vychádza z podobnej schémy, ktorá bola už pred jej aplikovaním na sektor geotermálnej energie, dlhodobo využívaná v ropnom priemysle, a preto jej kritéria – po logickej a nevyhnutnej modifikácii, sú akceptované, a pochopiteľné ako v teoretických, tak aj praktických prípadoch.

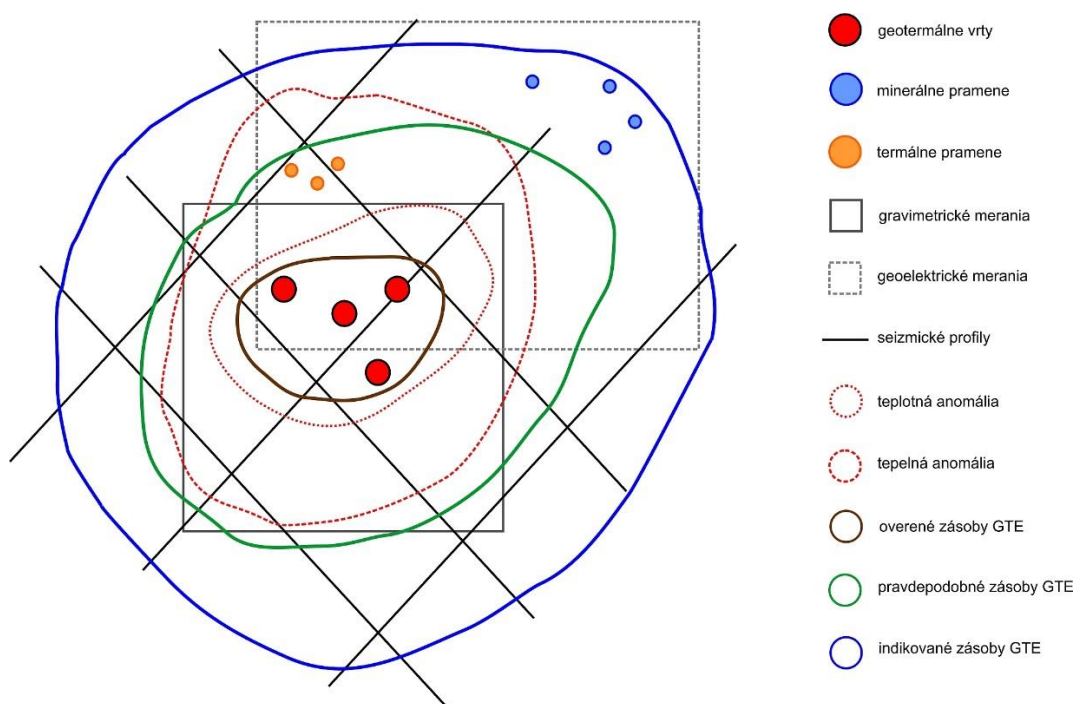
Metodike, ktorá je využívaná pri konštrukcii modelov McKelveyovej schémy, je venovaná časť 6.1 respektíve 6.2. Pre účely prehľadu klasifikácie teraz postačia kvalitatívne a kvantitatívne definície.

Základom McKelveyovej schémy – ktorá je v rámci geotermálnej energie celosvetovo najvyužívanejšou – je geologická istota, čiže miera spoľahlivosti odhadu energetického

potenciálu, alebo energetickej kapacity v jednotlivých triedach podľa stupňa reálneho overovania (aplikované geochemické, geofyzikálne, mapovacie, modelovacie a vrtné práce) alebo na základe pravdepodobnostného modelovania (Obrázok 2.20; Príklad 2.2). Štandardne v rámci McKelveyovej schémy je možné vymedziť nasledovné kategórie (MUFFLER – CATALDI, 1978; SANYAL – SARMIENTO, 2005; CLOTWORTHY ET AL., 2006; LAWLESS ET AL., 2010; WILLIAMS ET AL., 2010; SARMIENTO ET AL., 2018):

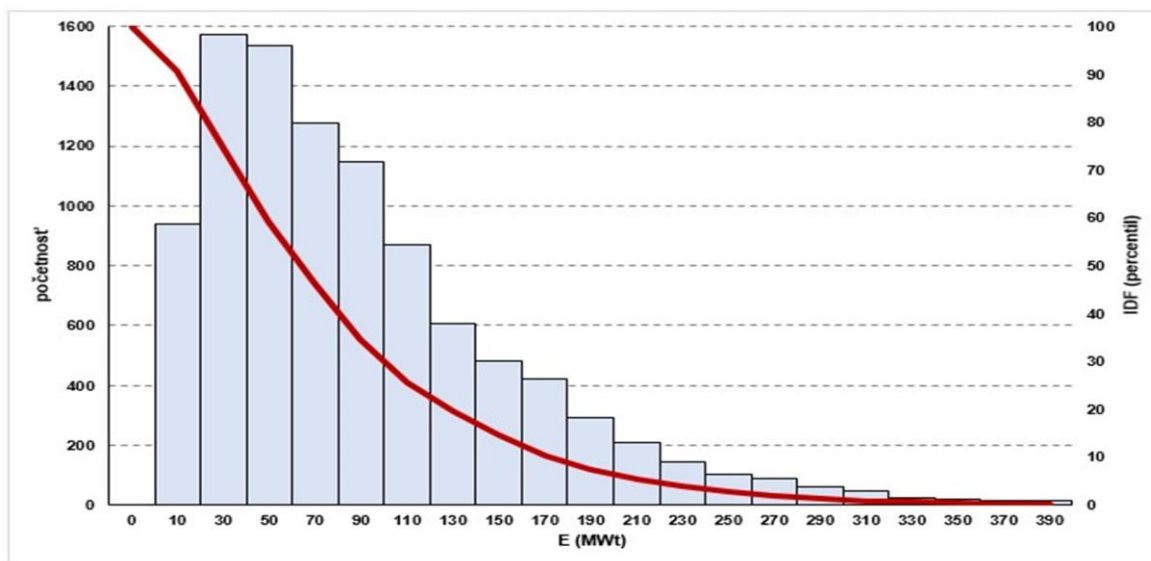
- zdroje geotermálnej energie (geothermal resources)
- zásoby geotermálnej energie (geothermal reserves)
 - indikované zásoby geotermálnej energie (inferred / possible reserves)
 - pravdepodobné zásoby geotermálnej energie (probable reserves)
 - overené zásoby geotermálnej energie (proven reserves)
- **zdroje geotermálnej energie - RS_T** vyjadrujú množstvo geotermálnej energie v rezervoárovom systéme, ktorého dostupnosť, a produktivita, nie je v krátkodobom ani strednodobom horizonte možná. Stupeň overenia je minimálny. Zvyčajne sú aplikované odhady na základe analógie s geotermálnymi štruktúrami a poľami v podobných geologických, hydrogeologických, alebo geotermických podmienkach. Z pohľadu geologickej istoty ide o časť akumulovanej geotermálnej energie s najnižšou istotou odhadu, pričom ich úroveň odhadu čiastočne zodpovedá aj maximálnemu množstvu statickej a dynamickej zložky geotermálnej energie v systéme
- **zásoby geotermálnej energie – RE_T** vyjadrujú tú časť energie, ktorá je s určitým stupňom overenia (podľa subkategórií) identifikovaná, exploatovateľná ekonomicky aj právne v súčasnosti, podľa požiadaviek aktuálnej situácie v legislatívnom a trhovom systéme. Na rozdiel od zdrojov geotermálnej energie, zásoby sú časťou energetického potenciálu viazaného na geotermálny systém, ktoré sú kvantifikované, eventuálne overené modelovaním a dostupnými metódami prieskumu. Bilančne je možné celkové zásoby geotermálnej energie vyjadriť ako súčet zásob geotermálnej energie s rôznym stupňom geologickej istoty, respektíve overenia, ktorých maximálna vyjadrená hodnota zodpovedá 10-percentilu pravdepodobnostnej distribúcie (viď 6.2)

- **indikované / predpokladané zásoby geotermálnej energie** – R_{inf} zastupujú tú časť geotermálneho systému a naňho viazaného energetického potenciálu, ktorý bol odhadovaný na základe modelov, alebo analýzy povrchových prejavov (minerálne a termominerálne pramene, gejzíry, anomálie pôdneho CO_2 a podobne) rezervoárového systému, s pravdepodobnosťou úspešnej produkcie pod 50 %
- **pravdepodobné zásoby geotermálnej energie** – R_{pb} sú neoverené zásoby geotermálnej energie, ktoré majú vysokú pravdepodobnosť budúcej produkcie, a ktorých potenciál je odhadovaný na základe solídneho geofyzikálneho a geochemického prieskumu (seizmika, odporové merania, magnetotelurika, gravimetria), ako aj aplikovaním modelovacích metód vychádzajúcich z nepriamych vrtných údajov (napríklad geotermometrie), s pravdepodobnosťou budúceho overenia 50 – 90 %
- **overené zásoby geotermálnej energie** – R_{pv} predstavujú tú časť energetického potenciálu, ktorý bol overený prieskumnými alebo produkčnými vrtmi na základe ich dlhodobých hydrodynamických testov, krátkodobého monitoringu, a produktivitou vo vzťahu k teplote alebo špecifickej entalpie a temodynamickej kvality



Obrázok 2.20 Grafický vzťah priestorovej situácie geotermálneho systému a kategórií zdrojov a zásob geotermálnej energie.

PRÍKLAD 2.2: Príklad odhadovania zdrojov a zásob geotermálnej energie podľa McKelveyovej schémy pre útvár geotermálnych vôd Dubnícka depresia. Upravené podľa: Fričovský et al. (2024).



ZADANIE: Pravdepodobnostný model odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie pre dobu produkcie 100 rokov (na obrázku histogram distribúcie a IDF distribučná krivka odhadu) priniesol nasledovné percentilové vyjadrenia modelovanej energetickej kapacity: $P_{90}(E) = 21 \text{ MWt}$, $P_{50}(E) = 74 \text{ MWt}$, $P_{10}(E) = 182 \text{ MWt}$. Aktuálne overené zásoby prieskumnými geotermálnymi vrtmi predstavujú $R_{pv} = 5 \text{ MWt}$. Podľa postupov v Tabuľke 2.3 vyjadrite:

- úroveň pravdepodobných zásob geotermálnej energie R_{pb}
- úroveň predpokladaných zásob geotermálnej energie R_{inf}
- celkové zásoby geotermálnej energie RE_T
- celkový tepelno-energetický potenciál TTP
- pravdepodobný tepelno-energetický potenciál $TTP_{(p)}$
- s akou pravdepodobnosťou by bolo možné overiť 10 MWt v danom útvare
- s akou pravdepodobnosťou je možné overiť odhad pravdepodobných zásob

INTERPRETÁCIA: na vyjadrenie tried McKelveyovej schémy je možné využiť formulácie z Tabuľky 2.3. Keďže histogram vyjadruje výrazné zošikmenie vľavo, respektíve až lognormálnu distribúciu, určite platí, že priemer je väčší ako medián:

$$R_{pb} = P_{50}(E) - P_{90}(E) = 74 - 21 = 53 \text{ MWt}$$

$$R_{inf} = P_{10}(E) - P_{50}(E) = 182 - 74 = 108 \text{ MWt}$$

$$RE_T = R_{pv} + R_{pb} + R_{inf} = R_{pv} + [P_{50}(E) - P_{90}(E)] + [P_{10}(E) - P_{50}(E)] = 5 + 53 + 108 = 166 \text{ MWt}$$

$$TTP = R_{pv} + R_{pb} = 5 + 53 = 58 \text{ MWt}$$

$$TTP_{(p)} = P_{10}(E) + R_{pb} = 21 + 53 = 74 \text{ MWt}$$

f) podľa interpretácie IDF krivky zodpovedá pravdepodobnosť 92 - 93 %

g) podľa interpretácie IDF krivky zodpovedá pravdepodobnosť 62 - 63 %

ZÁVER: Z výsledkov pravdepodobnostného modelu vyplýva, že s pravdepodobnosťou aspoň 50 % je možné overiť v rezervoárovom prostredí aspoň 74 MWt, čo zodpovedá pravdepodobnému tepelno-energetickému potenciálu. Konzervatívny TTP na úrovni odhadu 61 % dosahuje podľa modelu 58 MWt pre dobu produkcie 100 rokov.

Tabuľka 2.3 Klasifikácia zdrojov geotermálnej energie na základe McKelveyovej schémy

kategória	geologicko-geotermická charakteristika	pravdepodobnostná charakteristika
zdroje geotermálnej energie	- energia akumulovaná v systéme - obmedzená technická a technologická dostupnosť - najnižšia trieda pravdepodobnosti	$RS_T < P10(E)$
indikované / odvodené zásoby	- bez preukázania vrtnými prácami - solídne indície podľa analógie s overenými systémami a štruktúrami - teplotné, geofyzikálne, geochemické indície alebo prejavy - vysoká pravdepodobnosť prehodnotenia pri realizácii vrtných prác alebo zvyšovaní kvality vstupných parametrov	$R_{inf} = P10(E) - Md(E)$ ak $Md(E) < P50(E)$ $R_{inf} = P10(E) - P50(E)$ ak $Md(E) > P50(E)$
pravdepodobné zásoby	- preukázané na základe obhájiteľných výsledkov numerického, geofyzikálneho a geochemického modelovania - indikované priamymi alebo nepriamymi povrchovými a podpovrchovými príznakmi - blízkosť geotermálnych vrtov	$R_{pb} = Md(E) - P90(E)$ ak $Md(E) < P50(E)$ $R_{pb} = P50(E) - P90(E)$ ak $Md(E) > P50(E)$
overené zásoby	- úspešne overená časť zásob geotermálnej energie vrtnými prácami a dostačujúcim monitoringom - vrtné, monitorovacie a testovacie práce nebudú mať výrazný vplyv na rekalibráciu odhadovaného množstva overených zásob - prakticky predstavujú inštalovaný výkon geotermálneho vrtu, respektíve sumu inštalovaného výkonu geotermálnych vrtov v rámci hodnoteného GT poľa	$R_{pv} > P90(E)$

* E predstavuje celkové, alebo dostupné množstvo tepla odhadovaného v systéme (viď 6.1 a 6.2)

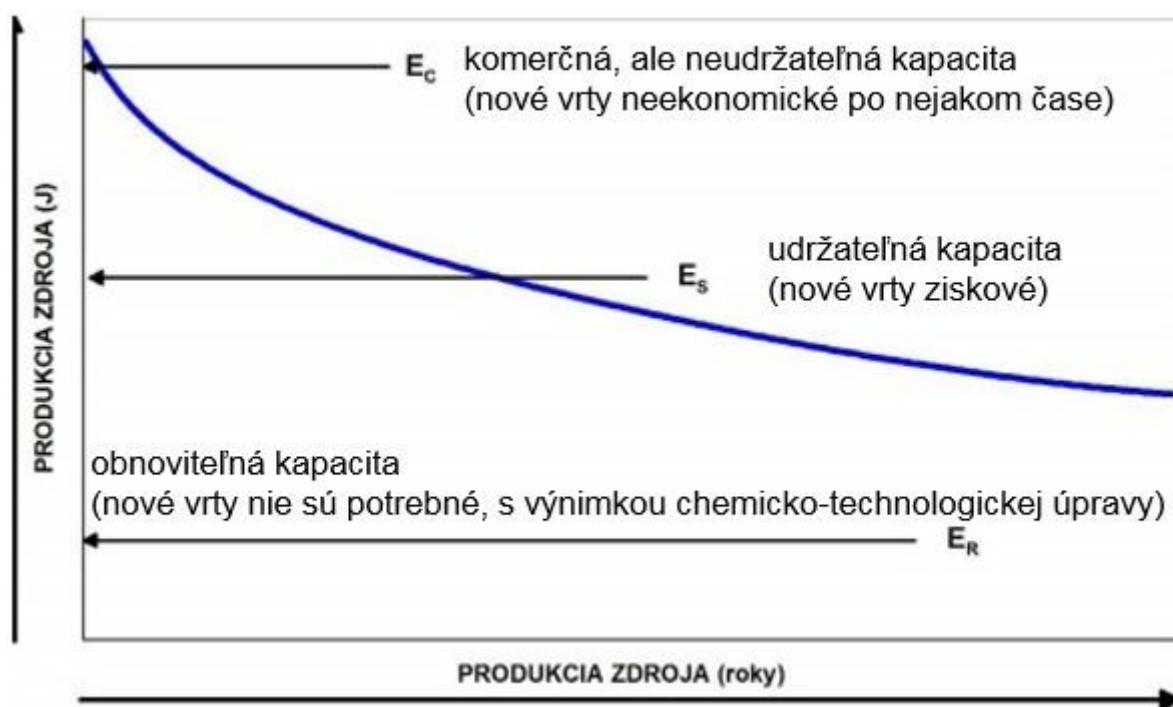
2.2.4.3 Klasifikácia energetického potenciálu na základe kapacity

V súvislosti s praktickým využívaním zdrojov geotermálnej energie a v snahe priblížiť problematiku hodnotenia a ich klasifikácie energetickému priemyslu, vznikla modifikovaná schéma využívaná princíp **rezervoárovej kapacity** (Obr. 2.21), ktorá sa objavuje najmä ako náhrada, alebo paralelná hodnotiacia schéma v anglofónnej literatúre (SANYAL, 2005B,C; SANYAL ET AL., 2002, 2004; SANYAL – MORROW, 2010; WILLIAMS, 2010; WILLIAMS ET AL., 2011):

- **obnoviteľná energetická kapacita štruktúry (renewable capacity) – E_R** vychádza z modelovanej bilancie systému medzi teplom vstupujúcim do rezervoárového

prostredia, a teplom, ktoré prirodzene z rezervoárového prostredia vystupuje, štandardne do nadložia, alebo v podobe termominerálnych prameňov, plyných výverov, a podobne. Vyjadruje tak množstvo tepla, ktoré je reálne v rezervoárovom prostredí obnovované

- **udržateľná energetická kapacita štruktúry (sustainable capacity) – E_s** predstavuje množstvo geotermálnej energie, ktoré je akumulované v systéme a ktoré do systému vstupuje, ošetrované o časť energie opúšťajúcu rezervoár, a vyjadruje preto maximálnu energetickú bilanciu rezervoárového prostredia
- **ekonomická kapacita štruktúry (commercial capacity) – E_c** predstavuje množstvo geotermálnej energie, ktoré je po dlhú dobu ekonomicky efektívne udržateľné, ak je zohľadnený prirodzený pokles produktivity existujúcich vrtov a nevyhnutnosť ich nahradenia. To znamená, že ekonomická kapacita štruktúry na začiatku prevyšujúca energetický potenciál rezervoáru s predlžovaním produkcie klesá na úroveň, kedy dôjde ku kompromisu medzi tým, čo je pre investora (majiteľa geotermálneho projektu) ekonomicky výhodné, a čo je energeticky výhodné pre dlhodobú produkciu



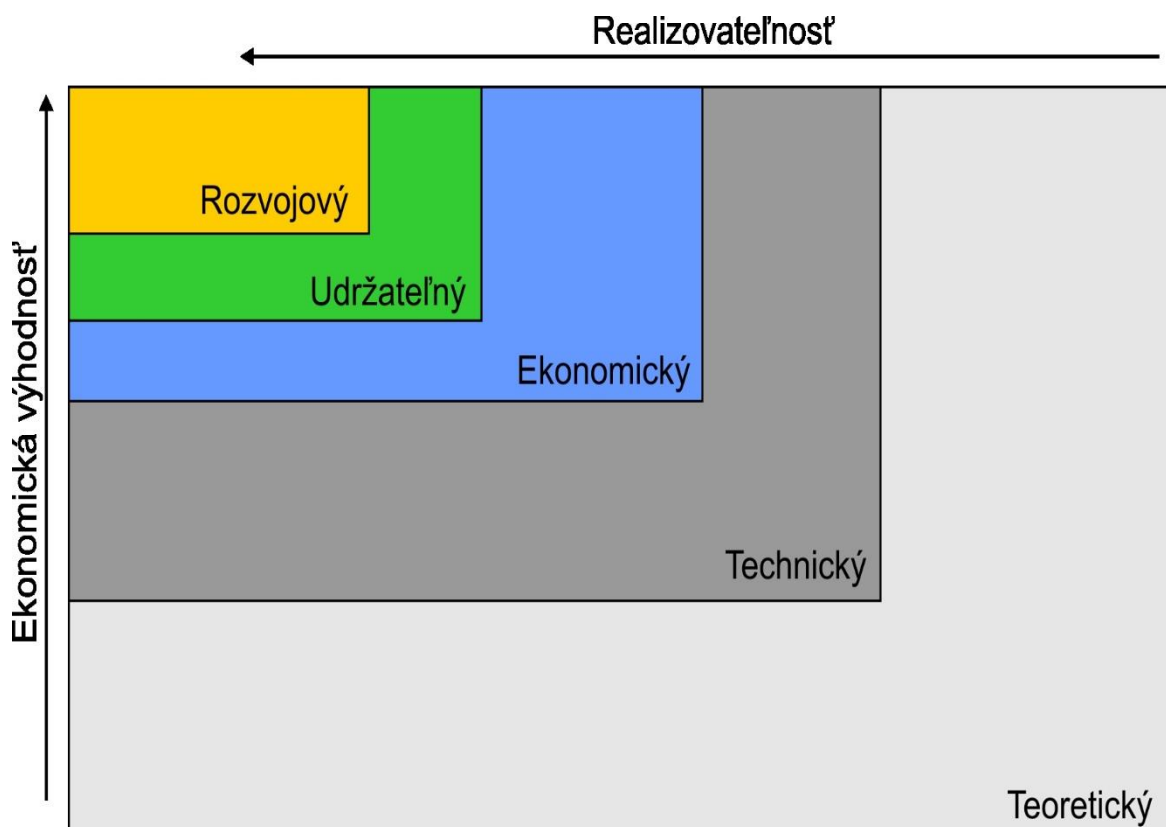
Obrázok 2.21 Klasifikácia a vývoj geotermálnych polí na základe energetickej kapacity rezervoáru. UPRAVIŤ

2.2.4.4 Klasifikácia energetického potenciálu na základe kapacity

Ďalšia hodnotiaca schéma vychádza zo snahy čo najviac minimalizovať „geologický slovník“ pri hodnotení energetického potenciálu zdrojov geotermálnej energie (Obr. 2.22), a čo najväčší dôraz pri jeho hodnotení dať na technické a technologické aspekty produkcie zdrojov geotermálnej energie. Teoretickým základom klasifikačnej schémy je takzvaný Austrálsky a Kanadský kódovník hodnotenia zdrojov geotermálnej energie a ich katalogizácie (RYBACH, 2010A,B, 2015; BEARDSMORE ET AL., 2010; DEIBERT ET AL., 2010; GOLDSTEIN ET AL., 2011; AGEMAR ET AL., 2012, 2014, 2015; VAN WEES ET AL., 2013; FALCONE – BEARDSMORE, 2015; BADGET ET AL., 2016):

- **teoretický potenciál (theoretical potential) – P_M** predstavuje celkové, maximálne množstvo geotermálnej energie akumulovanej v štruktúre v hĺbke do 10 km, ktoré je možné v blízkej budúcnosti, a na základe technickej a technologickej dostupnosti produkovať; a to pri zohľadnení očakávanej energetickej účinnosti produkcie
- **technický potenciál (technical potential) – P_T** je časť teoretického potenciálu v kritickej hĺbke do 6,5 km, ktorý je upravený o faktory produkcie, ako tolerovaná miera ochladenia rezervoáru (do 10 % iniciálnych podmienok), faktor dostupnosti zdroja geotermálnej energie (viď 6.1 alebo 6.2), faktor priestorovej dostupnosti (z celkovej plochy geotermálneho systému je vyčlenená časť, kde urbánne a prírodné, alebo legislatívne prekážky bránia rozvoju infraštruktúry) – pre potreby rozvoja geotermálnych projektov preto predstavuje tú časť energetického (teoretického) potenciálu, ktorá je technicky a technologicky dostupná
- **ekonomický potenciál (economic potential) – P_E** tvorí tú časť technicky využiteľného potenciálu, ktorá je využiteľná na konkrétnom mieste, v konkrétnom čase, pri nákladoch, ktoré sú porovnateľné, alebo konkurencieschopné v porovnaní s alternatívnymi energetickými projektmi a konvenčnými palivami. Štandardne sa pre stanovenie P_E využíva modelovanie vyrovnaných energetických nákladov (LCOE) medzi zdrojom geotermálnej energie a ostatnými energetickými surovinami. Znamená to, že ekonomický potenciál teda predstavuje potenciál štruktúry, pri ktorom je možné uvažovať s vyrovnaním nákladov na produkciu primárnych energií zo zdroja geotermálnej energie voči konvenčným energetickým surovinám, t.j. kde $LCOE_{GT} \leq LCOE_{FF}$.

- **udržateľný potenciál (sustainable potential) – P_S** je tou časťou komerčného potenciálu, ktorú je možné produkovať bez ohrozenia dlhodobej životnosti rezervoáru a samotného geotermálneho projektu. Metodika jeho stanovenia sa výrazne líši medzi krajinami, ktoré túto klasifikačnú schému využívajú (Nemecko, Austrália, Kanada, Nový Zéland, Taliansko...). Definícia však zároveň umožňuje presne vymedziť interval udržateľného potenciálu ($P_D < P_S < P_E$), stanovuje rámcové metódy jeho modelovania a odhadu, a pritom ponecháva voľný priestor pre ich voľbu z pohľadu dostupnosti vstupných údajov
- **potenciál rozvoja produkcie (developable potential) – P_D** vyjadruje tú časť udržateľného potenciálu, ktorú je možné využívať v realistických podmienkach, dlhodobo, a aktuálne. Z praktického hľadiska hodnotenia zdrojov geotermálnej energie ide o overené zásoby v prípade, ak ich miera je menšia, ako udržateľný potenciál.

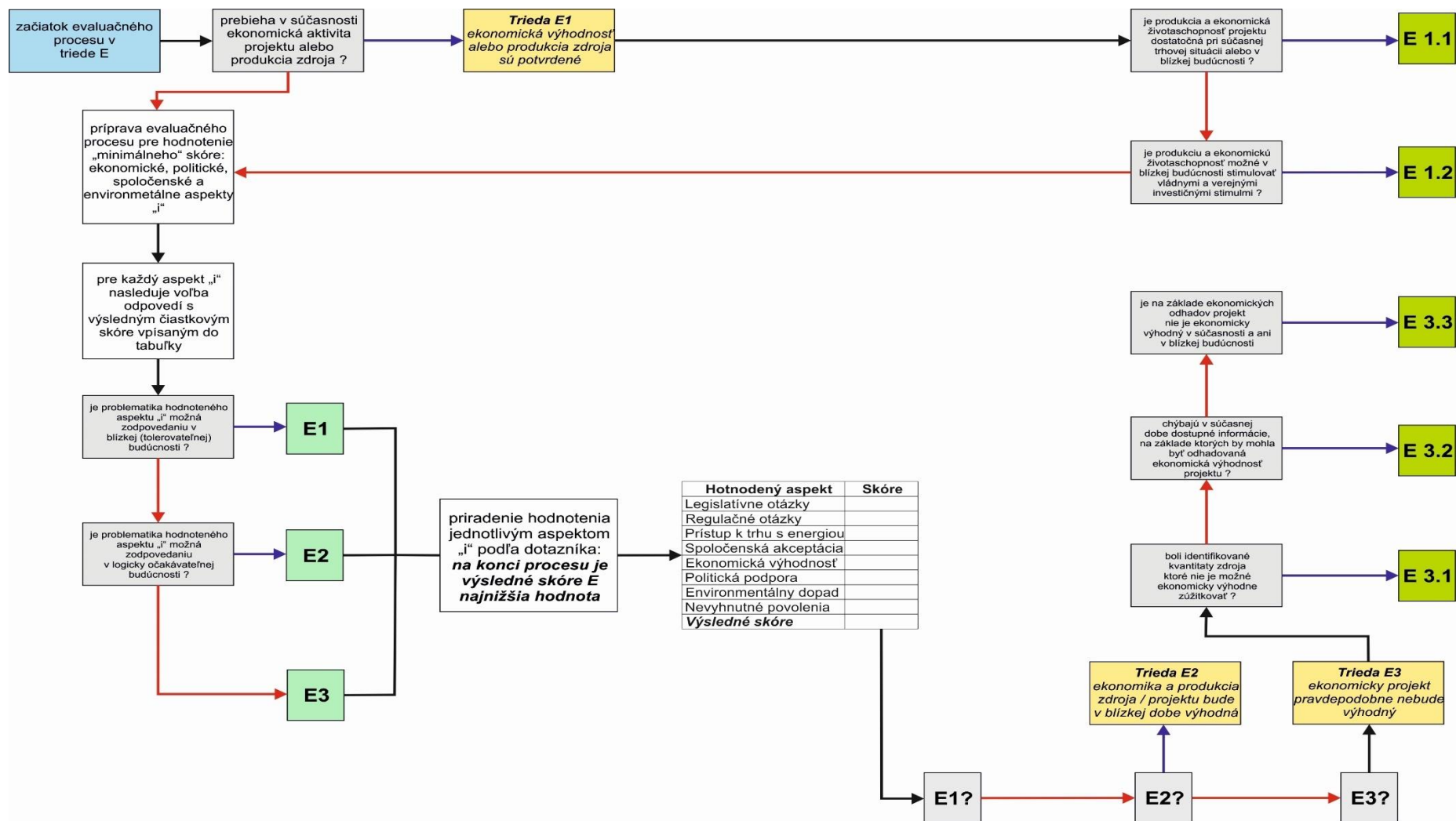


Obrázok 2.22 Klasifikácia a vývoj geotermálnych polí na základe energetickej kapacity rezervoáru. UPRAVIŤ

2.2.4.5 Klasifikácia energetického potenciálu podľa UNFC-2009-GE

Katalóg UNFC-2009 (z angl. United Nations Framework Classification) je označením Rámцovej klasifikácie OSN pre energiu z fosilných zdrojov a zdrojov a zásob nerastných surovín (orig. United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009), ktorý priamo nadväzuje na podobnú rámcovú dohodu UNFC-2009. Princíp hodnotenia je založený na kvantitatívnom vyjadrení energetických parametrov projektov alebo hydrogeotermálnych systémov s plánovanou realizáciou projektov zameraných na priame a nepriame využitie zdrojov geotermálnej energie. Klasifikácia sa opiera o simultánne 3-osové hodnotenie projektu kombinovaním socio-ekonomickej rentability (E), uskutočniteľnosti (F), respektíve geologickej istoty (G). Vyčlenenie tried pripadá numerickým kódom, ktoré sú jazykovo nezávislé, preto je nespornou výhodou katalógu jeho aplikovateľnosť v celosvetovom meradle (ERSOY ET AL., 2004; ROSS ET AL., 2013; FALCONE ET AL., 2016).

- **trieda E : socio-ekonomická životaschopnosť zdroja geotermálnej energie / projektu (socio-economic viability)** vyjadruje parametre zdroja geotermálnej energie / projektu využívajúceho (alebo plánovaného) zdroj geotermálnej energie s ohľadom na ekonomickú, technickú situáciu a stav spoločnosti (Obr. 2.23)
 - **E1:** produkcia, využitie a distribúcia energie je ekonomicky výhodná s ohľadom na aktuálne trhové podmienky a realistické prognózy vývoja trhu, potrebné administratívno-právne úkony sú získané, alebo existuje očakávateľný predpoklad ich úspešnej komplementácie
 - **E1.1:** produkcia, využitie a distribúcia energie je ekonomicky výhodná s ohľadom na aktuálne podmienky na trhu a realistické prognózy jeho vývoja
 - **E1.2:** produkcia, využitie a distribúcia energie nie je ekonomicky výhodný s ohľadom na aktuálne podmienky na trhu a jeho prognózy vývoja, tento stav ale menia existujúce dotácie z tretej strany
 - **E2:** produkcia, využitie a distribúcia energie nebola pri súčasných podmienkach preukázaná ako ekonomicky výhodná, s ohľadom na prognózy trhu ale existuje predpoklad ich ekonomickej výhodnosti v dohľadnej dobe (do 5 rokov)
 - **E3:** produkcia, využitie a distribúcia nezodpovedá ekonomickej výhodnosti s ohľadom na dohľadnú dobu, respektíve ekonomická evaluácia je v štádiu, kedy nie



Obrázok 2.23 Postup UNFCCC klasifikácie pre triedu E – socio-ekonomická životaschopnosť

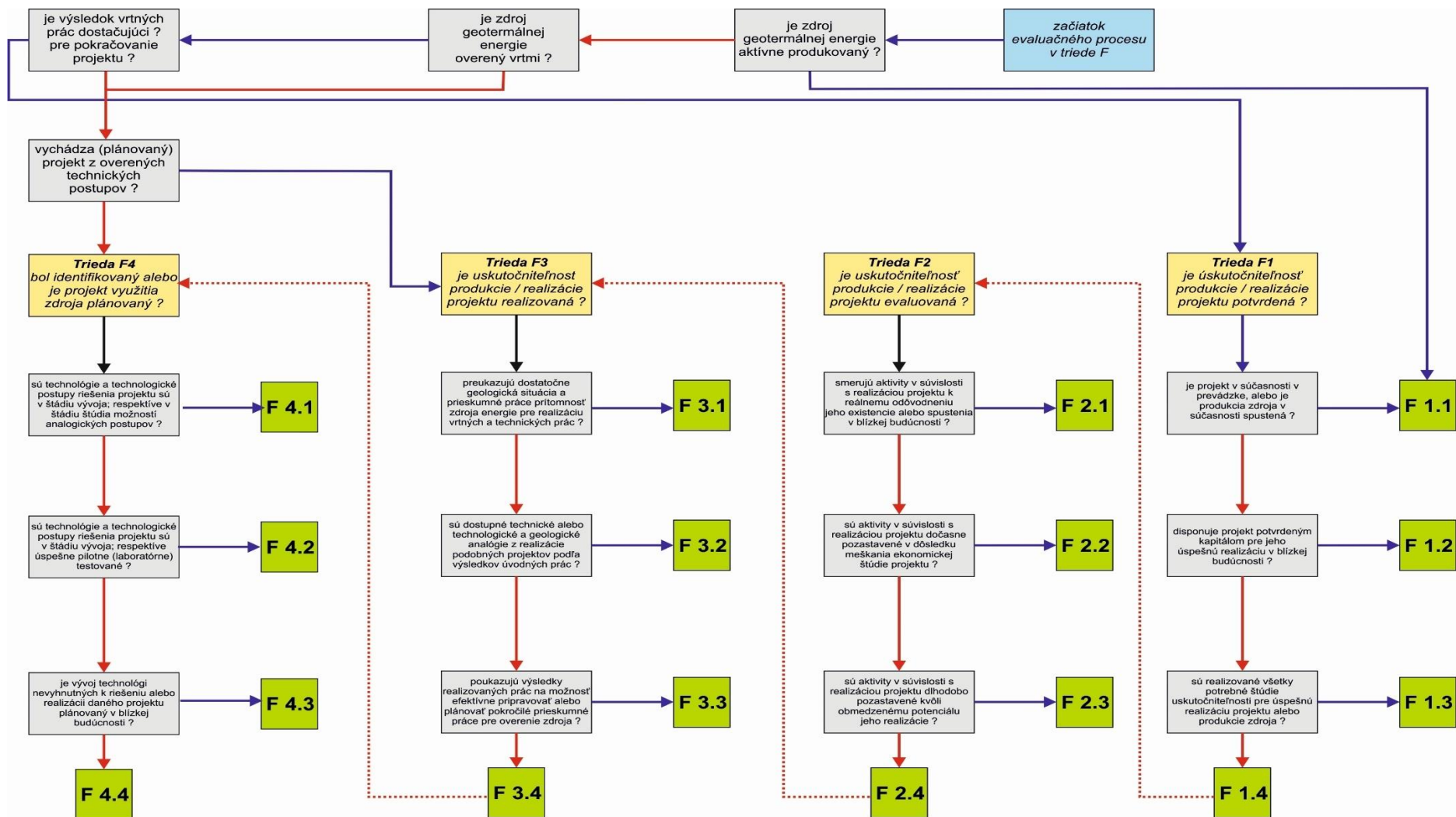
je možné realisticky posudzovať socio-ekonomickú rentabilitu zdroja / projektu. Do kategórie sa zaraďujú aj množstvá produkovanej a využitej energie, ktoré nie je možné distribuovať smerom k druhému odberateľovi (napr. parazitické straty)

- E3.1: množstvá energie, ktoré napriek produkcii a primárnemu využitiu nemôžu byť distribuované k druhým odberateľom, parazitické straty, straty z konverzie a podobne
- E3.2: socio-ekonomická životaschopnosť zdroja / projektu nemôže byť presvedčivo stanovená s ohľadom na nedostatok podkladových materiálov
- E3.3: pri realistických odhadoch prognózy vývoja trhu a spoločnosti je súčasný zdroj geotermálnej energie / projekt využívajúci geotermálnu energiu považovaný za neekonomický, napríklad vplyvom vzdialenosti od distribučnej siete alebo zákazníka

- **trieda F : uskutočniteľnosť projektu (feasibility)** vyjadruje technicko-technologickú uskutočniteľnosť projektu využívajúceho zdroj geotermálnej energie alebo vzťah zdroja geotermálnej energie k aktuálnym technicko-technologickým možnostiam trhu vrátane potrebnej projektovej, výrobnjej a distribučnej infraštruktúry (Obr. 2.24)

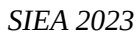
- **F1:** Uskutočniteľnosť (potenciálneho) projektu v rámci zdroja geotermálnej energie bola úspešne potvrdená, prebieha, alebo získané výsledky štúdia využiteľnosti a využitia zdroja preukazujú jeho uskutočniteľnosť v reálnom projekte
 - F1.1: Produkcia zdroja geotermálnej energie prebieha / projekt využívajúci zdroj geotermálnej energie je v testovacej alebo plnej prevádzke
 - F1.2: Prostriedky potrebné pre produkciu zdroja energie alebo prevádzku projektu, ktorý z energetického zdroja vychádza boli schválené, a implementácia technických zariadení nevyhnutných pre jeho využívanie a prevádzku aktívne prebieha
 - F1.3: Zdroj geotermálnej energie alebo projekt boli podrobené spoľahlivej štúdii uskutočniteľnosti projektu využívajúceho zdroj geotermálnej energie, respektíve uskutočniteľnosti využívania zdroja geotermálnej energie
- **F2:** Uskutočniteľnosť produkcie zdroja geotermálnej energie alebo realizácie na neho nadväzujúceho projektu je v procese nevyhnutných štúdií. Predbežné výsledky uskutočniteľnosti vytvárajú podklady pre realizáciu nevyhnutných analýz v rámci daného projektu exploatácie, alebo realizácie

- **F2.1:** Projekt, alebo produkcia zdroja geotermálnej energie sú v štádiu aktívneho získavania výsledkov a podkladov k podrobnej štúdiu uskutočniteľnosti
- **F2.2:** Práce a štúdiá spojené s uskutočniteľnosťou realizácie projektu alebo produkcie zdroja geotermálnej energie sú v súčasnej dobe pozastavené
- **F3:** Uskutočniteľnosť realizácie projektu alebo produkcie zdroja geotermálnej energie nie je možné uskutočniť v dôsledku nedostatočnej kvality a kvantity relevantných technických dát
 - **F3.1:** Prírodné, alebo lokálne technické a technologické podmienky poukazujú na nevyhnutnosť realizácie prác, ktoré odôvodnia realizáciu projektu alebo exploatacie
 - **F3.2:** Prírodné alebo technické a technologické podmienky indikujú možnosť uskutočniteľnosti projektu na základe analógie, podľa výsledkov práve realizovaných prvotných a prieskumných prác
 - **F3.3:** Prírodné alebo technické a technologické podmienky poukazujú na možnosť efektívne plánovať a uskutočniť práce, ktoré by viedli k overeniu uskutočniteľnosti projektu / exploatacie zdroja
- **F4:** Projekt alebo produkcia hodnoteného zdroja geotermálnej energie nie je pri daných socio-ekonomických, technických a technologických podmienkach uskutočniteľná
 - **F4.1:** Technológie nevyhnutné pre realizáciu projektu alebo produkciu zdroja sú v súčasnosti v štádiu vývoja, respektíve štúdia možností aplikácie už existujúcich technológií na základe analógie s pilotnými projektmi
 - **F4.2:** Technológie nevyhnutné pre realizáciu projektu alebo produkciu zdroja sú v súčasnosti v štádiu vývoja, doteraz neboli spoľahlivo testované
 - **F4.3:** Technológie nevyhnutné pre realizáciu projektu alebo produkciu zdroja v súčasnosti neexistujú, respektíve nie sú ani vo vývoji
- **trieda G : geologická istota projektu (geological knowledge)** charakterizuje aktuálny stav geologickej preskúmanosti zdroja geotermálnej energie, ktorého využívanie je hodnotené, respektíve ktorého využívanie je plánované v hodnotenom projekte, s ohľadom na princípy výskumu a prieskumu zdrojov geotermálnej energie a odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie (Obr. 2.25)



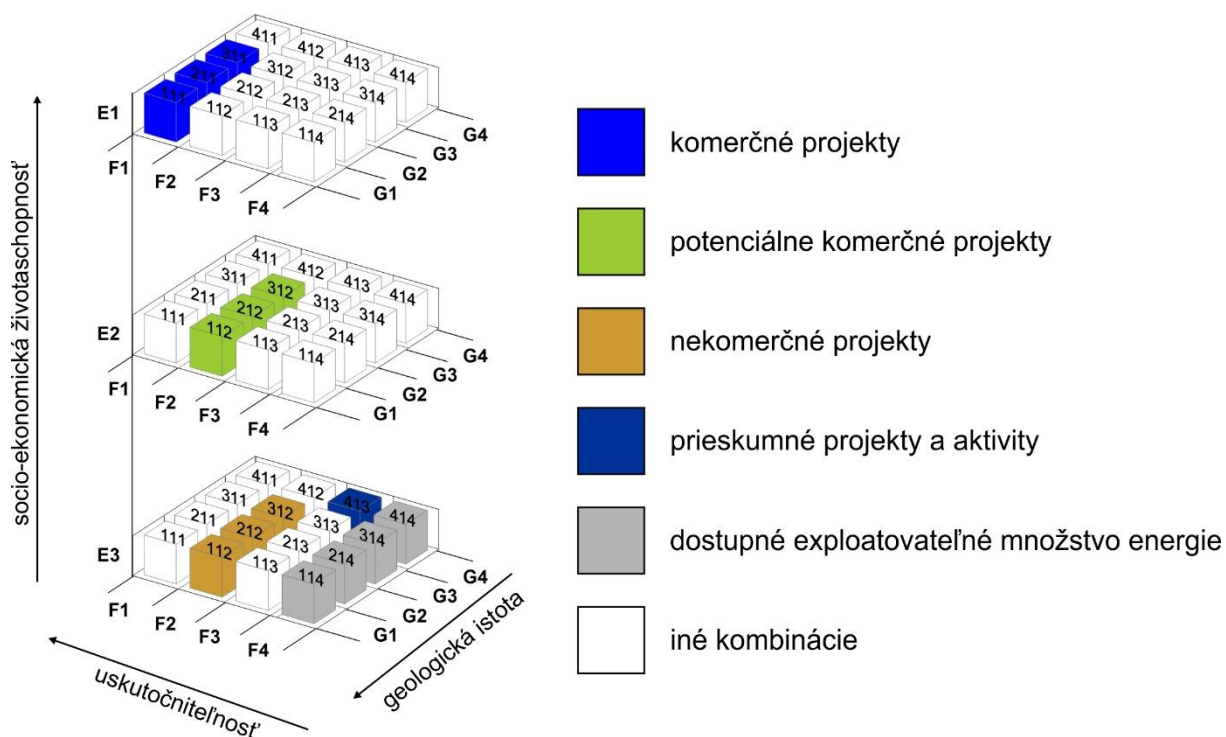
Obrázok 2.24 Postup UNFCCC klasifikácie pre triedu F – uskutočniteľnosť projektu

- **G1:** Kvantita energetického potenciálu odhadovaná na základe vysokej istoty, pri zohľadnení existujúcich neistôt; z výskumu a prieskumu zdroja geotermálnej energie existujú geologické, meteorologické, klimatologické, topografické a geografické podklady, boli realizované technické práce a simulácie, respektíve modelovania odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie, obnoviteľnosti a udržateľnosti produkcie, rezervoárovej produkcie, environmentálnej udržateľnosti a podobne
- **G2:** Kvantita energetického potenciálu odhadovaná so strednou istotou a spoľahlivosťou odhadu, napríklad na základe opodstatneného odhadu, predovšetkým bez numerických simulácií odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie, pri existujúcich technických a geologických prácach ktorými bol zdroj geotermálnej energie zachytený a nevyhnutné údaje technickými a technologickými prácami dokumentované
- **G3:** Kvantita energetického potenciálu odhadovaná s nízkou istotou, na základe regionálnych modelov a štúdií, s využitím reálnych lokálnych dát, bez realizácie technických prác vedúcich k overeniu prítomnosti a exploatovateľnosti zdroja geotermálnej energie
- **G4:** Kvantita energetického potenciálu odhadovaná na základe povrchových prejavov respektíve na základe princípov analógie s hydrogeotermálnymi a geotermálnymi systémami vo svete
 - **G4.1:** Odhad na vysokej hladine spoľahlivosti: konzervatívne odhadované množstvá na základe povrchových prejavov prítomnosti zdroja geotermálnej energie, napr. odhad ložiskových teplôt na základe geotermometrie
 - **G4.2:** Odhad strednej hladiny spoľahlivosti: odhad realizovaný na základe generalizovaných premenných a priemerných hodnôt analogických, respektíve regionálnych súborov dát
 - **G4.3:** Odhad nízkej hladiny spoľahlivosti: odhad realizovaný na základe generalizovaných premenných a priemerných hodnôt pri zohľadnení maximálnych hodnôt vstupných kvalitatívnych parametrov podľa analógie, respektíve na základe regionálnych súborov dát



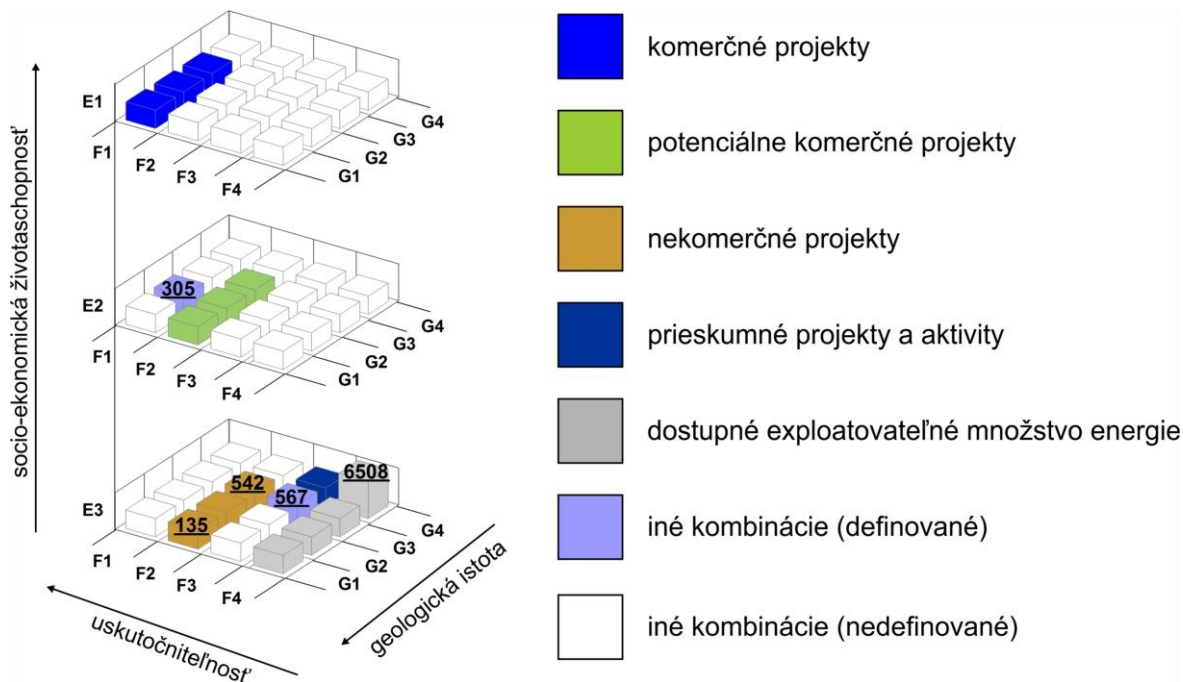
Výstupom postupného hodnotenia (potenciálnych) projektov je 3-rozmerná klasifikačná schéma (Obrázok 2.26), v rámci ktorej má 5 skupín svoje špecifické postavenie:

- komerčné projekty
 - projekty pripravené na produkciu a produkujúce E = 1, F = 1.1, G = 1, 2, 3
 - schválené projekty na inštaláciu E = 1, F = 1.2, G = 1, 2, 3
 - opodstatnené projekty na rozvoj E = 1, F = 1.3, G = 1,2,3
- potenciálne komerčné projekty
 - očakávajúcce rozvoj E = 2, F = 2.1, G = 1, 2, 3
 - pozdržané projekty E = 2, F = 2.2, G = 1, 2, 3
- nekomerčné (aktuálne nevýhodné) projekty
 - projekty s neistým výsledkom E = 3.2, F = 2.2, G = 1,2,3
 - nevýhodné projekty E = 3.3, F = 3.3, G = 1, 2, 3
- prieskumné projekty E = 3, F = 3, G = 4
- nevyužiteľný potenciál E = 3, F = 4, G = 1, 2, 3
- dostupné množstvá geotermálnej energie E = 3, F = 4, G = 1, 2, 3



Obrázok 2.26 Klasifikácia projektov geotermálnej energie na základe schémy UNFCCC

PRÍKLAD 2.3: UNFC-2009-GE klasifikácia zdrojov geotermálnej energie v d'urkovskej depresii.
Upravené podľa: Fričovský et al. (2020b).



Tepelný výkon (MWt)	Množstvo GTE (PJ)	Klasifikačné triedy			Pozícia v schéme UNECE / IGA (Obr. 5.4)	Poznámky / odôvodnenie klasifikácie
		E	F	G		
43	135	3.2	2.1	1	321	- množstvá energie overené prelivovými skúškami vrtov GTD-1 až GTD-3 (Vranovská et al., 1999) 26 MWt bolo overených čerpacou skúškou GTD-2 (Halás Sr. et al., 2016) - tepelný výkon overený numerickým modelom produkcie exploataciou (Giese, 1998, 1999) 37 MWt bolo overených ako P90(H₀) – táto štúdia 33 MWt bolo stanovených simuláciou Monte Carlo ako technický potenciál štruktúry (P_T) – táto štúdia
97	305	2	1.3	2	212	- množstvá tepelnej energie v kategórii R_{pv} + R_{pb} na úrovni P50(H₀) – táto štúdia - ekonomický potenciál štruktúry stanovený odhadom MCS (P_C) – táto štúdia - overené pre plánované využitie v systémoch zásobovania teplom (Beňovský et al., 1999; Vranovská et al., 2000, 2002) - čiastočne kvantifikované environmentálne benefity z odhadu redukcie a úspory CO₂ (Fričovský et al., 2013)
172	542	3.2	2.2	3	323	- množstvá tepelnej energie a výkonu stanovené podľa metódy technického potenciálu P_T do hĺbky 6500 m – táto štúdia - tepelný výkon a zásoby geotermálnej energie zodpovedajúce R_{pv} + R_{pb} + R_{ud} – táto štúdia - množstvá energie stanovené pravdepodobnosťou MCS simuláciou pre P10(H₀) – táto štúdia
180	567	3.2	3.2	3	333	- tepelný výkon a zásoby geotermálnej energie zodpovedajúce R_{pv} + R_{pb} – táto štúdia - bez štúdií ekonomických a technicko-technologických analýz využívania geotermálnej energie v takomto množstve
3015	6508	3.2	4.1	4	344	- zdroje geotermálnej energie stanovené MCS odhadom s pravdepodobnosťou < 10 % - táto štúdia - bez štúdií ekonomických a technicko-technologických analýz využívania geotermálnej energie v takomto množstve

2.2.5 Vybrané pojmy v energetike zdrojov geotermálnej energie

Pri posudzovaní projektov zdrojov geotermálnej energie existuje niekoľko pravidelne sa opakujúcich pojmov, ktorých vysvetlenie a definícia sú nevyhnutné pre pochopenie ako zámeru, tak aj realizovateľnosti samotných projektov. Medzi relevantné pojmy (GRANT ET AL., 1982; MORAN – SHAPIRO, 2004; DiPIPPo, 2005, 2007, 2015; TESTER ET AL., 2006; ROSEN ET AL., 2008, 2013; AXELSSON, 2009; GUDMUNDSSON, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011; GUNGOR ET AL., 2011; GLASSLEY, 2015; LEE ET AL., 2019; YOUNG ET AL., 2019A,B) patria:

2.2.5.1 Produkcia, produktivita

Produktivita Q ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$) vyjadruje celkové množstvo rezervoárového média, ktoré preniká geotermálnym vrtom k povrchu. Jej monitoring, zaznamenávanie, je závislé na charaktere rezervoárového média:

- geotermálna voda alebo geotermálna para = merané prietoky na ústí produkčných vrtov
- dvojité fáza = merané prietoky na ústí produkčných vrtov ako samostatné množstvá vodnej a parnej frakcie
- vlhká geotermálna para = merané prietoky po separácii (separačná stanica na ústí produkčného vrtu alebo na vstupe do infraštruktúry) ako samostatné množstvá vodnej a parnej frakcie

Overené množstvá geotermálnej vody Q_{pv} ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$) znamenajú množstvá geotermálnych vôd (rezervoárového média), ktoré boli overené krátkodobými alebo dlhodobými hydrodynamickými a monitorovacími skúškami.

Schválené množstvá geotermálnej vody ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$) predstavujú overené množstvá, alebo produktivitu, ktorá na základe platnej legislatívnej úpravy prešla schvaľovacím procesom na MŽP SR. Tieto množstvá môžu byť nižšie, ako overené množstvá geotermálnej vody, vzhľadom na výsledky dlhodobej hydrodynamickej skúšky, analýzy chemického rozboru geotermálnych vôd, alebo obmedzené inými záujmami, najčastejšie spoločenskými alebo environmentálnymi na základe konsenzu Komisie pre klasifikáciu zdrojov a zásob pri MŽP.

Aktuálne odoberané množstvá Q_{act} ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$) predstavujú aktuálny stav odberu rezervoárového média, štandardne priemerované na týždne, mesiace, respektíve priemerované na rok. Na rozdiel od konštantných parametrov (schválené, overené) množstiev, sú dynamicky závislé predovšetkým na energetických požiadavkách odoberateľa, respektíve na navrhovanej stratégii využívania zdrojov geotermálnej energie.

Inštalovaný výkon $P_{th,inst}$ vrtu (MWt) /2.2/ predstavuje maximálny tepelno-energetický výkon vrtu daný jeho overenou / schválenou výdatnosťou Q_{pv} a referenčnou teplotou, čo znamená:

- referenčná (ambientná) teplota prostredia, t.j. $T_{ref} = 15\text{ °C}$ alebo $T_{ref} = 20\text{ °C}$
- teplota zneškodnenia geotermálnej vody po poslednom stupni jej využitia
- optimalizovaná teplota kondenzátora v geotermálnej elektrárni

$$P_{th,inst} = Q_{pv} \cdot c_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{ref}) \left| \begin{array}{l} T_{ref} = 15\text{ °C}, T_{ref} = T_{inj}, T_{ref} = T_{con} \\ Q_{pv} = Q_{max} \end{array} \right. \quad /2.2/$$

Referenčný výkon $P_{th,ref}$ (MWt) predstavuje skutočné množstvo geotermálnej energie odoberané z rezervoárového prostredia pri aktuálnej produkcii geotermálnych vôd Q_{act} v priemete na referenčnú teplotu voči ktorej je rezervoárové prostredie bilancované. Na rozdiel od aktuálneho výkonu Q_{act} /2.3/ tak ide o normalizovaný výkon zodpovedajúci prirodzenému energetickému spádu aj napriek situácii, ak $T_{ref} \neq T_{out}$:

$$P_{th,ref} = Q_{act} \cdot c_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{ref}) \left| \begin{array}{l} T_{ref} = 15\text{ °C} \\ Q_{act} \in \langle 0; Q_{pv} \rangle \end{array} \right. \quad /2.3/.$$

Aktuálny výkon $P_{th,act}$ (MWt) je počítaný na mesačnej alebo ročnej báze podľa reportovaných aktuálnych, alebo priemerovaných množstiev odoberaných geotermálnych vôd Q_{act} pri danej teplote zneškodnenia T_{out} . Z pohľadu produkčných charakteristík tak predstavuje reálny tepelno-energetický výkon vrtu, avšak nie množstvo geotermálnej energie odoberané zo systému na jeho referenčnej, porovnávacej hladine /2.4/:

$$P_{th,act} = Q_{act} \cdot c_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{out}) \left| \begin{array}{l} T_{out} \in \langle T_{ref}; T_{wh} \rangle \\ Q_{act} \in \langle 0; Q_{max} \rangle \end{array} \right. \quad /2.4/.$$

Z definícií a pohľadu vzťahov odoberaných množstiev geotermálnej vody a špecifických výkonov, platí niekoľko overovacích pravidiel pre posudzovanie geotermálnych projektov:

- overené množstvá geotermálnej energie R_{pv} predstavujú inštalovaný výkon $P_{th,inst}$ vtedy, ak teplota zneškodnenia je rovná referenčnej teplote ($T_{ref} = T_{out}$)
- inštalovaný výkon $P_{th,inst}$ je vždy väčší, ako referenčný výkon $P_{th,ref}$
- referenčný tepelný výkon $P_{th,ref}$ je vždy väčší ako aktuálny výkon $P_{th,act}$
- inštalovaný výkon geotermálneho vrtu $P_{th,inst}$ môže byť väčší ako inštalovaný výkon energetického zariadenia $P_{th,IN}$ bez ohrozenia projektu, čo otvára možnosti kaskádového zapojenia
- ak je inštalovaný výkon geotermálneho vrtu $P_{th,inst}$ menší, ako inštalovaný výkon energetického zariadenia (napr. výmenníkovej stanice) $P_{th,IN}$ v na Slovensku obvyklej schéme 1 vrt = 1 projekt, je nevyhnutné sledovať lokálne krivky energetického dopytu tak, aby $P_{th,inst}$ bol minimálne rovnaký ako odhadované maximá energetického dopytu, v opačnom prípade hrozí energetický deficit na strane dodávky energie do systému.

Produkcia geotermálnej energie $E_{TH,act}$ (GWh,t) predstavuje množstvo geotermálnej energie produkovanej konkrétnym vrtom pri jeho prirodzenom výkone $P_{th,act}$, respektíve skupinou vrtov v rámci útvaru geotermálnych vôd pri aktuálnom časovom vyťažení t_{prod} /2.5/

$$E_{TH,act} = \frac{P_{th,act} \cdot 24 \cdot t_{prod} [d]}{10^3} \quad /2.5/$$

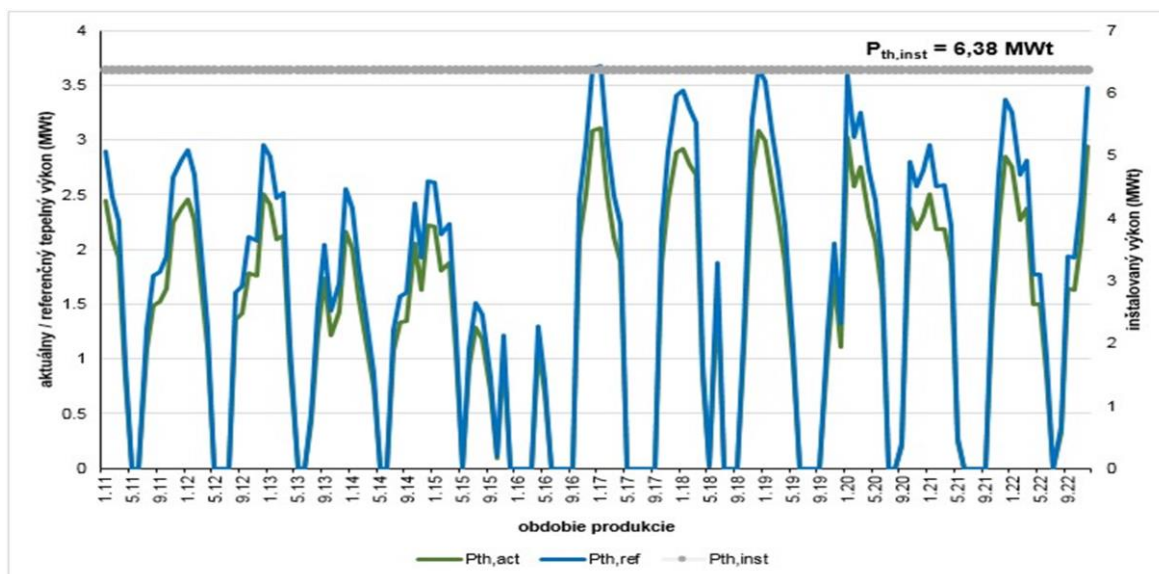
Produkcia tepelnej energie EQ_{act} (TJ) vyjadruje množstvo tepla dodávaného geotermálnym vrtom do systému pri jeho aktuálnych podmienkach a kumulatívnej produkcii na mesačnej, respektíve ročnej báze Q_{cum} (m^3), pričom je vyjadrená voči teplote zneškodnenia /2.6/

$$EQ_{act} = \frac{Q_{cum} \cdot c_{wh} \cdot \rho_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{out})}{10^{12}} \quad /2.6/$$

Ideálne varianty produkcie geotermálnej energie a produkcie tepelnej energie v zmysle definícií Medzinárodnej geotermálnej asociácie vychádzajú z:

- produkcie geotermálnej energie pri inštalovanom výkone v režime 24/7/365 pre E_{TH}
- produkcie geotermálnych vôd na úrovni Q_{pv} v režime 24/7/365 pre EQ .

PRÍKLAD 2.4: Rozdiel medzi inštalovaným, referenčným, a aktuálnym tepelným výkonom na príklade geotermálneho vrtu FGG-2 Galanta (Centrálna depresia Podunajskej panvy), Slovensko v zapojení na centrálne zásobovanie teplom. Upravené podľa: Fričovský et al. (2024)



Vrt FGG-2 v Galante podporuje systém centrálneho zásobovania teplom v hybridnom usporiadaní. Z grafu je zrejme rozkolísanie aktuálneho a teda aj referenčného tepelného výkonu vrtu v závislosti na klimatických pomeroch, a teda podľa energetických potrieb vykurovacieho systému. Je evidentné, ako geotermálny vrt reflektuje vykurovacie obdobia, kým v letných mesiacoch je odstavený. Naproti tomu inštalovaný výkon geotermálneho vrtu, nezávislý na externých faktoroch, ostáva konštantný v čase.

PRÍKLAD 2.5: Jednoduchý odhad energetických parametrov projektu pre priame využitie zdrojov geotermálnej energie

ZADANIE: Vrt Vr-2 Vrbov má overené množstvá geotermálnych vôd $Q_{pv} = 31,76 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, pri teplote $T_{wh} = 59 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($C_{wh} = 4124,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\rho_{wh} = 962,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). V roku 2019 pracoval v režime 365 dní v roku, s teplotou zneškodnenia $T_{out} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a referenčnou teplotou $T_{ref} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Kumulatívne odbery za rok predstavujú $725\,548 \text{ m}^3$, ideálne odbery 1040688 m^3 . Z uvedených parametrov vyjadrite:

- priemerný aktuálny tepelný výkon $P_{th,act}$
- referenčný tepelný výkon $P_{th,ref}$
- inštalovaný výkon $P_{th,inst}$
- produkciu geotermálnej energie v roku 2019 $E_{TH,act}$
- produkciu tepelnej energie v roku 2019 EQ_{act}

VÝPOČTY PARAMETROV: Energetické parametre vrtu na základe vstupných údajov vieme vyjadriť vzťahmi /2.2/ až /2.6/:

$$P_{th,inst} = Q_{pv} \cdot c_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{ref}) = 31,76 \cdot 4124,8 \cdot (59 - 15) = 5,76 \text{ MWt}$$

$$P_{th,ref} = Q_{act} \cdot c_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{ref}) = 22,15 \cdot 4124,8 \cdot (59 - 15) = 4,01 \text{ MWt}$$

$$P_{th,act} = Q_{act} \cdot c_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{out}) = 22,15 \cdot 4124,8 \cdot (59 - 20) = 3,56 \text{ MWt}$$

$$E_{TH,act} = \frac{P_{th,act} \cdot 24 \cdot t_{prod} [d]}{10^3} = \frac{3,56 \cdot 24 \cdot 365}{10^3} = 31,2 \text{ GWh}_t$$

$$EQ_{act} = \frac{Q_{cum} \cdot c_{wh} \cdot \rho_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{out})}{10^{12}} = \frac{725548 \cdot 4124,8 \cdot 962,55 \cdot (59 - 20)}{10^{12}} = 112,35 \text{ TJ}$$

2.2.5.2 Indikátory produkcie a produktivity

Základné zaťaženie / základný dopyt / základný výkon (base load) predstavuje minimálnu energetickú požiadavku na energetický systém, ktorý musí byť schopný zabezpečiť v režime 24/7/365 v stabilných dodávkach. Jednou z rozhodujúcich výhod zdrojov geotermálnej energie je ich nezávislosť na externalitách (slnečný svit, smer a rýchlosť vetra, dodávky paliva) a ako v prípade priameho, tak nepriameho využitia tak poskytujú stabilný energetický zdroj, s potenciálom dlhodobej produkcie v prípade, ak je zodpovedne optimalizovaná produkcia. Schopnosť zdrojov geotermálnej energie poskytovať základný výkon je opakovane využívaná v hybridných systémoch založených na kombinácii geotermálnej energie s fosílnymi zdrojmi (napríklad geotermálna voda + zemný plyn) alebo alternatívnymi zdrojmi (napríklad geotermálna voda + solárne PV alebo solár-termál).

Špičkové zaťaženie / špičkový dopyt / špičkový výkon (peak load) predstavuje na základe energetických výpočtov, alebo dlhodobých meraní, maximálnu energetickú spotrebu koncových zákazníkov, ktorá, na rozdiel od špičkového výkonu, je závislá na sezónnych požiadavkách, alebo externalitách, ako sú denné ľudské cykly zvýšeného odberu (napríklad v pracovný týždeň ráno – príprava do práce, školy; respektíve večer – príchod z práce, zo školy). Zdroje geotermálnej energie môžu byť schopné pokrývať aj základný, aj špičkový výkon, predovšetkým ale v priamych spôsoboch využitia. Systémy geotermálnych elektrární nie sú technicky usporiadané na variácie v špičkovom výkone. Zároveň predovšetkým dvojité fáza má špecifické podmienky, pri ktorých je transportovaná ku separátorom a expanzným staniciam, a skokové zmeny v produkovaných množstvách by tak mohli viesť ku nehodovým udalostiam zapríčineným zmenami tlakov v produktovodoch, alebo záťažach separačných a expanzných staníc.

Aktuálny faktor využitia CF (-) vyjadruje podiel aktuálnej produkcie geotermálnej energie v danom časovom období voči produkcii geotermálnej energie za ideálnych podmienok ($t_{\text{prod}} = 365$ dní v roku respektíve 8760 h) pri inštalovanom výkone /2.7/:

$$CF = \frac{P_{\text{th,act}} \cdot 24 \cdot t_{\text{prod}} [d]}{P_{\text{th,inst}} \cdot 8760} = \frac{E_{\text{TH,act}} \cdot 10^{-3}}{P_{\text{th,inst}} \cdot 8760} \quad /2.7/.$$

Faktor aktuálneho výkonu ACF (-) vyjadruje podiel priemerovaného ročného aktuálneho výkonu geotermálnych vrtov voči ich inštalovanému výkonu /2.8/. Ide o indikátor jednoduchého využitia energetického potenciálu toho-ktorého geotermálneho vrtu bez zváženia časovej zložky:

$$ACF = \frac{P_{th,act}}{P_{th,inst}} \quad /2.8/.$$

Faktor produktivity PF (-) predstavuje pomer medzi aktuálnym ročným časom využívania geotermálnych vrtov a časom jeho celoročnej konštantnej prevádzky. Poukazuje tak na sezónnosť a jej variabilitu pri rôznych klimatických podmienkach /2.9/:

$$PF = \frac{t_{prod}[d].24}{8760} \quad /2.9/.$$

Faktor špičkového využitia LF (-) vyjadruje pomerom priemerného mesačného aktuálneho výkonu $P_{th,act(im)}$ (MWt) voči maximálnemu mesačnému aktuálnemu výkonu $P_{th,act(m,max)}$ mieru časovej stability tepelného výkonu produkujúceho geotermálneho vrtu /2.10/:

$$LF = \frac{P_{th,act(m,avg)}}{P_{th,act(m,max)}} = \frac{P_{th,act(m,avg)}}{P_{th,peak}} \quad /2.10/.$$

Faktor špičkového zaťaženia UF (-) vyjadruje mieru energetického využitia produkujúceho geotermálneho vrtu pri jeho špičkovom výkone voči maximálnemu, inštalovanému tepelno-energetickému výkonu vrtu $P_{th,inst}$ /2.11/. Keďže s nárastom UF sa špičkový výkon približuje inštalovanému výkonu, faktor špičkového zaťaženia vyjadruje mieru energetickej rezervy geotermálneho vrtu pri jeho maximálnom využití s ohľadom na energetický potenciál:

$$UF = \frac{P_{th,peak}}{P_{th,inst}} \quad /2.11/.$$

2.2.5.3 Indikátory účinnosti a efektívnosti produkcie

Indikátory účinnosti a efektívnosti produkcie sú zamerané na hodnotenie energetickej spotreby produkovaného zdroja geotermálnej energie, a to ako na strane vstupu (geotermálny vrt) tak aj na strane výstupu (infraštruktúra).

Energetická účinnosť η_p (-) je pomer medzi aktuálne dodávaným tepelno-energetickým výkonom vrtu a množstvom geotermálnej energie odoberanej zo systému opísanom referenčným tepelno-energetickým výkonom, pričom vo všeobecnosti vyjadruje teplotné straty systému v dôsledku rôzne optimalizovanej produkčnej sústavy /2.12/:

$$\eta_p = \frac{P_{th,act}}{P_{th,ref}} \quad /2.12/.$$

Tepelná účinnosť η_{th} (-) je jedným z najjednoduchších parametrov pre termodynamické hodnotenie účinnosti využívania zdrojov geotermálnej energie, pričom všeobecne vyjadruje pomer medzi teplom dodaným do systému, a teplom produkovaným systémom. Tepelná účinnosť sa viaže alebo na konkrétny projekt (v tom prípade je T_C teplota geotermálnej vody opúšťajúca poslednú výmenníkovú sústavu pred zneškodnením), alebo na jeho časti (v tom prípade je teplota T_H počítaná vždy na vstupe do konkrétneho výmenníka tepla a T_C na výstupe z konkrétneho výmenníka tepla /2.13/. Pri posudzovaní geotermálnych elektrární vie byť tepelná účinnosť využitá len pre hodnotenie binárnych projektov, ako funkcia vzťahu teploty na vstupe do evaporátora a dosiahnutá teplota odparovania /2.14 a 2.15/

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out} \cdot t_{prod}}{\left[m_{wh} \cdot c_{wh} \cdot \rho_{wh} \cdot (T_H - T_C) \right] \cdot t_{prod}} \quad /2.13/$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{W}{Q_{in}} = 1 - \frac{2,47 \cdot m_{wh} \cdot \left(\frac{T_H - T_C}{T_H + T_C} \right) \cdot (T_H - T_L)}{\left[m_{wh} \cdot c_{wh} \cdot \rho_{wh} \cdot (T_H - T_C) \right] \cdot t_{prod}} \quad /2.14/$$

$$\eta_{th} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad /2.15/.$$

Termodynamická účinnosť ϵ_{UT} (-) vyjadruje účinnosť premeny (konverzie) medzi tepelnou energiou na vstupe do elektrárne a elektrickou energiou na výstupe z elektrárne /2.16/, respektíve účinnosť medzi odovzdávaním tepla v rámci výmenníkov pri priamom využití geotermálnej energie /2.17/. Keďže vyjadruje účinnosť na základe termodynamických parametrov, špecifickej entalpie, špecifickej entropie, a špecifickej exergie, ktoré sú funkcie nielen teploty, ale zároveň aj tlaku, umožňuje termodynamická účinnosť následné analýzy vychádzajúce z celého vedného odboru exergoekonomiky

$$\varepsilon_{ut} = \frac{W_{net}}{E_{in}} = \frac{m_s \cdot \eta_T \cdot (h_{T,in} - h_{T,out})}{m_{wh} \cdot [h_{wh} - h_0 - T_0 (s_{wh} - s_0)]} \quad /2.16/$$

$$\varepsilon_{ut} = \frac{Ex_{hex}}{Ex_{in}} = \frac{m_{hf} \cdot [h_{hex} - h_{cold} - T_{cold} (s_{hex} - s_{cold})]}{m_{wh} \cdot [h_{wh} - h_0 - T_0 (s_{wh} - s_0)]} \quad /2.17/.$$

Index termodynamického potenciálu IP (-) vyjadruje potenciál, ktorý má zdroj geotermálnej energie po jeho využití k dispozícii pre konanie termodynamicky výhodnej a účinnej práce /2.18/ (konverzie, odovzdávania tepla), respektíve projekt /2.19/ vychádzajúc zo skutočnosti, že ten klesá s tým, ako sa zvyšuje termodynamická účinnosť, a teda ako sa maximalizuje rozdiel medzi termodynamickou kvalitou zdroja na vstupe a výstupe zo systému

$$IP = (1 - \varepsilon_{ut}) \cdot (Ex_{in} - Ex_{out}) \\ = (1 - \varepsilon_{ut}) \cdot \{m_{wh} \cdot [h_{wh} - h_0 - T_0 (s_{wh} - s_0)] - m_{out} \cdot [h_{out} - h_0 - T_0 (s_{out} - s_0)]\} \quad /2.18/$$

$$IP = (1 - \varepsilon_{ut}) \cdot (Ex_{in} - Ex_{out}) \\ = (1 - \varepsilon_{ut}) \cdot \{m_{wh} \cdot [h_{wh} - h_0 - T_0 (s_{wh} - s_0)] - m_{hf} \cdot [h_{hex} - h_{cold} - T_{cold} (s_{hex} - s_{cold})]\} \quad /2.19/.$$

Termodynamický index udržateľnosti SI (-) vychádza z termodynamической účinnosti využívania zdroja geotermálnej energie, alebo výkonnosti konkrétneho projektu /2.20/ a základnej premisy, podľa ktorej jedným z kritických pilierov je zvyšovanie termodynamической účinnosti energetických projektov a využívania energetických zdrojov

$$SI = \frac{1}{(1 - \varepsilon_{ut})} \quad /2.20/$$

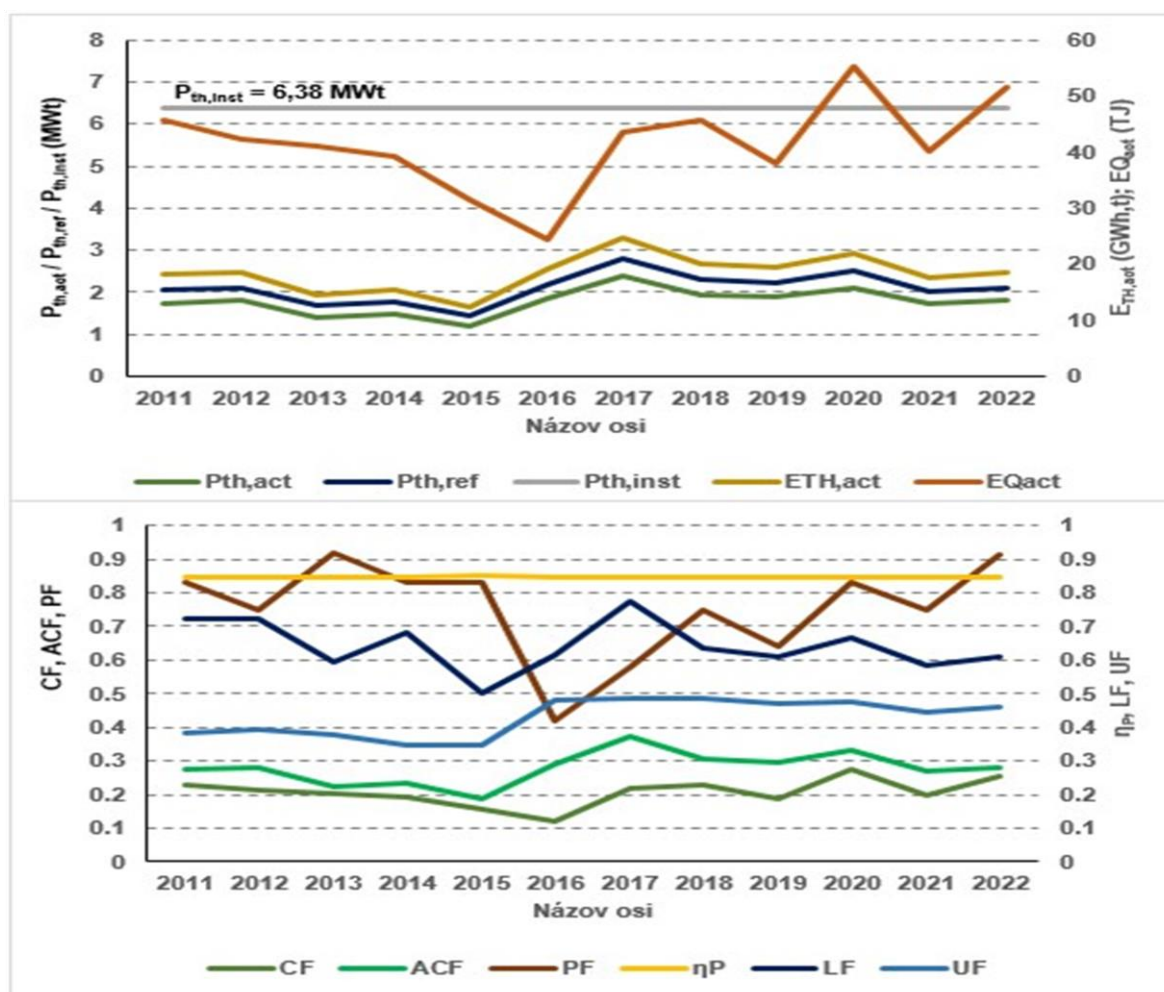
Tabuľka 2.4 Zoznam symbolov a skratiek využitých vo funkčných vzťahoch v kapitole 2 a kapitole 6

symbol	jednotka	vysvetlivka
A	m ²	plocha rezervoárového prostredia
A _e	m ²	vymedzená efektívna plocha (anomálie) rezervoárového prostredia
ACF	-	faktor aktuálneho výkonu
C _m	kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	špecifická tepelná kapacita horninového prostredia v rezervoári
C _w	kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	špecifická tepelná kapacita geotermálnej vody v rezervoári
C _{wh}	kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹	špecifická tepelná kapacita geotermálnej vody na ústí vrtu
CF	-	aktuálny faktor využitia geotermálnej energie
E ₀	J	dostupné množstvo geotermálnej energie
E _{in}	MW	práca na vstupe do systému / energia na vstupe do systému
E _F	J	celkové množstvo tepelnej energie rezervoárového média
E _M	J	celkové množstvo tepelnej energie v rezervoárovej hornine
E _S	J	celkové množstvo tepelnej energie parnej frakcie
E _T	J	celkové množstvo tepelnej energie v rezervoári
E _W	J	celkové množstvo tepelnej energie vodnej zložky
E _{TH,act}	J	aktuálna produkcia geotermálnej energie
E _{Q,act}	J	aktuálna produkcia geotermálnej energie
E _{X,hex}	MW	exergetický výkon výmenníkovej sústavy
E _{X,in}	MW	exergetický výkon zdroja geotermálnej energie do výmenníkov
h	kJ.kg ⁻¹	špecifická entalpia
h ₀	kJ.kg ⁻¹	špecifická entalpia v definovanom referenčnom stave
h _{T,in}	kJ.kg ⁻¹	špecifická entalpia na vstupe do turbíny
h _{T,out}	kJ.kg ⁻¹	špecifická entalpia na výstupe z turbíny
h _{wh}	kJ.kg ⁻¹	špecifická entalpia zdroja geotermálnej energie na ústí vrtov
H ₀	W	energetická báza
IP	-	index termodynamického potenciálu
LF	-	faktor špičkového využitia
m _{wh}	kg.s ⁻¹ , m ³ .s ⁻¹	produktivita na ústí geotermálnych vrtov
m _S	kg.s ⁻¹ , m ³ .s ⁻¹	produktivita geotermálnej pary na vstupe do turbíny
P _i	MW(t,e)	bilančné množstvá geotermálnej energie
P _{th,act}	MW(t,e)	aktuálny energetický výkon
P _{th,inst}	MW(t,e)	inštalovaný výkon (vrtov) / overené množstvá geotermálnej energie
P _{th,ref}	MW(t,e)	referenčný tepelný výkon na referenčnú teplotu T _{ref}
P _{th(D)}	MW(t,e)	udržateľný potenciál rozvoja aktuálnej produkcie geotermálnej energie
P _{th(D*)}	MW(t,e)	udržateľný potenciál rozvoja inštalovaného výkonu
P _{th(S)}	MW(t,e)	kritická udržateľná rezervoárová kapacita
P _{th,(c)}	MW(t,e)	kritická produkcia geotermálnej energie pre dané r _{cap}
P _D	MW(t,e)	potenciál (udržateľného) rozvoja produkcie geotermálnej energie
P _E	MW(t,e)	ekonomický potenciál zdrojov geotermálnej energie
P _M	MW(t,e)	teoretický potenciál zdrojov geotermálnej energie
P _S	MW(t,e)	udržateľný potenciál zdrojov geotermálnej energie
P _T	MW(t,e)	technický potenciál zdrojov geotermálnej energie
PF	-	faktor produktivity
q ₀	W.m ⁻²	hustota tepelného toku na stope rezervoárového prostredia
q _S	W.m ⁻²	hustota tepelného toku na povrchu územia
Q _{act}	l.s ⁻¹ , kg.s ⁻¹ , m ³ .s ⁻¹	aktuálne produkované množstvá geotermálnych vôd
Q _{cum}	m ³ .s ⁻¹	kumulatívna produktivita za sledované obdobie
Q _{in}	J	energia na vstupe do systému
Q _{max}	l.s ⁻¹ , kg.s ⁻¹ , m ³ .s ⁻¹	maximálne produkované množstvá geotermálnych vôd
Q _{out}	J	energia na výstupe zo systému / produkovaná energia
Q _{prod}	kg.s ⁻¹ , m ³ .s ⁻¹	produkované množstvá geotermálnych vôd
Q _{pv}	l.s ⁻¹ , kg.s ⁻¹ , m ³ .s ⁻¹	overené množstvá (produktivita) geotermálnych vôd podľa HDS
Q _{HEX}	J, W	tepelný výkon výmenníkovej sústavy
r _{cap}	-	koeficient kapacity zásob geotermálnej energie
r _{cap(S,40,100)}	-	koeficient udržateľnosti rozvoja aktuálnej produkcie GTE

Tabuľka 2.4 Zoznam symbolov a skratiek využitých vo funkčných vzťahoch v kapitole 2 a kapitole 6

symbol	jednotka	vysvetlivka
$\Gamma_{cap}(S^*,40,100)$	-	koeficient udržateľnosti rozvoja maximálnej produkcie GTE
$\Gamma_{cap}(U,40,100)$	-	koeficient udržateľnosti aktuálnej produkcie geotermálnej energie
$\Gamma_{cap}(U^*,40,100)$	-	koeficient udržateľnosti maximálnej produkcie geotermálnej energie
R_0	-	koeficient dostupnosti geotermálnej energie
R_{inf}	MW(t,e)	predpokladané (indikované) zásoby geotermálnej energie
R_{pb}	MW(t,e)	pravdepodobné zásoby geotermálnej energie
R_{pv}	MW(t,e)	overené zásoby geotermálnej energie
RE_T	MW(t,e)	celkové zásoby geotermálnej energie
RS_T	MW(t,e)	celkové zdroje geotermálnej energie
s	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	špecifická entropia
s_0	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	špecifická entropia v definovanom referenčnom stave
s_{cold}	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	špecifická entropia geotermálnej vody na výstupe z výmenníkov
s_{hex}	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	špecifická entropia geotermálnej vody na vstupe do výmenníkov
s_{wh}	$\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	špecifická entropia zdroja geotermálnej energie na ústí vrtov
S_w	-	saturácia rezervoárového prostredia vodnou zložkou
SE_{xI}	-	index špecifickej exergie
SI	-	termodynamický index udržateľnosti
t_{prod}	s	čas produkcie
T_0	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota definovaného referenčného stavu
T_{inj}	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota reinjektáže
T_{out}	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota na výstupe z výmenníkovej / projektovej sústavy
T_{ref}	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	referenčná teplota
T_{res}	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	rezervoárová teplota
T_{wh}	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota na ústí produkčných vrtov
T_C	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota geotermálnej vody na výstupe zo systému
T_H	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota geotermálnej vody na vstupe do systému
T_L	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota na výstupe zo systému pracovného média
T_S	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota aktívneho povrchu pôdy
TTP	MW(t,e)	celkový tepelno-energetický potenciál
$TTP_{(p)}$	MW(t,e)	pravdepodobný tepelno-energetický potenciál
$TTP_{(s)}$	MW(t,e)	kumulatívny udržateľný potenciál geotermálnej energie
UF	-	faktor špičkového zaťaženia
W	MW	vykonaná práca
W_{net}	MW	energetický výkon
γ_t	$\text{kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	celková špecifická tepelná kapacita rezervoárového média
γ_{wh}	$\text{kJ.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	celková špecifická tepelná kapacita na ústí produkčných vrtov
Δz	m	hrúbka rezervoárového prostredia
Δz_e	m	hrúbka rezervoárového prostredia v efektívnej ploche
ε_{UT}	-	termodynamická účinnosť
ρ_w	kg.m^{-3}	hustota horniny v rezervoárovom prostredí
ρ_w	kg.m^{-3}	hustota geotermálnej vody v rezervoárovom prostredí
ρ_{wh}	kg.m^{-3}	hustota geotermálnej vody na ústí produkčných vrtov
η_{th}	-	tepelná účinnosť
η_p	-	energetická účinnosť
η_T	-	celková účinnosť elektrárne
ϕ	-	pórovitosť horninového prostredia
ϕ_e	-	pórovitosť horninového prostredia v efektívnej ploche

PRÍKLAD 2.6: Vývoj vybraných faktorov produkcie a produktivity v čase. Príklad vrtu FGG-2 Galanta (pokračovanie Príkladu 2.4). Upravené podľa: Fričovský et al. (2024)



Reálne priemery výpočtov faktorov produkcie a produktivity na vrte FGG-2 Galanta poukazujú na ich časovú variabilitu v priebehu monitorovacieho obdobia 2011-2022 (dole) v porovnaní s produkčnými charakteristikami (hore). Z uvedeného vyplýva, podobne ako v Príklade 2.4), že aj priemerná ročná, aj mesačná, respektive denná produktivita vrtov, a jej prejavy v odvodených faktorov, sú výrazne premenlivé. Z grafov je napríklad evidentná korelácia medzi PF (reálny / ideálny čas produkcie) a produkovanými množstvami geotermálnej energie ($E_{TH,act}$) a tepla (EQ_{act}). Práve z vyjadrenia PF vyplýva, že v sledovanom období bola priemerná doba reálnej produkcie 75 % v rozptyle 42 - 92 % dní produkcie v roku, čo ďaleko prevyšuje aj množstvo vykurovacích dní. Od roku 2016 je možné pozorovať návrat na intenzitu z roku 2011, čo najmä v poslednom čase môže reflektovať zvyšovanie podielu geotermálnej energie v inak hybridnom (geotermál - zemný plyn) centralizovanom systéme zásobovania tepla pre mesto Galanta. Faktor špičkového využitia LF, ktorý porovnáva mesačné priemerné a maximálne výkony dlhodobo osciluje v pásme 0,6 - 0,7, čo znamená, že geotermálny vrt pracuje v pomerne vyváženom režime, a teda existuje možnosť zvýšenia jeho energetickej produktivity o 15 - 20 %. Lokálne ročné maximá sa približne od roku 2015 zvýšili na úroveň $UF = 0,5$, čo odráža potenciál rozvoja produkcie. S tým súvisí aj stabilný, kvázi lineárny vývoj energetickej účinnosti $\eta_P = 0,84 - 0,85$, čo je odrazom približovania sa teploty zneškodnenia (opustenia projektovej siete) referenčnej teploty. Je potrebné dodať, že vrt nie je využívaný v dubletovom systéme, a geotermálna voda je povrchovo zneškodňovaná.

PRÍKLAD 2.7: Príklad výpočtu základných termodynamických parametrov geotermálneho projektu priameho využitia geotermálnej energie s jedným stupňom využívania a jednou výmenníkovou stanicou tepla (vrt Vr-2 Vrbov pre rok 2019, pokračovanie príkladu 2.5). Údaje z hospodárstva sú fiktívne.

ZADANIE: Predpokladajme, že výmenník tepla pre chov rýb pracuje v režime 365 dní v roku presne tak, ako vrt, ktorý ho zásobuje energeticky. Z energetických výpočtov ešte vyplýva:

i) pre vrt Vr-2: $m_{wh} = 22,15 \text{ kg/s}$ alebo $0,02215 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_{wh} = 246,7 \text{ kJ/kg}$, $s_{wh} = 0,798$, $T_{out} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{out} = 83,95 \text{ kJ/kg}$, $s_{out} = 0,30 \text{ kJ/kgK}$

ii) pre výstup z výmenníka: $m_{hex} = 14,75 \text{ kg/s}$ alebo $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$, $T_{hex} = 42 \text{ }^\circ\text{C}$, $c_{hex} = 4109 \text{ kJ/kgK}$, $\rho_{hex} = 975 \text{ kg/m}^3$, $h_{hex} = 175,5 \text{ kJ/kg}$, $s_{hex} = 0,59 \text{ kJ/kgK}$

iii) pre výstup z hospodárstva: $T_{cold} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $h_{cold} = 154,7 \text{ kJ/kg}$, $s_{cold} = 0,52 \text{ kJ/kgK}$

iv) z priemerných mesačných výkonov vyplýva maximum $P_{th,peak} = 3,89 \text{ MWt}$.

Z uvedených údajov vypočítajte:

a) faktory produkcie a produktivity /2.7/ až /2.11/

b) indikátory účinnosti a efektívnosti produkcie /2.12/ až /2.20/

c) uveďte aspoň 2 možnosti, ako zvýšiť účinnosť geotermálneho projektu

VÝPOČTY: Pre vyjadrenie požadovaných parametrov je nevyhnutné správne dosadiť do modelových výrazov /2.7/ až /2.20/, následne sú výpočty indikátorov priamočiare:

$$CF = \frac{P_{th,act} \cdot 24 \cdot t_{prod}[d]}{P_{th,inst} \cdot 8760} = \frac{3,56 \cdot 24 \cdot 365}{5,76 \cdot 8760} = 0,61$$

$$ACF = \frac{P_{th,act}}{P_{th,inst}} = \frac{3,56}{5,76} = 0,61$$

$$PF = \frac{t_{prod}[d] \cdot 24}{8760} = \frac{24 \cdot 365}{8760} = 1$$

$$LF = \frac{P_{th,act(m,avg)}}{P_{th,peak}} = \frac{3,56}{3,89} = 0,91$$

$$UF = \frac{P_{th,peak}}{P_{th,inst}} = \frac{3,89}{5,76} = 0,68$$

$$\eta_p = \frac{P_{th,act}}{P_{th,ref}} = \frac{3,56}{5,76} = 0,62$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{HEX}}{Q_{in}} = 1 - \frac{[m_{hex} \cdot c_{hex} \cdot \rho_{hex} \cdot (T_{hex} - T_{cold})]}{[m_{wh} \cdot c_{wh} \cdot \rho_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{out})]} = \frac{[0,015 \cdot 4109 \cdot 975 \cdot (42 - 37)]}{[0,022 \cdot 4125 \cdot 963 \cdot (59 - 20)]} = 1 - \frac{0,3}{3,42} = 0,91$$

$$\varepsilon_{ut} = \frac{Ex_{hex}}{Ex_{in}} = \frac{m_{hex} \cdot [h_{hex} - h_{cold} - T_{cold}(s_{hex} - s_{cold})]}{m_{wh} \cdot [h_{wh} - h_0 - T_0(s_{wh} - s_0)]} = \frac{14,66 \cdot [175,5 - 154,7 - 310(0,58 - 0,52)]}{22,15 \cdot [247,7 - 83,9 - 293(0,798 - 0,3)]} = \frac{32}{371} = 0,09$$

$$IP = (1 - \varepsilon_{ut}) \cdot (Ex_{in} - Ex_{out}) = (1 - 0,09) \cdot (371 - 32) = 308$$

$$SI = \frac{1}{(1 - \varepsilon_{ut})} = \frac{1}{(1 - 0,09)} = 1,099$$

c) z výsledkov termodynamických indikátorov je zrejmé, že „problém“ je v tomto prípade na strane odoberateľa – geotermálneho projektu, preto ako možné riešenia (okrem iných) je možné navrhovať napríklad:

- zvýšiť energetický odber v danom výmenníkovom stupni (navýšením obehových množstiev pracovnej látky m_{hex})
- znížiť teplotu na výstupe z projektu T_{cold} väčším ochladením.

3 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIÍ VYUŽÍVANIA GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

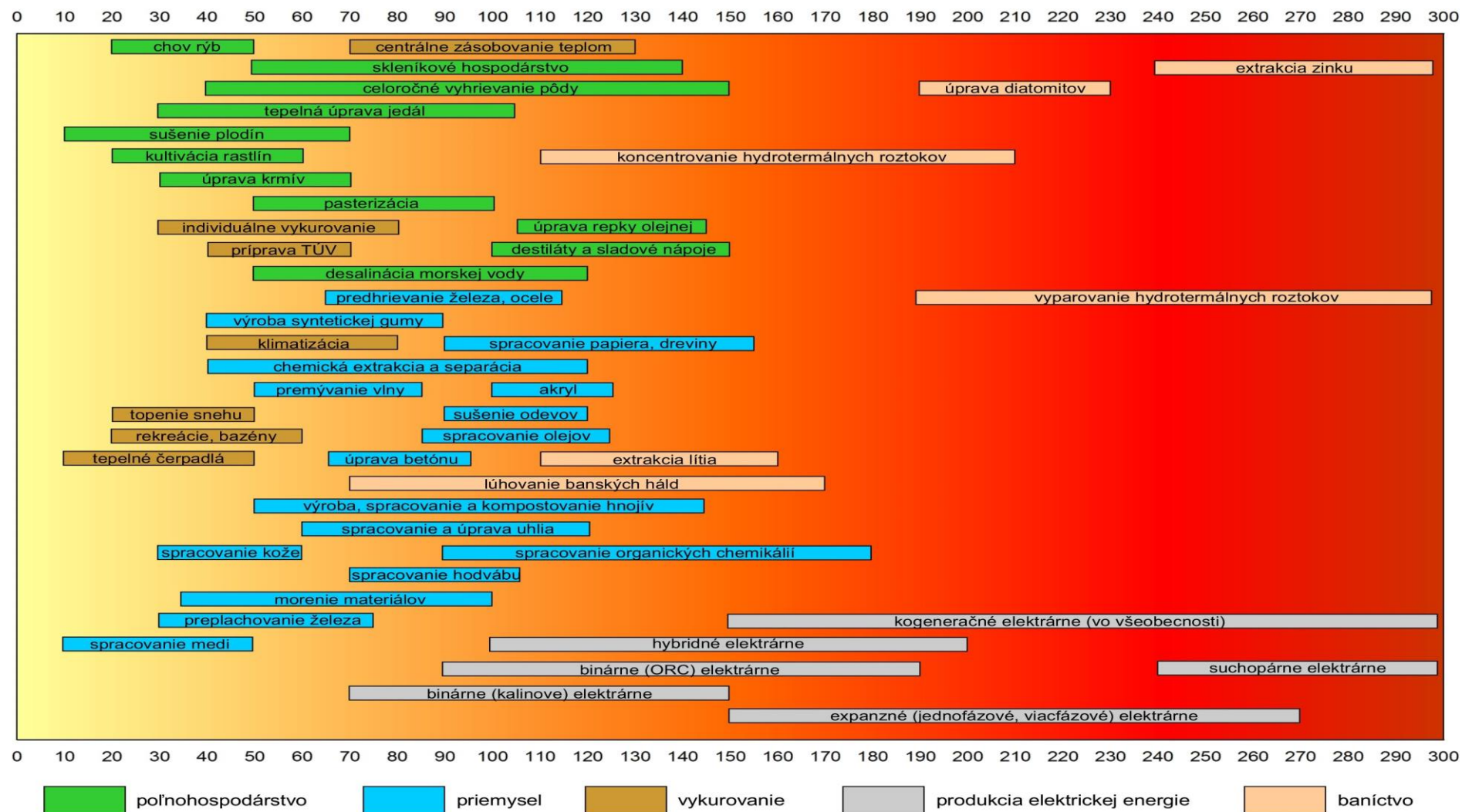
Geotermálna energia je v zmysle definície (Kapitola 2) synonymum slova teplo, respektíve **tepelná energia**, ktorá je akumulovaná, alebo prechádza geologickým prostredím (pre zjednodušenie v zemskej kôre, respektíve jej vrchných častiach, ktoré sú ekonomicky využiteľné). Možnosti jej ekonomicky a technologicky efektívneho využitia potom vychádzajú zo vzťahu povahy zdroja (geotermálna energia) – povahy produktu / odoberateľa – a procesov, ktoré medzi zdrojom a odoberateľom musia prebehnúť.

Podľa spomenutého vzťahu existujú dva základné spôsoby využitia geotermálnej energie (ROSEN – FAYEGH, 2017):

- **priame využitie geotermálnej energie** (ang. direct use) = produkcia tepelnej energie z tepelnej energie = bez potreby energetickej / termodynamickej konverzie medzi energetickými formami = všetky spôsoby využitia geotermálnej energie, pri ktorých je produktom tepelná energia (vykurovanie, vyhrievanie) alebo je benefit získaný z tepelnej a chemickej povahy (chemického zloženia) produkovaných zdrojov geotermálnej energie (baníctvo, hutníctvo, priemysel, poľnohospodárstvo, chemický priemysel, spracovanie materiálov)
- **nepriame využitie geotermálnej energie** (ang. indirect use / power production) = produkcia elektrickej energie z tepelnej energie = nevyhnutné procesy energetickej konverzie .

Možnosti využívania zdrojov geotermálnej energie, ak ide o jej prirodzený potenciál, sú kontrolované, pričom pravdepodobne ikonickým diagramom vzťahu potenciál - možnosti (Obr. 3.1) je pravdepodobne Lindalova schéma (LINDAL, 1973; GLASSLEY, 2015):

- fázová povaha zdrojov geotermálnej energie (geotermálna voda, geotermálna voda a na ňu viazané, alebo voľné termodynamické formy parnej frakcie)
- rezervoárová teplota a teplota respektíve entalpia (pri dvoj-fázových zdrojoch a pare) produkovaného média a termodynamická kvalita
- produktivita / výdatnosť zdroja
- chemické zloženie zdrojov geotermálnej energie.



Obrázok 3.1 Modifikovaná Lindalova schéma. Upravené podľa: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

Zásadným problémom zobrazenia Lindalovej schémy je fakt, že vychádza z dynamickej premennej – teploty, a nie z termodynamickej kvality zdroja geotermálnej energie. Totiž potenciál, aj energetická kvalita a možnosti využitia zdroja geotermálnej energie pri teplote 120 °C sa líšia (LEE, 1996, 2001), podľa toho, či ide o:

- 1-fázovú geotermálnu vodu (pri extrémne vysokých tlakoch) – do úvahy prichádzajú len priame spôsoby využitia, eventuálne binárna produkcia geotermálnej energie
- geotermálnu vodu s neekonomickým podielom vlhkej pary – do úvahy prichádzajú len priame spôsoby využitia, eventuálne binárna produkcia geotermálnej energie
- geotermálnu vodu s ekonomickým podielom vlhkej pary – do úvahy prichádza aj expanzná, aj binárna produkcia geotermálnej energie a priame spôsoby využitia.

Ešte komplikovanejšie, respektíve zrádnejšie, je spoliehanie sa na Lindalovu schému pri vyšších teplotách, a najmä v prípadoch, keď ide o rezervoáre s dvojistou fázou, kedy prirodzene v rámci rezervoáru, alebo produkčných vrtov dochádza k spontánnemu oddeleniu geotermálnej vody a geotermálnej pary, respektíve formovaná geotermálna para má rôznu termodynamickú kvalitu (entalpiu, exergiu, chemické zloženie, vlhkosť) = potenciál využitia (DIPIPPO, 1999, 2005, 2015, 2016; DOMANSKI ET AL., 2015):

- 2-fázové zdroje s prevahou geotermálnej vody a nízkou termodynamickou kvalitou pary = binárne elektrárne, viacstupňové expanzné elektrárne nízkeho inštalovaného výkonu do 20 MWe s viacstupňovým odvlhčovaním
- 2-fázové zdroje s prevahou geotermálnej vody a dostatočnou termodynamickou kvalitou pary = viacstupňové expanzné elektrárne s inštalovaným výkonom 20 – 100 MWe s veľkosťou inštalovaného výkonu v závislosti na celkovej produktivite
- 2-fázové zdroje s prevahou geotermálnej pary a nízkou termodynamickou kvalitou pary = jednostupňové expanzné elektrárne nízkeho výkonu do 50 MWe, dvojstupňové / viacstupňové expanzné elektrárne s viacstupňovým odvlhčovaním
- 2-fázové zdroje s prevahou geotermálnej pary a dostatočnou termodynamickou kvalitou pary = jednostupňové expanzné elektrárne s inštalovaným výkonom v závislosti na celkovej produktivite.

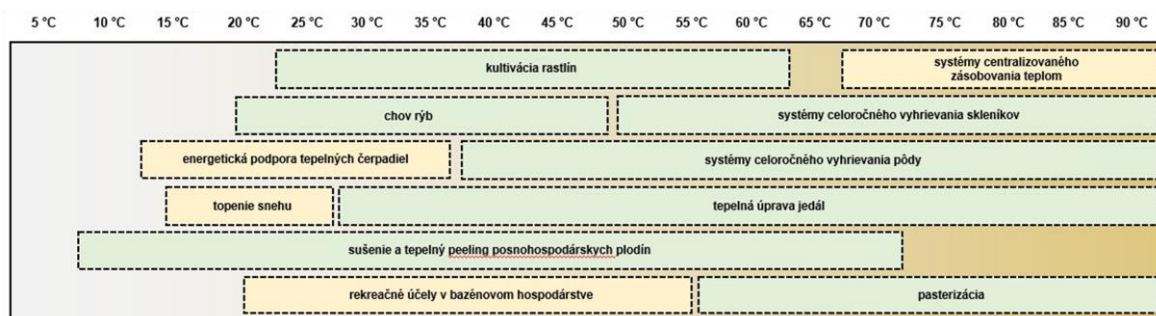
Z toho vyplýva, že **Lindalova schéma ako taká je aplikovateľná viacmenej len pre zdroje geotermálnej energie = geotermálne vody, prípadne, obmedzene, pre geotermálne vody s viazanou vlhkou parnou fázou**. Zároveň ale schéma nezohľadňuje:

- produktivitu zdroja
- chemické zloženie
- termodynamickú kvalitu geotermálnej vody, ktorá môže ovplyvňovať procesy tepelnej výmeny vo výmenníkoch tepla.

Samotné **čítanie** Lindalovej schémy (Príklad 3.1) sa musí pri posudzovaní energetického potenciálu zdrojov geotermálnej energie riadiť niekoľkými princípmi (VALDIMARSSON, 2009; GLASSLEY, 2015)

- zobrazené teplotné intervaly predstavujú rozhranie optimálnych teplôt
- pri posudzovaní konkrétneho spôsobu využívania geotermálnej energie **teploty zdroja naľavo** (nižšie) znamenajú, že daný zdroj geotermálnej energie nemá energetický potenciál termodynamicky efektívne a účinne spĺňať energetické požiadavky daného spôsobu
- pri posudzovaní konkrétneho spôsobu využívania geotermálnej energie **teploty zdroja napravo** (vyššie) znamenajú, že využitie daného zdroja geotermálnej energie je pre zvolený spôsob termodynamicky neefektívne, a z pohľadu účinnosti a efektívnosti je potrebné hľadať riešenia s vyššou energetickou (termodynamickou) náročnosťou, a cielený spôsob následne využiť v kaskádovom stupni po (čiastočnom) ochladení zdroja geotermálnej energie
- schéma nezobrazuje prírodné, ale ani technické, sociologické, ekonomické, technologické, právne, ani environmentálne limity
- schéma počíta s absolútnymi teplotami, tzn. vie byť využitá pri optimalizovaní kaskádových systémov na základe predikcie, alebo pozorovania vývoja rezervoárovej teploty a rezervoárovej produkcie.

PRÍKLAD 3.1: Analýza uskutočniteľnosti projektov s využitím Lindalovej schémy.



ZADANIE: Hydrogeotermálny prieskum overil geotermálne vody s teplotou na ústí vrtu $T = 85^{\circ}\text{C}$, a podľa hydrodynamickej skúšky aj produktivitu $Q = 40 \text{ l.s}^{-1}$. Základným účelom prieskumu bola podpora centrálného zásobovania teplotou, s minimálnym výkonom 4 MWt výmenníkovej stanice pracujúcej s účinnosťou 90 %, s napojením na kaskádové systémy pre lokálne poľnohospodárstvo na druhom a turimus na treťom stupni v severnej časti Slovenska, keď ich odberové požiadavky sú zhodné po maximálne 2 MWt. Aké sú možnosti využívania zdroja geotermálnej energie?

RIEŠENIE: Ak príslušné parametre dosadíme do vzťahu /2.2/, požadovaný tepelný výkon nad 4 MWt pri 90 % účinnosti je možné dosiahnuť pri minimálnom spáde geotermálnej vody na 55°C (t.j. výstup z primárnej výmenníkovej stanice). Predpokladajme, že medzi prvým a druhým výmenníkom tepla nedôjde k ďalším teplotným stratám. Podľa Lindalovho diagramu z možností vypadáva pasterizácia a celoročné vyhrievanie skleníkov (teplota geotermálnej vody je na ľavom okraji teplotného intervalu a klesá tak tepelná účinnosť výmeny a efektívnosť). Ak ako okrajovú podmienku použijeme požadované 2 MWt, po opäťovnom dosadení do /2.2/ pri rovnakej účinnosti je teplota geotermálnej vody na výstupe z druhého stupňa maximálne 40°C , pričom využitia môže byť pre vyhrievanie pôdy, sušenie plodín alebo peeling, kultiváciu rastlín, prípadne chov rýb. Rovnaký postup zopakujeme pre tretí kaskádový stupeň. Optimálne 2 MWt je možné dosiahnuť, ak teplota geotermálnej vody na výstupe bude 25°C . Ide o hornú hranicu teploty pre povrchové zneškodnenie podľa legislatívy. Podľa Lindalovej schémy ale stále pripadá do úvahy aj energetická podpora tepelných čerpadiel, respektíve topenie snehu, ktoré podporuje aj poloha lokality.

3.1 Priame využitie geotermálnej energie

Priame využitie geotermálnej energie teda využíva tepelnú energiu pre produkciu tepelnej energie (a chladu) bez zapojenia konverzných systémov, ktoré by prevádzali termodynamickú premenu jednej formy energie na druhú. Zároveň sa k priamemu využitiu počítajú všetky procesy využívania chemického zloženia produkovaných zdrojov geotermálnej energie v segmente priemyslu, baníctva, alebo poľnohospodárstva.

Z pohľadu **kontaktu** medzi zdrojom geotermálnej energie a cieľom využitia, je možné rozlíšiť (VALDIMARSSON, 2009):

- **kontaktné (priame) technológie** = technológie, kedy dochádza ku priamemu kontaktu medzi zdrojom geotermálnej energie a koncovým cieľom / odoberateľom
 - napríklad: priame termálne bazény, lúhovanie banských hald geotermálnou vodou
- **nepriame technológie** = technológie, pri ktorých nedochádza ku priamemu kontaktu medzi zdrojom a cieľom / odoberateľom, a teda sú využívané výmenníky tepla
 - napríklad tepelné čerpadlá, podzemné výmenníky tepla, systémy individuálneho alebo centralizovaného zásobovania teplom, systémy ohrevu pôdy atp.

Priame využitie geotermálnej predstavuje v skutočnosti extrémne širokú škálu spôsobov a možností využívania geotermálnej energie

3.1.1 Segment centrálného a individuálneho zásobovania teplom

Rozdiel medzi centrálnym a individuálnym zásobovaním teplom (vykurovaním) je v zložitosti a početnosti koncových odoberateľov tepla (ELIASSEN ET AL., 2004; ERLINGSSON – JOHANESSON, 2008; VALDIMARSSON, 2009):

- **individuálne vykurovanie / zásobovanie teplom** = využívanie jedného zdroja geotermálnej energie pre zásobovanie konkrétneho objektu, alebo siete objektov v rámci rozvetvených produktovodov
- **centralizované vykurovanie / zásobovanie teplom** = využívanie jedného, alebo viacerých zdrojov geotermálnej energie pre rozvetvené systémy zásobovania teplom z koncentrovaného – centralizovaného zdroja, respektíve výmenníkovej stanice
- **kombinované vykurovanie / zásobovanie teplom** = využívanie oboch systémov dodávok tepla v rámci jedného projektu.

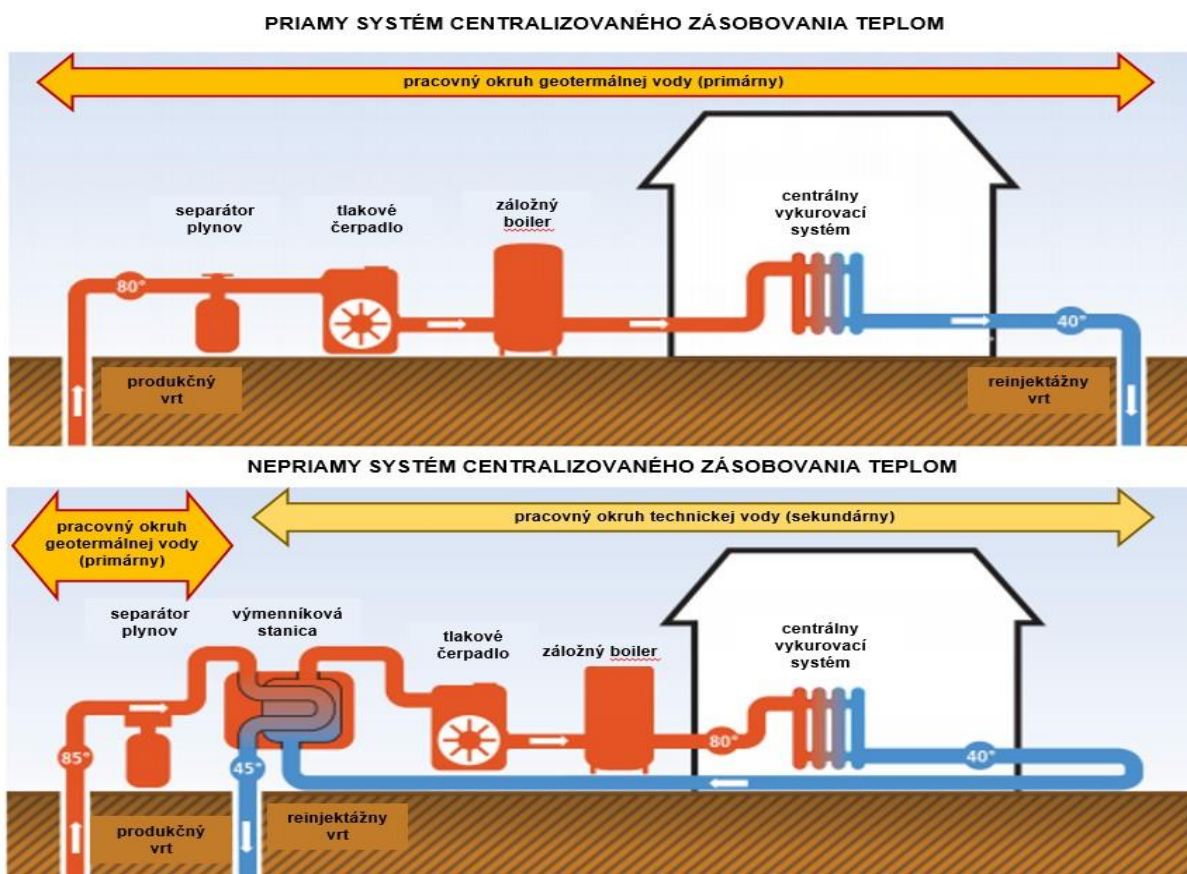
Je samozrejmé, že centralizované zásobovanie teplom je jeden z technicky, technologicky, ekonomicky, ale aj energeticky a termodynamicky najnáročnejších spôsobov priameho využívania geotermálnej energie. Optimalizácia celého systému vychádza z kombinácie rôznych faktorov, pričom najdôležitejšie sú (ROSEN – DINCER, 2003; ELIASSEN ET AL., 2004; CHATENAY ET AL., 2014; NICO ET AL., 2020):

- teplota a termodynamická kvalita zdrojov geotermálnej energie
- energetická kapacita / náročnosť odberných miest (potreba vykurovania, chladenia, zásobovania teplou úžitkovou vodou)
- klimatické pomery (počet vykurovacích dní, typológia vykurovacích kriviek)
- technický a technologický stav budov (architektúra, výškové parametre, energetická účinnosť budov)
- vzdialenosť odoberateľov od zdroja
- chemické zloženie zdrojov geotermálnej energie (typ a technológie výmenníkov tepla a procesov jeho distribúcie)
- energetické limity zdroja (možnosti a teplotná škála ochladzovania, zneškodňovania)

Oboje, centralizované alebo individuálne vykurovanie je celosvetovo realizované, vzhľadom na architektúru povrchovej infraštruktúry (ELIASSEN ET AL., 2004; CHATENAY ET AL., 2014) v troch základných režimoch (Obr. 3.2):

- **priame systémy vykurovania** (angl. single-pipe, primary district heating systems, direct district heating systems) = zdroj geotermálnej energie prechádza od produkčných vrtov priamo ku koncovým odoberateľom tepla v centralizovane riadených distribučných sústavách, po ktorých sa vracia do centralizovaných reinjektážnych, alebo zneškodňovacích centier
 - jednoduché na technicko-technologické zariadenia
 - jednoduché na optimalizáciu technických a produkčných zariadení
 - náročné na energetickú stabilitu (teplotu, množstvo) zdroja, vstupné teploty ku koncovým odoberateľom
 - náročné na chemické zloženie zdroja (korózia, inkrustácia)
- **nepriame systémy vykurovania** (angl. double-pipe, indirect district heating systems, secondary district heating systems) = zdroj geotermálnej energie prichádza do výmenníkovej stanice, kde sa stretáva v systémoch odovzdávania tepla s pracovnou vodou vnútorného (sekundárneho, pracovného) okruhu
 - náročná technická, technologická a termodynamická optimalizácia
 - náročná distribučná sieť
 - menej citlivé na energetickú stabilitu zdroja
 - odpadajú kritéria teploty na vstupe ku koncovému odberateľovi a chemizmus

- **systémy s predhrievaním** (angl. temperature booster plants) = zdroj geotermálnej energie pred alebo po výmenníkovej stanici vnútorného okruhu prechádza dodatočným prehrievaním z iného zdroja geotermálnej energie
 - aplikovateľné len v špecifických geotermických podmienkach
 - náročné na optimalizáciu predhrievania
 - zvýšená ekonomická náročnosť projektu
 - maximalizovaná stabilita a bezpečnosť dodávok energie schopná pokryť aj neočakávané špičkové zaťaženie
- **hybridné systémy** (angl. boosted heating plants, hybrid-district heating) = zdroj geotermálnej energie je alebo prehrievaný zapojením boilerov pracujúcich s inými energetickými zdrojmi (fosilnými, alternatívnymi) v základnom alebo špičkovom režime, prípadne sú iné energetické zdroje využité ako základné, alebo špičkové energetické zdroje, v závislosti na nastavení systému



Obrázok 3.2 Obvyklé pracovné schémy centralizovaného zásobovania teplom. Upravené podľa: Eliasson et al. (2004), Chatenay et al. (2014)

3.1.2 Segment poľnohospodárstva – skleníkové hospodárstvo

Segment poľnohospodárstva (angl. agriculture) vo vzťahu k zdrojom geotermálnej energie sa niekedy vníma ako využitie zdrojov geotermálnej energie na vykurovanie / vyhrievanie skleníkov, čiže skleníkové hospodárstvo (DELL ET AL., 2019). Napriek tomu, využívanie zdrojov geotermálnej energie je v segmente poľnohospodárstva všeobecne využívané pre (RAGNARSSON, A. - ÁGÚSTUSSON, M., 2014):

- vykurovanie / vyhrievanie skleníkov = pestovanie poľnohospodárskych plodín (greenhousing, greenhouse heating)
- chov poľnohospodárskych zvierat (livestock farming)
- chov rýb (aquaculture)
- príprava, výroba a spracovanie poľnohospodárskych produktov a materiálu.

Priamo v rámci segmentu skleníkového hospodárstva je možné technológie rozdeliť podľa spôsobov vyhrievania vzduchu (Obr. 3.3), respektíve vplyvu na pestované plodiny (POPOVSKI, 2004; RAGNARSSON, A. - ÁGÚSTUSSON, M., 2014):

- **nepriame systémy vyhrievania vzduchu s prirodzeným prúdením** (angl. aerial pipe heating) = vo vzduchu, zvyčajne pod strechou, umiestnené produktovody s vyhrievacím médiom, prúdenie vzduchu je zabezpečené prirodzenou konvekciou vzduchu
 - vyžadujú veľké plochy vzhľadom na používaný materiál a redukujú svetlosť priestoru skleníka
 - kontrolujú alebo potlačujú neprirodzenú vlhkosť a obmedzujú tak náchylnosť rastlín na choroby
 - znižujú kondenzáciu vlhkosti na stenách skleníka
 - zvyčajne optimalizované ako doplnujúci, alebo samostatný vykurovací systém
- **nepriame systémy vyhrievania vzduchu s vynúteným prúdením** (angl. aerial fan-assisted convectors) = využívajú rovnaké princípy ako predošlý typ, s využitím ventilátorov, ktoré regulujú smery a intenzitu prúdenia vzduchu v skleníku
 - ekonomicky a energeticky náročnejšie na optimalizáciu a prevádzku (parazitické straty skleníka)
 - dokážu zabezpečiť vyrovnané vertikálne teplotné profily vzduchu v celom skleníku podľa potreby / kritérií pestovaných rastlín

- **priame systémy vyhrievania vzduchu** (angl. aerial heaters) = využívajú priamo zahriaty vzduch fúkaný do skleníka z vrchu pri využití prirodzenej konvekcie a pohybu vzdušných mäs na základe hustoty vzduchu a teploty
 - zvyčajne náročné na produktivitu zdroja kvôli nízkej efektívnosti tepelnej výmeny na rozhraní voda-vzduch
 - zvyšujú svetelnosť skleníka
 - nezabezpečia vyrovnané teplotné profily vzduchu v celom skleníku
- **systémy vyhrievania pôdy** (angl. soil heating installations) = systémy tepelných produktovodov inštalované priamo v pôde, so zámerom vyhrievať a udržiavať primeranú teplotu pôdy a koreňového systému
 - neschopné splniť požiadavky celkovej teplotnej regulácie skleníka
 - vhodné pre plodiny vyžadujúce teplotnú reguláciu len koreňového systému
 - zvyčajne v kombinácii s inými systémami vyhrievania skleníkov
- **systémy vyhrievania pri-pôdneho vzduchu** (angl. soil-air heating installations) = produktovody uložené priamo na povrchu pôdy, čo umožňuje vyhrievanie pripovrchovej vrstvy pôdy a vrchnej koreňovej sústavy, respektíve vzduchu v okolí nižších listových systémov
 - maximalizujú využitie tepla rastlinami
 - minimalizujú tepelné straty do okolia
 - citlivé na zvolený materiál tak, aby dokázali zabezpečiť aj sálanie do pôdy
- **lavicové systémy vyhrievania** (angl. bench heating) = produktovody vyhrievajúce lavicových systémov pestovania, t.j. uložené na okrajoch pestovacích lavíc, alebo priamo pod nimi
 - kombinujúce vyhrievanie pôdy zo spodnej strany a prienik tepla ku stenám skleníka respektíve fóliovníka
 - minimalizuje negatívne účinky vlhkosti a kondenzácie

Faktory, ktoré ovplyvňujú realizáciu vyhrievania v skleníkovom hospodárstve sú najmä (POPOVSKI, 2004; SKRZYPCZAK ET AL., 2021):

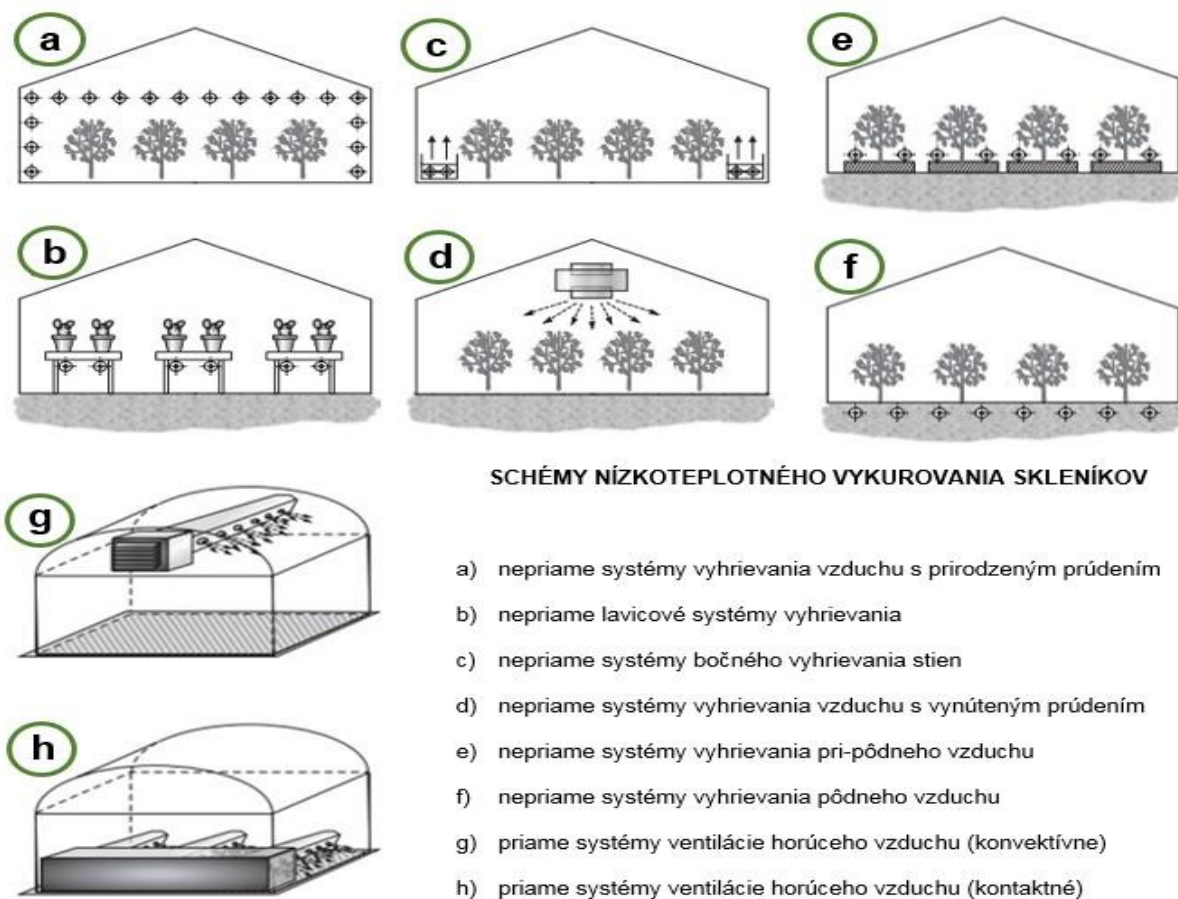
- dostupnosť zdroja geotermálnej energie (požadované teploty, termodynamická kvalita, náklady na realizáciu vrtania – odpadajú v prípade ak ide o kaskády alebo odpadové teplo

- cena výroby a produkcie tepla v skleníkovom hospodárstve (extrémne klesá v prípade využitia v nižších kaskádových stupňoch)
- chemizmus zdroja geotermálnej energie
- energetická plocha vykurovania (objem a plocha skleníkov)
- klimatické podmienky
- poľnohospodársky profil (typy, náročnosť, a požiadavky pestovaných rastlín)
- ekonomická situácia na trhu s poľnohospodárskymi plodinami

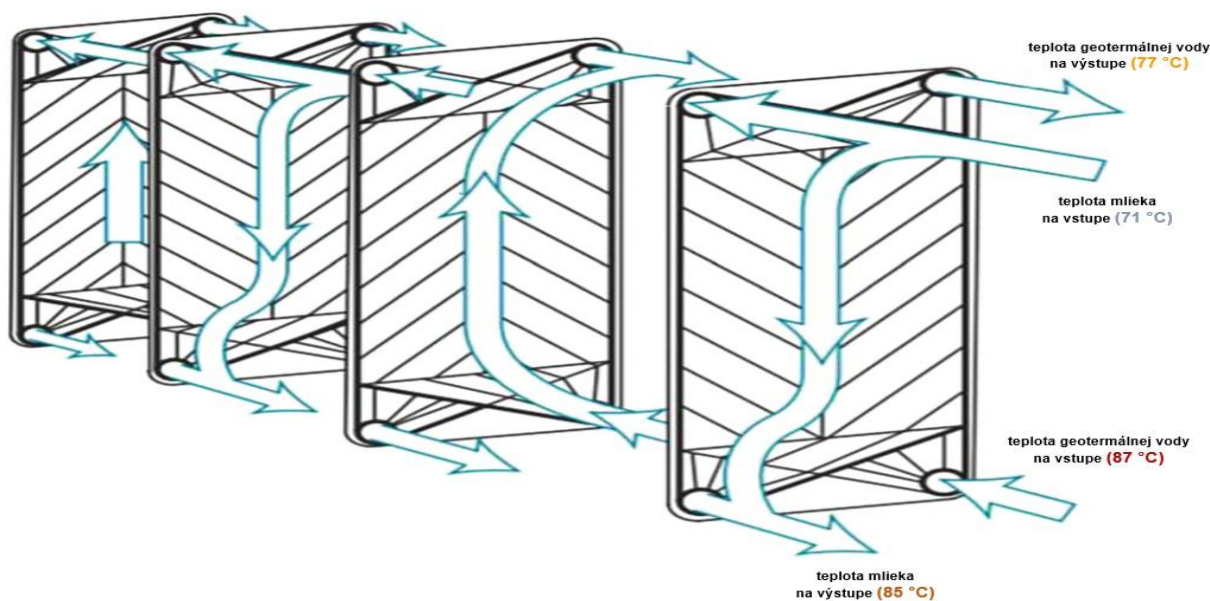
3.1.3 Segment poľnohospodárstva – výroba, príprava, spracovanie produktov

Napriek tomu, že vyhrievanie skleníkov je bezpochyby najvýraznejšou oblasťou segmentu poľnohospodárstva, ďalšie nezanedbateľné možnosti využitia tepla, vlhkosti, alebo chemického zloženia zdrojov geotermálnej energie sú (NGUYEN ET AL., 2015; NLEONU ET AL., 2020; TOMASZEWSKA ET AL., 2021, 2022):

- **tepelná úprava jedál, pasterizácia a sterilizácia** = využitie tepelnej energie / tepla v procese úpravy, alebo prípravy jedál, a to priamo v kúpeľných nádržiach (po predchádzajúcej chemickej úprave zdroja geotermálnej energie) alebo výmenníkoch tepla (Obr. 3.4), respektíve priamo vysokoteplotná sterilizácia poľnohospodárskych a hospodárskych produktov, respektíve zariadení na výrobu, spracovanie, a skladovanie produktov
- **povrchové spracovanie jedál** = priame ponáranie poľnohospodárskych produktov do horúceho kúpeľa (geotermálnej vody, geotermálnej vody, alebo prehriatej pracovnej vody) na ich prvotné zjemnenie, a následne lúpanie / šúpanie mechanicky, alebo prúdom (geotermálnej pary, „čistej vodnej pary“ odparením v geotermálnych výmenníkoch, prúdom geotermálnej vody alebo „technickej“ vody z výmenníkov)
- **zavlažovanie** = aplikácia vylievanej alebo rozprašovanej geotermálnej vody v systémoch otvoreného alebo uzavretého poľnohospodárstva podľa podmienok daných chemickým zložením geotermálnej vody
- **odparovanie a destilácia** = predovšetkým využívanie výmenníkov tepla založených na geotermálnej vode a pracovnej vode, alebo priamo alkoholoch, do systémov odparovania a destilácie alkoholov a niektorých poľnohospodárskych produktov (mentol, mäta, cukrová trstina)



Obrázok 3.3 Schémy architektúry geotermálneho vyhrievania skleníkového hospodárstva. Upravené podľa: Dickson – Fanelli (2004)



Obrázok 3.4 Příklad plátového prietokového výmenníka tepla v pasteurizácii. Zdroj: Geo-Heat Centre, OIT Klamath Falls

- **desalinizácia** = odparovanie morskej vody, respektíve vysokomineralizovanej podzemnej vody priamym alebo nepriamym kontaktom s geotermálnou vodou s cieľom zníženia pôvodnej salinity produktu
- **sušenie plodín** = využívanie horúceho vzduchu z výmenníkov tepla pracujúcich s geotermálnou vodou, alebo priamo suchej geotermálnej pary, ak to jej chemické zloženie dovoľí, pre sušenie vybraných typov plodín alebo produktov
- **výroba olejov a spracovanie repky** = esterifikačné a trans-esterifikačné procesy, a využitie tepla zo zdrojov geotermálnej energie a výmenníkov tepla v dodávaní tepla do výrobných procesov

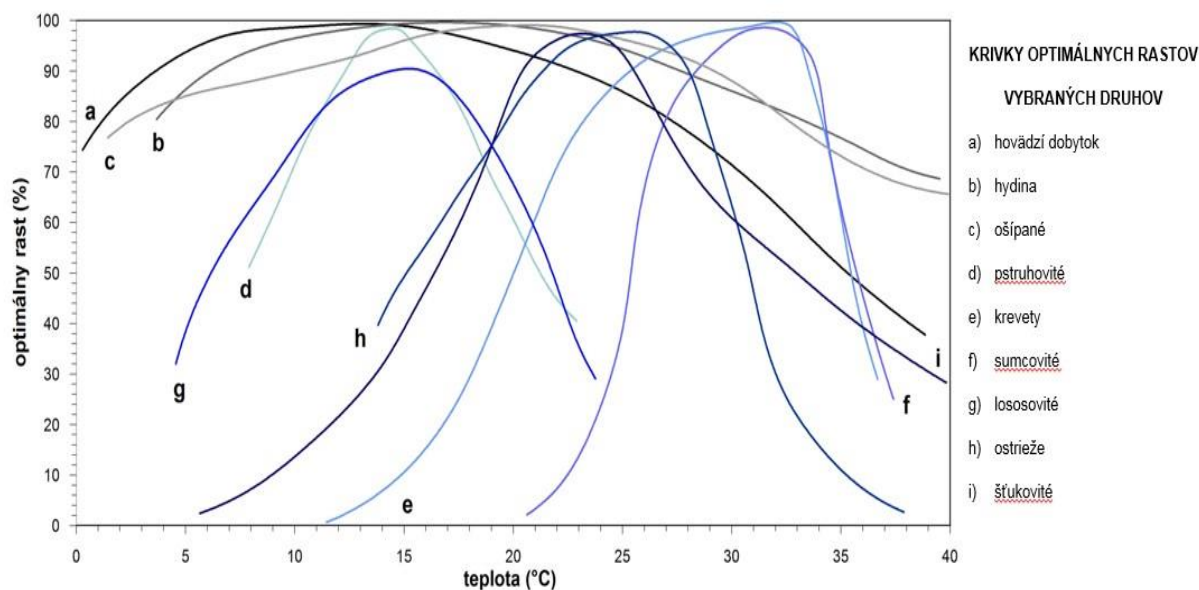
3.1.4 Segment akvakultúry

Na rozdiel od poľnohospodárstva, je segment akvakultúry, čiže chovu rýb (angl. aquaculture, fish-farming) limitovaný na využívanie geotermálnej vody výmenníkovými systémami pre udržiavanie, alebo zabezpečenie optimálnej teploty vývoja rýb a morských živočíchov (Obr. 3.5). Priame využitie geotermálnej vody nie je typické, nakoľko ryby sú významnými recipientmi ťažkých prvkov, ktoré sú typické pre geotermálne vody, a preto vysoko náročné na chemické zloženie zdrojov geotermálnej energie (RAFFERTY, 2004). Charakteristicky segment akvakultúry zahŕňa produkciu:

- rýb (losos, pstruh, pražma, morský vlk, sumec, tilapia, úhor, ostriež)
- morské živočíchy (ustrice, krevety, homáre)
- exotické vodné živočíchy a obojživelníky (korytnačky, aligátory)
- morské, brakické, a sladkovodné riasy.

3.1.5 Segment chovu poľnohospodárskych zvierat

Farmárstvo, a chov poľnohospodárskych zvierat je segmentom využívania zdrojov geotermálnej energie v systémoch výmenníkov tepla pre zabezpečenie optimálnej teploty vzduchu / prostredia poľnohospodárskych druhov, t.j. kury, dobytok, kone v celoročnom období. Do toho je pripočítaná aj produkcia chladu s cieľom celoročne udržateľného a kontinuálneho farmárstva (RAFFERTY, 2004; LOMERI – ROTTICH, 2014; STRPIC ET AL., 2020).



Obrázok 3.5 Vývojový diagram optimálneho rastu a teplôt vybraných vodných a poľnohospodárskych druhov. Upravené podľa: Dickson – Fanelli (2004); Ragnarsson (2014)

Do segmentu chovu poľnohospodárskych zvierat je zároveň možné priradiť aj (RAFFERTY, 2004):

- tepelnú prípravu a spracovanie krmív (vyhrievanie vodných kúpeľov geotermálnou vodou v systémoch tepelných výmenníkov)
- tepelno-chemickú prípravu a spracovanie krmív (v prípade, ak to chemické zloženie geotermálnej vody dovoľuje, obohacovanie krmív o minerálne látky zo zdroja geotermálnej energie)
- tepelno-chemickú prípravu a spracovanie hnojív
- kompostovanie

3.1.6 Segment priemyslu

Segment priemyslu je bezpochyby technicky a technologicky najkomplikovanejším spomedzi priameho využívania zdrojov geotermálnej energie, vzhľadom na jeho výraznú členitosť od chemického, až po materiálno-spracujúci (RAFFERTY, 2003), preto je priestorovo prakticky nemožné charakterizovať každý zo sektorov.

Z toho vyplýva, že v rámci povahy zdrojov geotermálnej energie je možné v priemysle využiť každý z jej charakteristických aspektov (LINDAL, 1992; FOCACCIA ET AL., 2016; TURCHI ET AL., 2018):

- geotermálna para – využitie vo vysokoteplotných a vysoko-energeticky náročných procesoch výroby alebo spracovania chemických produktov (latex, koža, spracovanie chemických zlúčenín a ich obohacovanie)
- geotermálna para a voda – zabezpečovanie výrobného, spracovateľského a priemyselného tepla, vrátane vykurovania priemyselných priestorov
- geotermálna voda – teplo do výrobných a spracovateľských procesov chemického, drevárskeho, papierenského, alebo spracovateľského priemyslu
- chemické zloženie geotermálnej vody – chemické reakcie pre spracovateľský a materiálový priemysel

Možnosti aplikovania geotermálnej energie sú napríklad (LINDAL, 1992; LIENAU, 2004; HASLINGER ET AL., 2022):

- **chemický priemysel** = príprava alebo výroba a spracovanie chemických, organických a anorganických zlúčenín (acetáty, polypropylén, latex, akryl, butylové gumy, farmaceutiká, anorganické a organické farbivá a pigmenty, EP gumy, PVC, morenie materiálov), využitím tepla dodávaného do výrobných procesov
- **olejársky priemysel** (organické palivá, organické oleje, spracovanie olejov, spracovanie kuchynských a priemyselných olejov) využitím tepla dodávaného do výrobných procesov
- **drevospracujúci a papierenský priemysel** (sušenie dreva, povrchové spracovanie dreva, výroba papiera), využívaním tepla dodávaného do procesov, priamych prietokov a kontaktu dreva a drevných produktov s geotermálnou vodou alebo parou, chemické reakcie vo výrobnom procese
- **gastronomický priemysel** (príprava a spracovanie jedál v gastronomickom sektore) zvyčajne dodávaním tepla do procesov
- **textilný priemysel** (premývanie a príprava vlny, sušenie odevov, výroba syntetických vlákien a materiálov, spracovanie kože, spracovanie hodvábu), štandardne dodávaním tepla do výrobných procesov, zriedkavo chemickým spracovaním materiálov priamymi kúpeľmi v zdroji geotermálnej energie

- **stavebný priemysel** (chemický príprava a úprava betónu, výroba asfaltu, produkcia kremýtých pieskov evaporáciou vysokomineralizovaných geotermálnych vôd a soľaniek), dodávaním tepla do výrobných procesov, chemické reakcie výrobných materiálov s geotermálnou vodou a chemické obohacovanie
- **odpadový priemysel a hospodárstvo** (sušenie odpadového materiálu, skládkové spracovanie materiálu, spracovanie kuchynského materiálu a odpadových olejov, výmenníkové skládkové tepelné hospodárstvo), dodávaním tepla do výrobných procesov.

3.1.7 Segment baníctva

V rámci využívania zdrojov geotermálnej energie v segmente baníctva je nevyhnutné rozlišovať medzi niekoľkými základnými rámcami (PREENE - YOUNGER, 2014; USSHER ET AL., 2014; PATSA ET AL., 2015):

- využívanie banských vôd v aktívnych, alebo opustených baniach ako priamych nízкотеплотných až vysokотеплотných zdrojov geotermálnej energie pre vhodné okruhy priameho alebo nepriameho využitia geotermálnej energie (obyčajne je táto možnosť limitovaná na geotermálne vody s pomerne nízkou teplotou)
- využívanie chemického potenciálu banských odpadov (odpadové haldy, banské priestory, banské vody) pre extrakciu a získavanie požadovaných prvkov, najčastejšie ťažkých kovov, vzácnych prvkov atp. (potenciál je limitovaný hydrogeológiou, hydrochémiou banských vôd a mineralógiou banských priestorov)
- využívanie zdrojov geotermálnej energie pre vyhrievanie a vykurovanie banských priestorov a banskej infraštruktúry a ich elektrifikácia
- využívanie banských priestorov ako podzemných výmenníkov / zásobníkov tepla pre energetické zhodnotenie a vykurovanie.

Využívanie priamo banských priestorov pre získavanie zdrojov geotermálnej energie alebo ich priame využívanie ako podzemných zásobníkov tepla má niekoľko nesporných výhod oproti konvenčnému rozvoju produkčných geotermálnych systémov (MALOLEPSZY ET AL., 2005; PREENE - YOUNGER, 2014; PATSA ET AL., 2015; BOYNTON ET AL., 2018; MONAGHAN ET AL., 2022; MATAS-ESCAMILLA, 2023):

- banská podzemná infraštruktúra je lokalizovaná v určitej hĺbke (odpadá nevyhnutnosť vŕtania, prípadne sa výrazne znižuje požadovaná hĺbka vŕtania)
- lokálne geologické podmienky sú na pomerne významnej úrovni poznania v porovnaní so znalosťami v nepreskúmaných, alebo málo preskúmaných územiach a úvodných etapách prieskumu, vrátane pomerne dobrej dostupnosti pevných vzoriek alebo priamo vytekajúcich banských vôd
- lokálne hydrogeologické podmienky, predovšetkým pri zachytávaní banských vôd so špecifickou teplotou sú dlhodobo zrejmé z povinných banských monitorovaní, vrátane chemického zloženia geotermálnych vôd
- zníženie rizika neúspechu vŕtania
- zníženie technickej náročnosti realizácie projektov
- sekundárne zhodnotenie banských priestorov a širšieho okolia banských lokalít z pohľadu udržateľného rozvoja a environmentálnych, ako aj spoločensko-ekonomických dopadov
- simultánne získavanie minerálov z banských vôd v prípade ich vhodného chemického zloženia.

Vzhľadom na stále stúpajúci tlak smerom k environmentálne prijateľnému získavaniu zemských zdrojov nadobúda produkcia a získavanie vzácnych prvkov alebo kovov mimoriadnu dôležitosť aj v rámci využívania zdrojov geotermálnej energie. Ide predovšetkým o získavanie bóru, lítia, zlata, striebra, stroncia, medi, olova, mangánu, kremeňa, horčíka, draslíka, ortute, gália, ruténia, uránu, hliníka, arzenu, diatomitov a.i. (BOURCIER ET AL., 2005; MROCZEK ET AL., 2015; THOMAS ET AL., 2015; NEUPANE – WENDT, 2017; SMITH ET AL., 2017; MOTT ET AL., 2022).

Zdroje geotermálnej energie sa na procese získavania významných prvkov alebo ich zlúčenín podieľajú ako (BOURCIER ET AL., 2005; PATSA ET AL., 2015A,B; WALL, 2019; MOTT ET AL., 2022):

- priame zdroje minerálnych fáz – následne sú podrobené evaporácii / kryštalizácii alebo chemickej, elektrickej, organickej, alebo mechanickej úprave s cieľom získania požadovaných prvkov alebo ich zlúčenín pred ďalšími procesmi prípravy, spracovania a úpravy

- chemické médium pre získavanie minerálnych fáz v procesoch zahusťovania, chemickej reakcie a úpravy (napríklad banských hald), extrakcie chemickými reakciami – rozpúšťaním, lúhovaním atp. (napríklad banských hald)
- tepelné médium zabezpečujúce odparovanie banských vôd obsahujúcich cieľové minerálne fázy
- tepelné médium ako zdroj tepelnej alebo elektrickej energie pre výrobu, získavanie, a spracovanie minerálnych fáz (napríklad prehrievanie kyselín pri extrakcii zlata a striebra v banských odpadových haldách).

3.2 Nepriame využitie geotermálnej energie

Podľa základnej definície rozlišujúcej medzi spôsobmi využitia zdrojov geotermálnej energie, do oblasti nepriameho využitia patria **geotermálne elektrárne**, t.j. komplexné systémy konverzie tepelnej energie na energiu elektrickú.

Princípom produkcie elektrickej energie je efektívne a účinné (udržateľné) fungovanie produkčných komponentov elektrární = turbín, ktorá pracujú na systémoch tlakovej a tepelnej expanzie, kedy sa termodynamická kvalita parnej fázy expanziou premieňa na mechanickú energiu hriadeľa a následne elektrickú energiu v generátore. Pracovným médium geotermálnych elektrární je teda **geotermálna para**, respektíve tzv. **pracovná para**.

Na rozdiel od priameho využitia geotermálnej energie, má produkcia elektrickej energie veľké množstvo limitov, pričom medzi najhlavnejšie patria (STEFANSSON, 2002; KRISTMANSDÓTTIR – ÁRMANSSON, 2003; DiPIPPPO, 1983, 2012, 2016B,C; SANYAL, 2005C; ELIASSON ET AL., 2014; KARLSDÓTTIR ET AL., 2015; SOWA-WATRAK ET AL., 2017; TOMASINI-MONTENEGRO ET AL., 2017; CORO-TRUMPY, 2020):

- typ geologického prostredia zdroja geotermálnej energie (zvyčajne ovplyvňuje produktivitu zdroja, fázovú povahu zdroja, energetický potenciál, termodynamickú kvalitu parnej fázy, udržateľnosť zdroja)

- fázová povaha zdroja (ovplyvňuje dizajn budúcej elektrárne na základe prítomnosti prirodzenej parnej frakcie v rezervoári, dizajn a pozíciu produktovodov, a komponentov prípravy a úpravy zdroja pred vstupom do výrobnjej časti elektrárne)
- hydrogeologický a dynamický režim rezervoárového prostredia (ovplyvňuje možnosti dlhodobého formovania a udržiavania parnej frakcie, jej produktivitu a režim prítoku)
- geochemické parametre produkovanej geotermálnej vody (ovplyvňujú saturačný stav minerálnych fáz, t.j. teplotné a tlakové pomery precipitácie minerálov, inkrustačný a korózný potenciál, možnosti reinjektáže a finálneho ochladenia separovanej vody po opustení geotermálnej elektrárne pred reinjektovaním, chemické zloženie, kvalitu a vlhkosť pary)
- termodynamická a energetická kvalita pary / vlhkosť, chemické zloženie (ovplyvňuje komplikovanosť prípravných procesov pary pred vstupom do turbínovej komory a možnosti jej kondenzácie alebo zneškodňovania, dizajn chladiaceho systému)
- geometria rezervoáru (ovplyvňuje povrchový dizajn elektrárne na základe lokalizácie jeho perspektívnych produkčných oblastí, celkovej rozlohy elektrárne, situácie jednotlivých komponentov, dĺžky produktovodov, pozície reinjektážnych a produkčných polí)
- klimatické a hydrologické podmienky (ovplyvňujú dizajn chladiacich systémov, záložných zdrojov chladenia, možnosti rozvoja geotermálneho poľa)
- reliéf krajiny (ovplyvňuje celkovú povrchovú rozlohu elektrárne a optimalizáciu produkčných a reinjektážnych polí, produktovodov)
- situácia na energetickom trhu a stabilita odberných miest
- environmentálne aspekty (možnosti ovplyvnenia okolia a spoločnosti svetelným alebo hlukovým smogom, pachom z exhalácie plynov, dizajn produktovodov a chladiacich systémov, pozícia samotnej elektrárne vzhľadom na ochranu prírody a krajiny)
- seizmicita územia a inžiniersko-geologické podmienky (ovplyvňuje lokalizáciu komponentov elektrárne, možnosti reinjektáže, ako jedno z hlavných vylučovacích kritérií v prípade akútnych seizmických rizík s vysokým magnitúdom).

Na základe **prítomnosti parnej frakcie**, ako kľúčového parametra pri voľbe dizajnu geotermálnej elektrárne, v rezervoárovom prostredí je možné vyčleniť základné pracovné typy elektrární (ELIASSEN ET AL., 2014; SHOKATI ET AL., 2015; DIPPO, 2016C):

- *priame geotermálne elektrárne* (angl. dry-steam, direct-steam) = elektrárne pracujúce so suchou geotermálnou parou produkovanou z rezervoárového prostredia
- *expanzné geotermálne elektrárne* (angl. single-flash, double-flash, multi-flash, flashing-cycles) = elektrárne pracujúce so separovanou geotermálnou parou oddelenou prirodzene, alebo technicky z produkovaného zdroja geotermálnej energie (geotermálna voda + geotermálna para)
- *binárne geotermálne elektrárne* (angl. binary geothermal power plants) = elektrárne pracujúce s binárnou pracovnou látkou s nízkou teplotou varu, ktorá v uzavretých systémoch nahrádza geotermálnu paru na vstupe do turbínovej komory
 - organické-Rankinove cykly (angl. organic-Rankine cycle) = pracujúce so štandardizovanými organickými pracovnými látkami
 - Kalinove cykly (angl. Kalina-design, Kalina-type) = pracujúce so zlúčeninami $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Komplikovanosť celej konverzie energetických foriem sa následne odráža na komponentoch geotermálnych elektrární (Tab. 3.1, Obr. 3.6), ktorých zaradenie v pracovnom cykle, a pozícia, v rámci priestoru, sú závislé práve na jeho typológii. Zjednodušená schéma geotermálnych elektrární má niekoľko vzájomne prepojených sústav (HILL ET AL., 1990; THOROLFSSON, 2010; FINGER – BLANKENSHIP, 2010; DiPIPPA, 2005, 2012, 2016C; PAMBUDI ET AL., 2015):

- **sústava produkcie a spracovania zdroja geotermálnej energie**
 - *produkčné vrty a vrtné polia* ^{3.1} = systémy produkcie zdroja
 - *distribučná sieť (produktovody)* = sústava produktovodov / „potrubí“ od produkčných polí k turbínovej komore, medzi turbínovou komorou a chladiacou vežou, a od chladiacej veže, alebo turbínovej komory k sústavám spracovania a likvidovania zvyškového tepla; pričom rôzne časti distribučnej siete sú dizajnované podľa účelu, a podľa fázového stavu prenášaného média
 - *separačné stanice* = zariadenia na gravitačné, alebo mechanické oddelenie vodnej a parnej frakcie, a ich rozdelenie pre sústavu výroby elektrickej energie a sústavu spracovania a zneškodnenia zvyškového tepla
 - *expanzné stanice* = zariadenia na tlakovú expanziu pary prepojené s turbínovou komorou

^{3.1} vrátane ostatných typov vrtov (3.3), t.j. monitorovacích, slepých, záložných, štruktúrnych; ale s výnimkou reinjektážnych

Tabuľka 3.1 Komponenty geotermálnych elektrární

Názov útvaru	priame (suchopárne) geotermálne elektrárne	expanzné geotermálne elektrárne	binárne elektrárne
vrtné polia (wells, well fields)	x	x	x
produktovody (pipelines, piping systems)	x	x	x
separačné stanice / separátory (separators)	-	x	-
expanzné stanice / expandéry (expanders)	-	x	-
tlmiace stanice (silencers)	x	x	-
odstraňovače vlhkosti (moisture remover)	x	x	-
odstraňovače pevných častíc (particle remover)	x	x	-
odvodové a kontrolné ventily (valves)	x	x	x
predhrievacie stanice (preheaters)	-	-	x
evaporačné stanice (evaporators)	-	-	x
turbíny (turbines)	x	x	x
generátor (generator)	x	x	x
kondenzátory (condensers)	x	x	x
chladiace veže (cooling towers)	x	x	x
reinjektážne zdrže (lagoons)	x	x	-
reinjektážne vrty (reinjection wells, reinjector fields)	x	x	x

- *odstraňovače pevných častíc* = zvyčajne gravitačné zariadenia, ktorých úlohou je odstrániť z pary zvyšky horninového prostredia z vrtu, ktoré sa na povrch dostali prúdením geotermálnej vody alebo pary, s cieľom zabrániť mechanickému poškodeniu turbínových lopatiek
- *odstraňovače vlhkosti* = gravitačné, alebo tlakovo-expanzné zariadenia, ktorých cieľom je odstrániť zvyškovú vlhkosť z geotermálnej pary smerujúcej do turbínovej komory tak, aby sa zvýšila termodynamická kvalita pary a obmedzilo mechanické pôsobenie kvapôčok vlhkosti na turbíny (a znížil sa zároveň chemický korózný potenciál pary na turbínových lopatkách)
- *usmerňovacie a kontrolné ventily* = ventily schopné odkloniť aktuálne toky v rámci produktovodov a jednotlivých staníc elektrárne k sústave spracovania a zneškodnenia v prípade neočakávaných technických udalostí (napríklad poruchy a výpadok turbíny, odstavenie bloku kvôli údržbe)
- **sústava produkcie elektrickej energie**
 - atmosférické turbíny / exhalačné = pracujúce na gradiente tlaku medzi vstupom do turbínovej komory a atmosférickým tlakom prostredia, bez chladiaceho systému
 - kondenzačné turbíny = pracujúce na gradiente tlaku medzi vstupom do turbínovej komory a tlakom kondenzátora



Obrázok 3.6 Príklady komponentov geotermálnych elektrární.

- *alternátory a generátory* = štandardizované stanice pracujúce s konverziou mechanickej / kinetickej energie turbíny prenášanej na generátor, na elektrickú energiu
- **sústava spracovania zvyškového tepla**
 - *kondenzačné stanice / kondenzátory* = stanice prepojené priamo s turbínou a chladiacou vežou, slúžiace na kondenzáciu pary opúšťajúcej turbínu na vodný kondenzát pre zvyškové spracovanie tepla, alebo zdroj chladiaceho média, respektíve pre udržiavanie organického pracovného cyklu
 - *chladiace veže* = častokrát najikonickejší komponent elektrární, ktorých účelom je udržiavať chladiace médium pre kondenzačné turbíny (plytká podzemná voda, povrchová voda, zmes obvyčajnej vody a kondenzátu), respektíve umožniť kondenzáciu a exhaláciu parnej frakcie po výstupe z turbíny; pracujúce v takzvanom vlhkom režime (voda) alebo suchom režime (vzduch)
 - *reinjektážne zdrže* = prirodzené (Príklad 3.2), hĺbené, alebo postavené nádrže zachytávajúce separovanú geotermálnu vodu, prípadne kondenzát z chladiaceho systému elektrárne, pred ďalším využitím, alebo reinjektážou, s cieľom maximalizovať vypadávanie minerálov z média, a zároveň ochladiť médium pred ďalším využitím; využívané veľmi obmedzene vzhľadom na environmentálny a priestorový dosah a chemické zloženie zdrojov geotermálnej energie
 - *tlmiace stanice* = zariadenia využívané v prípade, ak dôjde k potrebe odkloniť tok zdroja geotermálnej energie do elektrárne, pracujúce ako atmosférické separátory na oddelenie parnej frakcie (exhalácia do ovzdušia) od vodnej frakcie (ďalšie využitie v kogenerácii, alebo reinjektáž)
 - *reinjektážne vrty* = individuálne alebo reinjektážne polia.

3.2.1 Priame (suchopárne) geotermálne elektrárne

Priame geotermálne elektrárne sú jediným dizajnom konverzného cyklu, ktorý je založený na **produkcii suchej geotermálnej pary**, v dôsledku čoho odpadá potreba optimalizácie separačných a expanzných staníc, čo výrazne znižuje ich vstupné náklady. Na druhej strane, podmienka suchopárnych rezervoárov výrazne limituje (doteraz) ich rozšírenie vo svete. Elektrárne charakterizujú nasledovné charakteristiky (DIPPO, 1991, 2016C; HUTTRER, 2020):

- minimálny environmentálny dopad (kondenzát reinjektovaný, alebo para exhalovaná)

PRÍKLAD 3.2: Geotermálna elektráreň Svartsengi. Upravené podľa: Gudmundsdottir et al. (2010); Thorolfsson (2010); De Almeida (2018)



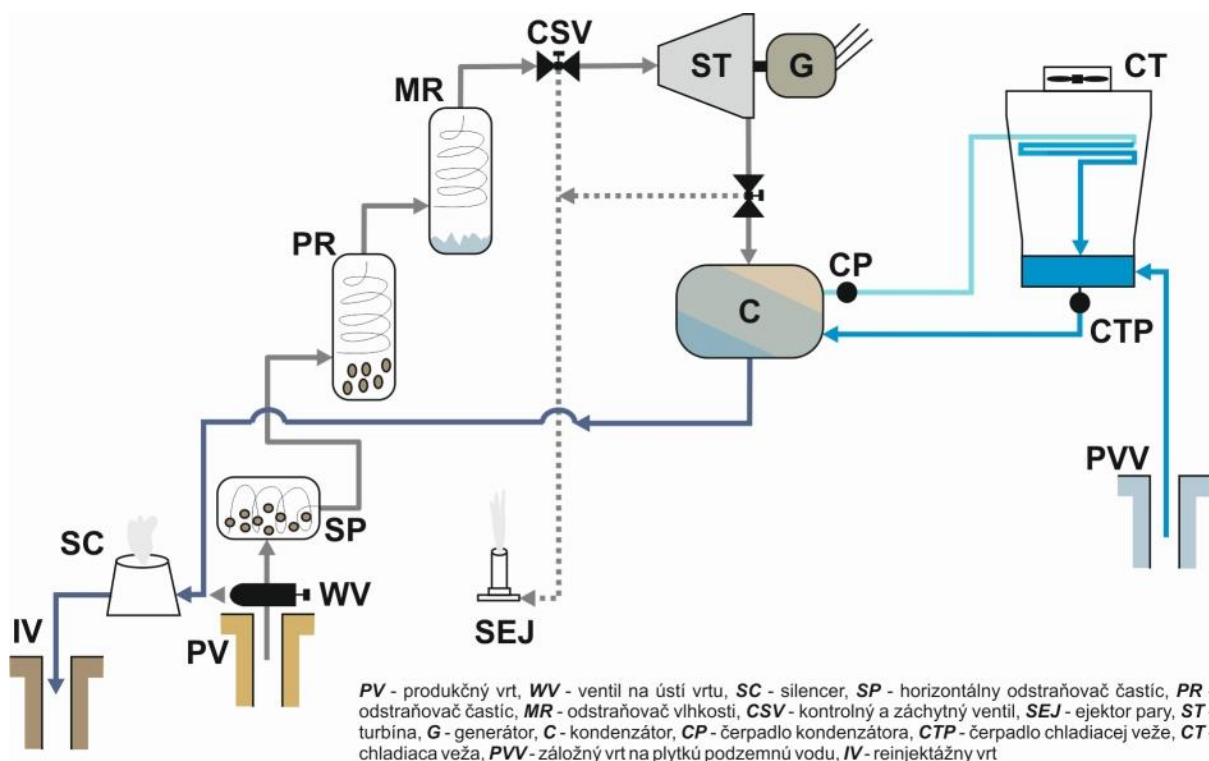
Geotermálna elektráreň Svartsengi (na pozadí v pravej časti snímku) bola uvedená do prevádzky v roku 1978 ako vôbec prvá, cielene konštruovaná kogeneračná elektráreň na svete. V súčasnosti pracuje s tromi blokmi: 1 blok s priamou, suchopárnou jednotkou, 1 blok s dvoma jednostupňovými expanznými jednotkami, a 1 blok so 7 binárnymi jednotkami. Binárne jednotky sú napojené na odpadové teplo z expanzného cyklu (separovaná geotermálna voda), teda paralelne. Prakticky sa jedná o štandardnú „kombinovanú“ elektráreň, aké sú aj v iných krajinách, napríklad elektráreň Lahedong v Indonézii, s rovnakým paralelným dizajnom (sériový dizajn by znamenal napojenie binárnej jednotky na kondenzát z turbínových jednotiek). Čo robí elektráreň výnimočnou, je využitie takzvanej lagúnarnej zdrže, teda odkaliska geotermálnych vôd opäšťajúcich geotermálnu elektráreň pred ich zneškodnením reinjektážou. Daná zdrž umiestnená v prírodnom prostredí bazaltového lávového poľa je aktuálne využívaná ako jedno z najznámejších geotermálnych rezortov na svete – Blá Lónid (Blue Lagoon, Modrá Lagúna). Napriek tomu, že zdržové lagúny predstavujú častokrát (príkladom môže byť zdrž elektrárne Cerro Prieto v Mexiku) významný problém z pohľadu životného prostredia, v prípade Modrej Lagúny ide o unikát kombinujúci:

- teplota 37 – 40 °C je vhodná pre relaxačné kúpanie, udržiavaná celoročne
- dekády trvajúce štúdiá preukázali terapeutické účinky separovanej geotermálnej vody najmä na psoriatické diagnózy a rekonvalescenciu popálenín
- kombinácia minerálneho zloženia geotermálnej vody, ktorá reaguje s prirodzeným horninovým podložím viedla, opäť na základe klinických a dermatologických výskumov, k založeniu špecializovanej dermatologickej kozmetiky pod značkou „Blue Lagoon skin care“ z bahna, ktoré sa kontinuálne tvorí na dne zdrže (vypadávaním minerálov z chladnúcej geotermálnej vody a minerálne fázy z kontaktu voda-podložie)
- najnovším príradkom je centrum výskumu a produkcie rias, z ktorých 60 % druhov je endemitických, viazaných len na lagúnu, ktoré sú následne využívané ako v kozmetických, tak aj farmakologických produktoch.

Príklad geotermálnej elektrárne Svartsengi a jej lagúnovej zdrže je unikátnym prejavom udržateľného prístupu k využívaniu zdrojov geotermálnej energie.

- sprievodné plyny (H₂S, CO₂) sú štandardne chemicky spracované v chladiacej veži
- najvyššia termodynamická účinnosť (50 – 70 %)
- k roku 2020 bolo na svete 44 elektrární s 51 blokmi a 61 jednotkami (Island – 1, Japonsko – 1, Nový Zéland – 1, Indonézia – 2, Spojené Štáty – 15, Taliansko – 24)
- priemerný inštalovaný výkon na turbínu – 49 MWe
- aktuálne výkonom najväčšia elektráreň je Darajat v Indonézii (i.v. 270 MWe)
- štandardne nebývajú spojené s inými konverznými cyklami
- štandardne nie sú napojené na kogeneračný cyklus

Pracovný cyklus priamej elektrárne začína (Obr. 3.7 – systém so suchou chladiacou vežou) v sústave produkčných vrtov (PV) kde geotermálna para prechádza úst'ovým ventilom (WV) k prvému stupňu mechanického prečistenia od pevných častíc (SP). Tým je centrifugálny, horizontálny separátor, umiestnený ešte pred vstupom do hlavného produktovodu. Následne je parovodmi vedená k elektrárni. Pred stanicou sú zvyčajne napojené ďalšie, vertikálne centrifugálne separátory, ktorých úlohou je filtrovať zbytkové pevné častice, ako sú sporadicky vyzražávané zrná minerálov, či mikroúlomky hornín z rezervoáru (PR), alebo odstraňovať vlhkosť, ktorá mohla v pare vzniknúť počas prechodu parovodom drobnými zmenami tlaku (MR). Posledným dôležitým bodom pred vstupom do turbíny je kontrolný a záchytný ventil (CSV), usmerňujúci prúdenie pary do turbínovej komory, alebo, naopak, k tlmiacej stanici, silenceru (SC), respektíve ejektoru (SEJ), cez ktoré je možné paru vypúšťať priamo do atmosféry. Tlmiaca stanica sa používa v prípade, ak je ohrozená činnosť komponentov a produktovodov pred vstupom pary do elektrárne. V prípade priaznivých podmienok je para po kontrolnom a záchytnom ventile prevedená na vstupné dýzy v turbínovej komore (ST), kde dochádza k premene tepelnej energie na mechanickú, a následne kinetickú energiu hriadeľa, ktorý v generátore (G) produkuje elektrickú energiu. Hýbateľom toho je prúdenie pary jedným, či viacerými tlakovými stupňami lopatiek turbíny. Para je nakoniec odvedená do kondenzátora (C), kde prechádza zmenou fázového stavu. V závislosti na účinnosti ochladenia a fázovej zmeny je kondenzát vedený k tlmiacim staniciam (SC), kde zvyšková časť pary expanduje, a vodná zložka je reinjektovaná, alebo, ak je kondenzácia dostatočne efektívna, je vodná fáza reinjektovaná priamo. Ak hrozí pokles účinnosti kondenzácie (napríklad vysokou teplotou ovzdušia), je možné turbínu prepojiť s ejektorom (SEJ) a paru čiastočne vypúšťať priamo z elektrárne. To zníži množstvo pary v kondenzátore, a naopak, zvýši účinnosť kondenzácie, bez ohrozenia optimalizovanej teploty chladiacej vody v nepriamom okruhu chladiacej veže.



Obrázok 3.7 Základná a zjednodušená schéma priamej elektrárne napojenej na suchý chladiaci cyklus. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?).

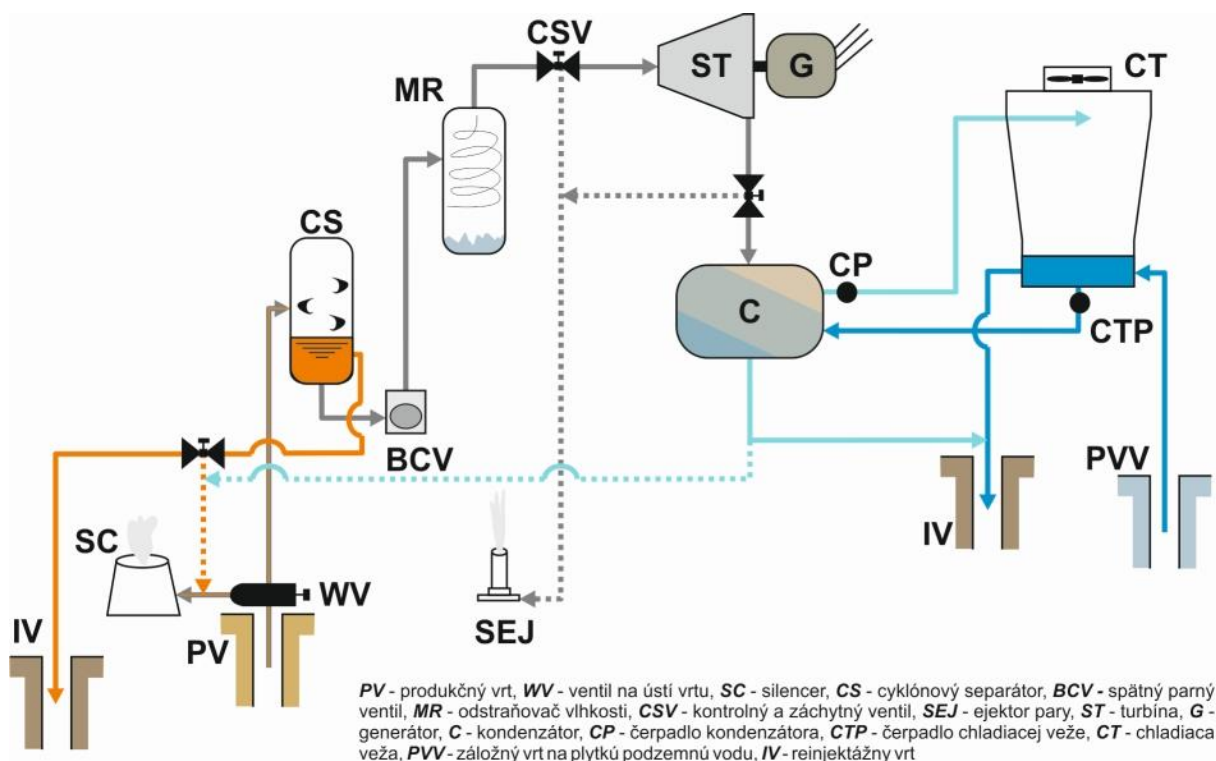
3.2.2 Jedno-stupňové expanzné geotermálne elektrárne

Expanzné geotermálne elektrárne predstavujú rozšírenie pracovnej schémy priamych konverzných cyklov o sústavy úpravy, oddelenia, a spracovania pôvodne **produkovanej dvojitej fázy**, alebo **saturovanej vlhkej geotermálnej pary**, ktorú produkčné vrty exploatujú z rezervoárového prostredia. Tým zároveň dochádza aj k oddeleniu okruhov spracovania separovaných zložiek. Pre produkciu elektrickej energie je využívaná len **oddelená para**. Elektrárne stručne vystihujú vybrané charakteristiky (DiPIPPPO, 2005, 2016C; KARLSDOTTIR, 2012; FRICK ET AL., 2019; HUTTRER, 2020):

- environmentálny dopad závisí na chemickom zložení produkovaného média, možnostiach chemickej úpravy, respektíve zneškodnenia geotermálnej vody, pary a kondenzátu
- termodynamická účinnosť 30 – 55 % podľa formy viazanosti parnej frakcie a počtu zapojených separátorov (ktoré zvyšujú parazitické straty a znižujú účinnosť)
- k roku 2020 bolo na svete 72 elektrární s prevládajúcim 1-stupňovým cyklom

- priemerný inštalovaný výkon na turbínu – 32 MWe
- optimalizované na prepojenie s dvoj-stupňovými expanznými cyklami (paralelne) alebo binárnymi produkčnými cyklami (sériovo)
- vo vhodných klimatických podmienkach využívané ako kogeneračné (spracovanie separovanej geotermálnej vody alebo kondenzátu) pred reinjektážou
- reinjektáž nevyhnutná pre saturačné stavy minerálnych fáz vo vodnej frakcii a produkčné, respektíve pracovné tlaky

Pracovný cyklus jedno-stupňovej expanznej elektrárne (Obr. 3.8 – schéma s vlhkým cyklom chladenia) začína na ústí produkčného vrtu (PV), kde čerpaná dvojité fáza prechádza kontrolným ventilom na ústí (WV). Ak nie je dôvod odkloniť ju k predčasnému zneškodneniu v tlmiacej stanici, silenceri (SC) a reinjektovať (IV), prúdi produktovodom k separátoru, zvyčajne cyklónovému alebo centrifugálnemu (CS). Oddelená vodná fáza zo separátora je určená pre zneškodnenie, a je odvádzaná k reinjektážnym vrtom (IV). V prípade kogenerácie (kaskádového napojenia priamych systémov využívania) by ďalšie stupne boli umiestnené medzi separátor a reinjektážny vrt. Ďalšia časť elektrárne od separátora k turbíne je podobná priamemu cyklu. Po opustení separátora smeruje para spätným parným ventilom (BCV), ktorého úlohou je zabrániť náhodnému prieniku vodnej zložky do ďalších častí systému, napríklad, ak by došlo ku kolapsu tlakových pomerov v separátore, k staniciam upravujúcim jej kvalitu pred vstupom do turbíny, t.j. cez odstraňovač pevných častíc (PR) a vlhkosti (MR). Pred vstupom do turbínovej komory (ST) je kontrolný a záchytný ventil (CSV), ktorý prepúšťa parnú fázu, alebo ju odvádzajú k ejektoru pary (SEJ), kde je okamžite vypúšťaná do ovzdušia. V turbínovej komore para prúdi v klasickom dizajne všetkými tlakovými stupňami lopatiek turbíny (ST), ktorých pohyb prechádza na hriadeľ, s následnou produkciou elektrickej energie v generátore (G). Po opustení turbíny para vstupuje do kondenzátora (C). Zmes kondenzátu a chladiacej vody je pumpou (CP) odvedená do chladiacej veže (CT), kde podlieha evaporačnému ochladeniu. Ochladená zmes je čiastočne akumulovaná v zbernej nádrži chladiacej veže, kde dopĺňa jej stálu hladinu, a čiastočne reinjektovaná do vtláčacích vrtov (IV). Chladiaci cyklus je uzavretý pumpovaním chladiacej vody čerpadlom (CTP) do kondenzátora. Hladina chladiacej vody je dopĺňaná kontinuálne, respektíve podľa potreby, vrtmi na plytkú (obyčajnú) studenú podzemnú vodu. V prípade suchého cyklu by bolo chladenie totožné so suchým chladením priamej elektrárne na Obrázku 3.7-



Obrázok 3.8 Základná a zjednodušená schéma jedno-stupňovej expanznej elektrárne napojenej na kontaktný vlhký cyklus.
Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?).

3.2.3 Viac-stupňové expanzné geotermálne elektrárne

Pod označením viac-stupňové expanzné elektrárne rozumieme konverzné cykly pracujúce s najmenej dvoma, sériovo zapojenými separátormi. Kým jedno-stupňové cykly ako rezervoárové médium využívajú zvyčajne dvojité fázy s prevahou parnej frakcie, viac-stupňové cykly sú využívané pri produkcii dvojitej fázy s prevahou parnej frakcie, ak je vlhkosť separovanej pary privysoká (kvôli, napríklad, problémom so zmenami inkrušťačných alebo korózných potenciálov pri rapidných zmenách tlaku a oddelení parnej frakcie), alebo naopak, ak chemické zloženie dvojitej fázy umožňuje maximalizovať separáciu pary aj pri extrémne nízkych tlakoch (niekedy nižších, ako atmosférický tlak), s cieľom maximalizovať účinnosť elektrárne a produkciu elektrickej energie. Zároveň viac-stupňové cykly pracujú aj s dvojitou fázou s prevahou vodnej frakcie, respektíve, ak to prietokové pomery umožňujú, aj s rezervoármi s tzv. vlhkou saturovanou parou (DiPIPPO, 2005). Samotný proces expanzie je však výrazne limitovaný, a musí byť ekonomicky, termodynamicky, aj energeticky presvedčivo zdôvodnený, pretože platí (DiPIPPO, 2016B; DAYSH ET AL., 2020; ROBERTSON-TAIT ET AL., 2020):

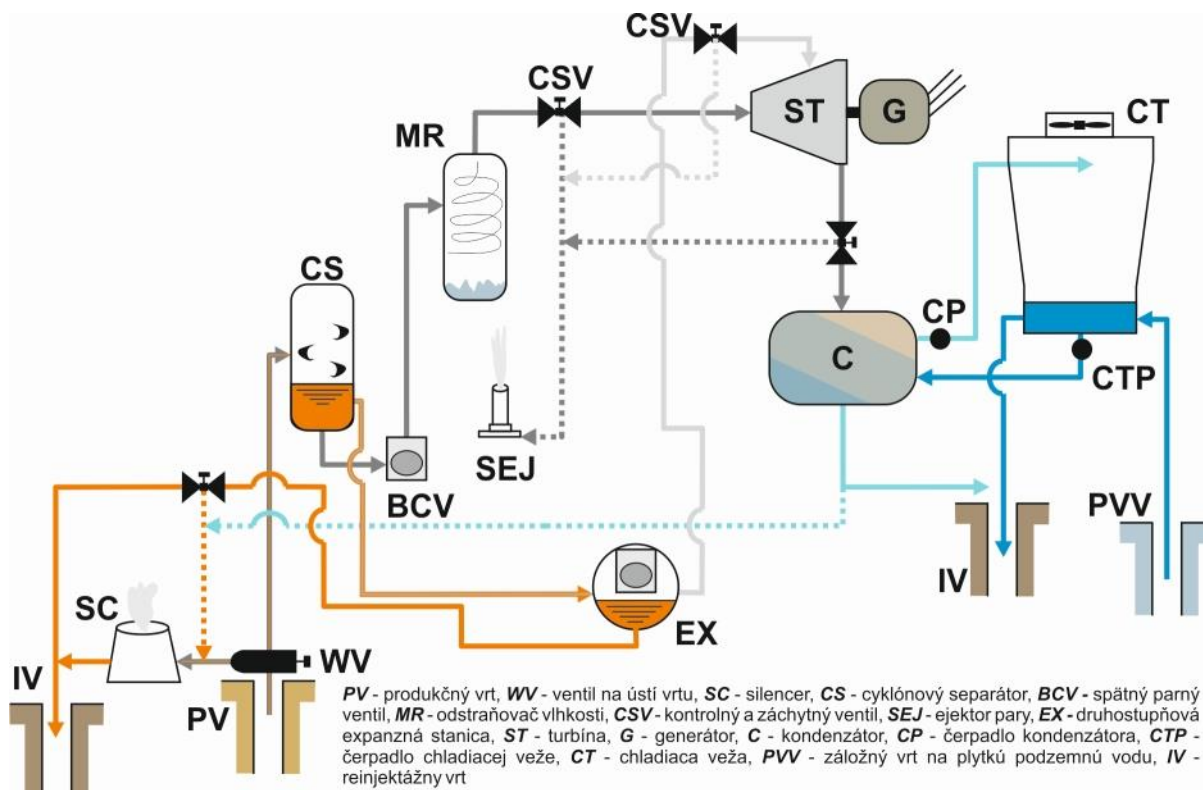
- každou separáciou môže klesnúť účinnosť konverzie poklesom entalpie pary
- narastajú parazitické straty, ak cykly nepracujú priamo s atmosférickými expandermi
- každý ďalší stupeň je napojený sériovo na prvotne oddelenú nasýtenú vodnú zložku
- každý ďalší expanzný stupeň môže zvýšiť výkon turbíny o 15 – 20 % z prírastku predchádzajúceho cyklu
- prakticky sú v elektrárnach využívané maximálne 3 expanzné cykly; t.j. ak prvotný stupeň generuje 10 MWe, pri 20 % prírastku je na druhom stupni možné získať + 2 MWe, na treťom stupni už len + 0,4 MWe, takže výsledný výkon bude predstavovať 12,4 MWe, aj to za ideálnych podmienok
- 3-stupňové elektrárne boli k roku 2020 v prevádzke len tri: Nga Awa Purua (Nový Zéland), Hudson Ranch (USA) a John L. Featherstone (USA)

Viac-stupňové elektrárne je možné zároveň charakterizovať (DiPIPPo, 1991, 2005, 2016c; HUTTRER, 2020):

- zvyčajne pracujú na rovnakom geotermálnom poli ako 1-stupňové expanzné cykly
- širšie možnosti využívania zdrojov geotermálnej energie, nakoľko umožňujú pracovať efektívne s rôznymi stupňami viazanosti parnej frakcie na vodnú zložku
- zdroje geotermálnej energie prítomné vo vulkanickom aj bazénovom prostredí v rôznej hĺbke
- ak nie je možné paru z rôznych stupňov separácie zmiešavať (chemizmus, vlhkosť, termodynamická kvalita), vyvstáva potreba ďalšej turbíny alebo celej turbínovej komory, čo zvyšuje vstupné náklady
- vyžadujú ďalšie produktovody medzi stupňami expanzie a turbínovou komorou (zvyšovanie nákladov)
- problémy s manažmentom separovanej vodnej zložky (precipitáty predovšetkým oxidov kremeňa a síry, zmena pH, zvyčajne potreba inhibítora)
- 28 elektrární so 79 produkčnými jednotkami
- priemerný inštalovaný výkon – 34 MWe

Pracovný cyklus dvoj-stupňovej expanznej elektrárne (Obr. 3.9 – kontaktná, vlhká kondenzácia) začína na ústí produkčného vrtu (PV), respektíve jeho ventile (WV), kde je možné produkované médium odkloniť k tlmiacej stanici (SC) pre atmosférickú expanziu parnej fázy a

následné zneškodnenie zvyškovej vodnej zložky. Alebo, za normálnych okolností, dvojité fáza prechádza do prvého stupňa separácie (SC), ktorý je nastavený na tlak kondenzátora. Tu prebieha základné oddelenie takzvanej vysokotlakovej pary, prechádzajúcej spätným parným ventilom (BCV) k staniciam pre odstránenie pevných častíc (PR) a vlhkosti (MR). Po prechode kontrolným a záchytným ventilom (CSV) je para privedená do turbínovej komory (ST) na prvý, *vysokotlakový stupeň lopatiek*, cez ktorý prechádza k *nízkotlakovému stupňu* a následne do kondenzátora (C). V prípade technických problémov s turbínou je para ešte pred vstupom odklonená k ejektoru (SEJ). Rozdiel oproti jednoduchému expanznému cyklu spočíva v manažmente vodnej zložky na výstupe z primárnej separácie (SC). Tá je tentokrát vedená k expanznej stanici (EX), ktorej tlak je prispôsobený tlaku turbíny na nízkotlakovom stupni. Dôjde teda k dodatočnej separácii, ktorá vytvára samostatný obeh nízkotlakovej pary, odvedenej vlastným kontrolným ventilom (CSV). Na nízkotlakových lopatkách turbíny (ST) sa stretáva s expandujúcou parou z primárneho okruhu separátora. V prípade problémov s turbínou alebo kondenzátorom je aj nízkotlakovú paru možné núdzovo vypúšťať do atmosféry v ejektore (SEJ). Para z oboch okruhov je po výstupe z turbíny (ST) vedená ku kondenzátoru (C). Zvyčajne ide o priamy typ napojený na vlhké, evaporčné chladiace veže. Zmes vody z chladiaceho okruhu a kondenzátu je čerpadlom kondenzátora (CP) smerovaná do chladiacej veže (CT), po prechode ktorou časť ostáva v záchytnej nádrži, časť je reinjektovaná do rezervoárového prostredia (IV), podľa chemického zloženia. Posledný okruh je spojený so separovanou vodnou fázou z nízkotlakovej expanznej stanice (EX). Jej teplota je zvyčajne o 40 – 60 °C nižšia, ako pri jednostupňovej expanzii, spolu s výrazne nižším tlakom, čo zvyšuje potenciál vyžrážavania sa agresívnych minerálnych fáz. Podľa chemického zloženia a teploty, či obsahu plynov, je možné separovanú vodnú zložku zneškodňovať po dodatočnom odplynení v silenceri (SC), alebo priamo reinjektovať do vrtov (IV). Odplynenie pri atmosférickom tlaku v tlmiacej stanici prichádza do úvahy, ak je separačná a expanzná stanica blízko produkčným, alebo reinjektážnym vrtom. Dlhým transportom sa neúmerne zvyšuje riziko inkrustácie a korózie v potrubí a tým aj náklady na údržbu a obnovu zariadení, preto je potom prednostne volené „ukladanie“ separovanej vodnej zložky do lagúnových zdrží, alebo priama reinjektáž. V prípade kogeneračného alebo kaskádového dizajnu elektrárne je pre druhotné využitie „odpadového tepla“ (angl. waste heat) využité len separovaná vodná zložka z primárneho stupňa, práve pre technicko-technologické otázky manažmentu vodnej zložky nižších stupňov oddeľovania.



Obrázok 3.9 Základná a zjednodušená schéma dvoj-stupňovej expanznej elektrárne napojenej na kontaktný vlhký cyklus. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?).

3.2.4 Binárne elektrárne typu ORC

Binárne elektrárne typu ORC (Organic Rankine Cycle) sú riešením v prípade produkcie zdrojov geotermálnej energie s minimálnymi obsahmi viazanej parnej frakcie, respektíve s 1-fázovou geotermálnou vodou. Práve zavedenie technológií binárnych cyklov umožnilo rozsiahly rozvoj produkcie elektrickej energie mimo hlavných geodynamických a vulkanických zón, ako je pacifický Ohnivý kruh (Ring of Fire), stredoocéánsky chrbát, anatolijský rift v Turecku, východoafrický rift (Keňa, Etiópia), alebo apeninská vulkanická zóna (Taliansko).

Termín binárne elektrárne je odvodený zo skutočnosti, že samotná elektráreň kombinuje dva od seba izolované cykly – cyklus zdroja geotermálnej energie, a cyklus pracovnej látky, ktorá nahrádza geotermálnu paru nízkou teplotou odparovania. Tieto dva cykly neprichádzajú nikdy do kontaktu. V type ORC sú štandardne využívané organické pracovné látky (BAO – ZHAO, 2013; TOMAROV – SHIPKOV, 2017; WANG ET AL., 2019; ZINSALO ET AL., 2022) na báze uhlíkovodíkov, napríklad propán (R-290), izobután (R-600a) a izopentán (R-601a), difluórmétán

(R-32), 1,1,2,2-tetrafluóretán (R-134a), R-245, celý rad flórovaných a flór-chlórovaných uhl'ovodíkov plus dnes už nepoužívané dichlórdifluórmétán (R-12) a dichlórtetrafluóretán (R-114), pre ktoré ale zároveň platí:

- pracovné látky s nízkou toxicitou majú vysokú horľavosť
- pracovné látky s nízkou horľavosťou majú vysokú toxicitu
- energeticky, ekonomicky, a termodynamicky najúčinnnejšie pracovné látky (R-12 a R-114) boli celosvetovo zakázané
- látka musí mať nízku teplotu varu a nízku teplotu zamrznutia
- aktuálne je hlavným kritériom „back-up safety“, t.j. výber takej pracovnej látky, aby v prípade nečakanej nehodovej udalosti nedošlo k nenávratnému poškodeniu biotickej a abiotickej zložky životného prostredia.

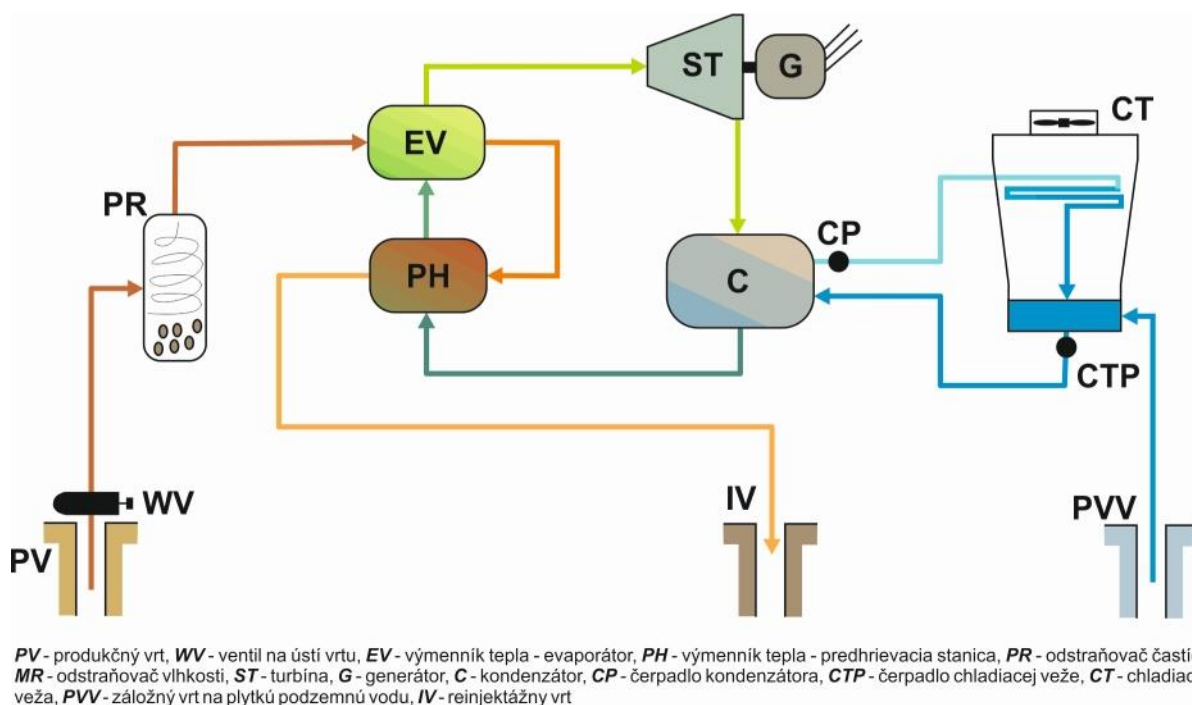
Pri súčasnom stave poznania a prieskumu zdrojov geotermálnej energie na Slovensku, vrátane konštrukcie pravdepodobnostných alebo diskretných termických modelov rezervoárového prostredia v overených hĺbkach (napr. VRANOVSKÁ ET AL., 1999; MARCIN ET AL., 2020; FRIČOVSKÝ ET AL., 2024) **vzhľadom na fázovú povahu zdrojov geotermálnej energie a limitovanú prítomnosť vlhkej pary sú binárne cykly (ORC, Kalina) pravdepodobne jedinou technologickou alternatívou produkcie elektrickej energie zo zdrojov geotermálnej energie na Slovensku.**

Binárne konverzné cykly je možné charakterizovať nasledovne (DIPPO, 1989, 1991, 2005, 2016C, 2020; HUTTRER, 2020; YASUKAWA ET AL., 2020):

- ORC systémy využiteľné pri teplotách od 80 °C
- Kalinove systémy (viď 3.2.5) schopné termodynamicky účinnej práce pri teplotách od 60 °C
- v porovnaní s inými pracovnými cyklami najmenej náročné na povahu a termodynamickú kvalitu zdroja geotermálnej energie
- minimálny environmentálny dopad (oba cykly uzavreté, geotermálna voda ostáva v uzavretom cykle produkcie a reinjektáže, pracovná látka je vyparovaná a kondenzovaná cyklicky v uzavretom okruhu a nepriamych kondenzátoroch)
- redukovaná hlučnosť (žiadne ejekčné ani tlmiace stanice)
- napojiteľné na expanzné elektrárne sériovo (na kondenzát) alebo paralelne (zvyškové teplo zo separácie)

- kvôli redukcii nákladov pracujú častokrát s bezkontaktnými suchými chladiacimi systémami, preto je ich účinnosť často závislá na klimatických obdobiach
- interval účinnosti dosahuje 10 – 40 %
- 136 elektrární (48 % celkového počtu) a 309 jednotiek (46 % z celkového počtu) k roku 2020
- priemerný výkon na jednu jednotku je 8,5 MWe
- najvyšší inštalovaný výkon v prepočte na turbínu má elektráreň Salton Sea (USA) – 58 MWe
- len 15 % (14 730 GWh,e) podiel na svetovej produkcii elektrickej energie z geotermálnych elektrární k 2020
- binárny dizajn umožňuje konštrukciu tzv. binárnych kogeneračných autonómnych cyklov (produkcia elektrickej energie a tepla) s inštalovanými výkonmi 1 – 3 MWe a 1 – 5 MWt
- častokrát kogeneračné, v kombinácii s tepelným využitím geotermálnej vody po opustení výmenníkového okruhu elektrárne.

Základná schéma **pracovného cyklu binárnej ORC elektrárne** (Obr. 3.10) začína na ústí produkčného vrtu (PV). Geotermálna voda smeruje systémom filtrov a odstraňovačov pevných častíc (PR) k výmenníku tepla nazývanému evaporátor (EV), v ktorom dochádza k prehriatiu pracovnej látky na teplotu, pri ktorej dochádza k jej odpareniu. Po opustení evaporátora smeruje ochladená geotermálna voda k ďalšiemu výmenníku tepla, ktorý pracuje s jej nižšou teplotou, predhrievacej stanici (PH), ktorej úlohou je zvýšiť teplotu pracovnej látky pred vstupom do evaporátora natoľko, aby bol využitý čo najväčší potenciál zdroja geotermálnej energie, a premena na paru čo najefektívnejšia. Následne geotermálna voda opúšťa elektráreň, je odvádzaná k systému reinjektážnych vrtov (IV), alebo na ďalšie, priame využitie. Po zmene fázového stavu na paru prechádza pracovná látka kontrolným a spätným ventilom (CSV). Na rozdiel od geotermálnej pary je v prípade poruchy turbíny možné odvieť paru len do kondenzátora (C). Za priaznivej situácie organická látka pokračuje do turbíny (ST), kde prechádza škálou turbínových lopatiek. Pracovný cyklus opúšťa v kondenzátore (C), kde dochádza k zmene jej fázového stavu na kvapalnú. Chladiacou zmesou je voda, alebo vzduch z chladiacej veže (CT) privádzané do kondenzátora čerpadlom (CTP). Chladiaca voda je dodávaná systémom vrtov na plytkú, studenú podzemnú vodu (PVV).



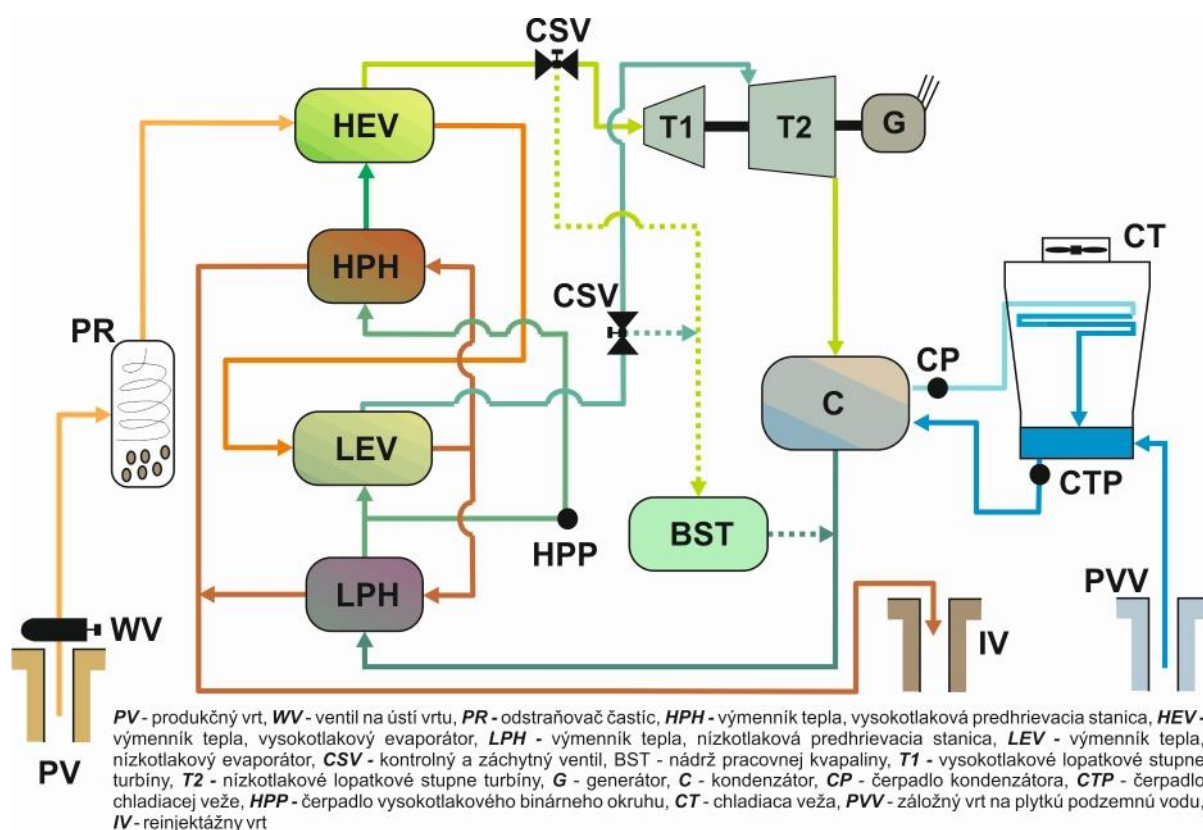
Obrázok 3.10 Základná a zjednodušená schéma binárnej elektrárne typu ORC napojenej na bezkontaktný vlhký cyklus. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?).

Ekvivalentom viacstupňových expanzných elektrární je v prípade binárnych jednotiek takzvaný **viacstupňový binárny cyklus** (angl. dual-pressure binary power cycle), ktorý zvyšuje účinnosť produkcie jednoduchej elektrárne až o 25 %, avšak za cenu výrazného navýšenia vstupných nákladov (DIPPO, 2004, 2007, 2016). Technicky a technologicky ide o úpravu obyčajnej binárnej elektrárne tak, aby bola maximalizovaná fázová premena pracovnej látky a minimalizovaná vlhkosť jej pary pri vstupe do turbínovej komory. Nevýhodou sú parazitické straty potrebné na stupeň nízkotlakového prehrievania a vyparovania (Obr. 3.11).

Pracovný cyklus dvojstupňovej elektrárne štandardne začína na ústí produkčného vrtu (PV). Následne je geotermálna voda privádzaná cez odstraňovaciu stanicu pevných častíc (PR) k (hlavnému) vysokotlakovému evaporátoru (HEV). Po prechode, kedy odovzdáva podstatnú časť tepla pracovnej látky tak, aby došlo k jej čo najefektívnejšiemu odpareniu, prechádza do nízkotlakového evaporátora (LEV), kde dochádza k nízkotlakovej evaporácii, pri nízkej teplote, ale zároveň aj nízkom tlaku v porovnaní s nasledujúcim štádiom. Až následne je geotermálna voda distribuovaná súbežne k vysokotlakovej (HPH) a nízkotlakovej (LPH) predhrievacej stanici, ktoré sú navrhnuté tak, aby pred vstupom do evaporátorov sa teplotné krivky procesov geotermálnej vody a pracovnej látky čo najviac priblížili, a pracovná látka bola prehriatá už

pred vstupom do evaporátora čo najefektívnejšie. Po tepelnej výmene je geotermálna voda odvedená z elektrárne za účelom ďalšieho využitia, alebo reinjektáže (IV). Okruh pracovnej látky je nastavený protismerne oproti pohybu geotermálnej vody. Po opustení kondenzátora (C) prechádza, podobne ako v základnom dizajne, prvostupňovou a následne druhostupňovou sústavou prehrievania a odparenia, so samostatným odvedením k lopatkovým stupňom turbíny (ST1 a ST2) cez kontrolné a spätné ventily (CSV). Hoci para z oboch stupňov prúdi k turbíne samostatne, v nízkotlakovom stupni dochádza k premiešaniu pary z nízkotlakovkej sústavy s parou expandujúcou od vysokotlakových stupňov. Zmiešavanie zvýši teplotu nízkotlakovkej pary a zníži jej vlhkosť, čo vedie k podpore výkonu druhého turbínového stupňa. Následne je spoločne para odvedená do kondenzátora (C). Cyklus chladenia bol opakovane opísaný vyššie.

Keďže dvojstupňový cyklus prináša určité parazitické straty spojené s nízko teplotným / nízkotlakovým okruhom doplnujúceho odparovania, v segmente binárnych jednotiek je aktuálne stupňujúci sa tlak na výskum a vývoj takzvaných binárnych-expanzných cyklov. Tie sú odvodené od jednoduchšej pracovnej schémy (Obr. 3.10), kde v evaporátore (HEV) nedôjde



Obrázok 3.11 Základná a zjednodušená schéma dvojstupňovej binárnej elektrárne typu ORC napojenej na bezkontaktný vlhký cyklus. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?).

ku tepelnému odpareniu čo najväčšieho množstva pracovnej látky, ale tá je následne ešte expandovaná v nízkotlakovej expanznej stanici pred vstupom do turbínovej komory. Zavedenie jednoduchších systémov výmenníkov tepla, a jednoduchá tlaková expanzia má za účel znížiť vstupné náklady. Testovanými pracovnými látkami, ktoré by boli vhodné pre jednoduchú tlakovú expanziu po čiastočnom prehrievaní, sú freóny a izobutén, R-1234ze, R1233zd(E), a.i. (EDRISI – MICHAELIDES, 2013; GALLONI ET AL., 2015; GUILLAUME ET AL., 2017; LIU ET AL., 2018).

Už menej často využívaným typom je takzvaný **rekuperačný binárny cyklus**, ktorý kombinuje dve organické pracovné látky, pričom pracovná látka vysokotlakového stupňa po výstupe z turbíny kondenzuje v kondenzátore odovzdávaním tepla pracovnej látke nízkotlakového stupňa (SHOKATI ET AL., 2015). Ide o pomerne drahé, a náročné systémy, pre ktoré musí byť dostatočná produktivita zdroja geotermálnej energie tak, aby celkový výkon elektrárne dokázal vyvážiť extrémne vysoké náklady, v porovnaní s inými typmi binárnych jednotiek (vlastné obehové a výmenníkové systémy a turbíny pre vysokotlakový a nízkotlakový okruh pracovných látok).

3.2.5 Binárne elektrárne typu Kalina

Kalinove elektrárne (DIPPO, 2005, 2016C) sú špecifickým typom binárnych cyklov, ktoré ako pracovnú látku využívajú zmes $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Základom celého cyklu je skutočnosť, že obe látky existujúce v zmesi majú rozdielnú teplotu varu, čo umožňuje opakovanú rekuperáciu a zvyšovanie teploty zmesi bez toho, aby došlo k expanzii a odpareniu skôr, ako je vstup do turbínového prostredia po efektívnej separácii. Z desiatok patentov a laboratórnych dizajnov pre porovnanie s „konvenčnými“ ORC systémami je vhodné využiť pôvodný, KCS-11 a KCS-34 dizajn (KALINA ET AL., 2014; FIASCHI ET AL., 2017), pričom jeden je využitý v elektrárni Matsunoyama (Japonsko), a druhý v elektrárni Húsavík (Island), Unterhaching (Nemecko) a Bruchsal (Nemecko).

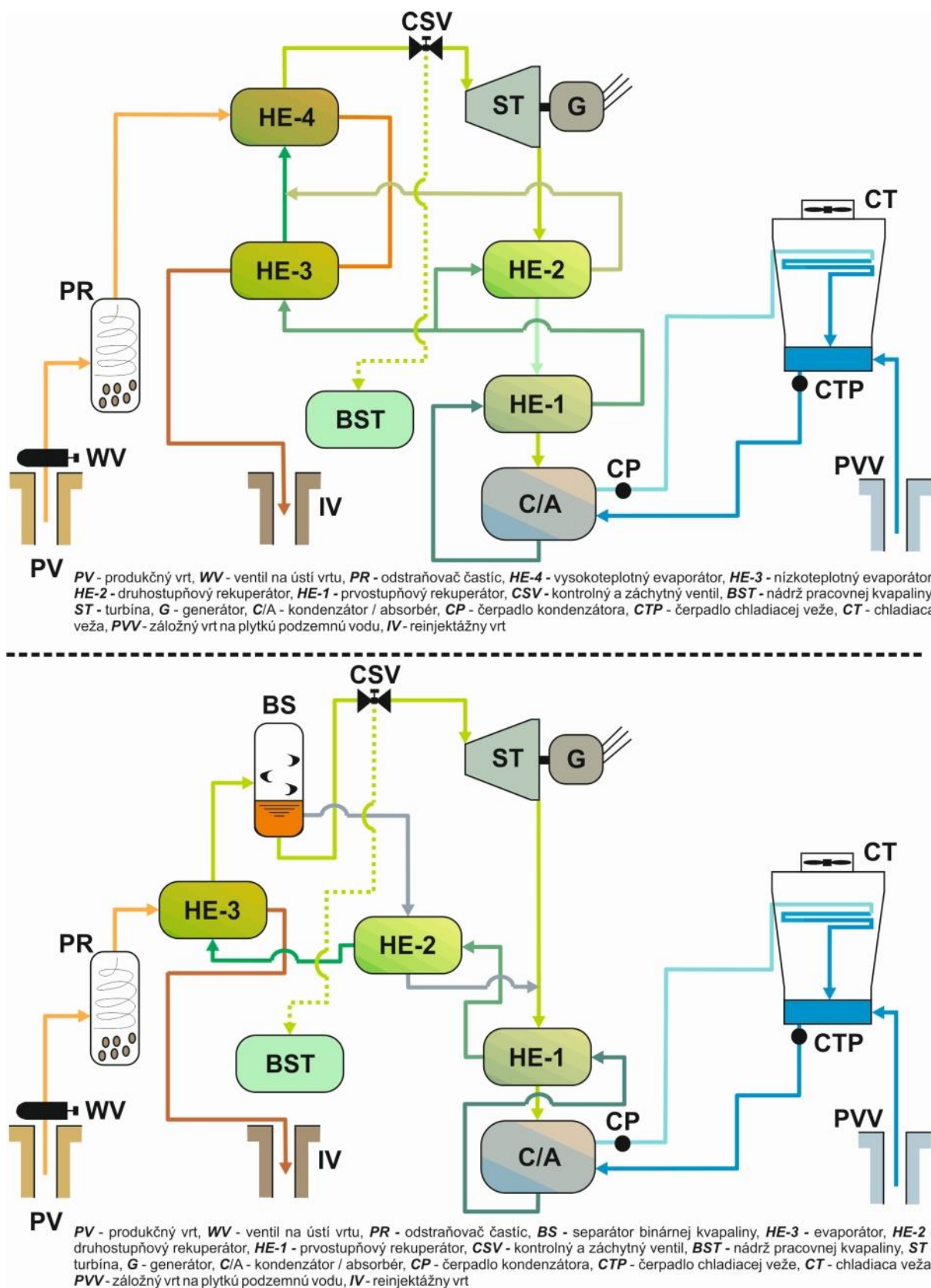
Pracovný cyklus systému KCS-11 začína príivodom geotermálnej vody z produkčného vrtu (PV) do vysokoteplotného výmenníka tepla (HE-4), v dôsledku čoho zmes prechádza do väčšinovej plynnej fázy a je odvedená k turbíne (ST). Tento výmenník tepla plní úlohu evaporátora. Čiastočne ochladená geotermálna voda smeruje k nízokoteplotnému výmenníku

(HE-3), kde odovzdáva teplo zmesi opúšťajúcej prvostupňový rekuperátor (HE-1), zvyšuje teplotu zmesi, čo vedie k efektívnejšiemu odparovaniu, a samotná odchádza do systému reinjektáže (IV) alebo na ďalšie využitie. Naopak, pracovná látka po opustení evaporátora (HE-4) smeruje k turbíne (ST) kde vykonáva prácu. Prvý stupeň ochladenia prebieha v druhostupňovom rekuperátore (HE-2), kde zmes kondenzuje, a teplo odovzdáva časti zmesi opúšťajúcej prvostupňový rekuperátor. Druhý stupeň ochladenia prebieha práve v prvostupňovom rekuperátore (HE-1), v kontakte s kvapalnou zmesou opúšťajúcou absorbér, alebo kondenzátor (C/A). Práve v absorbéri je formujúci sa kondenzát ochladený chladiacou vodou z chladiacej veže pre dôsledné zníženie teploty pracovnej látky.

Pracovný cyklus dizajnu KCS-34 začína produkciou geotermálnej vody v produkčnom vrte (PV). V tomto koncepte sa geotermálna voda s pracovnou látkou stretáva len v evaporátore (HE-3), kde sa následne zmes dostáva nad teplotu varu a mení povahu na dvojfázovú zložku. Geotermálna voda je odvedená k systému reinjektáže (IV), alebo na ďalšie účely. Zmes opúšťajúca evaporátor je odvedená k centrifugálnemu, binárnemu separátoru (BS), kde je oddelená vodná a parná zložka. Parná zložka vykonáva prácu v turbíne (ST). Na vývode z turbíny je zmiešaná s kvapalnou fázou, ktorá po opustení binárneho separátora prešla vysokoteplotným rekuperátorom (HE-2), v ktorom predhriala zmes smerujúcu do evaporátora. Čiastočne kondenzovaná para spolu so separovanou vodnou zložkou sú vedené k nízokoteplotnému rekuperátoru (HE-1), kde odovzdávajú teplo a predhrievajú zmes opúšťajúcu absorbér, alebo kondenzátor (C/A). Tu pracovná látka definitívne kondenzuje a ochladzuje sa na základnú, obehovú teplotu pri nepriamom kontakte s chladiacou vodou privedenou z chladiacej veže. Systém je nastavený pre maximálnu teplotu geotermálnej vody 140 °C.

Využívanie Kalinovho typu je obmedzené kvôli technickým problémom, napriek tomu (DiPIPO, 2015, 2016C):

- dokážu pracovať s geotermálnou vodou na ústí vrtu nad 60 °C
- termodynamická účinnosť dosahuje 30 – 40 %, vysoko nad konvenčnými ORC cyklami
- zmes $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ je široko dostupná a lacnejšia, ako organické pracovné látky
- nevyhnutne vyžaduje bezkontaktné vlhké chladiace systémy
- zvýšené investície, v závislosti na komplikovanosti dizajnu, vzhľadom na výmenníky tepla a potrebu distribučnej siete produktovodov
- mnohé existujúce projekty po čase vykazovali technické problémy spojené s dlhodobou opakovanou rekuperáciou a mechanickým poškodzovaním turbínových lopatiek.



Obrázok 3.12 Koncept dizajnov KCS-11 a KCS-34 napojených na bezkontaktný vlhký cyklus chladenia. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?).

PRÍKLAD 3.3: Geotermálne elektrárne a voľba vhodného dizajnu

ZADANIE: Hydrogeotermálny prieskum overil v hĺbkach 3 500 m, v ktorej absolútny tlak dosahuje 36,5 MPa a blíži sa tlaku hydrostatickému, zdroje geotermálnej energie s teplotou $T = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, s produktivitou $Q = 75\text{ l.s}^{-1}$, a saturovanou vlhkou geotermálnou parou s frakciou 2 – 5 %. Investorom je priemyselný park s energetickou náročnosťou 1,0 MWe, ktorý ako vedľajšiu činnosť zároveň využíva svoje kapacity pre sušenie poľnohospodárskych plodín z okolitých družstiev s energetickou náročnosťou 4 MWt, ktoré získava v systémoch založených na zemnom plyne. Zámerom je poskytnúť okolitým obciam v rámci spoločenskej kompenzácie drobný rekreačný rezort s vyhrievaním bazénov, pričom minimálne požiadavky na tepelný výkon zdroja sú 2 MWt. Geochemické modelovanie určilo minimálnu teplotu reinjektáže geotermálnej vody aspoň $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Požiadavky investora zahŕňujú termodynamickú účinnosť elektrárne aspoň 35 %, účinnosť výmenníkov tepla 85 %. Pre prieskumnú firmu vyplývajú otázky:

- aký dizajn elektrárne je možné s daným zdrojom GTE použiť?
- je daný zdroj schopný pokryť energetickú požiadavku pre elektrárne?
- aký dizajn chladiaceho systému si bude vyžadovať elektrárne?
- je možné z daného zdroja energeticky zabezpečiť aj požadované CHP systémy tepelného zúžitkovania odpadového tepla z elektrárne?
- pri splnení požadovaných výkonov, je pre investora zmysluplné uvažovať o ďalších možných spôsoboch využívania zdrojov geotermálnej energie?

RIEŠENIE:

a) Podľa charakteristiky overeného zdroja geotermálnej energie, ktorý obsahuje parnú frakciu s pomerom 2 – 5 % vo forme vlhkej saturovanej pary je zrejmé, že do úvahy prichádza jedine systém založený na **binárnych cykloch**. Podľa požiadaviek investora na energetickú účinnosť je zrejmé, že do úvahy prichádza **viacstupňový binárny pracovný cyklus**, ktorý je jediný schopný dosiahnuť danú účinnosť.

b) Na základe termodynamického modelovania (v štúdiu neuvedené) je možné dosiahnuť daný energetický výkon binárnej jednotky pre spádovú teplotu na výstupe z elektrárne $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ak berieme do úvahy maximálnu produktivitu)

c) Keďže ide o binárnu elektrárne, kde pracovná a chladiaca látka nesmú prísť spolu do kontaktu, do úvahy prichádzajú jedine **nepriame chladiace cykly**, založené na vode alebo vzduchu. Lacnejší, vzduchom-chladený variant je závislý na sezónnosti vývoja teploty vzduchu, drahší, vlhký variant vyžaduje využiteľné zásoby povrchovej alebo plytkej podzemnej vody. Pre nízku energetickú rezervu elektrárenského cyklu je ale nevyhnutné odporúčiť vlhký nepriamy chladiaci systém.

d) Vychádzajúc z realizovaného modelu elektrárne, je teplota geotermálnej vody na výstupe z elektrárne $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pre prvý kaskádový stupeň požaduje investor 4 MWt. Optimalizovaním vzťahu /2.2/ je daný výkon dosiahnuť v prípade, ak teplota geotermálnej vody na výstupe dosiahne $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podľa Lindalovho diagramu (Obr. 3.1) je zároveň možné uvažovať o využívaní geotermálnych vôd pre účel sušenia plodín. Preto vo výsledku **je prvý kaskádový (poľnohospodársky) stupeň možný**. Ak nepredpokladáme ďalšie straty teploty, potom opätovnou optimalizáciou vzťahu /2.2/ je možné energetické požiadavky druhého stupňa, 2 MWt, dosiahnuť v prípade, ak minimálna spádová teplota bude $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ide o teplotu nad kritickou teplotou reinjektáže. Z tohto pohľadu **je druhý kaskádový (rekreačný) stupeň možný**.

e) Ak zväžíme rozdiel medzi kritickou teplotou reinjektáže a teplotou na výstupe z druhého kaskádového stupňa, podľa /2.2/ je hrubý energetický výkon geotermálnej vody (pri 100 % účinnosti tepelnej výmeny) 0,6 MWt. Z tohto pohľadu **nie je realistické uvažovať o ďalších možnostiach využívania zdroja geotermálnej energie nad rámec plánovaného CHP cyklu**.

3.3 Typy geotermálnych vrtov

Geotermálne vrty predstavujú (s výnimkou ojedinelých prípadov, kedy sú využívané predovšetkým v priamych systémoch prirodzené termálne vývery geotermálnej vody a dvojitej fázy) jediný spôsob produkcie zdrojov geotermálnej energie pre jej priame aj nepriame využitie. Rozvoj geotermálnych polí a produkcie geotermálnej energie je štandardne, podľa globálnej praxe, diametrálne odlišný od „klasického“ hydrogeologického prieskumu a následne produkcie „obyčajných“ podzemných vôd práve rôznou funkciou, ktoré geotermálne vrty majú – za účelom realizácie úspešného, systematického, a udržateľného – prieskumu, využívania a monitoringu zdrojov geotermálnej energie, splňať.

Základné atribúty, ktoré odlišujú konštrukciu a pozíciu geotermálnych vrtov oproti ropnému priemyslu, alebo klasickej (plytkej) hydrogeológii sú (GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON – FRANZON, 2012):

- väčšina geotermálnych vrtoch je hĺbená do pevného skalného podložia (karbonáty, vulkanity, magmatity, metamorfity), pričom zvyčajne len úvodné úseky sú v nekompaktných sedimentoch, čo výrazne sťažuje samotný proces vrtania
- otvorené (open-hole) alebo perforované (screen) úseky pri geotermálnych vrtoch bývajú dlhé (resp. hlboké) n10 – n100 m
- je bežná stratifikácia perforovaných úsekov v rámci jedného vrtu
- charakteristické je riziko explózie a výbuchu, na ktoré musia byť vrty usposobené špecializovanými zariadeniami – preventermi (blow-out preventer)
- pracujú s neporovnateľne väčšími rezervoárovými tlakmi a teplotami, čo mení požiadavky na vnútorné vybavenie geotermálnych vrtov (paženie vrtu = angl. casing) a ich zaistenie voči okoliu (cementácia = angl. cementing)
- ako vrtné mazivo a chladiace médium počas vrtania je najvhodnejšia voda, pri ktorej nehrozí po prieniku do priepustných rezervoárových vrstiev ich upchatie, napríklad vrtným piesčitým až ílovitým výplachom, ako pri hydrogeologických alebo ropných vrtoch
- súčasťou vrtania je aj riziko úplnej straty vrtného výplachu (po jeho preniknutí do priepustných horninových zón) a nevyhnutnosť jeho monitoringu a manažmentu
- štandardne je vrtanie realizované pri omnoho väčších vrtných profiloch (priemeroch).

Normálnou, a vyžadovanou súčasťou vrtania s cieľom prieskumu, overenia, a častokrát aj produkcie zdrojov geotermálnej energie **je stimulácia rezervoárového prostredia** geotermálnych vrtov za účelom zvýšenia jeho prirodzenej priepustnosti s využitím injektovania vody alebo vrtného vodného výplachu pod veľkým tlakom, injektovania studenej vody s cieľom pôsobenia tepelného šoku na horninové prostredie, alebo s využitím injektovania kyselín, ak to umožňuje litológia rezervoáru (AXELSSON – THÓRHALSSON, 2009; THÓRHALSSON, 2009, 2012A).

Na základe funkcie (Tab. 3.2, 3.3, Obr. 3.13), ktorú jednotlivé vrty na štandardne manažovaných geotermálnych polia vykonávajú, je možné rozlíšiť (AXELSSON ET AL., 2005B; THÓRHALSSON, 2009; AXELSSON – FRANZSON, 2012; SAEMUNDSSON, 2010; SANTOS, 2011; THÓRHALSSON – GUNNLAUGSSON, 2012; AXELSSON, 2018):

- **gradientové vrty (temperature gradient wells)** = prieskumné vrty často s hĺbkou do 50 – 200 m, zvyčajne úzkoprofilové (angl. slimhole) s priemerom < 15 cm, ktorých hlavným účelom je prieskum nadložia a distribúcia tepelného toku a geotermického gradientu, prípadne identifikovanie plytkých výstupných zón zdrojov geotermálnej energie, a tak aj geotermálne anomálie v rámci prieskumu geotermálneho poľa, ale aj jeho kontinuálneho monitorovania počas produkcie konštrukciou teplotných profilov – zvyčajne bez paženia
- **prieskumné vrty (exploration wells)** = štandardne realizované do cieľovej hĺbky odhadovaného rezervoáru zdrojov geotermálnej energie, štandardne s úzkym profilom a priemerom < 15 cm, ktorých výhoda oproti realizácii priamych produkčných vrtov v nepreskúmanom území sú ich podstatne nižšie náklady spojené s menším priemerom – vrty sa štandardne využívajú počas prieskumu na odber pevného horninového materiálu (stanovenie geofyzikálnych, geotermických, termofyzikálnych a hydraulických parametrov) a prvotné geochemické odbery zdroja geotermálnej energie – vrty môžu byť následne využité ako úzkoprofilové-produkčné, alebo rozšírené vrtaním na štandardné priemery – pažené len v prípade úspešného overenia zdrojov geotermálnej energie – v prípade úspešného overenia môžu byť zároveň využité aj ako pozorovacie, alebo monitorovacie vrty
- **produkčné vrty (production wells)** = vrty realizované s cieľom samotnej produkcie zdroja geotermálnej energie, štandardne realizované ako širokoprofilové, pažené od povrchovej / úvodnej kolóny

- **vytyčovací vrt (step-out well)** = vrt realizovaný ako úzkoprofilový alebo širokoprofilový, cielený v perifériách rezervoáru alebo jeho efektívnej produkčnej zóny, za účelom overenia jeho geometrie a vlastností (fáza prieskumu), a následne za účelom monitorovania, kedy štandardne slúžia na teplotné a tlakové profilovania, eventuálne kontinuálne monitorovanie rezervoárového tlaku – v prípade ich dobrého technického stavu môžu byť v prípade potreby využité ako produkčné vrty
- **záložné / náhradné vrty (make-up wells / fill-in wells)** = vrty realizované počas hlavných vrtných prác, alebo počas produkcie rezervoáru s cieľom mať záložné vrty pre prípad neočakávaných situácií na vytýčených produkčných alebo reinjektážnych vrtoch, respektíve vrty nahradzujúce existujúce produkčné vrty na hranici životnosti, pri ktorých sa štandardne nevykonávajú overujúce hydrodynamické skúšky, alebo geofyzikálne karotážne meranie
- **reinjektážne vrty (reinjection wells)** = vrty špecificky vŕtané ako širokoprofilové za účelom reinjektáže, štandardne v rámci produkčnej zóny alebo na jej periférii, v závislosti na optimalizácii reinjektážnej stratégie (viď 3.4)
- **monitorovacie vrty (monitoring wells)** = vrty realizované už v zámere ako monitorovacie (štandardne úzkoprofilové kvôli úspore nákladov), alebo pôvodne produkčné vrty, ktorých funkcia sa zmenila na monitorovaciu posunutím produkčného poľa v dôsledku geologických, geotermických, hydraulických, alebo produkčných faktorov – štandardne obsahujú vybavenie na kontinuálny alebo periodický monitoring termických a tlakových parametrov, prípadne zabudované intervalové sondy na sledovanie parametrov vo vybraných bodoch celého úseku vrtu
- **spiace vrty (stand-by wells)** = pôvodne produkčné, prípadne reinjektážne vrty, ktoré sú krátkodobé alebo dlhodobé odstavené v dôsledku potreby manažovania produkcie zdroja geotermálnej energie alebo v dôsledku zmeny jeho produktivity a kvalitatívnych alebo kvantitatívnych parametrov – udržiavané v technickom stave umožňujúcom ich okamžitú aktiváciu v prípade potreby, t.j. prepojené s povrchovou infraštruktúrou

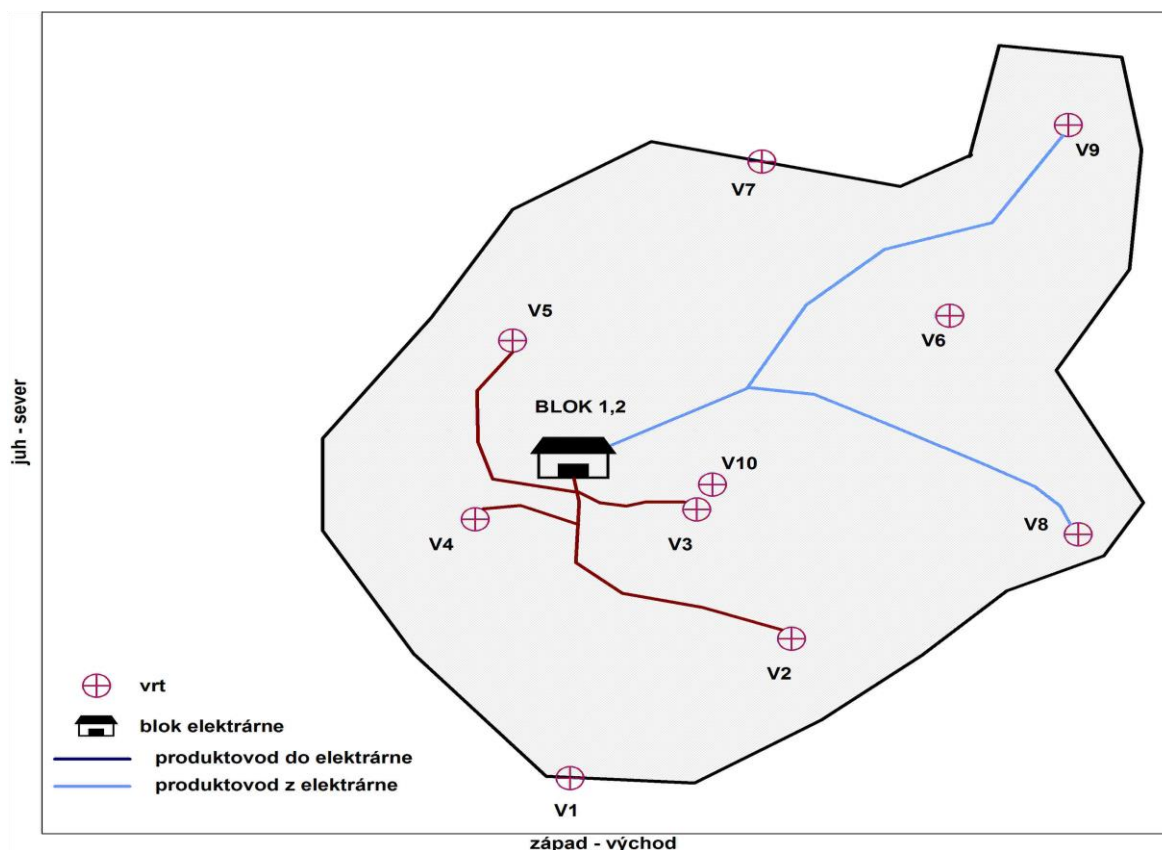
Zaužívanou praxou na Slovensku je schéma 1 vrt = 1 projekt = 1 majiteľ, aj v rámci toho istého rezervoárového prostredia, pričom majiteľa / producenti zdrojov geotermálnej energie spolu štandardne nekomunikujú. Konštrukcia podobnej schémy vrtov je bez výrazného zlepšenia povedomia o rezervoárovom manažmente a legislatívnej podpory takmer nemožná.

Tabuľka 3.2 Funkcie a základný dizajn štandardných vrtoch na produkovaných geotermálnych poliach. Upravené podľa: Thórhallsson (2009); Axelsson – Franzson (2012)

názov útvaru	gradientové vrty	prieskumné vrty	produkčné vrty	vytyčovací vrty	záložné vrty	reinjektážne vrty	monitorovacie vrty	spiace vrty
DIZAJN A VYBAVENIE VRTU								
profil	<	<, >	>	<, >	>	>	<, >	>
paženie	-	o	x	o	x	x	o	x
monitoring na ústí	-	-	x	-	x	x	x	x
monitoring karotážou	x	x	x	-	o	x	x	-
vertikálny monitoring	-	-	x	o	o	x	x	-
profilovanie	x	x	x	o	o	x	x	-
pevné vzorky	x	x	-	o	-	-	-	-
fázové vzorky	x	x	x	o	-	x	x	-
prepojenie s projektom	-	-	x	-	x	x	o	-
zmena účelu	-	x	x	o	x	o	x	x
FÁZA KONŠTRUKCIE A FUNKČNOSTI (AKTIVITY) VRTU								
prieskum	x	x	x	x	-	-	-	-
overenie	x	x	x	x	-	-	-	-
skúšanie	x	x	x	x	x	x	-	-
produkcia	x	-	x	x	x	x	x	x
ultmenie / ukončenie	x	-	x	-	x	x	x	x
GEOMETRIA – TYP VRTANIA								
vertikálne	x	x	x	x	x	x	x	x
uklonené	-	-	x	-	x	o	-	x
orientované	-	-	x	-	x	o	-	x

vysvetlivky: < = úzkoprofilové ; > = širokoprofilové ; x = štandardne áno ; - = štandardne nie ; o = v prípade potreby, nevyhnutnosti

PRÍKLAD 3.4: Funkcia geotermálnych vrtov na fiktívnom geotermálnom poli využívanom pre produkciu elektrickej energie.



Priložená veľmi jednoduchá schéma zobrazuje niekoľko vrtov V1 až V10 v rôznych priestorových pozíciách v rámci vymedzeného rezervoárového prostredia (polygón). Kým niektoré geotermálne projekty pracujú v schéme 1 projekt = 1 vrt, a niektoré geotermálne elektrárne využívajú jednotky, respektíve desiatky vrtov, situácia býva často komplikovaná, a realizovaných vrtov môžu byť stovky. Príklad má ilustrovať variabilitu použitia vrtov v rámci projektu. Z pohľadu funkcie geotermálnych vrtov je možné napríklad charakterizovať:

- vrt **V1** a **V7** sú situované na nateraz vymedzenom okraji rezervoárového prostredia, a preto ich funkcia je jednoznačne vytyčovací - zároveň ale môžu plniť funkciu monitorovacích vrtov na periférii, a v prípade ich technického vybavenia a vhodného vrtného profilu môžu byť využité aj ako prieskumné (pri rozširovaní prieskumu o geometriu rezervoáru v južnom alebo severnom smere)
- vrt **V8** a **V9** je aktuálne reinjektážny: situovaný na okrajoch rezervoáru (periférna reinjektáž), pričom pôvodne mohli byť oba vrty konštruované aj ako prieskumné, v rámci vymedzovania rezervoáru, prípadne v prvých etapách prieskumu rezervoáru a jeho rezervoárového média
- vrty **V2** až **V5** sú evidentne produkčné, nakoľko sú napojené produktovodmi do elektrárne. V závislosti na ich technickom vybavení a spôsobe realizácie (vrtania) mohli byť pôvodne aj prieskumné, prípadne môžu byť využívané aj ako záložné (alebo realizované už boli aj ako záložné)
- vrt **V10** je v charakteristickej pozícii monitorovacieho objektu (blízko, alebo na okraji produkčnej zóny vymedzenej produkčnými vrtmi), pričom v budúcnosti, pri jeho vhodnom technickom vybavení, môže slúžiť ako vrt záložný ku vrtu V3
- pozícia vrtu **V6** je štandardnou pre monitorovacie vrty, nakoľko sa približuje zvolenej reinjektážnej zóne (vrty V8 a V9), a prípadné frontové postupy identifikuje najskôr, a teda na hodnotenie vplyvov produkcie a reinjektáže môže byť využitý vrt V6 spoločne s vrtom V10.

Tabuľka 3.3 Výber základných metód geologického, geochemického, a geofyzikálneho výskumu ovplyvňujúcich priestorovú pozíciu vrtov na geotermálnych poliach. Upravené podľa: Axelsson – Franzson (2012); Axelsson (2018)

Typ prieskumu	Prieskumné a vytyčovací vrtý	Produkčné vrtý a spiace vrtý	Monitorovacie a gradientové vrtý	Záložné vrtý	Reinjekčné vrtý
povrchové geologické mapovanie	P	P	S	S	P
štruktúro-tektonické mapovanie	P	P	S	S	P
mapovanie povrchových prejavov	P	P	P	-	P
povrchové teplotné merania, atmogeochemia	S	P	P	S	S
geochemický a izotopový prieskum	P	P	P	S	S
letecké a družicové snímkovanie	S	S			S
hydrogeologické mapovanie a prieskum	P	P	P	P	S
magnetometria	S	S	-	-	P
gravimetria	P	S	S	S	P
geoelektrika a magnetotelurika	P	S	P	P	P
seizmika	P	P	S	S	P
vrtná litológia	-	P	S	P	P
teplotné a tlakové profily	-	P	S	P	S
prítokometria	-	P	P	P	P
vrtné kamerové záznamy	-	S	-	S	P
hydrodynamické skúšky	-	P	P	P	P
monitoring teploty a tlaku	-	P	P	P	P
geochemický monitoring	-	P	P	P	P
monitoring teploty a tlaku	-	P	P	P	P
mikroseizmika	-	S	-	S	P
stopovacie skúšky	-	P	P	P	P
priestorové rezervoárové modelovanie	P	S	P	S	P

vysvetlivky: P = primárne ovplyvňuje pozíciu, S = sekundárne ovplyvňuje pozíciu, - = neovplyvňuje pozíciu

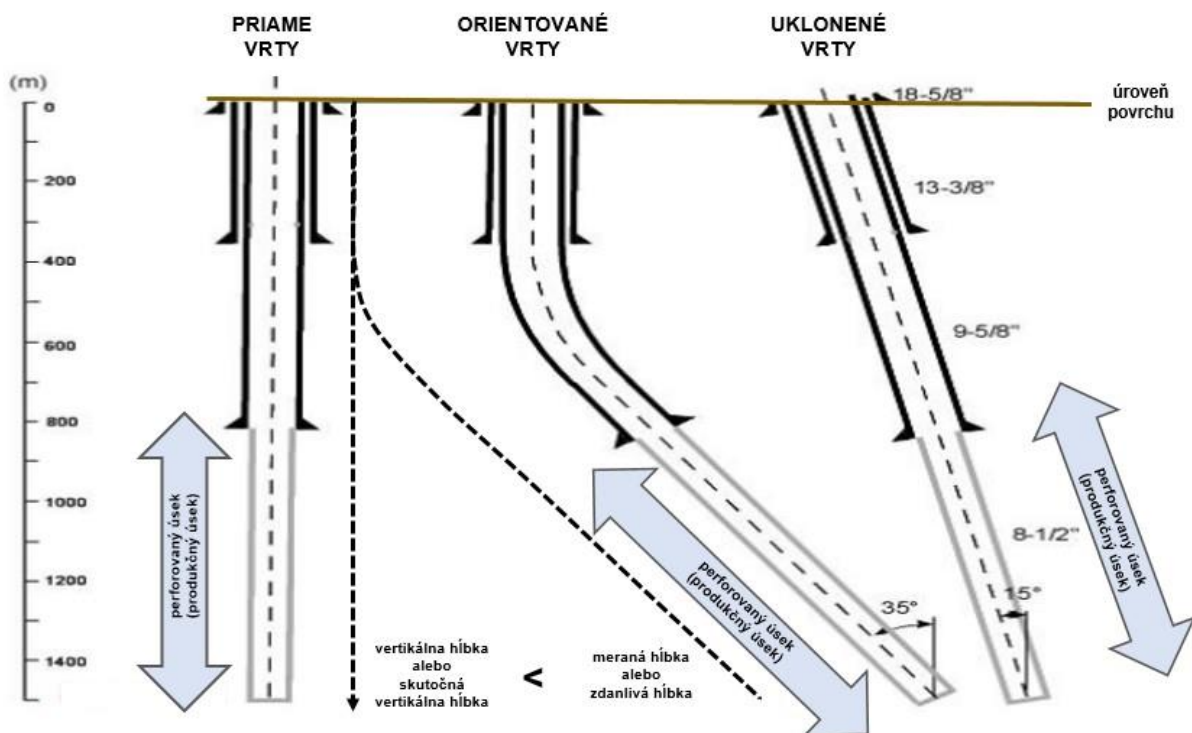
Predovšetkým pri skutočne rozsiahlych projektoch, ako sú systémy centrálneho zásobovania teplom napojené na viacstupňové kaskády, alebo by-pass dizajnované viacúčelové využitie, respektíve pri geotermálnych elektrárnach má inštalácia viacerých vrtov na základe komplexného prieskumu a monitorovania obrovský význam, pretože z dlhodobého hľadiska:

- inštalácia vrtov môže prebiehať krokovo, na základe prieskumu a monitorovania, t.j. projekt si na doplnujúce vrty zvyčajne môže zaradiť
- aplikácia povrchového prieskumu v prvotných štádiách rozvoja geotermálneho poľa limituje početnosť potrebných vrtov pre relevantné výsledky
- realizácia predovšetkým úzkoprofilových vrtov je z dlhodobého hľadiska lacnejšia, ako prípadné ukončenie projektu v prípade nedostatočného prieskumu a poznania rezervoárového prostredia, ktoré by viedlo ku kolapsu daného projektu.

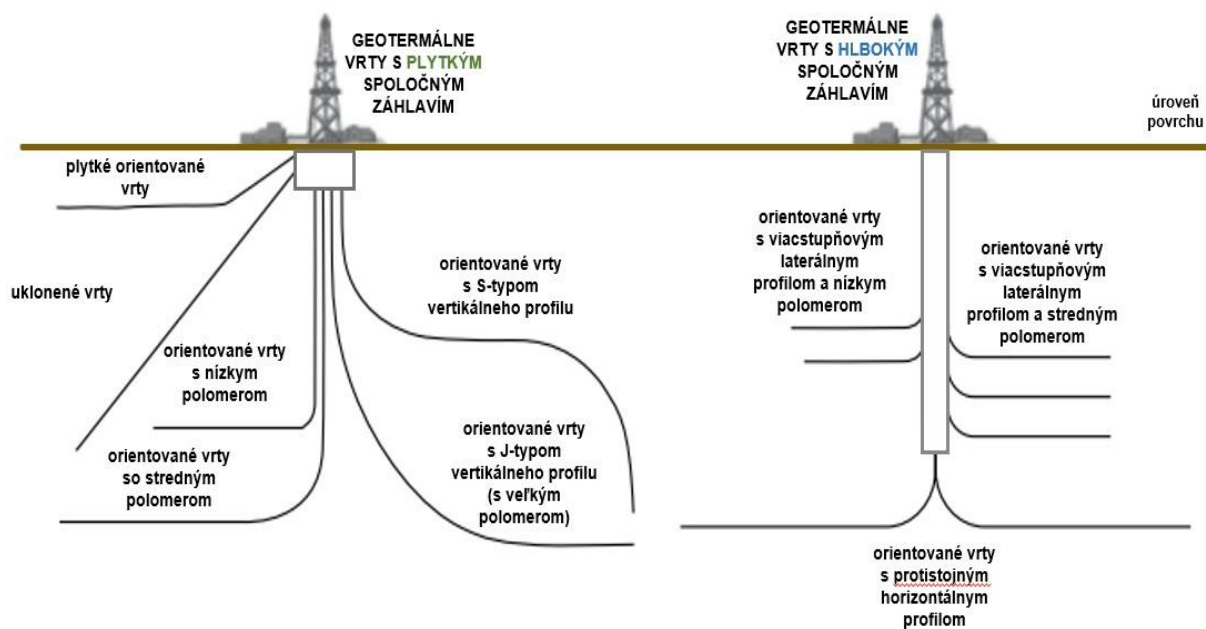
Vrtné práce sú bezpochyby ekonomicky extrémne náročnými operáciami – z dlhodobého hľadiska je ale preukázateľné, že ide stále o výhodné investície pre zníženie rizika projektu, a udržanie jeho produkcie, a teda nielen zabezpečenie návratnosti, ale aj predlžovanie ziskovosti. Čiastočným riešením šetrenia nákladov je, v prípade, ak to umožňujú geologické, hydraulické a geotermické podmienky, kombinovanie vrtov s rôznymi profilmi (Obr. 3.13), ale spoločným záhlavím (Obr. 3.14), ktoré zároveň umožňujú obchádzanie logistických, alebo štruktúrno-geologických, či prírodných prekážok. Zároveň princíp spoločných záhlaví alebo rôznej geometrie vrtov, čiastočne redukuje priestorové nároky geotermálneho projektu a znižuje celkovú spotrebu krajiny vzhľadom na inštalovaný výkon.

Jednotlivé profilové typy vrtov využívaných v geotermálnom priemysle je možné jednoducho charakterizovať nasledovne:

- **vertikálne vrty (direct, vertical)** – predstavujú najjednoduchší dizajn, pri ktorom je os vrtu udržiavaná (s drobnými odchýlkami) vo vertikálnom smere vzhľadom k povrchu, a skutočná hĺbka vrtu je rovná prakticky celkovej hĺbke (dĺžke, vertikálnej dĺžke) vrtu
- **uklonené vrty (inclined)** – vrty, ktorých os je od povrchu budovaná pod rovnakým uhlom k povrchu – pri spoločnom záhlaví a pri vhodných hydraulických parametroch ide štandardne potom o produkčnú dvojčku
- **orientované vrty (directed, oriented)** – udržiavajú do danej hĺbky vertikálnu os, v hĺbke orientácie (kick-off depth) následne pokračujú do cieľovej pozície pod jedným, alebo rôznymi uhlami – často využívané pri reinjektácii a v zložitej geológii.



Obrázok 3.13 Základné profily využívané pri hĺbení geotermálnych vrtov. Zdroj: Thórhallsson (2009)



Obrázok 3.14 Princíp geotermálnych vrtov so spoločným záhlavím. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?), Thórhallsson (2009)

3.4 Reinjektáž

Reinjektáž predstavuje proces spätného zatlačania „odpadového tepla“ (AXELSSON, 2008B, 2012B,C; DiPIPO, 2016B), čiže:

- na istú teplotu ochladenej geotermálnej vody v 1-fázových rezervoároch s geotermálnou vodou
- geotermálnej vody separovanej od geotermálnej pary a dodatočne odparenej v tlmiacich staniciach
- kondenzátu z geotermálnej elektrárne (kondenzovanej geotermálnej pary, zmesi kondenzátu a chladiacej podzemnej vody)

alebo doplnkového zdroja – príkladom môžu byť využívané povrchové vody, plytké podzemné vody, alebo odpadové vody (SANYAL – ENEDY, 2011, ENEDY, 2016) späť do rezervoárového prostredia systémom reinjektážnych produktovodov a na nich napojených reinjektážnych vrtov.

Samotná reinjektáž, z historického a globálneho hľadiska, začala ako sporadické riešenie problémov zneškodňovania (separovanej) geotermálnej vody alebo kondenzátu z geotermálnej elektrárne pre ich extrémne vysoký chemizmus a potenciál inkrustácie minerálnych fáz. Až s vývojom času sa z reinjektáže stala základná, a vyžadovaná súčasť trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu aplikovaná prakticky na každom existujúcom geotermálnom poli vo svete (AXELSSON, 2008B, 2012C;).

Na Slovensku je téma reinjektáže viacmenej paradoxná. Z takmer 300 vrtov, ktoré overili zdroje geotermálnej energie k roku 2023, je ich len niekoľko vedených ako reinjektážne: prakticky dva vrty v rámci Ďurkovej štruktúry v závislosti na optimalizácii produkcie (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; HALÁS ET AL., 2016), a následne GRP-1 Podhájska a VHP-12A Horná Potôň, z čoho aktívne funguje práve len vrt GRP-1 (FRIČOVSKÝ ET AL., 2023A). Legislatíva ^{3.2} – geologický zákon a vykonávajúca vyhláška MŽP SR definujú povinnú reinjektáž pri využívaní a produkovani zdrojov geotermálnej energie pomerne vážne, a to v prípade ak:

- hydrogeotermálna štruktúra je hydrogeologicky (hydraulicky) uzavretá

^{3.2} Zákon č. 569/2007 Z.z. Zákon o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov, t.č. Zákon č. 253/2022 Z.z.; a Vyhláška MŽP SR č. 22/2015 Z.z. ktorou sa vykonáva geologický zákon

- sú prekročené limitné koncentračné normy toxických prvkov (napríklad As)
- nariadená kapacita povrchového toku je nedostatočná pre povrchové zneškodnenie geotermálnej vody nariadením a ochladením.

Opačný extrém nastal posledné roky, pertraktovaním reinjektáže vo verejnej diskusii bez zváženia závažnosti, ktorú manažment reinjektáže predstavuje. Všeobecnou praxou vo svete nie je totiž náhodné situovanie vrtov v rezervoári, a následná „viera“ v ich primeranú komunikáciu s produkčnou zónou, ale precízna optimalizácia, modelovanie, a plánovanie pozície individuálnych reinjektážnych vrtov, alebo celých reinjektážnych polí pred ich skutočnou realizáciou. Optimalizácia vychádza zo súboru poznatkov týkajúcich sa (GRANT – BIXLEY, 2011):

- geometria rezervoárového prostredia, jeho okolia, nadložia a podložia, vrátane tektonickej situácie (zlomové a puklinové línie), podľa realizovaného povrchového geofyzikálneho prieskumu a prieskumných a vytyčovacích vrtov
- hydrogeológia a hydraulika rezervoáru podľa čerpacích skúšok, dlhodobého monitorovania produkcie, rozboru pevného materiálu, sledovania tlakových pomerov a tlakových profilov, gravimetrie, magnetometrie a distribúcie priestorového prúdenia podzemných vôd z krátkodobých a dlhodobých interpretácií, rýchlosti prúdenia, smery prúdenia, filtračné profily prúdenia
- geotermické pomery – distribúcia teploty, typológie transportu tepla, rezervoárovej dynamiky, nerovnomerného prehrievania, formy a tvary konvekčných buniek, prítomnosti a priestorovej distribúcie zón odparovania, laterálnych alebo vertikálnych prírokov, alebo naopak vertikálnych únikov, zvyčajne na základe testovania vrtov počas prieskumu a overovania, ako aj počas monitoringu počas produkcie, vrátane teplotných profilov, tlakových profilov, merania fázovej rovnováhy voda – para a jej termodynamickej viazanosti, geoelektrických a gravimetrických meraní
- geochemické pomery pred spustením reinjektáže a počas reinjektáže, vrátane vplyvu reinjektáže na chemizmus rezervoárového prostredia podľa opakovaného a častého rozboru vodnej a parnej fázy, vrátane aplikovania geochemických a geotermometrických, respektíve termochemických modelov
- možná rezervoárová odozva, kontinuálne modelovaná a prehodnocovaná na základe dát prieskumu, overovania, produkcie a monitorovania produkcie zdroja.

Na samotnú reinjektáž je pritom nevyhnutné pozeráť z viacerých uhlov. Podľa obdobia vzniku reinjektážnych vrtov alebo polí je zvyčajne rozlišovaná jednoducho na (AXELSSON, 2008B):

- **primárna reinjektáž** = vrty alebo polia vznikajú pred spustením produkcie, na základe výsledkov z etáp prieskumu a overovania zdroja, respektíve v prvých rokoch produkcie geotermálneho poľa vychádzajúc z kontinuálneho monitorovania počas exploatácie – častokrát býva v dlhodobom horizonte premiestňovaná, nahradzovaná, v závislosti na vývoji komunikácie medzi reinjektážnou a produkčnou zónou, a na rezervoárovej odozve
- **sekundárna reinjektáž** = vrty alebo polia vznikajú ako následok produkcie rezervoáru s cieľom obmedziť negatívny vplyv reinjektáže na produkčnú zónu (napr. prienik studeného frontu), alebo ako odpoveď na otvorenie ďalšej produkčnej zóny v rámci rezervoárového prostredia
- **doplňujúca reinjektáž** = zvyčajne doplnenie individuálnych vrtov do špecifických pozícií v rámci produkčnej zóny alebo jej periférie, alebo priamo do existujúcich reinjektážnych polí, s cieľom zvýšiť reinjektážnu kapacitu – vrty sa realizujú zvyčajne v prípade zlého technického stavu predošlej generácie vrtov, alebo ako dôsledok nedostatočného efektu reinjektáže na tlakové pomery v rezervoári (nízku produktivitu).

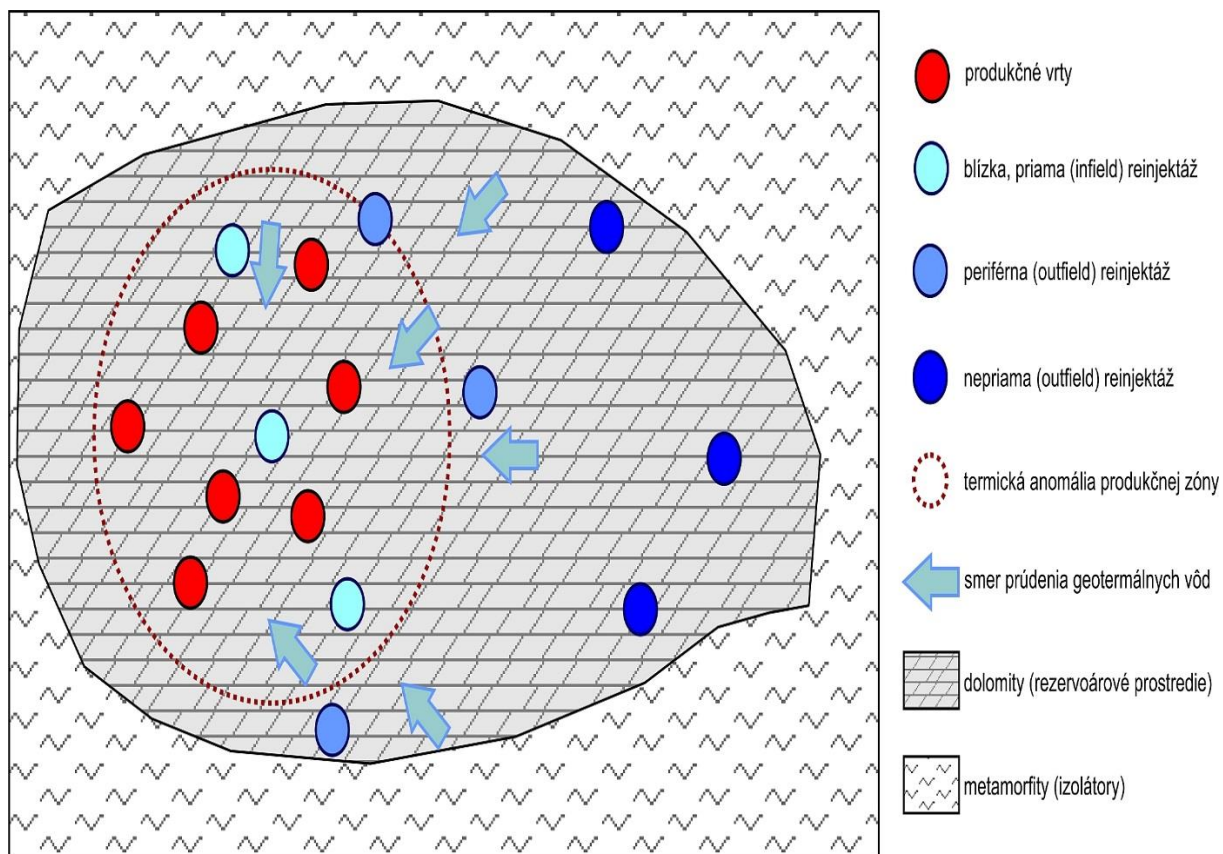
Pozícia reinjektážnych vrtov – či už individuálnych vrtov, alebo celých reinjektážnych polí, pritom nezávisí len od vyššie uvedených ale aj od **účelu realizovania reinjektáže**, ktorým najčastejšie je (AXELSSON, 2008B, 2012B,C):

- environmentálne prijateľné zneškodňovanie využitého zdroja geotermálnej energie, respektíve jeho kondenzátu
- podpora prirodzeného dopĺňania rezervoáru rezervoárovým médiom počas dlhodobej produkcie
- manažment rezervoárového tlaku a jeho zvyšovanie (doplňaním) počas produkcie, ako protiakcia proti poklesu tlaku (a straty produktivity) vplyvom vyčerpávania rezervoárového prostredia (v uzavretých štruktúrach, alebo ak produkcia prekračuje intenzitu prirodzeného rezervoárového dopĺňania)
- manažment a zvyšovanie produktivity a extrakcie tepelnej energie (v EGS systémoch)

- potlačovanie možnej subsidencie (poklesávania) povrchu a reliéfu vplyvom vyprázdňovania horninového prostredia produkciou, pri ktorej dochádza ku kompakcii horninového prostredia vyvolávajúcej pokles terénu
- cielená reinjektáž na obnovenie, alebo udržanie povrchových prejavov geotermálnej energie (termálne pramene, fumaroly, solfatáry, gejzíry, horúce bahná).

Podľa vzťahu **priestorovej pozície a funkcie** reinjektážnych vrtov (Obr. 3.15) alebo polí voči efektívnej zóne produkcie, teda tej časti rezervoáru, ktorá je okamžite ovplyvnená produkciou (formovanie teplotného a tlakového gradientu, hlavné prítokové zóny k produkčným vrtom), manažment reinjektáže rozlišuje (KAYA ET AL., 2011; AXELSSON, 2012C):

- **blízka / priama reinjektáž (infield reinjection)** = reinjektážne vrty situované v tesnej blízkosti produkčných vrtov alebo v rámci efektívnej produkčnej zóny (produkčného poľa) rezervoáru; pričom:
 - priamo podporuje tlakové pomery v rezervoári a s veľkou účinnosťou zabezpečuje udržiavanie produktivity rezervoáru takmer okamžitým dopĺňaním
 - extrémne zvyšuje riziko prieniku studeného frontu k produkčným vrtom a zmeny v rezervoárovej dynamike v okolí produkčných vrtov
- **periférna / nepriama reinjektáž (outfield reinjection)** = reinjektážne vrty situované na okraji produkčnej zóny, respektíve na okraji termickej anomálie (zvyčajne akumulčná zóna obehovej štruktúry), alebo v periférii produkovaného rezervoáru (tranzistná zostupná oblasť, infiltračná oblasť)
 - redukuje riziko prieniku reinjektážneho frontu k efektívnej produkčnej oblasti zvyšovaním vzdialenosti od zóny produkcie
 - zvyšuje riziko nedostatočnej reinjektáže, nakoľko hydraulicky prepojené filtračné kanály na dopĺňanie rezervoáru musia byť zmapované s vysokou mierou pravdepodobnosti, v opačnom prípade existuje riziko nutného dopĺňania ďalších vrtov – podporuje prirodzené dopĺňanie rezervoárového média zvyčajne v prostredí, kde dlhodobá produkcia nemá dramatické účinky na produktivitu vrtov, častokrát v rezervoároch so suchou geotermálnou parou citlivých na tlakové pomery

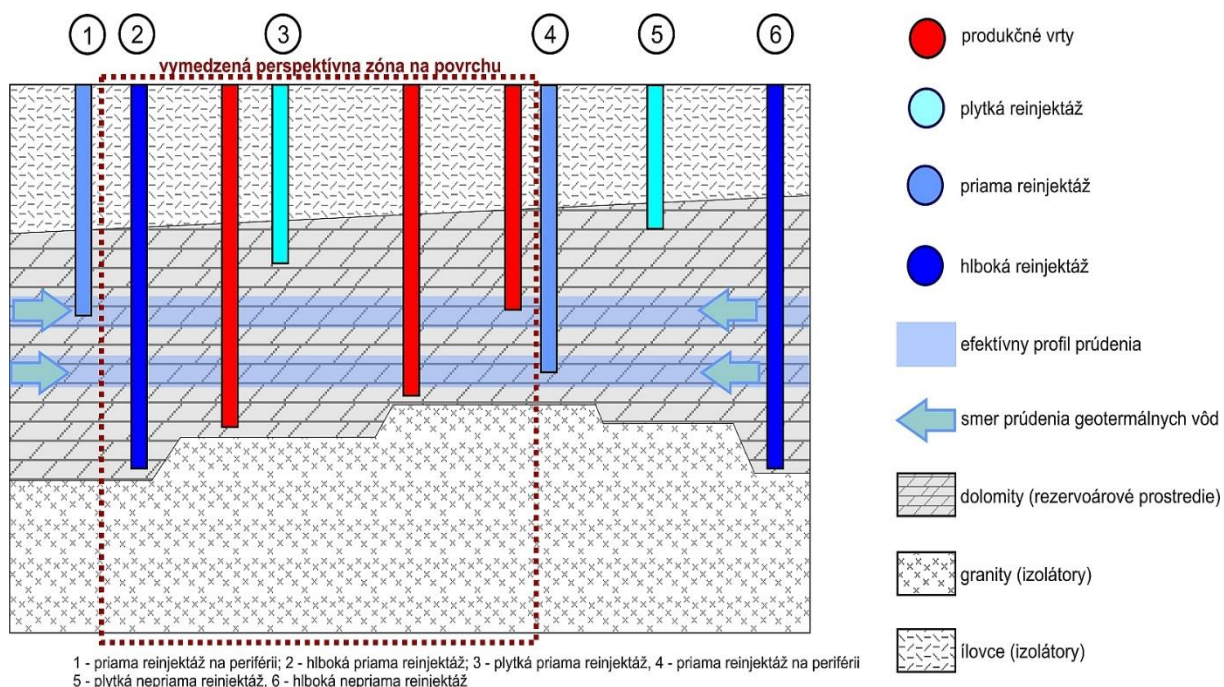


Obrázok 3.15 Typy priestorovej pozície reinjektážnych vrtov vo vzťahu k produkčnej zóne na geotermálnom poli. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

Vo vzťahu **vertikálnej pozície reinjektážnych vrtov k rezervoáru** (Obr. 3.16) alebo profilom v rámci rezervoárovej horniny, kde prebieha významná časť prúdenia rezervoárového média, je možné vyčleniť (KAYA ET AL., 2011; DIAZ ET AL., 2016):

- **plytká reinjektáž (shallow reinjection)** = reinjektážne vrtov zasahujú k stropu produkovaného rezervoáru, alebo do jeho nadložia
 - spoliehajú sa na gravitačné prúdenie a zostup ochladeného média do rezervoáru
 - reinjektovaním do nadložia umožňujú zneškodnenie odpadového tepla ako primárny cieľ reinjektáže
 - v prípade vhodnej optimalizácie pomáhajú – ochladením nadložia – udržiavať alebo podporovať teplotný gradient a množstvo tepla prechádzajúceho rezervoárom
 - účinky tlakového vplyvu na rezervoár sú otáznе (strop rezervoáru) alebo žiadne (nadložie)

- prienik studeného frontu môže byť enormne rýchly ak sú v blízkosti zlomových systémov komunikujúcich s efektívnymi profilmi produkcie v podloží
- **priama reinjektáž (direct / in-depth reinjection)** = reinjektážne vrtý sú vertikálne približne v rovnakej pozícii ako hlavné produkčné profily a hlavné hydraulické komunikačné cesty
 - najefektívnejšie kontroluje tlakové pomery s najväčšou istotou vplyvu na rezervoár
 - najväčšie riziko negatívnych dopadov reinjektáže a rezervoárovej odozvy
- **hlboká reinjektáž (deep reinjection)** = reinjektážne vrtý zasahujú väčšie rezervoárové hĺbky ako je pozícia produkčných vrtov, spolieha sa na väčšie teploty, vyžaduje vertikálne výstupné smery po puklinách alebo zlomoch k profilom prúdenia
 - znižuje riziko ochladenia efektívneho profilu zahrievaním
 - zvyšuje riziko rezervoárovej dynamiky v podloží a spôsobov transportu tepla v podloží efektívneho profilu
 - vyššie ekonomické náklady.



Obrázok 3.16 Typy vertikálnej pozície reinjektážnych vrtov vo vzťahu k produkčnej zóne na geotermálnom poli. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

Vo vzťahu **teploty reinjektovanej vody ku rezervoárovému prostrediu** je potrebné zohľadniť jeho geológiu, priepustnosť, a najmä chemizmus vtláčaného média vo vzťahu k častokrát enormnému potenciálu precipitácie – vypadávaníu minerálnych fáz z roztoku do horninového prostredia zmenou teploty a tlaku (GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON, 2012C; KAYA ET AL., 2011):

- **studená reinjektáž (cold reinjection)** = teplota vtláčanej vody dosahuje celosvetovo 5 – 70 °C
 - nízkou spádovou teplotou zvyšuje energetické využitie zdroja geotermálnej energie
 - v prípade presýtenia kalcitom, čím nižšia teplota, tým väčšie riziko vypadávaníu, a sekundárneho vyhojenia puklinových systémov (uzavretie komunikačných ciest)
 - veľké riziko prieniku studeného frontu a rezervoárového ochladzovania, zvyčajne sa realizuje ako hlboká a periférna
 - v silikátových horninách (vulkanitoch) zvyšuje priepustnosť okolia reinjektážneho vrtu
 - v prípade podsýtenia kalcitom zvyšuje priepustnosť okolia reinjektážneho vrtu
- **teplá reinjektáž (hot reinjection)** = teplota vtláčanej vody dosahuje nad 70 °C
 - s nárastom teploty reinjektáže klesá teplotný spád na vstupe a výstupe z produkčného systému a jeho tepelno-energetický výkon, vrátane účinnosti
 - v prípade presýtenia silikátovými minerálmi sa ich potenciál precipitácie a upchávania migračných ciest v okolí reinjektážneho vrtu zvyšuje
 - v prípade podsýtenia silikátovými minerálmi so zvyšujúcou sa teplotou rastie miera rozširovania migračných ciest v okolí reinjektážneho vrtu
 - využíva sa štandardne ako priama alebo plytká reinjektáž.

Samotné **množstvo reinjektovaného média** do rezervoárového prostredia sa riadi jednoduchým rozlíšením (GRANT – BIXLEY, 2011; KAYA ET AL., 2011):

- **čiastková reinjektáž (optimum reinjection)** = časť produkovaného množstva rezervoárového média (do 90 % pomeru k produkcii) je reinjektovaná
 - spomaľuje postup a prienik studeného frontu a znižuje negatívne dopady rezervoárovej odozvy na produkciu a reinjektáž

- ponecháva väčšie množstvo zvyškového tepla na povrchové zneškodnenie
- umožňuje citlivý manažment rezervoárového tlaku najmä v rezervoároch so suchou geotermálnou parou
- zvyšuje riziko poklesu produktivity nedostatočným dopĺňaním rezervoáru (a zvyšovaním tlaku) v ostatných typoch prostredia
- **maximálna reinjektáž (full reinjection)** = produkcia 90 – 100 % produkovaného rezervoárového média, v extrémnych prípadoch, s využitím plytkej podzemnej vody, povrchovej vody, alebo odpadových vôd aj presahujúca 100 %
 - zvyšuje riziko negatívnej rezervoárovej odozvy ochladzovaním (konvektívne ochladzovanie verzus konduktívne rezervoárové prostredie)
 - náročnejšie na technické riešenie
 - maximalizovaná tlaková podpora rezervoárového prostredia a tlakových možností udržiavania produktivity.

Najčastejšie kombinácie reinjektážnych stratégií aplikovaných v globálnej praxi sú zhrnuté v Tabuľke 3.4.

Tabuľka 3.4 Reinjektážne stratégie v závislosti na povahe zdroja geotermálnej energie. Upravené podľa: Kaya et al. (2011); Diaz et al (2016); Kamila et al. (2021)

Reinjektážna stratégia	nízkoentálpické zdroje GTE do 150 °C, 1-fáza, geotermálna voda / geotermálna voda + vlhká para	strednoentálpické zdroje GTE do 250 °C, s prevahou geotermálnej vody	strednoentálpické zdroje GTE do 330 °C, s prevahou geotermálnej vody	sysokoentálpické zdroje GTE do 330 °C, s prevahou geotermálnej pary	Suchopárne rezervoáre
PRIESTOROVÁ POZÍCIA					
blízka	P	S	P	P	P
periférna	S	P	S	S	S
VERTIKÁLNA POZÍCIA					
plytká	-	C	P	C	-
priama	P	P	S	P	S
hlboká	S	P	S	P	P
TEPLOTA					
studená	P	S	P	P	P
horúca	-	P	S	S	-
MNOŽSTVO					
čiastková	S	S	P	S	S
maximálna	P	P	S	P	P

vysvetlivky: P = prednostná stratégia, S = sporadická a špecifická stratégia v konkrétnych prípadoch, - = neuplatňuje sa, C = doplnková

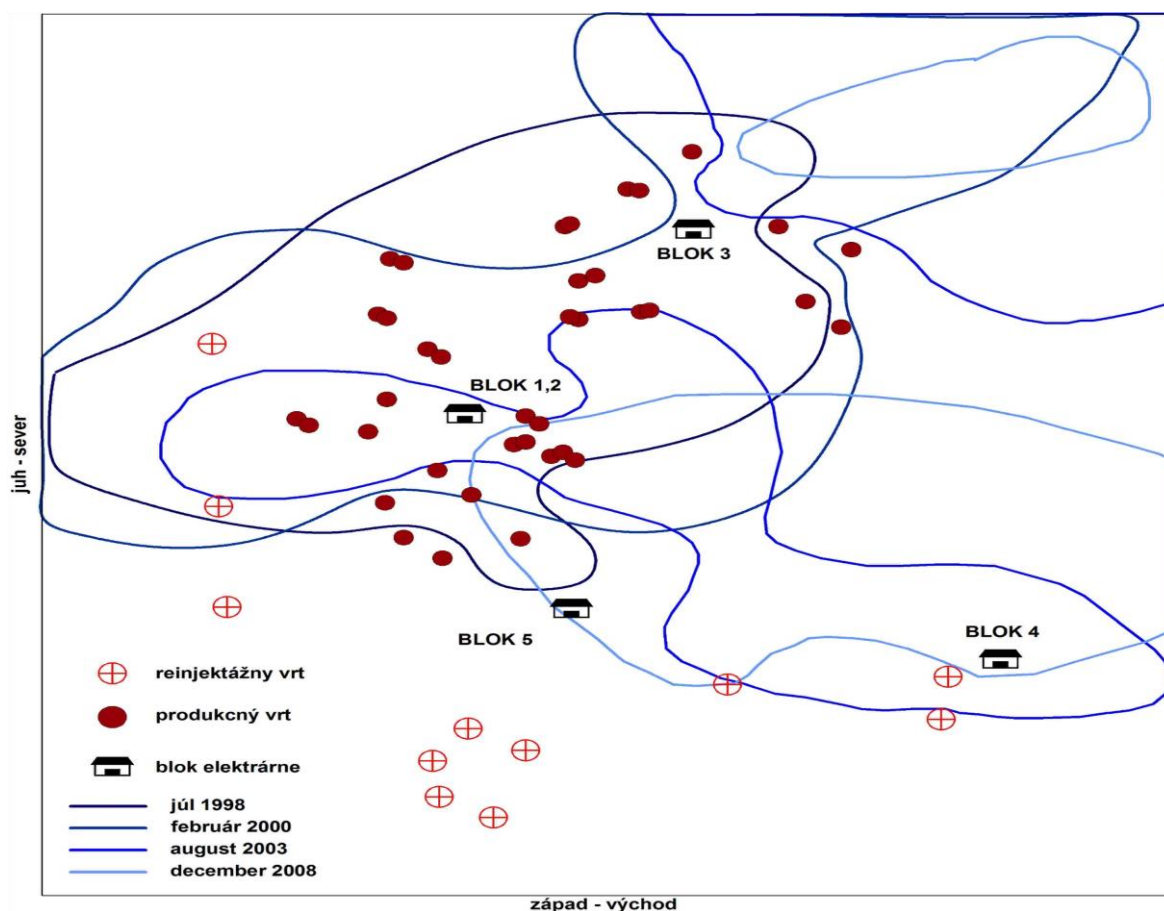
Odpoveď rezervoárového prostredia alebo celej hydrogeotermálnej štruktúry na produkciu, a aplikovanú reinjektáž, sa nazýva rezervoárová odozva – vid' 4.3.5 (angl. = reservoir response). Správne aplikovaná a riadená reinjektáž má viacero benefitov na rezervoárové prostredie, medzi ktoré patrí (AXELSSON, 2008B; GRANT – BIXLEY, 2011; KAMILA ET AL., 2021):

- udržiavanie primeraného tlaku v rezervoárovom prostredí suchopárnych rezervoárov (zabránenie tzv. prehriatiu a spontánnemu vyparovaniu)
- udržiavanie primeraného tlaku v rezervoároch s dvojitou fázou alebo jedno-fázovou geotermálnou vodou (podpora produktivity a prítoku geotermálnej vody / vodnej zložky k vrtom, zabezpečovanie geotermálnej vody podliehajúcej odparovaniu)
- tvorba tlakovej bariéry (najriskynejšia operácia) prenikajúcemu studenému frontu priamo v rezervoárovom prostredí (odklonenie migrujúceho frontu zvýšením tlaku na periférii produkčnej zóny)
- minimalizovanie alebo prevencia subsidencie
- podpora obnovenia alebo formovania prírodných prejavov geotermálnej energie.

Naopak, v prípade zle riadenej alebo zle optimalizovanej reinjektáže, problémy pre rezervoár môžu nastať predovšetkým v súvislosti s (AXELSSON, 2008B; 2012B,C GRANT – BIXLEY, 2011):

- prienik studeného frontu k produkčným vrtom pred plánovaným ukončením produkcie (ochladzovanie produkčnej zóny a rezervoárového prostredia)
- prienik hydraulického frontu do produkčnej alebo efektívnej zóny produkcie (zvýšenie tlaku v zóne nad rámec prirodzeného, čo môže viesť ku kondenzácii parnej fázy, respektíve parnej frakcie a zvýšeniu nasýtenia vodnej zložky)
- prienik chemického frontu (reinjektovaná voda je častokrát s úplne iným chemizmom, ako rezervoárové médium, takže môže dôjsť k úplnej zmene saturačných stavov a koróznno-inkrustačného potenciálu)
- seizmicita v prípade, ak je reinjektáž realizovaná pod tlakom zapúšťaním
- vztlínanie terénu ak je reinjektáž realizovaná do nadložia rezervoáru v nadmerných množstvách (vyvolaný opak subsidencie)
- zmena priepustnosti horninového prostredia v okolí reinjektážnych vrtov a v smere prúdenia reinjektážneho frontu (zvýšenie, alebo zníženie priepustnosti podľa saturačného stavu minerálov v reinjektovanej vode).

PRÍKLAD 3.5: Priestorové dopady reinjektáže pozorované na základe poklesu rezervoárových tlakov na geotermálnom poli Miravalles, Kostarika. Upravené podľa: Moya – Nietzen (2010)

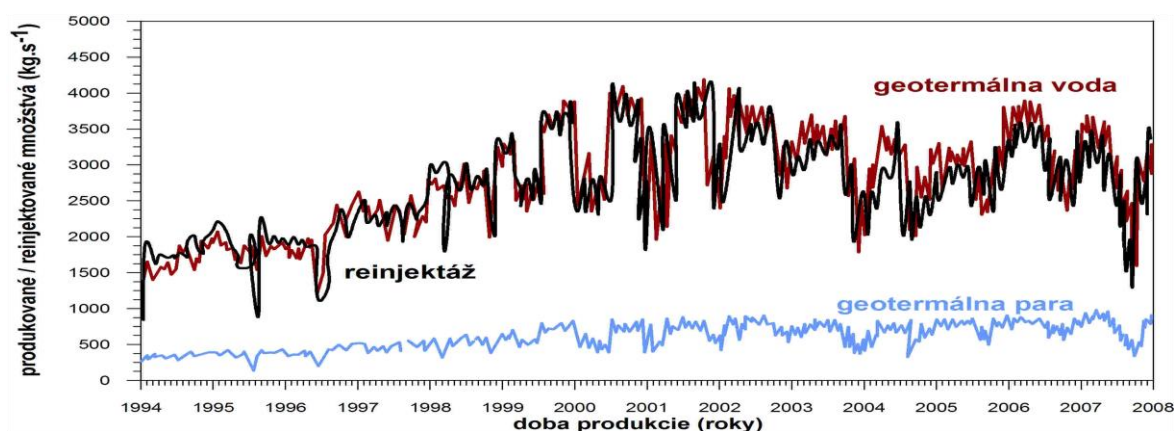


ZADANIE: Geotermálne pole Miravalles slúži pre produkciu dvojfázového zdroja geotermálnej energie pre rovnomernú elektrárňu na Kostarike. V súčasnosti je elektrárňu založená na piatich produkčných blokoch, ktoré boli zapájané postupne v rokoch 1994 (B1), 1998 (B2), 2000 (B3), 2002 (B4) a 2003 (B5). Priložená príkladová mapa zobrazuje pozíciu tlakových anomálií zaznamenaných na produkčných a monitorovacích vrtoch – poklesu rezervoárového tlaku. Reinjektážny sektor sa nachádza v južnej a západnej časti geotermálneho poľa.

INTERPRETÁCIA: Využitie máp poukazuje na základný znak akejkoľvek rezervoárovej odozvy: priestorovú variabilitu a možnosti kontroly, alebo usmerňovania jej negatívnych prejavov, ak je to možné. Lokalizácie pozorovaného poklesu tlaku v období 1998 – 2000 presne odrážajú spúšťanie jednotlivých blokov geotermálnej elektrárne, pričom tlaková anomália sa koncentrovala na severe a severovýchode. Naopak, v období 2003 – 2008 sa tlakové poklesy posúvajú na juh až juhovýchod s tým, ako sú otvárané produkčné bloky 4 a 5.

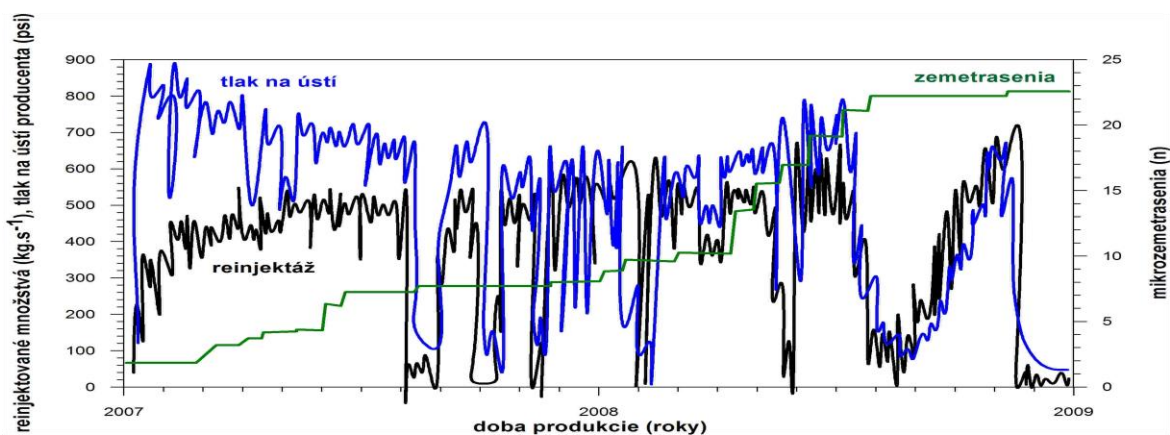
ZÁVER: Reinjektáž lokalizovaná v južnej a západnej časti geotermálneho poľa v úvodných rokoch nezabránila tlakovým zmenám rezervoáru, čo môže znamenať nízku komunikáciu produkčnej a reinjektážnej zóny. Tlakové pomery sa vyrovnávajú v okolí B1 a B2 až v neskorších obdobiach produkcie / reinjektáže, pravdepodobne ako následok postupu hydraulického frontu. V južnej oblasti sa medzi rokmi 2003 – 2008 posúva tlaková anomália viac na juh, čo znamená posun hydraulického frontu v smere k bloku 5, ale len obmedzený účinok juhovýchodného reinjektážneho segmentu. Napriek tomu (viď Príklad 3.6) tlaková anomália nespôsobilá plošné obmedzenie produkcie geotermálnej energie, ale viedla k dočasným poklesom produktivity vo vrtoch východne od tretieho produkčného bloku. V súčasnosti je zóna tlakovej depresie približne na úrovni z roku 2008.

PRÍKLAD 3.6: Vzťah produktivity rezervoárového prostredia na geotermálnom poli Miravalles (Kostarika) vo vzťahu k reinjektáži – okolie bloku 1. Upravené podľa: Axelsson (2012c); Moya – Nietzen (2010)



V nadväznosti na predošlý príklad uvádzame aj vývoj produktivity geotermálnej vody a geotermálnej pary po separátoroch na produkčných vrtoch západne od bloku 1 a 2. Pozorovaná tlaková depresia trendovo vplýva v období 1994 – 2003 predovšetkým na mierne nárasty produkovaných množstiev geotermálnej pary, pravdepodobne v dôsledku nedostatočnej komunikácie medzi reinjektážnou a produkčnou zónou. Následne s tým, ako sa presúva tlaková depresia na severovýchod, respektíve juhovýchod od bloku 1 a 2 (Príklad 3.5), sa produktivita parnej fázy vyrovnáva a osciluje. Množstvá produkovanej geotermálnej vody úzko korelujú s intenzitou reinjektáže.

PRÍKLAD 3.7: Vzťah vývoja priemerného tlaku na ústí produkčných vrtov a mikroseizmických udalostí na geotermálnom poli Salak v Indonézii. Upravené podľa: Yoshioka et al. (2019)



Geotermálne pole Salak v Indonézii predstavuje jeden z geotermálnych systémov kombinujúcich dvojfázové zdroje geotermálnej energie a sporadické polohy rezervoárov suchej geotermálnej pary s otáznym využívaním. Vývoj reinjektáže vo vzťahu ku rezervoárovým tlakom monitorovaným na ústí produkčných vrtov v počiatočných reinjektážach dokumentuje problémy s rezervoárovou priepustnosťou, nakoľko tlak na ústí produkčných vrtov prvé mesiace klesal napriek stúpajúcim reinjektážnym množstvám. Približne od októbra 2007 však rezervoárový tlak a jeho vývoj zodpovedá osciláciám v reinjektáži, čo znamená, že komunikácia medzi efektívnou časťou rezervoáru a reinjektážnou zónou bola stimulovaná práve aplikovanou studenou reinjektážou pod vysokým tlakom. Na druhej strane je viditeľná reakcia nárastu kumulatívnych mikroseizmických udalostí reagujúca vždy na zvyšovanie reinjektovaných množstiev, alebo cyklické špúšťanie reinjektáže.

4 KONCEPCIA TRVALO UDRŽATEĽNEJ REZERVOÁROVEJ PRODUKCIE

Princíp, alebo koncept trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie (TURP) / trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu (TURM) plynulo nadväzuje na definíciu trvalo udržateľného rozvoja (TUR). Jeho hlavnou myšlienkou je: „*napĺňanie potrieb súčasnej generácie bez obmedzovania možností pre budúce generácie naplňať ich potreby*“ odkazujúc na nevyhnutnosť rovnováhy medzi rozvojom spoločnosti ako aj zachovávaním a ochranou prostredia ako zdroja napĺňania týchto potrieb; ktorá bola prakticky okamžite rozšírená o potrebu „brať ohľad na budúcnosť neurčovaním úrovne blahobytu v súčasnosti a zároveň brať ohľad na potreby súčasnosti bez určovania blahobytu z pohľadu budúcnosti“ (CHICHILNISKY, 1997; ROGERS ET AL., 2007; NEL – COOPER, 2009).

V literatúre venovanej zdrojom geotermálnej energie (alebo alternatívnym / obnoviteľným zdrojom energií) sú dva základné termíny: „*udržateľný*“ (z angl. sustainable) a „*obnoviteľný*“ (z angl. renewable) opakovane zamieňané (napr. AXELSSON, 2010), a v skutočnosti odkazujú na úplne rozdielne aspekty využívania a produkcie zdrojov geotermálnej energie.

Samotný pojem „obnoviteľnosti“ a „udržateľnosti“ zdrojov geotermálnej energie je dlhodobu na Slovensku používaný automaticky, čo vychádza z toho, že (FRIČOVSKÝ ET AL., 2016D):

- zdroje geotermálnej energie sú „škatuľkované“ v literatúre ako automaticky obnoviteľné na základe:
 - falošnej bilancie medzi „nekonečnosťou“ transportu tepla v smere od jadra k povrchu vo vzťahu k pomerne krátkej existencii ľudstva a technológií energetického využitia
 - zdanlivej dlhodobej prítomnosti termálnych (a termo-minerálnych) prameňov, ktoré indikujú prítomnosť zdrojov geotermálnej energie v rezervoárovom prostredí pod povrchom
- udržateľnosť zdrojov geotermálnej energie je štandardne hodnotená na základe hydrodynamických skúšok a udržiavania výdatnosti geotermálnych vrtov, čo vyplýva z:
 - pohľadu na zdroje geotermálnej energie ako na podzemné = geotermálne vody (takzvané **hydrogeologické hľadisko**), čomu je kladený dôraz aj

v legislatívnych normách (Kapitola 10), s opomínaním energetickej stránky rezervoárového prostredia a obehovo-akumulačných štruktúr zdrojov geotermálnej energie

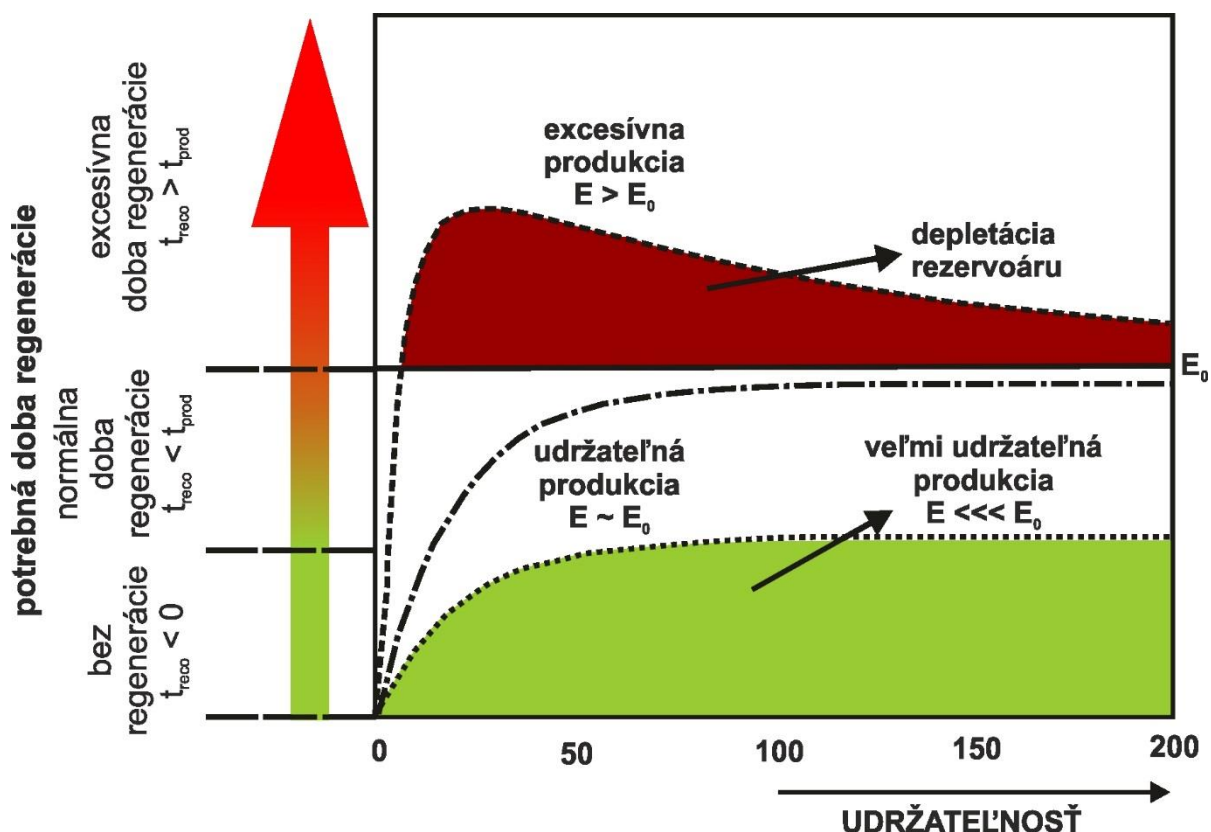
- aj v domácej odbornej verejnosti platí (nesprávny) konsenzus o rovnováhe medzi množstvom geotermálnych vôd odoberaných z rezervoárového prostredia a množstvom geotermálnej energie akumulovanej v rezervoárovom prostredí = priama úmera medzi výdatnosťou a energetickým potenciálom
- chýbajúceho systému výchovy a vzdelávania špecialistov na špecifické zákonitosti a podmienky zdrojov geotermálnej energie = rezervoárových inžinierov, ktorí pristupujú ku zdrojom geotermálnej energie z **energetického hľadiska** a na základe termodynamickej rovnováhy medzi médiom (geotermálna voda a/alebo para), horninou (rezervoárové prostredie) a energiou (akumulovanou a prechádzajúcou horninovým prostredím)

4.1 Udržateľnosť zdrojov geotermálnej energie

4.1.1 Definícia trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie

Na definíciu TUR nadviazali výsledky III. pracovnej skupiny IPCC ^{4.1} definíciou trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie, podľa ktorej „... pre každý geotermálny systém a pre ľubovoľný zvolený spôsob produkcie rezervoáru existuje určité, kritické množstvo energie E_0 , pod ktorého hranicou je možné dlhodobo (po dobu 100-300 rokov) udržiavať konštantnú produkciu energie. Produkciu rovnú, alebo nižšiu ako E_0 je možné označiť ako udržateľnú, kým produkcia vyššia ako E_0 je považovaná za depletačnú“ (AXELSSON ET AL., 2001), ktorá bola vzápätí ratifikovaná IGA a OSN (Obr. 4.1). Definícia nadväzuje na predchádzajúce chápanie udržateľnej produkcie geotermálnej energie ako „produkcie v množstve, ktoré je udržateľné po požadovaný čas“ respektíve „produkciu zabezpečujúcu dlhodobé udržanie nastavených množstiev produkovanej energie s ohľadom na spoločenské, technické a technologické požiadavky“ (RYBACH ET AL., 1999).

^{4.1} IPCC = International Panel on Climate Change – Medzinárodný panel o zmene klímy pri OSN



Obrázok 4.1 Definícia trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie

V oboch prípadoch však definície vychádzajú z posudzovania vzťahu medzi **energiou** (prechádzajúcou a akumulovanou) v rezervoári **a časom**. Z definície vyplýva, že **udržateľná produkcia zdrojov geotermálnej energie**:

- je každý spôsob produkcie geotermálnej energie, ktorý neovplyvňuje negatívne energetické / kvantitatívne a kvalitatívne parametre rezervoárového prostredia pre obdobie viac ako 100 rokov
- nepresahuje energetickú kapacitu rezervoárového prostredia = schopnosť rezervoárového prostredia dlhodobo udržať množstvo geotermálnej (tepelnej) energie v rezervoári z obdobia pred, a počas zvolenej doby produkcie
- neobmedzuje možnosti produkcie geotermálnej energie z rovnakého geotermálneho systému v súčasnosti, alebo budúcnosti tak, aby nedošlo k jeho následnému energetickému znehodnoteniu
- vyjadruje **koncepčný, technický a technologický prístup k rezervoáru a spôsob jeho využitia** vzhľadom na jeho prirodzenú kapacitu.

4.1.2 Faktor časovej zložky definície TURP

Z praktického hľadiska naráža časovej škály, pre ktorú je možné hodnotiť produkciu geotermálnej energie ako udržateľnú na niekoľko konfliktov:

- princíp TUR (filozofická podstata), hovorí o potrebe „budúcich generácií“, t.j. v neurčitom plurále
- princíp rezervoárového inžinierstva (energetický, rezervoárový princíp) hovorí o škále 100 – 300 rokov podľa pôvodnej koncepcie TURP, počas ktorej musia byť zachované energetické parametre rezervoáru
- princíp podnikateľský (ekonomický) hovorí o ekonomickom využívaní energetickej suroviny, ktorou geotermálna energia je.

Prakticky ide o konflikt medzi tým, čo je pre investorov a majiteľov geotermálnych polí ekonomicky výhodné, a čo je výhodné pre rezervoárové prostredie (AXELSSON – STEFANSSON, 2003). Pritom v rámci všeobecného využívania zdrojov geotermálnej energie naďalej existujú štandardizované doby produkcie geotermálnej energie uprednostňujúce hľadisko ekonomického prínosu z využívania zdrojov geotermálnej energie nad potrebou udržateľnosti rezervoárového prostredia, pre ktoré sa energetické bilancie rezervoárov vyhodnocujú:

- **globálny, amortizovaný (optimalizovaný) čas produkcie zdrojov geotermálnej energie**, t.j. priemerný čas, počas ktorého dôjde k nevyhnutným výmenám projektovej infraštruktúry, t.j. vrtné diela, paženie vrtov, povrchové technické zariadenia vrtov, komponenty energetickej infraštruktúry v projektoch, t.j. 20 – 40 rokov (FRIDLEIFSSON ET AL., 2008)
- **amortizovaná životnosť geotermálnych elektrární**, t.j. čas, po ktorom je potrebné prehodnotiť ekonomické aspekty udržiavania a obnovovania technicko-technologických súčastí produkčných polí (geotermálne vrty) a infraštruktúry, čiže zariadení / komponentov geotermálnych elektrární, t.j. 30 – 50 rokov v závislosti na povahe (fázová povaha, chemické zloženie) produkovaných zdrojov geotermálnej energie (SANYAL, 2005)
- na Slovensku dlhodobo absentovala časová schéma bilancovania energetického potenciálu rezervoárového prostredia, pričom jednotlivé útvary geotermálnych vôd sa hodnotili pre obdobie 20 rokov až 40 rokov (napr. REMŠÍK ET AL., 1992; BAJO ET AL., 1998) a k určitému návrhu zjednotenia došlo až pilotným projektom

pravdepodobnostného odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie (FRÍČOVSKÝ ET AL., 2020C, 2023C, 2024).

Preto v protiklade vystupuje koncept TURP, ktorý jednoznačne hovorí o časovej škále **100 – 300 rokov** (AXELSSON ET AL., 2001, 2002), čo zároveň naplňuje terminologicky „budúce generácie“ zo základnej koncepcie TUR, zároveň ale ponecháva časovú rezervu vzhľadom na možnosti odhadu vývoja technológií a technologickej vyspelosti spoločnosti.

Z tohto dôvodu, sa ako kompromisné riešenie častokrát využívajú dva základné koncepty vnímania časovej škály:

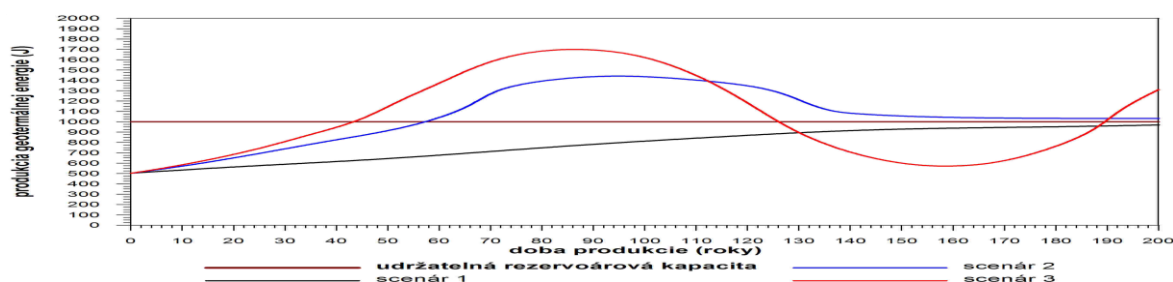
- **krátkodobý horizont produkcie = 40 rokov**, využívaný v praktických a projektových zámeroch pre potreby energetického využitia zdrojov geotermálnej energie
- **dlhodobý (udržateľný) horizont produkcie = 100 rokov**, využívaný z pohľadu dlhodobého hodnotenia využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie a v národných energetických stratégiách, konceptoch a schémach

4.1.3 Kategórie produkcie geotermálnej energie podľa vzťahu k udržateľnosti

Podľa parametrov ich využívania je možné vyčleniť tri základné kategórie (KETILSSON ET AL., 2010; AXELSSON ET AL., 2010):

- **stabilná, silná udržateľná produkcia:** produkcia, ktorá nespôsobuje pokles kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov zdroja geotermálnej energie, alebo produkcia, ktorá vedie k minimálnemu (zanedbateľnému) poklesu týchto parametrov
- **slabo udržateľná produkcia:** produkcia, ktorá vedie k poklesu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov zdroja geotermálnej energie v čase, ktorý ale vedie k výraznému posilneniu spoločenského a ekonomického prínosu v jeho využití a využívaní
- **neudržateľná produkcia:** produkcia, ktorá vedie k poklesu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov zdroja geotermálnej energie v mierke, ktorá vyvoláva nutne pokles jeho ekonomickej a časovej životaschopnosti, alebo ktorá bráni v jeho dlhodobom využívaní pri minimálnych spoločenských, sociálnych alebo ekonomických benefitoch.

PRÍKLAD 4.1: Príklad hodnotenia produkčných stratégií v zmysle TURP. Použité informácie aj z príkladov udržateľných stratégií produkcie



ZADANIE: Na znázornenom grafe sú priložené tri scenáre fluktuácie produkcie geotermálnej energie vo vzťahu ku udržateľnej energetickej kapacite rezervoáru pre dobu produkcie maximálne 200 rokov. Vo vzťahu k teoretickej časti koncepcie trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie sa pokúste jednotlivé scenáre vyhodnotiť:

- scenáre z pohľadu krátkodobého horizontu produkcie (40 rokov)
- scenáre z pohľadu dlhodobého horizontu produkcie (100 rokov)
- scenáre z pohľadu produkcie geotermálnej energie na 200 rokov
- ktorý scenár je z pohľadu udržateľnosti optimálny?

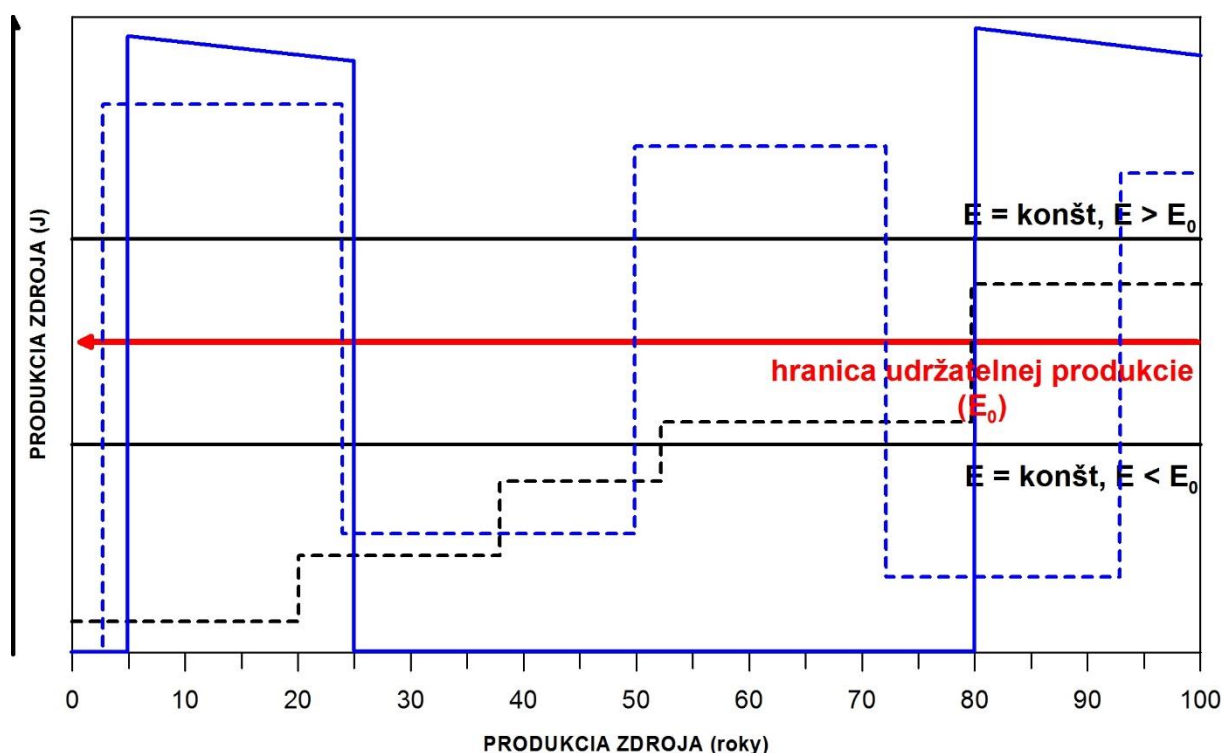
RIEŠENIE:

- scenár 1 – krátkodobo udržateľný / dlhodobo udržateľný / udržateľný aj pre produkciu na 200 rokov
- scenár 2 – krátkodobo udržateľný / dlhodobo neudržateľný / neudržateľný pre produkciu na 200 rokov
- scenár 3 – krátkodobo udržateľný / dlhodobo neudržateľný / neudržateľný pre produkciu na 200 rokov (depletačná fáza v období 40 – 125 rokov a 90 – 200 rokov; prvá depletačná fáza je výrazne dlhšia ako fáza udržateľnej produkcie, následná utlmovacia fáza je kratšia ako fáza predchádzajúcej depletačie a množstvo odoberanej energie je rovnaké ako v prvej etape produkcie)
- optimálny scenár je v tomto prípade scenár 1, rešpektujúci udržateľnú energetickú kapacitu rezervoáru vo všetkých sledovaných horizontoch

4.1.4 Manažment produkcie vo vzťahu k udržateľnej kapacite rezervoáru

Z definície udržateľnosti zdrojov geotermálnej energie prakticky vyplýva, že čím menej energie je odoberanej z rezervoárového prostredia, tým je udržateľnosť produkcie dlhodobejšia, výraznejšia, a istejšia. V absolútnej rovine je ale nezmyselné dlhodobo udržiavať produkciu hlboko pod úrovňou udržateľnej rezervoárovej kapacity. Pre rovnováhu medzi energetickým a ekonomickým pohľadom na zdroje geotermálnej energie boli postupne zavedené viaceré štandardizované produkčné stratégie (Obr. 4.2), ktoré majú svoje špecifiká (STEFANSSON – AXELSSON, 2003, 2005; STEINGRIMSSON ET AL., 2005, 2006; BROMLEY ET AL., 2006; AXELSSON, 2009A, 2010, 2011; GRANT – BIXLEY, 2011) :

- **konštantná produkcia** = udržiavanie stabilného energetického výkonu produkčných vrtov (mimo cyklov závislých na klimatických obdobiach a dennej variabilite dopytu)
 - bezpečná v neskorších fázach rozvoja a produkcie geotermálnej energie
 - vyžaduje znalosť o krátkodobej odozve rezervoáru na produkciu
 - vyžaduje modely predpokladu rezervoárovej odozvy kalibrované na predchádzajúce produkčné obdobia
 - kritický je kontinuálny geotermický, hydraulický, geochemický a fázový monitoring
 - najľahšia na manažment produkcie
 - šetrí komponenty produkčnej infraštruktúry zamerané na produkčno-tlakovú a fázovú kontrolu výdatnosti vrtov alebo regulačné mechanizmy turbín (napríklad tlakové, separačné, odvádzacie stanice a podobne)
 - ekonomicky najjednoduchšie modelovateľná vzhľadom na rozhodnutie o časovej nemennosti produkcie
 - potrebuje stabilné odberné miesto s viac-menej (okrem spomínaných výkovov) konštantnou odbernou kapacitou
 - *na Slovensku sa udržiava variant s konštantnou produkciou geotermálnych vôd*
- **krokové zvyšovanie produkcie** = na časové obdobie rozložené postupné zvyšovanie produkcie rezervoáru (kroky s rôznou dĺžkou, zvyčajne 3 – 5 rokov, niekedy až 10 – 15 rokov v závislosti na komplikovanosti rezervoáru a rezervoárového média), pričom súbežne s každým krokom prebieha prieskum a výskum rezervoárových podmienok, procesov a odozvy, a ku krokovému zvyšovaniu produkcie dochádza len v prípade ak to rezervoárové podmienky na základe spoľahlivých modelov dovoľia
 - najčastejšie aplikovaná v prvých 5 – 20 rokoch produkcie rezervoáru
 - umožňuje aplikovanie všetkých princípov rezervoárového manažmentu (viď č.4) v predstihu s cieľom minimalizovať riziká depletácie
 - bez kontinuálneho systému monitorovania kvantitatívnych a kvalitatívnych parametrov rezervoáru a rezervoárového média nemá zmysel
 - obmedzuje krátkodobé ekonomické zisky
 - umožňuje včas rozhodnúť o zastavení alebo znížení produkcie s cieľom predĺžiť životnosť rezervoáru aj za cenu predĺženia ekonomickej návratnosti
 - v neskorších štádiách produkcie rastú ekonomické výhody
 - náročné ekonomické modelovanie



Obrázok 4.2 Vzťah produkčných stratégií a udržateľnej rezervoárovej kapacity. Upravené podľa: Stefansson – Axelsson, 2005; Axelsson, 2011

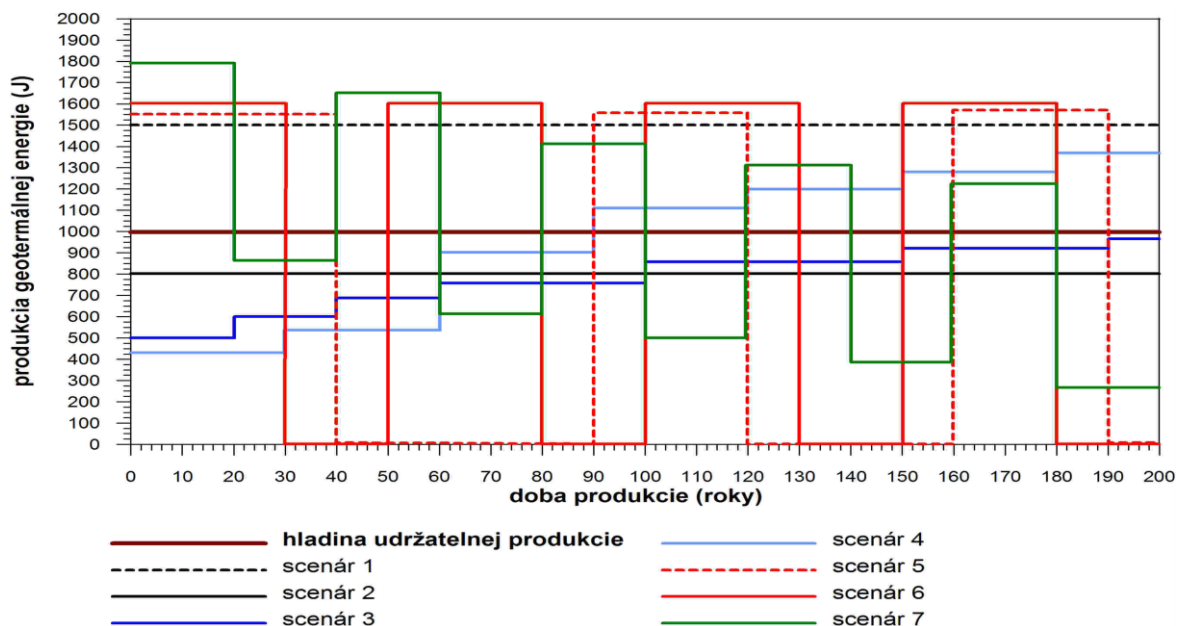
- **cyklické utlmovanie produkcie** = cielené striedanie oscilácie produkcie geotermálnej energie okolo hranice udržateľnej (a obnoviteľnej) kapacity rezervoáru v pravidelne sa opakujúcich periódach nárastu a poklesu produkcie
 - zvyčajne začína štádiom depletácie, za ktorým nasleduje štádium utlmenia
 - štádium depletácie umožňuje krátkodobé navýšenie ekonomických ziskov potrebných pre prieskum a rozvoj rezervoáru, monitoringu, a jeho poznania v čase utlmenia produkcie
 - štádium utlmenia umožňuje spomalenie postupu chemického, termického alebo hydraulického studeného frontu (viď. 4.4) a čiastočné obnovenie pôvodnej rezervoárovej dynamiky (existencia, rozsah, charakter konvekčných buniek, prehrievania, adiabatického varu (viď 5.2.6 a 5.2.7)
 - v štádiu utlmenia dochádza zvyčajne k oprave, úprave, výmene vrtnej infraštruktúry, prieskumu iných alebo nevyužívaných častí rezervoáru
 - každý ďalší cyklus depletácie / utlmenia je realizovaný s nižšou mierou depletácie (presiahnutia odhadovanej udržateľnej rezervoárovej kapacity)

a naopak vyššou mierou utlmenia (narastá úroveň produkcie „pod“ udržateľnou rezervoárovou kapacitou), eventuálne sa cykly predlžujú (vyhodnotenie predchádzajúceho cyklu depletácie a utlmenia ukázalo na možnosti rýchleho obnovovania rezervoárovej kapacity, procesov a kvalitatívnych / kvantitatívnych parametrov) alebo naopak skracuje sa len fáza depletácie v rámci jedného cyklu (vyhodnotením bol preukázaný opak)

- vyžaduje numerické, alebo pravdepodobnostné modelovanie rezervoárovej kapacity, rezervoárovej obnoviteľnosti a udržateľnej rezervoárovej kapacity
- vyžaduje pravidelný, zahustený monitoring kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoáru, interpretáciu, vyhodnocovanie, krížové kontroly interpretácií
- stratégia sa využíva väčšinou v projektoch, ktoré pracujú s dvoma vzájomne nekomunikujúcimi rezervoárovými prostrediami, ktoré sa priestorovo (horizontálne) zastupujú, a ich rezervoárové médium má približne rovnakú termickú a termodynamickú kvalitu
- náročná na ekonomické plánovanie
- **cyklická depletácia a uzatváranie produkcie** = nepravidelné striedanie cyklov obdobia extrémne depletačného režimu s cyklom úplného uzavretia produkcie, pri ktorom doba uzavretia produkcie je aspoň rovnako dlhá, ako doba depletačného režimu
 - využíva sa v projektoch, ktoré pracujú s viacerými, priestorovo izolovanými rezervoármi, ktoré spolu vzájomne hydraulicky nekomunikujú, a depletácia jedného neovplyvní kvalitatívne a kvantitatívne parametre druhého
 - zvyčajne sa využíva v rezervoároch s geotermálnou vodou, geotermálnou vodou a vlhkou parou, alebo s dvojistou fázou s prevahou geotermálnej vody
 - niekedy využívaná na časti geotermálneho poľa so špecifickými geologickými, hydrogeologickými a tektonickými podmienkami, kým druhá časť geotermálneho poľa pracuje v inom režime a vzájomne spolu nekomunikujú
 - depletačná fáza využívaná na extrémne zvýšenie zisku a návratnosti projektu s cieľom zabezpečiť ziskovosť a prostriedky pre údržbu a výmenu infraštruktúry a ďalšie plánovanie
 - depletačná fáza trvá zvyčajne 10 – 20 rokov
 - fáza odstavenia produkcie by nemala presiahnuť 20 rokov

- v ďalších cykloch depletácie a odstavenia produkcie sa dĺžka fáz mení v závislosti na výsledkoch odhadu a modelovania rezervoárovej odozvy a regenerácie
- fáza absolútneho odstavenia produkcie je využívaná na prieskum a monitoring rezervoárového prostredia, a najmä obnovenie pôvodných rezervoárových podmienok do iniciálneho štádia, alebo termických podmienok (teploty) aspoň na 80 – 90 % pôvodných podmienok
- vyžaduje dobré znalosti a náročné modelovacie procesy pre odhad obnovovacej a regeneračnej kapacity rezervoárového prostredia, zahustený monitoring, geochemické a numerické modelovanie, pravdepodobnostné modely
- vyžaduje geotermálne projekty veľkej mierky, pracujúce s rôznymi zdrojmi geotermálnej energie (viacero blokov elektrární)
- pomerne jednoduché ekonomické plánovanie
- **krokové znižovanie produkcie** = alternatívny postup k predchádzajúcej stratégii krokového zvyšovania produkcie, kedy je postupne znižované množstvo produkovanej geotermálnej energie z rezervoárového prostredia
 - stratégia sa používa ako utlmovací proces postupného odpájania geotermálnych projektov v prípade, ak sú po určitom čase ekonomicky nerentabilné, alebo ak prienik studeného (hydraulického, chemického) frontu nie je možné pri daných štruktúrno-geologických, hydrogeologických, hydraulických a geotermických parametroch rezervoáru udržať
 - využívaná je v prípade ak nie je nevyhnutné produkciu rezervoárového prostredia utlmiť okamžite
 - v prípade, ak projekt pracuje s viacerými rezervoármi, pričom rozvoj druhého je v procese rozvoja, je krokové znižovanie produkcie vhodným manažmentom na zabezpečenie ekonomického a energetického prínosu projektu
 - v praxi je napriek tomu využívaná pomerne zriedkavo, respektíve vo veľmi krátkych časových krokoch, s dĺžkou kroku do 2 – 3 rokov, v závislosti na dôvode znižovania produkcie
 - z pohľadu odoberateľa energií umožňuje jeho adaptáciu na novo-vzniknuté skutočnosti (znižovanie alebo ukončenie produkcie) s minimalizovaním rizika energetického ohrozenia koncových užívateľov energií alebo energetického „šoku“ pre sieťové a rozvodové sústavy.

PRÍKLAD 4.2: Produkčné stratégie udržateľného rezervoárového manažmentu



PRÍKLAD: Na fiktívnej schéme je zobrazených 7 scenárov produkcie zdrojov geotermálnej energie na základe ich vzťahu k hladine udržateľnej rezervoárovej kapacity.

ZADANIE:

- Zhodnoťte jednotlivé scenáre podľa typu zvolenej produkčnej stratégie.
- Zhodnoťte jednotlivé scenáre podľa ich vzťahu k dlhodobej udržateľnosti

RIEŠENIE:

- scenár 1 = stratégia konštantnej produkcie / dlhodobo neudržateľný (prekračuje hladinu udržateľnej produkcie)
- scenár 2 = stratégia konštantnej produkcie / dlhodobo udržateľný (pod hladinou udržateľnej kapacity produkcie)
- scenár 3 = stratégia krokového zvyšovania produkcie / dlhodobo udržateľná (po obdobie 200-ročnej produkcie neprekračuje hladinu udržateľnej rezervoárovej produkcie)
- scenár 4 = stratégia krokového zvyšovania produkcie / dlhodobo neudržateľný (scenár po 90 rokoch predpokladá prekročenie hladiny udržateľnej produkcie a následnú depleťáciu rezervoáru)
- scenár 5 = stratégia cyklickej depleťácie a uzatvárania produkcie / dlhodobo neudržateľný (nepomer medzi dobami depleťácie a utlmenia, doby depleťácie prevyšujú štandardizovaných 10 - 20 rokov, doby utlmenia prevyšujú 20 ročné obdobia)
- scenár 6 = stratégia cyklickej depleťácie a uzatvárania / dlhodobo udržateľná (doba regenerácie / ukončenia produkcie nepresahuje štandardizovaných 20 rokov, čo znamená čas na obnovu pôvodných podmienok aj v zmysle obnovovacej a regeneračnej kapacity rezervoáru)
- scenár 7 = stratégia cyklickej depleťácie a utlmovania produkcie / dlhodobo udržateľný (kroky depleťácie a utlmovania produkcie sú maximálne rovnako dlhé a zároveň scenár počíta so znižovaním odberu energie počas depleťáčného režimu a znižovaním odberu energie v čase utlmovania)

4.1.5 Udržateľná rezervoárová kapacita

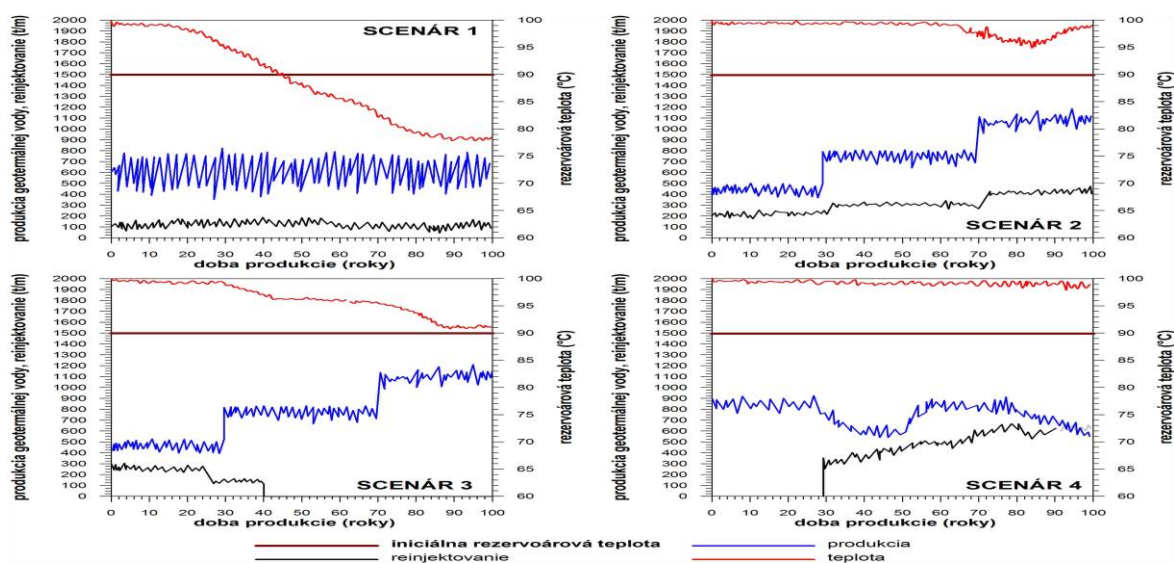
Udržateľná rezervoárová kapacita (ang. sustainable capacity, sustainable reservoir capacity, sustainable potential) – najčastejšie v MWt, teda udáva:

- množstvo geotermálnej energie, ktoré je možné z rezervoárového prostredia odoberať dlhodobo, bez ohrozenia jeho kvalitatívnych (chemické zloženie, rezervoárová dynamika, fázové pomery a fázová povaha parnej frakcie) a kvantitatívnych (teplota, termodynamická kvalita) parametrov
- množstvo geotermálnej energie, ktoré je rezervoár možný udržať s minimálnymi, alebo aspoň zvratnými zmenami jeho kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov po dostatočne dlhý čas produkcie
- množstvo geotermálnej energie, ktorú je možné energeticky a termodynamicky efektívne a účinne využiť pri vhodne nastavenom manažmente produkcie a optimalizovaní povrchovej projektovej sústavy

Kritickým faktorom udržateľnej produkcie geotermálnej energie vo vzťahu k udržateľnej rezervoárovej kapacite následne je (AXELSSON, 2009, 2010, 2011, 2012; RYBACH, 2003, 2007; SANYAL ET AL., 2005):

- udržateľná kapacita produkcie rezervoáru na začiatku produkcie a v jeho prvotných etapách nikdy nie je známa (z toho dôvodu sa zo začiatku aplikujú nekalibrované a kalibrované pravdepodobnostné modely jej odhadu)
- pri otvorení produkcie zvyčajne chýbajú kontinuálne monitorovacie záznamy o prejavoch rezervoáru, ktoré by bolo možné vyhodnocovať vo vzťahu ku udržateľnej rezervoárovej (energetickej, termickej, hydraulikkej) kapacite
- presnosť odhadu udržateľnej rezervoárovej kapacity dynamicky zvyšuje s tým, ako pribúdajú poznatky z monitorovania a interpretácie rezervoárovej odozvy na predlžujúcu sa produkciu
- dlhodobo udržateľná produkcia kladie značné požiadavky (viď 4.4) na realizovanie pravidelného, plošného monitoringu a skríningu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia, a tvorbu finančných prostriedkov na takzvané záložné riešenia (napríklad stand-by vrty) a rezervoárového manažmentu.

PRÍKLAD 4.3: Produkčné stratégie udržateľného manažmentu vo vzťahu ku rezervoárovej produkcii a kvalite. (Podľa nasledujúcich príkladov)



ZADANIE: Existujú 4 fiktívne scenáre výsledkov monitorovania rezervoárovej teploty, produkovaných množstiev geotermálnej vody, a reinjektážnej stratégie. Ak ako kritérium udržateľnosti, a proxy-parameter udržateľnosti budeme považovať monitoring teploty a produkciu geotermálnej vody, aj podľa príkladov v časti 4.3.5 skúste odhadnúť:

- aký typ produkčnej stratégie predstavujú jednotlivé scenáre ?
- je scenár tepelne / teplotne udržateľný ?
- je scenár hydraulicky / tlakovo udržateľný ?
- k akým procesom mohlo v rezervoári podľa vývoja teploty a produkcie geotermálnej vody dôjsť?
- ktorý zo scenárov by ste zvolili ako najbezpečnejší z pohľadu dlhodobej udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie?

RIEŠENIE:

- scenár 1 - konštantná produkcia geotermálnej energie / teplotne a tepelne neudržateľný (pokles teploty pod 10 % iniciálnych podmienok) / hydraulicky udržateľný (reinjektáž stabilná, produkcia geotermálnej vody stabilná) / v rezervoári mohlo dôjsť k prieniku studeného frontu z reinjektáže, prípadne z reinjektáže a prirodzeného dopĺňania
- scenár 2 - krokové zvyšovanie produkcie geotermálnej energie / teplotne udržateľný (teplota neklesla pod 10 % a zároveň sa počas produkcie obnovila) / hydraulicky udržateľný (navýšenie produkcie geotermálnej vody podstatne vyššie, ako navýšenie reinjektáže) / v poslednom štádiu zvýšenia mohlo dôjsť skôr k prítoku studených vôd z periferie, ktoré rezervoár dokázal obnoviť ešte počas produkcie, prípadne prítok studených vôd mohol byť nahradený prítokom teplých vôd z hĺbky vďaka dlhodobej intenzívnej produkcii
- scenár 3 - krokové zvyšovanie produkcie geotermálnej energie / tepelne udržateľný (ochladenie menej ako 10 %), hydraulicky udržateľný (produkcia zvyšovaná aj napriek ukončeniu reinjektáže) / ochladenie je pravdepodobne spôsobené prienikom studených vôd z periferie alebo okolia, keďže korešponduje so zvyšovaním produkcie geotermálnych vôd, ale nie s reinjektážou
- scenár 4 - konštantná produkcia geotermálnej energie (produkcia chce byť udržaná a moderovaná reinjektážou) / termicky udržateľný / hydraulicky neudržateľný (produkcia poklesáva aj napriek zvyšovaniu reinjektáže) / produkčná a reinjektážna zóna pravdepodobne dostatočne nekomunikujú a rezervoár stráca geotermálnu vodu a tlak, resp. je vyprázdňovaný
- ako najperspektívnejší sa javí scenár 2 (kombinuje hydraulickú udržateľnosť a tepelnú udržateľnosť produkcie, počas ktorej sa podmienky obnovujú)

4.1.6 Možnosti stanovenia udržateľnej rezervoárovej kapacity

Udržateľná rezervoárová kapacita teda udáva množstvo geotermálnej energie v rezervoári, ktoré je možné z rezervoáru dostatočne dlhú dobu produkovať. Rezervoáre zdrojov geotermálnej energie sú pritom komplexné, prepojené termodynamické systémy, v ktorých udržateľná rezervoárová kapacita je daná (AXELSSON, 2009; AXELSSON ET AL., 2001, 2002, 2004, 2005; GRANT – BIXLEY, 2011)

- geometriou rezervoáru (objem rezervoárového prostredia; t.j. objem prostredia, ktoré je schopné energiu akumulovať)
- termofyzikálne parametre rezervoáru a rezervoárového média (schopnosť rezervoárovej horniny a rezervoárového média akumulovať energiu – objemová hustota, merná tepelná kapacita, koeficient tepelnej rozťažnosti, koeficient tepelnej disperzivity, tepelná vodivosť)
- geotermickými podmienkami (rozdiel teploty na strope a báze rezervoáru kontroluje množstvo tepelnej energie, ktorá do rezervoáru kontinuálne vstupuje, a ktorá ním prechádza od bázy k stropu, čiže prestupuje do nadložia)
 - teplota rezervoárového prostredia / teplota rezervoárového média (vyjadrujú množstvo energie akumulovanej v systéme a možnosti rezervoáru prepúšťať dynamickú zložku energie najčastejšie vo vertikálnom smere)
 - geotermický gradient v rezervoári (ovplyvňuje rýchlosť prestupu tepelnej energie rezervoárom, a teda možnosti rezervoáru akumulovať časť prestupujúcej tepelnej energie)
- rezervoárová dynamika (kontrolujúca uplatňované procesy transportu tepla v rezervoári alebo prevládajúci koncový člen transportu tepla a energie v rezervoári; rezervoárové procesy, ako napríklad konvekcia, s prirodzenými miestami ochladzovania a prehrievania rezervoáru vplyvom pohybov konvekčných buniek).

Pre odhad, alebo stanovenie udržateľnej rezervoárovej kapacity sa využívajú predovšetkým (GRANT ET AL., 1982; GRANT – BIXLEY, 2011; GRANT, 2000, 2014; O’SULLIVAN ET AL., 2001; SANYAL – SARMIENTO, 2005; TUREYEN ET AL., 2014; BJARNADOTTIR, 2010; BURNELL ET AL., 2015; YOUNG ET AL., 2019):

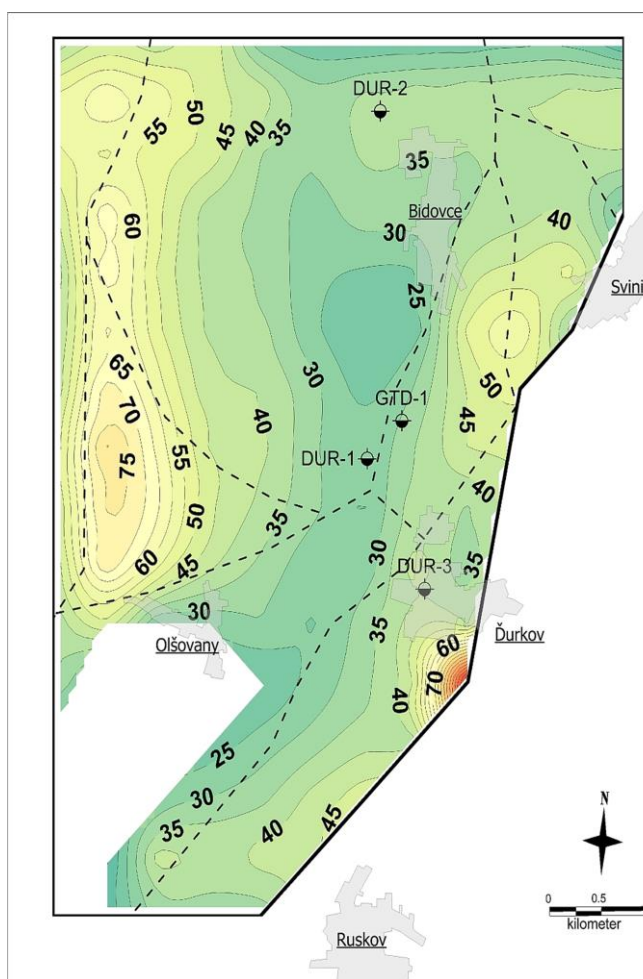
- **numerické (priestorové-matematické) fyzikálne modely** (Príklad 4.4)
 - presnejšie ako bilančné modely odhadu
 - náročné na vstupné údaje
 - dáta z povrchového prieskumu (geofyzika = seizmika, gravimetria)
 - dáta z vrtného prieskumu (vzorky hornín a rezervoárového média stanovujúce požadované parametre do modelov)
 - dáta z monitoringu (kontinuálny monitoring rezervoárových parametrov a parametrov produkovaného rezervoárového média)
 - vyžaduje opakovanú rekalibráciu modelov
 - náročné na personálne obsadenie (vyžaduje rezervoárové inžinierstvo ako vzdelanie, v opačnom prípade môžu viesť k chybným výsledkom, ktorých chyby presahujú vysoko mieru zjednodušenia bilančných modelov)
 - variabilita prevedenia modelov:
 - 1D parametrické, lumpfitové
 - 2D/3D priestorové modely
 - pravdepodobnostné modely
- **bilančné modely** (Príklad 4.5) vychádzajúce z energetickej bilancie rezervoárového prostredia, ktorá je štandardnou súčasťou modelovaní a odhadu energetickej bilancie a kapacity zdrojov geotermálnej energie
 - jednoduchá realizácia modelov
 - význam majú jedine v prevedení pravdepodobnostných modelov
 - v prevedení diskretných modelov majú extrémny potenciál skreslenia
 - vyžaduje opakovanú rekalibráciu modelov
 - vyžaduje skúsenosti s interpretáciou bilančných modelov energetického potenciálu a skúsenosti s interpretáciou a pochopením pravdepodobnostných modelov odhadu

Modelovanie udržateľnej rezervoárovej kapacity na území Slovenska je v úzadí. Rovnako, ako v iných prípadoch, oproti vo svete rozvinutému rezervoárovému manažmentu, chýba legislatíva podporujúca, respektíve podmieňujúca zavádzanie aspektov koncepcie TURP/TURM do praxe, a rovnako tak chýba ochota majiteľov geotermálnych projektov podieľať sa na štúdiu a zdieľaní informácií z produkcie s cieľom tvorby modelov. Pravdepodobnou príčinou je všeobecná skepsa voči verejným inštitúciám (syn. nedôvera),

chýbajúca legislatíva, a pravdepodobne aj obavy z možných obmedzení v prípade, ak by boli nežiadúce účinky na rezervoárové prostredie vplyvom jeho depletačnej produkcie preukázané, spolu s navrhnutými spôsobmi úpravy produkčnej stratégie alebo infraštruktúry.

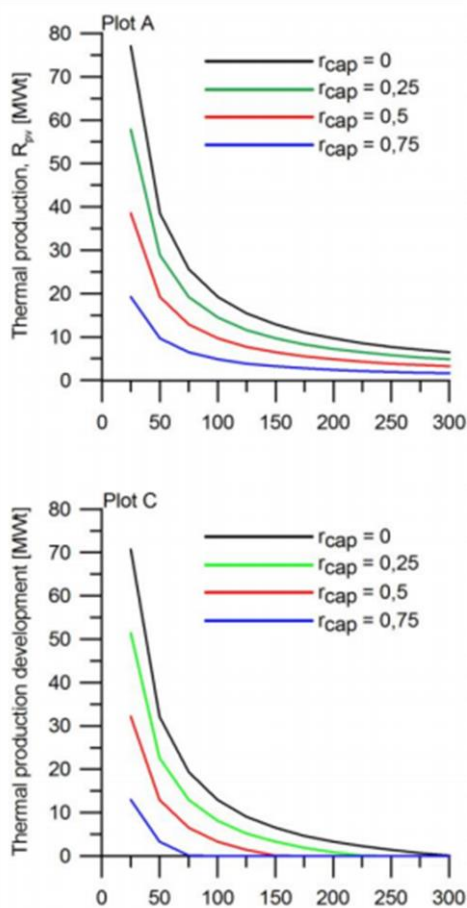
V súčasnosti, kedy bola opätovne obnovená činnosť AGES – Asociácie geotermálnej energie Slovenska, je možné predpokladať, že vzájomné nezhody medzi verejnou a súkromnou sférou budú postupne komunikované, vysvetľované, a táto situácia sa zmení. To je aj ambíciou spolupráce medzi MŽP SR, AGES, ŠGÚDŠ a prizvanými inštitúciami, s cieľom inštitucionalizovať, a následne legislatívne podporiť myšlienku dlhodobého monitoringu a analýzy udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie na jednotlivých lokalitách, respektíve útvaroch geotermálnych vôd.

PRÍKLAD 4.4: 2D mapové zobrazenie numerického modelu udržateľnej rezervoárovej kapacity metódou energetického prírastku (Sanyal, 2000) v podmienkach blokmodelového riešenia Ďurkovskej depresie (Fričovský et al., 2020b)



POPIS: mapa zobrazuje distribúciu prirodzenej udržateľnej kapacity rezervoáru Ďurkovskej depresie v zobrazení na jeho strope v kWt. Perspektívna zóna (Olšovany – Ďurkov – Bidovce – Svinica) je prejavovaná kontrastmi minim a maxim na hranici so Slanskými vrchmi, pričom západný okraj štruktúry je viditeľne zvýšený. Tento paradox súvisí s intenzívnym prestupom tepla z rezervoárového prostredia do nadložia pod vplyvom formovania konvekčných buniek, dôsledkom čoho množstvo energie „ostávajúcej“ v rezervoári v týchto miestach klesá. Tento jav je štandardný v rezervoároch s izolovanými konvekčnými bunkami. V prirodzene konduktívnom prostredí by distribúcia udržateľnej kapacity bola inverzná. To zdôrazňuje komplexnosť zdrojov GTE.

PRÍKLAD 4.5: 1D grafické zobrazenie udržateľného potenciálu a možností rozvoja produkcie geotermálnej energie podľa metódy koeficientu kapacity zásob (Bjarnadottir, 2010) v podmienkach hydrogeotermálnej štruktúry bešeňovská elevácia (Fričovský, 2014)



PRÍKLAD: grafy ukazujúce distribúciu tepelného výkonu (hore) bešeňovskej elevácie vzhľadom na úroveň udržateľnosti (kritická hranica je $r_{\text{cap}} = 0,5$) a možnosti ďalšieho rozvoja produkcie geotermálnej energie voči vtedy aktuálnym 6,3 MWt inštalovaného výkonu (dole).

INTERPRETÁCIA: Bilancia udržateľného potenciálu geotermálnej energie nie je ani v čase lineárna, a mení sa podľa dĺžky dizajnovanej produkcie, aj podľa úrovne udržateľnosti, s čím súvisia aj možnosti ďalšieho rozvoja. Kým pre obdobie 100 rokov je kritická udržateľná hranica 9,6 MWt, pre 40 rokov až 26 MWt. Potom možnosti rozvoja produkcie geotermálnej energie predstavujú pri zachovaní princípu udržateľnosti predstavujú 3,3 MWt pre udržateľný a takmer 20 MWt pre krátkodobý horizont produkcie.

ZÁVER: Možnosti dlhodobo udržateľnej produkcie klesajú s časom a nie sú lineárne.

4.2 Obnoviteľnosť zdrojov geotermálnej energie

Kým udržateľnosť zdrojov geotermálnej energie odkazuje na konceptuálny prístup = technický prístup ku využívaniu zdrojov geotermálnej energie z pohľadu energetickej kapacity, termín obnoviteľnosť (ang. renewability) odkazuje na prirodzené možnosti (hydro)geotermálnych systémov kontinuálne zásobovať, obnovovať, alebo nahradzovať energiu prechádzajúcu, alebo produkovanú z rezervoárového prostredia.

Tomu zodpovedá definícia obnoviteľnosti zdrojov geotermálnej energie, podľa ktorej (RYBACH ET AL., 1999; RYBACH, 2003, 2007, 2022; RYBACH – MONGILLO, 2006; STEFANSSON, 2000; STEFANSSON – AXELSSON, 2006; AXELSSON ET AL., 2005; O’SULLIVAN – MANNINGTON, 2005): „*obnoviteľnosť zdrojov geotermálnej energie vyjadruje energiu odoberanú zo systému, ktorá je kontinuálne nahradzovaná rovnakým množstvom energie v čase prebiehajúcej produkcie, eventuálne za čas podobný dobe produkcie počas a po jej ukončení, respektíve za čas definovaný technologickými a spoločenskými kritériami, zvyčajne 30 – 300 rokov*“.

V definícii obnoviteľnosti ide pritom o prienik medzi konceptom TURP a konceptom obnoviteľnosti zdrojov geotermálnej energie, kedy sa predpokladá produkcia zdrojov geotermálnej energie v rozpätí 100 – 300 rokov.

Samotná obnoviteľnosť má podľa definície dva základné komponenty:

- **obnovovaciu kapacitu** (ang. renewable capacity, renewability) geotermálnych systémov, respektíve rezervoárového prostredia = množstvo energie dopĺňanej do systému (energetická zložka)
- **regeneračnú kapacitu** (recoverability, recoverable capacity, reclamation period) geotermálnych systémov, t.j. čas, ktorý systém potrebuje pre obnovenie iníciaľných, alebo kvázi-iníciaľných podmienok (časová zložka).

4.2.1 Obnovovacia kapacita rezervoárového prostredia

Obnovovacia kapacita rezervoárového prostredia teda vyjadruje vzájomne prepojený vzťah medzi:

- množstvom energie v systéme (okrajová podmienka, nakoľko schopnosť rezervoárového prostredia akumulovať energiu je daná jeho objemom a tepelno-energetickou kapacitou)
- množstvom energie, ktoré do systému vstupuje a prechádza ním
- množstvom energie, ktoré zo systému prirodzene prestupuje do nadložia, alebo do prostredia.

Za **prirodzených podmienok** (bez produkcie) je rezervoárový systém **termodynamicky v rovnováhe** (OZGENER ET AL., 2005, 2007), to znamená, množstvo energie vstupujúcej do

systému je rovné množstvu energie, ktorá vystupuje zo systému, čo sa týka aj termo-minerálnych prameňov a iných povrchových prejavov geotermálnej energie (fumaroly, gejzíry). Počas **produkcie** do celkovej schémy vstupuje aj samotný odber geotermálnych vôd, ktorého dôsledkom je práve **narušenie termodynamickej rovnováhy medzi rezervoárovým prostredím a jeho okolím**. Vo výsledku potom (AXELSSON, 2010; RYBACH, 2007, 2022):

- v skutočnosti je možné odoberať z rezervoárového systému viac energie, ako je jej prirodzený prítok, respektíve prechod systémom (prevláda tzv. akumulovaná zložka geotermálnej energie)
- depletačná produkcia dočasne vedie ku krátkodobému zvýšeniu tepelného a teplotného gradientu v rezervoári, dôsledkom čoho je zvýšený prínos energie do systému z bezprostredného okolia
- z dlhodobého hľadiska však týmto procesom dôjde k ochladeniu rezervoárového prostredia.

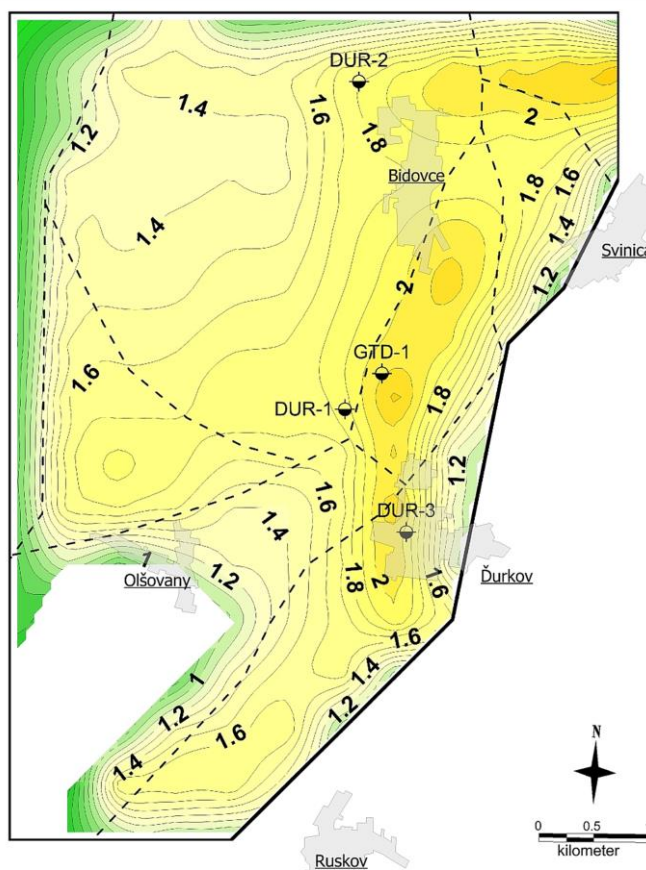
Množstvo energie, ktoré je rezervoár schopný prijímať z okolia kontinuálne, alebo po ukončení jeho produkcie, následne závisí od (Príklad 4.6 a 4.7):

- geotektonickej pozície rezervoárového systému = možnosti konduktívneho transportu tepla z astenosféry k povrchu, ktorého časť prechádza, a časť ostáva v rezervoári a konvektívneho transportu tepla = dodatočný prísun tepla horizontálnym, alebo vertikálnym prúdením termálnych vôd a/alebo aj magmy (ev. lávy) pod povrchom a v pripovrchových vrstvách
- geometrie rezervoáru (rozmery, objem, hĺbka)
- prítomnosti konvekcie = dodatočný tepelný prírastok do systému
- prirodzený tepelný gradient = rýchlosť a intenzita prestupu tepla / energie v pred-produkčnom štádiu
- indukovaný tepelný (a hydraulický) gradient = rozdiely medzi tepelno-energetickými parametrami rezervoáru a jeho okolia ovplyvňujúce možnosti príkonu tepla do systému vplyvom produkcie
- geotermické a termofyzikálne parametre rezervoáru = schopnosť rezervoárového prostredia prijímať a akumulovať tepelnú energiu, respektíve schopnosť rezervoárového prostredia transportovať tepelnú energiu do priestoru (tepelná vodivosť, tepelná kapacita, tepelná rozťažnosť)

- množstvo tepla prestupujúceho prirodzene do priestoru a do nadložia, nezávislé od aktuálneho stavu produkcie, dané geotermickými podmienkami nadložia rezervoáru.

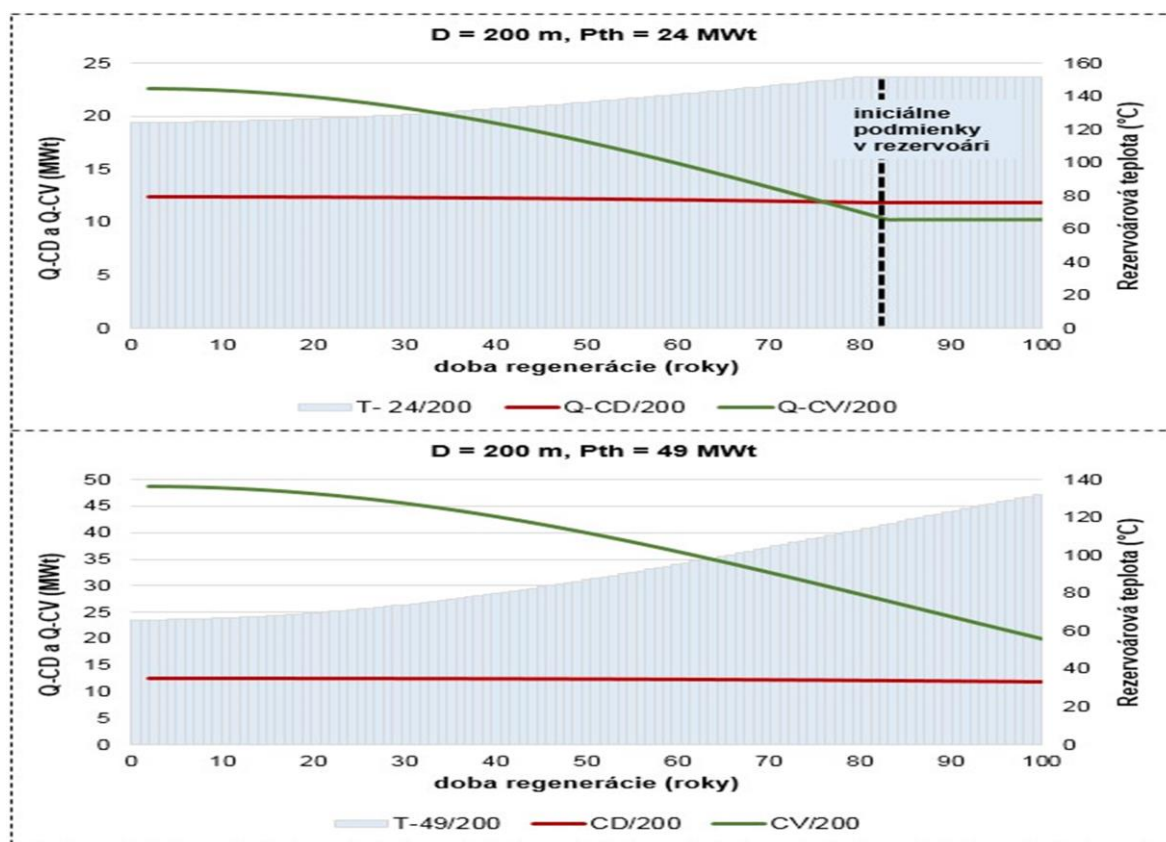
Z uvedeného vyplýva, že stanovenie obnovovacej kapacity rezervoárového prostredia je výsledkom realizácie diskretných, priestorových, alebo pravdepodobnostných konceptov matematicko-fyzikálneho modelovania (Príklad 4.6). Pre jej stanovenie / odhad sú potrebné informácie zbierané počas prieskumnej fázy (geofyzikálne metódy na určenie charakteru a geometrie rezervoárového systému), vrtných prác (vzorky pevných materiálov – hornín a rezervoárového média na analýzu termofyzikálnych vlastností), a kontinuálneho monitoringu (teplota, tlak, chemické rozbory, výsledky stopovacích skúšok, izotopové rozbory, hydrodynamické skúšky). Podobne, ako v prípade udržateľnej rezervoárovej kapacity zároveň platí, že **obnoviteľná kapacita rezervoáru musí byť predmetom opakovaného vyhodnocovania a prehodnocovania na základe produkčného monitoringu.**

PRÍKLAD 4.6: 2D mapa distribúcie obnovovacej kapacity rezervoárového prostredia d'urkovskej depresie. Upravené podľa: Fričovský et al., 2020b



Mapa zobrazuje izolínie obnovovacej kapacity modelu 500x500 m horizontálne a hrúbkou rezervoáru vertikálne. Pásmo najväčšej obnovovacej kapacity (MWt) tvorí zóna > 1,8 MWt prechádzajúca od obce Durkov na sever k Bidovciam (bodkovanou čiarou označené zlomové línie vymedzujú tzv. d'urkovský tektonický blok), a následne pokračuje z - v smerom k Svinici, až Slanským vrchom. To svedčí o značnej obnovovacej kapacite v časti celej d'urkovskej depresie oproti jej západnému okraju, zrejme aj vplyvom obmedzených konvekčných buniek (napr. Fričovský et al., 2018a, Vizi - Fričovský, 2023)

PRÍKLAD 4.7: Dynamické zmeny konvektívneho a konduktívneho prítoku do rezervoáru vplyvom predchádzajúcej rezervoárovej produkcie. Analytický 1-D lumpfit model rezervoárovej odozvy d'urkovskej depresie. Zdroj: Fričovský et al., 2020b,d



PRÍKLAD: Grafy zobrazujú vývoj konduktívneho (Q-CD) a konvektívneho (Q-CV) prísunu energie do rezervoárového prostredia scenárov po ukončení konštantnej produkcie 24 MWt (hore) a 49 MWt (dole) počas následnej doby regenerácie 100 rokov na vzdialenosť 200 m od reinjektážneho vrtu v závislosti k vývoju rezervoárovej teploty.

INTERPRETÁCIA: Po modelovanom ukončení produkcie vo vzdialenosti 200 m od reinjektážneho vrtu boli odhadované rezervoárové teploty $T = 125\text{ °C}$ (24 MWt) a 67 °C (49 MWt). V čase $t = 0$ (ukočenie produkcie) prevláda konvektívny (CV) nad konduktívnym (CD) prísunom tepla napriek tomu, že v iníciaálnom štádiu (pred produkciou) je ich pomer opačný. To je viditeľné na scenári pre 24 MWt produkciu, kedy po 82 rokoch došlo k obnoveniu pôvodnej teploty ($T = 152\text{ °C}$) a rezervoár v okolí nadobudol pôvodné štádium. Pre scenár produkcie 49 MWt ani po 100-ročnom prerušení produkcie nedôjde k nadobudnutiu pôvodných podmienok ($T = 132\text{ °C}$), a vo vzdialenosti $D = 200\text{ m}$ model stále prevláda vplyv konvektívneho prírastku tepla do systému nad konduktívnym.

ZÁVER: Množstvo tepelného prírastku je funkciou času a rezervoárovej teploty v čase produkcie aj obnovovania. Obnovenie pôvodných teplotných podmienok väčšinou potom znamená aj obnovenie prevládajúcich koncových členov transportu tepla a potom aj rezervoárovej dynamiky, ktorá môže súvisieť aj s formovaním parnej fázy.

4.2.2 Regeneračná kapacita rezervoárového prostredia

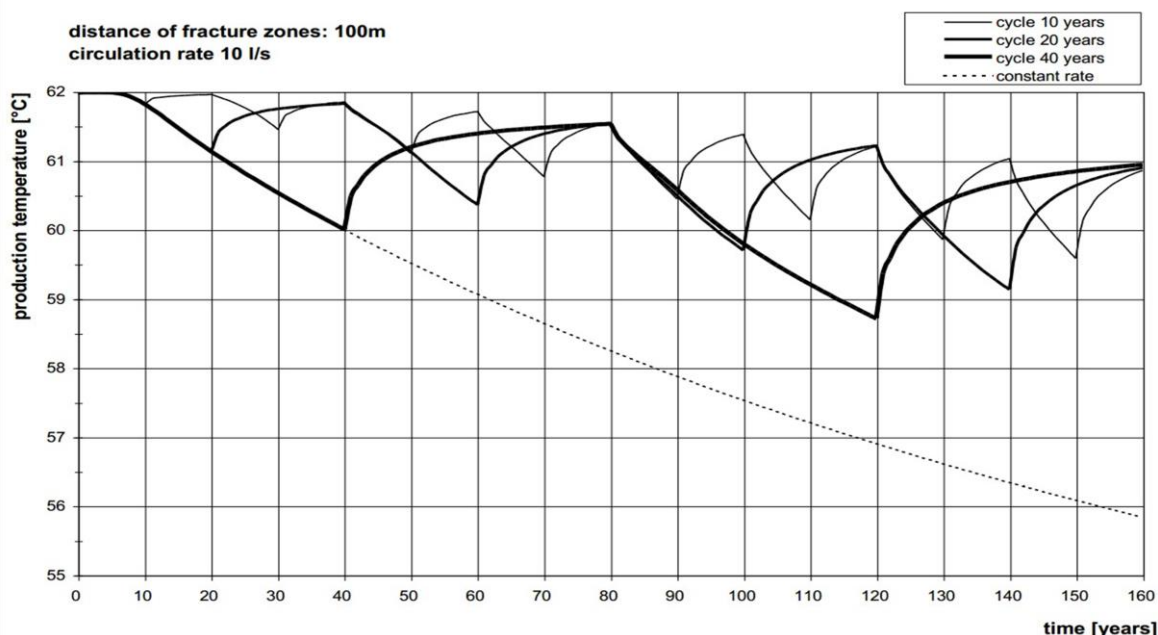
Regeneračná kapacita rezervoárového prostredia (Príklad 4.8) vyjadruje čas potrebný pre obnovenie prírodných (iniciálnych) podmienok v rezervoári po ukončení jeho produkcie. Práve hodnotenie regeneračnej kapacity je praktickým priemetom hodnotenia prístupu producentov geotermálnej energie k rezervoáru, a charakteru toho, či zdroj geotermálnej energie je produkovaný obnoviteľne. Aj napriek na začiatku časti 4.2 uvedenej definícii, je **produkcia** geotermálnej energie **považovaná za obnoviteľnú vtedy** (a len vtedy), **ak**:

- doba regenerácie nepresiahne dobu produkcie zdrojov geotermálnej energie = **doba regenerácie je kratšia, ako doba produkcie** (RYBACH, 2007, 2022)
- **kvantitatívne rozdiely** (rezervoárová teplota, rezervoárová špecifická entalpia, termodynamická kvalita) medzi stavom rezervoáru po ukončení produkcie a po ukončení doby regenerácie **nepresahujú 10 %** (SUTTER ET AL., 2011; FOX ET AL., 2013)
- v rámci kvantitatívnych rozdielov **dôjde k obnoveniu fázovej rovnováhy** spred obdobia produkcie, vrátane dynamických charakteristík rezervoárového prostredia (AXELSSON, 2009, 2012).

Je len samozrejmé, že regeneračná kapacita rezervoáru, podobne, ako aj jeho obnovovacia kapacita, **nie je konštantná a nie je heterogénna** v rámci jeho priebehu (Príklad 4.8), keďže hydrogeotermálne štruktúry nie sú pravidelné, homogénne telesá. Dôsledky dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie sa prejavujú základnými pravidlami:

- v prípade dubletovej schémy (využívanie reinjektáže) je najviac ovplyvnené okolie reinjektážnych vrtov (zvyčajne reinjektážne pole), z čoho vyplýva, že spravidla regeneračná kapacita rezervoárového prostredia v tejto časti je podstatne dlhšia, ako okolie produkčnej zóny
- v prípade prirodzeného dopĺňania geotermálnych vôd / rezervoárového média (bez reinjektáže) sú zóny najviac ovplyvnené, a najdlhšie sa regenerujúce v infiltračnej oblasti (zóna prieniku povrchových vôd do geologického prostredia) a zostupných tranzitných zónach, nakoľko produkcia rezervoárov vyvolá hydraulický (tlakový) gradient medzi rezervoárom a jeho perifériou = vody začnú prúdiť rýchlejšie, t.j. čas zdržania a možnosti prúdiacich vôd nadobudnúť vyváženú teplotu sa znížia.

PRÍKLAD 4.8: Príklad jednoduchého modelu predikcie regenerácie teploty na ústí dubletu mesta Riehen v Švajčiarsku. Zdroj: Mégel – Rybach, 2000; Rybach, 2022

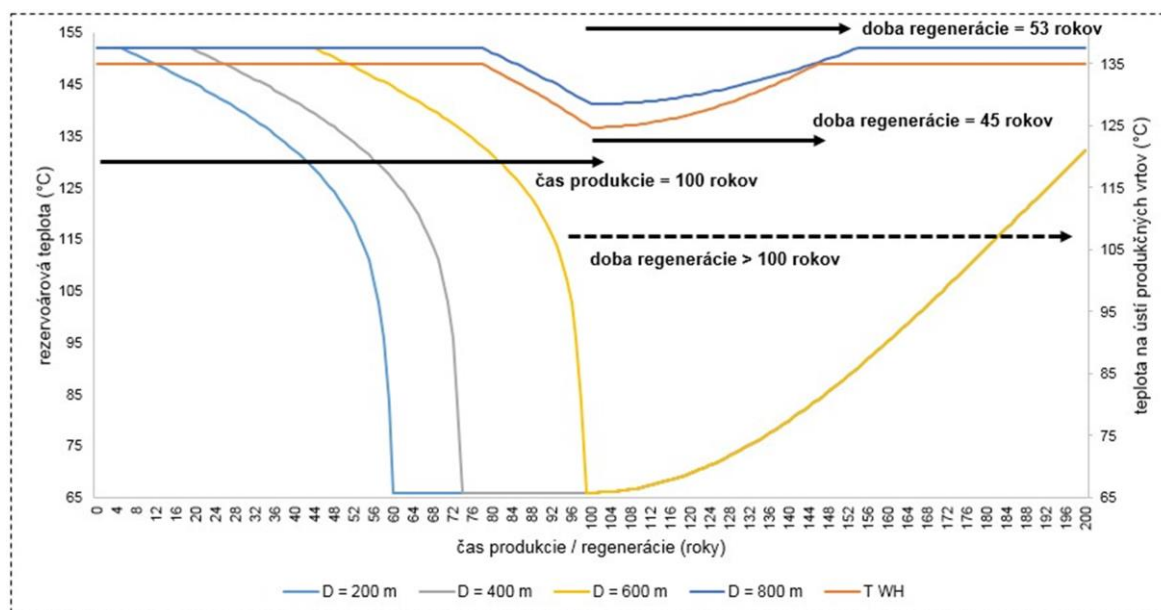


PRÍKLAD: Model odhadu schopnosti rezervoárového prostredia na lokalite Riehen (predmestie Ženevy v Švajčiarsku) obnovovať produkčnú teplotu = teplotu na ústí produkčného vrtu pre rôzne cyklické režimy produkcie a utlmovnia (plné čiary s rôznou hrúbkou) – t.j. 10/20/40 ročné cykly vo vzdialenosti 100 m od reinjektážneho vrtu; v porovnaní so scenárom konštantnej dlhodobej produkcie (bodkovaná čiara).

INTERPRETÁCIA: Z modelu odhadu rezervoárovej odozvy jednoznačne vyplýva schopnosť rezervoáru obnovovať svoje pôvodné podmienky, pričom maximálny rozdiel medzi iniciálnou a obnovovanou teplotou je pre 2. etapu 40-ročného cyklu 1 °C za využitia zvolených stratégií. Znamená to, že k úplnému obnoveniu pôvodných podmienok by pri zvážených cykloch nedošlo, ale modelované obnovovanie teploty cyklických stratégií dovoľujú hovoriť o obnoviteľnom prístupe / obnoviteľnom využívaní (a zároveň udržateľnom, keďže teplota neklesla pod 56 °C (kritická 10 % zmena oproti pôvodnému stavu) lokálneho zdroja geotermálnej energie.

ZÁVER: Spoliehanie sa na obnovovaciu kapacitu rezervoárového prostredia pri cyklickej stratégii umožňuje dlhodobú produkciu zdroja geotermálnej energie. Zreteľná konštantná produkcia by časom viedla k zreteľne výraznejším zmenám produkčnej teploty s nutnosťou nájsť riešenie, ako výsledný pokles tepelného výkonu riešiť. Práve pre najmenšie teplotné rozdiely pred a po regenerácii, ako aj počas produkcie, sa ale energeticky najúčinnnejším javí paradoxne najkratší, 10-ročný cyklus produkcie a utlmovania, vplyvom pomerne stabilných tepelných výkonov a minimálnou zmenou oproti iniciálnym podmienkam v čase otvorenia produkcie.

PRÍKLAD 4.9: Príklad výsledkov modelu rezervoárovej odozvy a regenerácie v 800 m horizontálnom profile dubletovej schémy d'urkovskej depresie. Upravené podľa: Fričovský et al., 2020b,d.



PRÍKLAD: pseudo-analytický lumpfitový model rezervoárovej odozvy pre scenár konštantného udržiavania produkcie geotermálnej energie na úrovni 49 MWt predpokladá, že aj po dobu 100 rokov nedôjde na ústí produkčných vrtov k poklesu teploty pod kritickú hranicu, t.j. 122 °C (10 % pôvodných hodnôt). Kritická teplota rezervoárového prostredia ($T = 65$ °C) je daná predpokladanou teplotou reinjektáže, takže pod túto hodnotu nemôže klesnúť. Model zároveň predpokladá úplné zastavenie produkcie po 100-ročnom období.

INTERPRETÁCIA: Z výsledkov modelu, ktorý predpokladá rovnakú dobu regenerácie, ako dobu produkcie vyplýva, že teplota na ústí vrtov po produkcii (124 °C) môže byť obnovená za približne 45 rokov (135 °C) rovnako, ako priemerná teplota rezervoáru vo vzdialenosti 800 m dosiahne pôvodné podmienky za 53 rokov (141 → 152 °C). Naopak, pre vzdialenosť < 600 m od reinjektážnych vrtov, kde teplota prostredia by bola podobná teplote reinjektáže (~ 65 °C), a táto kritická hranica teploty bola dosiahnutá v čase 98 rokov ($D = 600$ m), 73 rokov ($D = 400$ m) respektíve 59 rokov ($D = 200$ m), model nepredpokladá dosiahnutie pôvodných podmienok za 100-ročné obdobie regenerácie.

ZÁVER: Vzhľadom na bezprostredné okolie produkcie (ústie vrtu a $D = 800$ m) je možné konštatovať, že produkcia podľa tohto scenára / stratégie spĺňa podmienku obnoviteľnosti (čas regenerácie menší ako čas produkcie) a udržateľnosti (čas produkcie je 100 rokov pri zachovaní kritickej teploty). Problém nedosiahnutia pôvodných podmienok v smere k reinjektážnym vrtom môže byť následne vyriešený zmenou pozície reinjektážneho poľa, ak to geotermické a rezervoárové parametre dovoľia.

4.3 Rezervoárová odozva a monitoring zdrojov geotermálnej energie

4.3.1 Rezervoárový manažment v zmysle koncepcie TURM / TURP

Základným cieľom rezervoárového inžinierstva je v zmysle koncepcie trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie udržateľný **rezervoárový manažment**, čiže spôsob prístupu, ktorého cieľom je prostredníctvom kontinuálneho monitoringu, interpretácie, vyhodnocovania, a navrhovania riešení dospieť k dlhodobu udržateľnej produkcii zdrojov geotermálnej energie s cieľom znížiť riziká energetickej depletácie rezervoáru. Konkrétne zahŕňa akcie zamerané na (STEFANSSON ET AL., 1995; JOLIE ET AL., 2021):

- minimalizovať operačné výdavky na produkciu daného rezervoáru
- maximalizovať produkciu geotermálnej energie v súlade s charakteristikami rezervoárového prostredia
- zabezpečiť bezpečné dlhodobé dodávky energie (tepelnej, elektrickej) ku koncovým odoberateľom
- minimalizovať environmentálne dopady produkcie na rezervoár a jeho povrchové okolie
- manažovať technicko-technologické vplyvy produkcie geotermálnej energie na povrchovú infraštruktúru (korózia, inkrustácia)
- prispôbiť produkciu zdrojov geotermálnej energie lokálnej, národnej legislatíve a globálnym koncepciám.

Aj podľa vyššie uvedených princípov sledovaní odhadu udržateľnej rezervoárovej kapacity alebo jeho možností obnoviteľnosti, každý rezervoárový manažment vychádza zo základných princípov (AXELSSON, 2003, 2008; AXELSSON – STEINGRÍMSSON, 2018):

- znalosť rezervoárovej geometrie a hydraulických okrajových podmienok
- znalosť hydraulických a termofyzikálnych vlastností hornín rezervoárového prostredia respektíve jeho bezprostredného okolia (permeability, pórovitosť, špecifická hustota,

tepelná kapacita, tepelná rozťažnosť, tepelná konduktivita, rozostup puklinových systémov, šírka puklinových systémov, koeficient stlačiteľnosti)

- znalosť rezervoárového média (teplota, tlak, fázové pomery, fázové rozhrania, chemické zloženie geotermálnej vody, chemické zloženie geotermálnej pary, termodynamické parametre, termodynamická kvalita)
- znalosť rezervoárovej dynamiky (konduktívne procesy, konvektívne procesy a konvekčné bunky, rovnomernosť prehrievania rezervoáru z okolia, adiabatický var, analýza fázovej stability, hydrogeologický režim prúdenia)
- možnosti rozvoja, úpravy a spravovania povrchovej produkčnej infraštruktúry (možnosti umiestnenia náhradných vrtov, spiachich vrtov, záložných vrtov, možnosti presunu produktovodov, možnosti presunu alebo inštalácie nových produkčných staníc a staníc technickej úpravy a prípravy zdroja geotermálnej energie, sociálna akceptácia, environmentálne limity....).

Komplexnosť zdrojov geotermálnej energie (napríklad prítomnosť geotermálnych vôd s rôznou teplotou v rámci jedného geotermálneho systému, rôzne formy termodynamicky viazanej parnej frakcie na vodu) a geotermálnych systémov znemožňuje z praktického hľadiska nejaké zjednocovanie, alebo štandardizované schémy na mikromierke. Napriek tomu, vo všeobecnosti zmysel, význam, presnosť, a účinnosť monitorovacieho programu závisia na (AXELSSON, 2009, 2016; KRISTMANSDOTTIR, 2009; AXELSSON – KRISTMANSDOTTIR, 2009; MONTEROSSA – AXELSSON, 2013):

- fázovej povahy zdrojov geotermálnej energie = bez parnej frakcie alebo s parnou frakciou v rôznych stupňoch termodynamickej viazanosti
- geologickom prostredí rezervoárov = výber povrchových metód geofyzikálnych metód monitorovania a interpretácia výsledkov geochemického monitoringu
- prístupnosť a dostupnosť geotermálneho poľa = ekonomika a logistika predovšetkým povrchového geofyzikálneho monitoringu je náročnejšia v exponovanom a členitom teréne ako na rovinách alebo sklonenom reliéfe
- ciele monitoringu = ovplyvňujú zvolené metódy a ich frekvenciu
- rozpočet monitorovacích prác = ovplyvňuje metódy a frekvenciu monitorovania
- dostupnosť monitorovacích objektov a monitorovacia sieť = pramene, vrty...
- flexibilita monitoringu = možnosti upraviť monitoring vzhľadom na predošlé výsledky.

Bez ohľadu na povahu zdrojov geotermálnej energie, **každý monitoring musí nevyhnutne byť** (AXELSSON, 2009, 2016; KRISTMANSDOTTIR, 2009; AXELSSON – KRISTMANSDOTTIR, 2009; MONTEROSSA – AXELSSON, 2013):

- kontinuálny = od fázy prieskumu geotermálneho systému, cez etapu vŕtania, otvárania produkcie, až po – počas fázy dlhodobej produkcie
- periodický = musí byť realizovaný pravidelne (dodržané časové obdobia) a cyklicky (dodržané monitorovacie cykly v rámci každého roku)
- flexibilný = nevyhnutné je mať možnosť upraviť (a doplniť, obmedziť) monitorované parametre, monitorovacie metódy, alebo monitorovacie body podľa aktuálnych potrieb a výsledkov predchádzajúcich etáp prieskumu
- komplexný = zvolené všetky dostupné a zmysluplné metódy aplikovateľné v rámci daných podmienok rezervoáru a rezervoárového média
- rovnomerný = pokrýva dostupné objekty v rôznych / kritických pozíciách

Z povahy zdrojov geotermálnej energie, ktoré kombinujú energetickú zložku a zložku rezervoárového média, vyplývajú dva základné typy realizácie systematického a cieleného monitorovania produkcie a geotermálneho poľa (HERSIR – BJORNSSON, 1991; KJARAN – ELIASSON, 2008; AXELSSON, 2009; JACOBO – MONTALVO, 2013):

- **monitoring fyzikálnych parametrov**
 - realizovaný nepriamo = povrchovými geofyzikálnymi meraniami (odporové metódy, geoelektrika, magnetotelurika, magnetometria, gravimetria; respektíve letecké metódy prieskumu, družicový prieskum)
 - realizovaný priamo = termické, tlakové a prietokové merania vo vrtoch, respektíve karotážne merania
- **monitoring chemických parametrov** = realizovaný priamo na vrtoch (produkčných, reinjektážnych), technických zariadeniach produkčnej infraštruktúry (tepelné výmenníky, separátory geotermálnych elektrární atp.), alebo povrchových prejavoch zdrojov geotermálnej energie (fumaroly, gejzíry, termálne pramene)
 - geochemický monitoring (fyzikálno-chemické parametre geotermálnej vody a geotermálnej pary; izotopové rozbory)
 - stopovacie skúšky
 - atmogeochemické merania v pôdnom vzduchu.

4.3.2 Monitoring fyzikálnych parametrov

Aj **priamy monitoring** fyzikálnych parametrov rezervoárového prostredia a rezervoárového média sa odvíja najmä od kombinácie hydrogeologických a geotermických parametrov rezervoáru, pričom kľúčovým kritériom je v konečnom dôsledku prítomnosť parnej fázy (frakcie) v rezervoároch – Tabuľka 4.1 a 4.2 (AXELSSON, 2009; AXELSSON – KRISTMANSDOTTIR, 2009; GUDMUNDSDOTTIR – STEINGRÍMSSON, 2018):

Tabuľka 4.1 Parametre priameho monitoringu v závislosti na type geotermálneho systému. Upravené podľa: Axelsson (2009); Axelsson – Kristmansdottir (2009); Gudmundsdottir – Steingrímsson (2018)

Typ geotermálneho poľa / systému	nízkoentálnické geotermálne systémy (rezervoárová teplota do 120 °C a parná frakcia vo forme vlhkej pary)	vysokoentálnické geotermálne systémy (rezervoárová teplota nad 120 °C a parná frakcia vo forme dvojitej fázy alebo suchej geotermálnej pary)
Typ monitorovacích prác a monitorovaných parametrov	- celková produkcia rezervoárového média z každého produkčného vrtu - historická (minulá) produkcia - celková produkcia geotermálneho poľa - teplota produkovaného média - tlak na ústí produkčných vrtov - hladina geotermálnej vody v produkčných vrtoch a pozorovacích vrtoch - bod evázie plynov - teplotné profily (tzv. logging while drilling alebo logging while pumping) - tlakové profily na pozorovacích a monitorovacích vrtoch - kaliperové merania a kavnometria - reinjektované množstvá - reinjektované tlaky - teplota reinjektovanej vody na ústí reinjektážneho vrtu - teplota vstupujúcej reinjektovanej vody do rezervoárovej horniny - tlak reinjektovanej vody do rezervoárovej horniny	- historická a minulé celková produkcia (pre paru aj vodu) - celková produkcia média z geotermálneho poľa (pre paru aj vodu) - fázové (frakčné) pomery - produkovaná entalpia na ústí produkčných vrtov - tlak na ústí produkčných vrtov - bod evázie / separácie - hladina geotermálnej vody (vodnej frakcie) v produkčných a pozorovacích vrtoch - teplotné profily (LWD, LWP) na produkčných a monitorovacích vrtoch - tlakové profily (LWD, LWP) na pozorovacích vrtoch - tlakové profily na produkčných a pozorovacích vrtoch - kaliperové merania a kavnometria - prítokometria v produkčných vrtoch - spinnerové záznamy - teplota vstupujúcej reinjektovanej fázy do rezervoárovej horniny - tlak reinjektovanej fázy do rezervoárovej horniny - fázové rozhrania reinjektovaného média

Funkciou **nepriameho monitoringu** sú zvyčajne doplňujúce merania na plošnej úrovni, ktoré môžu podporiť výsledky priameho monitorovania na vrtoch. Cieľom vybraných metód

povrchového, alebo leteckého monitorovania je (HERSIR – BJORNSSON, 1991; BJORNSSON, 2009; AXELSSON, 2008, 2009, 2013):

- topografické merania = geodetické metódy merajúce najmä nadmorskú výšku reliéfu geotermálneho poľa s cieľom sledovať nástup, alebo mieru subsidencie (poklesu terénu) vplyvom vyprázdňovania rezervoárového prostredia alebo zmeny v hydrogeologickom režime prúdenia a akumulácie geotermálnych systémov, či zmeny fázovej stability zdrojov geotermálnej energie
- mikro-tiažové merania = aplikované na malej ploche, ktorých cieľom je sledovať zmeny tiažových anomálií súvisiacich s vyprázdňovaním rezervoárového prostredia, alebo naopak s prítokom vôd do rezervoárového prostredia z periferie; pri reinjektáži slúži na sledovanie pohybu reinjektovaného média (množstvo a smer prúdenia v rezervoári)
- geoelektrické a odporové merania = sledovanie pohybu rezervoárového média na základe jeho vodivosti / odporu; pričom vodivosť stúpa s teplotou a salinitou, čím môže indikovať prítoky studených alebo teplých pásiem rezervoárového média alebo pohyb reinjektážneho frontu

Tabuľka 4.2 Parametre priameho monitoringu v závislosti na type geotermálneho systému. Upravené podľa: Axelsson (2009); Axelsson – Kristmansdottir (2009)

Typ monitorovacieho program / prostriedkov	odporúčaná frekvencia monitorovacieho systému (* optimálna)
individuálna produkcia geotermálnej vody a/alebo pary	1/deň – kontinuálne*
kumulatívna produkcia geotermálnej vody a/alebo pary	1/týždeň
produkovaná entalpia	1/deň – kontinuálne*
teplota produkovaného média na ústí produkčných vrtov	1/deň – kontinuálne*
tlak na ústí produkčných vrtov	1/deň – kontinuálne*
hladina geotermálnej vody v produkčných vrtoch	1/deň – kontinuálne*
hladina geotermálnej vody v pozorovacích vrtoch	1/mesiac – 1/týždeň*
bod evázie / separácie	1/mesiac
prítokometria	1/týždeň
teplotné profily a tlakové profily na produkčných vrtoch	1/rok – 1/mesiac*
teplotné a tlakové profily na monitorovacích vrtoch	1/rok – 1/ 3mesiace*
kaliperové merania / kavernometria	1/rok
spinnerové merania / prítokometria	1/rok
teplota a tlak na ústí reinjektážnych vrtov	1/týždeň – 1/deň*
teplota a tlak na vstupe do rezervoárového prostredia	1/mesiac – 1/týždeň*
fázové pomery / rozhrania reinjektovaného média	1/týždeň – 1/deň*
teplotné a tlakové profily na reinjektážnych vrtoch	1/rok

- pasívne mikroseizmické merania = sledovanie mikroseizmickej aktivity územia, predovšetkým v súvislosti s reinjektážou, ktorá zmenami fyzikálnych podmienok rezervoáru (tlak, šmyk, trenie...) môže viesť k mikroseizmickej aktivite, čím je monitorovaný pohyb reinjektážneho frontu a jeho šírenie / akumulácia v prostredí.

4.3.3 Monitoring chemických parametrov

Kým výhodou geofyzikálneho monitoringu, alebo monitorovania produkčných parametrov je jeho komplexnosť a presnosť, vrátane možností vzájomnej korelácie a kalibrácie výsledkov medzi jednotlivými metódami, výhodou geochemického monitorovania zdrojov geotermálnej energie a produkcie je cenová výhodnosť, predovšetkým voči profilovacím alebo geofyzikálnym metódam.

Samotný proces vzorkovania = odberu vzoriek závisí na fázovej povahe a komplexnosti produkovaného rezervoárového média – Tabuľka 4.3 (KRISTMANSDOTTIR, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011; MORTENSEN – AXELSSON, 2013):

- 1-fázové zdroje geotermálnej energie = geotermálna voda
 - rozbor geotermálnej vody
 - rozbor rozpustených plynov
- viac-fázové zdroje geotermálnej energie = geotermálna voda + parná frakcia v rôznom stupni termodynamickej viazanosti:
 - rozbor geotermálnej vody
 - rozbor separovanej geotermálnej pary
 - rozbor rozpustených plynov.

Geochemický monitoring je štandardne využívaný v režimoch a postupoch (KRISTMANSDOTTIR, 2009; JACOBO – MONTALVO, 2013):

- sledovanie vývoja kľúčových parametrov (Cl, SO₄, SiO₂, HCO₃, Mg, EC) a ich zmien na časovej osi s následnou interpretáciou rezervoárových procesov
- mapovanie rezervoárových procesoch na takzvaných fáciálnych diagramoch alebo mapovacích genetických diagramoch sledujúcich predovšetkým geochemické príznaky procesov rezervoárového varu, zmiešavania, nariedovania (prítok anomálne chladného média), prehrievania (prítok anomálne teplého média)

Tabuľka 4.3 Režim geochemického monitoringu v závislosti na type zdroja geotermálnej energie. Upravené podľa: Kristmansdottir (2009)

Frekvencia monitorovacieho programu	nízkoentálnické geotermálne systémy (rezervoárová teplota do 120 °C a parná frakcia vo forme vlhkej pary)	vysokoentálnické geotermálne systémy (rezervoárová teplota nad 120 °C a parná frakcia vo forme dvojitej fázy alebo suchej geotermálnej pary)
denne	teplota	teplota, EC, pH
týždenne	EC, vybrané kritické parametre v závislosti na rezervoárovej povahe alebo jeho predchádzajúcej rezervoárovej odpovedi	vybrané kritické parametre v závislosti na rezervoárovej povahe alebo jeho predchádzajúcej rezervoárovej odpovedi
aspoň 4-krát ročne	SiO ₂ , Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO ₃ , SO ₄ , B, TDS, EC, CO ₂ , Li, pH	vodná zložka (SiO ₂ , Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO ₃ , SO ₄ , B, TDS, EC, CO ₂ , Li, H ₂ S, NO ₃ , Al, Fe, F) parná zložka (CO ₂ , H ₂ S, N ₂ , O ₂ , CH ₄) rozbór rozpustených plynov
aspoň 2-krát ročne	Al, Fe, Mn, Br, F, NO ₃ , H ₂ S, stabilné izotopy, rozbór rozpustených plynov	vodná zložka (Mn, Br, F, stabilné izotopy) parná zložka (H ₂ , Ar)
aspoň 1-krát ročne	stopové prvky (Sr, Cd, I, Zn, Hg, Pb, As, prípadne iné podľa geológie)	vodná zložka (Sr, Cd, I, Zn, Hg, Pb, As, prípadne iné podľa geológie)

- silikátová, aniónová a multikomponentová geotermometria vyžadujúca najmä chemické a termodynamické modelovanie s cieľom identifikovať hlavné rezervoárové procesy (zmiešavanie, nariedovanie, ochladzovanie, prehrievanie, konvekcia, adiabatický var, odplynovací var, viacfázové zmiešanie a prestupovanie....), ale aj smery a zmeny prúdenia a reakcií geotermálnych vôd priamo v rezervoári
- izotopové rozbory a izotopová geotermometria (datovanie média – čerstvé prítoky, reziduálne prítoky, hĺbkové prítoky, pôvod – magmatický, horninový, atmosférický)

4.3.4 Výstupy a prínos koncepčného monitoringu

Z častí 4.3.1 až 4.3.3 vyplýva, že výsledkom aplikovania systematického, komplexného a kontinuálneho monitoringu je zber údajov, na základe ktorých je pri vhodnom personálnom obsadení možné sledovať odozvu geotermálnych systémov (rezervoárov, rezervoárového média) na otvorenie produkcie a dlhodobú produkciu, a navrhovať stratégie na minimalizovanie rizík vyplývajúcich z rezervoárovej odozvy ako na samotné rezervoárové prostredie, tak aj na samotné projekty využívania geotermálnej energie.

Minimálne údaje a informácie, ktoré má monitoring za cieľ sledovať, teda sú (STEFANSSON ET AL. 1995; AXELSSON, 2009; MONTEROSSA – AXELSSON, 2013):

- individuálna a kumulatívna produkcia rezervoárového média, vrátane fázových pomerov pri vysokoentalpických (Tab. 4.2 a 4.3) zdrojoch geotermálnej energie
- teplota (nízkoentalpických) a entalpia (vysokoentalpických) rezervoárových médií
- zmeny hladiny podzemnej vody a bodu evázie plynov, respektíve separácie parnej frakcie
- chemické zloženie geotermálnej vody, plynov a parnej frakcie; vrátanie zmien chemických procesov na rozhraní voda-hornina v rezervoári
- reinjektované množstvá a parametre reinjektáže (teplota, tlak, množstvo, smer prúdenia, postupu a akumulácie)
- teplotné a tlakové pomery produkcie a teplotné a tlakové pomery rezervoárového prostredia z vertikálneho profilovania)
- technický status produkčných a reinjektážnych vrtov a produktivita získavaná z karotážnych meraní (kaliper, kavernometria, spinner, prietokometria)
- povrchové a environmentálne vplyvy produkcie (mikroseizmicita, tiaž, subsidencia).

Na základe výsledkov aplikovaných monitorovacích prác je možné aplikovať niekoľko rôznych metód na zlepšenie stavu udržateľnosti produkcie geotermálnej energie, prípadne pre limitovanie negatívnych dosahov rezervoárovej produkcie na samotný rezervoár, rezervoárové médium, alebo povrchovú / produkčnú infraštruktúru (STEFANSSON ET AL. 1995; AXELSSON, 2009, 2012C, 2013; MONTEROSSA – AXELSSON, 2013):

- úprava (zvýšenie / zníženie produkcie) alebo zmena (režim) produkčnej stratégie vzhľadom na rezervoárovú odozvu
- spustenie reinjektáže alebo úprava režimu reinjektáže (pozícia, teplota, množstvo) vzhľadom na rezervoárovú odozvu
- realizácia nových vrtov (viď 3.3) alebo stratégie technickej a technologickej úpravy existujúcich vrtov (napríklad zmeny perforácie vrtov podľa zmien v prítokových zónach, zmena paženia reagujúca na zmeny korózneho a inkrustačného potenciálu, zmeny povrchového vybavenia vrtov podľa fázových pomerov rezervoárového média a potenciálu minerálnych fáz korodovať / inkrustovať)
- pozícia čerpadiel v závislosti na zmene bodu evázie plynov a separácie parnej fázy

- vyhľadávanie nových rezervoárových zón pre lokalizáciu produkčných, alebo reinjektážnych vrtov
- vyhľadávanie nových geotermálnych systémov
- aplikácia vhodných prostriedkov kontroly korózie a inkrustácie optimalizáciou využívaných inhibítorov alebo zmenou pracovných tlakov.

4.3.5 Rezervoárová odozva dlhodobej produkcie

Pod pojmom rezervoárová odozva môžeme rozumieť **všetky fyzikálne a chemické procesy** týkajúce sa rezervoárového prostredia, alebo povrchu geotermálneho poľa, **ktoré majú preukázateľný súvis s produkciou zdrojov geotermálnej energie**, napríklad (KJARAN – ELIASSON, 2008; AXELSSON, 2009; KRISTMANSDOTTIR, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011; JACOBO – MONTALVO, 2013; KAYA - ZARROUK, 2017; KAMILA ET AL., 2021; SOLTANI ET AL., 2021):

- subsidencia reliéfu vyprázdňovaním rezervoáru = Príklad 4.10
- pokles rezervoárového tlaku a produktivity v súvislosti s vyprázdňovaním rezervoáru (nadmerná produkcia, nedostatočná komunikácia produkčnej a reinjektážnej zóny alebo produkčnej zóny a infiltračnej zóny) = Príklad 4.11 až 4.13
- pokles rezervoárovej entalpie (množstva frakcie parnej fázy) v súvislosti s ochladzovaním rezervoáru (ochladzovanie prítokom studeného frontu z reinjektážnej alebo infiltračnej oblasti zmenou tlakového gradientu produkciou, ktoré vedie ku kondenzácii pary, alebo strate jej termodynamickej energie) = Príklad 4.14
- ochladzovanie rezervoáru prítokom povrchových vôd alebo podzemných / geotermálnych vôd z periférie alebo nadložia produkovanej zóny rezervoáru, respektíve reinjektovaných geotermálnych vôd vplyvom nadmernej produkcie alebo zle zvolenej reinjektážnej stratégie = Príklad 4.15 – 4.16
- zmena rezervoárových procesov (horizontálneho alebo vertikálneho prúdenia v rezervoári, hydrogeologického režimu prúdenia, fázovej stability, procesov tvorby a akumulácie parnej fázy, nástup / ústup konvekcie) a tepelného charakteru rezervoárového prostredia vzhľadom na koncové členy transportu tepla = Príklad 4.17
- zmena chemického zloženia rezervoárového média a korózneho / inkrustačného potenciálu

- strata parnej fázy kondenzáciou (ochladenie rezervoáru, eventuálne zmiešavanie, prípadne zvýšenie rezervoárového tlaku reinjektážou) alebo naopak odparovaním (extrémne zníženie rezervoárového tlaku vyprázdňovaním produkciou, ktoré vedie k úniku parnej frakcie do neproduktívnych zón, alebo k povrchu s jej následnou kondenzáciou) = Príklad 4.18 – 4.19
- seizmicita územia = Príklad 4.20
- strata povrchových prejavov geotermálnej aktivity územia (zánik gejzírov, fumarolov, termálnych a termo-minerálnych prameňov)
- zmena rozloženia pôdných plynov a pôdneho ekosystému; a iné

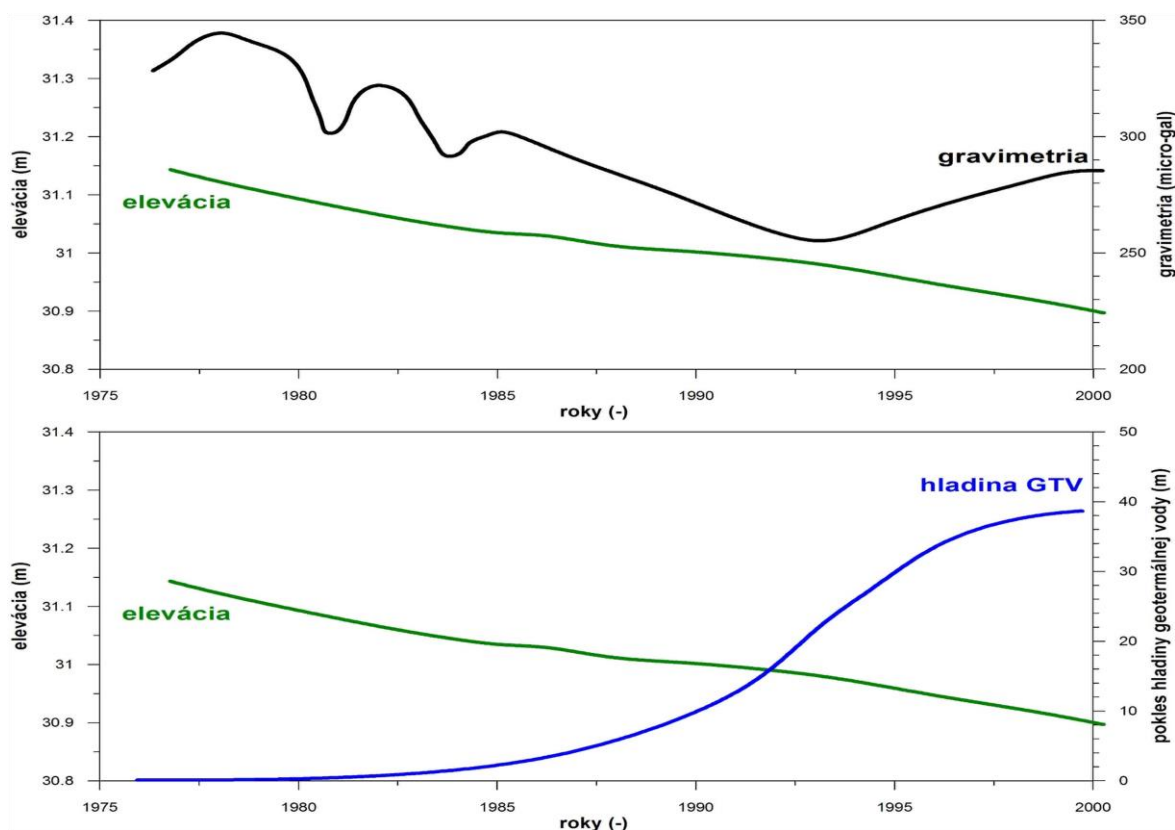
Nie je možné pomenovať všetky formy rezervoárovej odozvy, ktoré zároveň súvisia s komplexnosťou geotermálnych systémov. Podstatné je, že všetky prejavy sú monitorovateľné, a predikovateľné aplikáciou správneho rezervoárového manažmentu a monitoringu s jeho následným vyhodnocovaním. V súvislosti s následným manažmentom rezervoárovej odozvy platí (AXELSSON, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011):

- **každý** rezervoár odpovedá na produkciu zdrojov geotermálnej energie
- **miera** odpovede rezervoáru je funkciou **vzťahu** jeho **prirodzených** (geologických, geotermických, hydrogeologických) **parametrov a produkcie**
- zvratnosť rezervoárových procesov je funkciou kombinácie prirodzených parametrov, obnovovacej kapacity a manažmentu produkcie.

Väčšina parametrov zároveň súvisí s posunom „cudzieho“ frontu z periferie produkovanej oblasti až k produkčným vrtom, čo sa v literatúre označuje ako studený front (cold front, thermal breakthrough). V skutočnosti pre aplikáciu vhodného rezervoárového manažmentu a monitoringu platí:

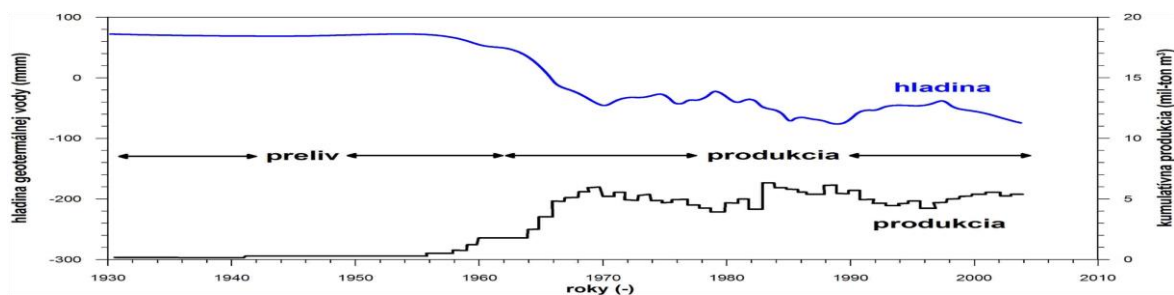
- front vždy prejde medzi reinjektážnou / infiltračnou oblasťou až k produkčnej (= **nie je to otázka či, ale kedy**), a jeho postup sa dá kontrolovať, riadiť
- ako prvý prichádza termodynamický front (zmeny sa prejavujú zmenami v multikomponentovej geotermometrii alebo saturačných stavoch minerálnych fáz)
- druhý prichádza hydraulický / tlakový front (zmeny sa prejavujú produktivitou, alebo množstvom / pomerom parnej fázy)
- posledný prichádza studený front (zmeny sa prejavujú zmenou teploty).

PRÍKLAD 4.10: Zmena terénu monitorovaná gravimetrickými (ťažovými) meraniami na geotermálnom poli Svartsengi, Island. Upravené podľa: Axelsson (2009).



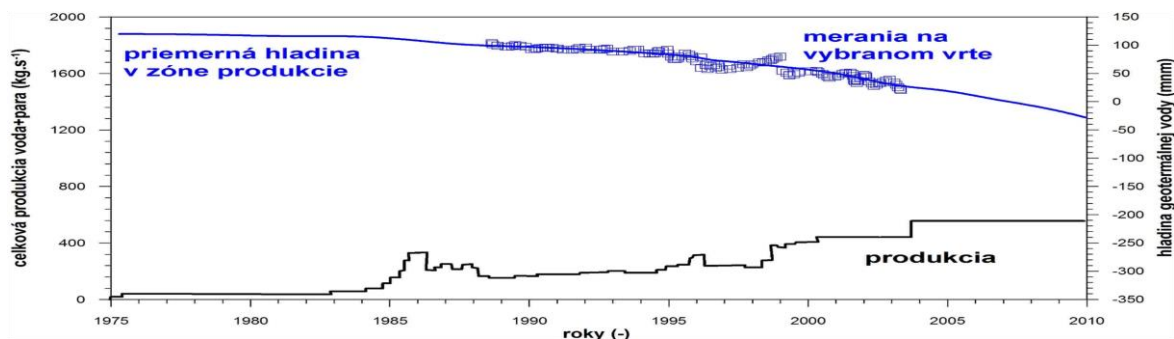
Jedným z nie častých prejavov odpovede rezervoárového prostredia, alebo celého geotermálneho systému na dlhodobú produkciu, sú terénne zmeny. Geotermálne pole Svartsengi zásobuje lokálnu elektrárňu, ktorá pracuje ako s expanznými, tak aj binárnymi jednotkami, a je, mimochodom, dokonalým príkladom využívania geotermálnej energie, kde odpadovú vodu z elektrárne po separovaní parnej fázy využíva na lokálnom, a svetoznáom, kúpalisku (Blá Lónid = Blue Lagoon = Modrá Lagúna), a vďaka chemickým reakciám medzi prírodným lávovým podložím vodnej plochy a separovanou geotermálnou vodou aj produkty = bahná, pre kozmetické a terapeutické účely. Hydrogeologický a gravimetrický monitoring oblasti poukázal od otvorenia produkcie rezervoárov niekoľko režimov, spôsobov rezervoárovej odozvy. Gravimetrické merania do roku 1994 zaznamenávajú súvislý pokles tiažových anomálií, pričom dramatický pokles hladiny vodnej zložky dvojitej fázy v monitorovacom vrte nastupuje až od 1980, ale nadmorská výška terénu kontinuálne klesá. To bolo interpretované ako účinok tlakovej zmeny v rezervoári dôsledkom produkcie, kedy došlo k jeho čiastočnému odparovaniu. Od roku 1994 síce tiažová anomália opätovne stúpa, ale rovnako pokračuje aj sústavný trend poklesu hladiny vodnej frakcie a poklesu terénu. Táto zmena súvisí opätovne so zmenami procesov prebiehajúcich v rezervoári. Je zrejmé, že odparovanie, predtým prejavované poklesom tiažovej anomálie sa zastavilo, avšak hladina vodnej frakcie pokračuje v poklese. Viacerí autori (vrátane zdrojovej literatúry) tento trend následne vysvetlili ako zastavenie odparovania rezervoáru po poklese tlaku tým, ako rezervoár nadobudol nové, kvázi-rovnovážne teplotno-tlakové pomery, a čiastočné ochladenie rezervoáru prienikom studeného frontu z okolia, ktorý spôsobil čiastočnú kondenzáciu parnej frakcie, bez výrazných zmien v hladine vodnej frakcie. To znamená, že obdobie po roku 1994 znamenalo vplyv reinjektáže dostatočný na zastavenie neočakávaného odparovania, ale nedostatočný na nárast saturácie rezervoáru, ktorý by zastavil subsidenciu terénu.

PRÍKLAD 4.11: Prejavy vyprázdňovania rezervoáru zmenou hladiny geotermálnej vody vo vrtoch geotermálneho poľa Laugarnes pred a po zavedení čerpadiel. Upravené podľa: Axelsson (2009).



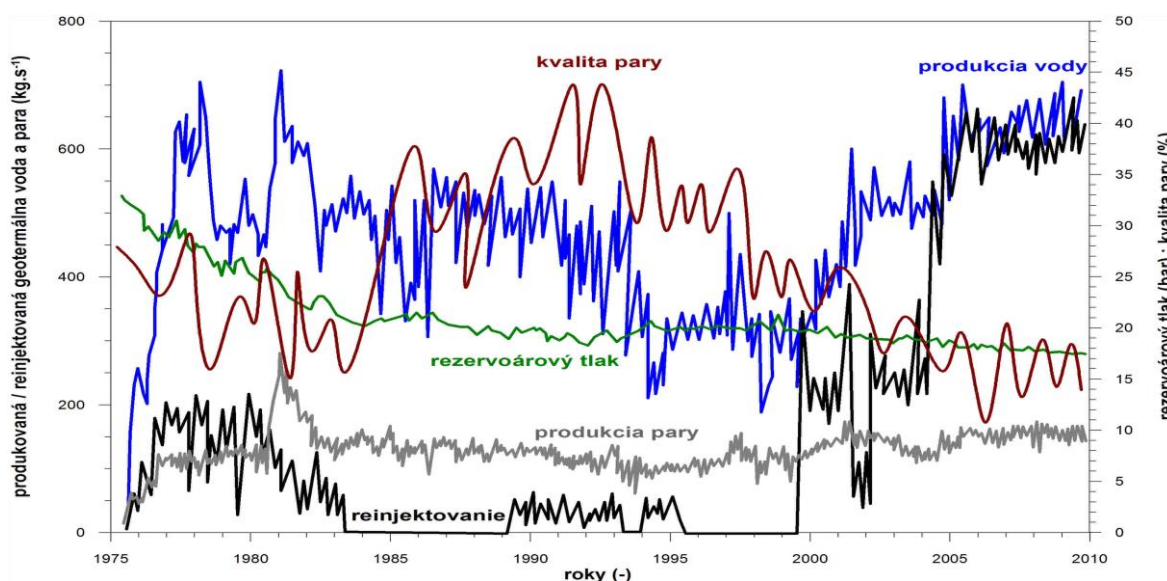
Hydraulické / tlakové prejavy sú základnými ukazovateľmi vývoja odozvy rezervoáru na jeho krátkodobú alebo dlhodobú produkciu, alebo jej rôzne spôsoby manažmentu. Nízкотеплотné pole Laugarnes s teplotami do 150 °C slúži na vykurovacie účely pre mesto Reykjavik. Závislosť produkovaných množstiev geotermálnej vody (a vlhkej pary) je evidentná predovšetkým po zmene režimu produkcie, ktorý prešiel od voľného prelivu (využíva prirodzený rozdiel medzi tlakom rezervoáru a atmosférickým tlakom) k aktívnemu využívaniu čerpadiel s tým, ako rástli energetické nároky a rezervoár súvisiace s rozvojom mesta Reykjavik. Takmer okamžite došlo v rezervoári k poklesu tlaku, ktorý súvisel s poklesom hladiny geotermálnej vody v produkčných vrtoch. Viacmenej konštantná produkcia geotermálnych vôd v monitorovacom období následne znamenala udržanie výšky vodného stĺpca, čo znamená, že reinjektáž, a prirodzené prítoky stabilizovali tlakové podmienky v rezervoári.

PRÍKLAD 4.12: Prejav vyprázdňovania rezervoáru v závislosti na produkcii rezervoárového média, a scenáre budúceho vývoja pre geotermálne pole Nesjavellir, Island. Upravené podľa: Axelsson (2009).



Vývoj hladiny geotermálnej vody (vodnej zložky) v jednom z produkčných vrtoch geotermálnej elektrárne Nesjavellir (viac Príklad 4.16), ktorého produkcia bola realizovaná v typických cykloch krokového zvyšovania produkovaných množstiev, ako súčasť komplexného manažmentu produkcie geotermálneho poľa pre celú elektráreň. Elektráreň má od spustenia produkcie zároveň aktívny reinjektážny manažment. Z priebehu záznamov produkovaných množstiev a vývoja hladiny vodnej frakcie na danom vrte vyplýva priama odozva rezervoáru na produkované množstvá poklesom tlaku = znížením hladiny vodnej frakcie, ktorá je funkciou postupne navýšovanej produkcie z daného vrto, aj s príkladom oscilácie v rámci jednotlivých meraní. Hladina vodnej frakcie kontinuálne klesá aj napriek obdobiam relatívnej stabilizácie (1988-1994 alebo 2004-2010). Z rezervoárového hľadiska to znamená vyprázdňovanie rezervoáru a stratu tlaku, ako dôsledok toho, že produkčná zóna ani tlakovo nekomunikuje s reinjektážnymi vrtmi. Z praktického hľadiska v takej situácii nastáva pokles množstiev vodnej zložky v rámci produkovanej dvojitej fázy. Strata tlaku v dvojfázovom rezervoári zároveň vedie k nárastu odparovania (zvýšenie objemu parnej zložky) a zvyšovaniu jej termodynamickej kvality, ktoré môže, ale nemusí byť kontraproduktívne, v závislosti na technologických zariadeniach elektrárne.

PRÍKLAD 4.13: Prejavy poklesu rezervoárového tlaku, a vývoja parnej frakcie v závislosti na produkčnej stratégii a reinjektáži na geotermálnom poli Ahuachapan, El Salvador. Upravené podľa: Axelsson (2009); Monterossa – Montalvo Lopéz (2010)

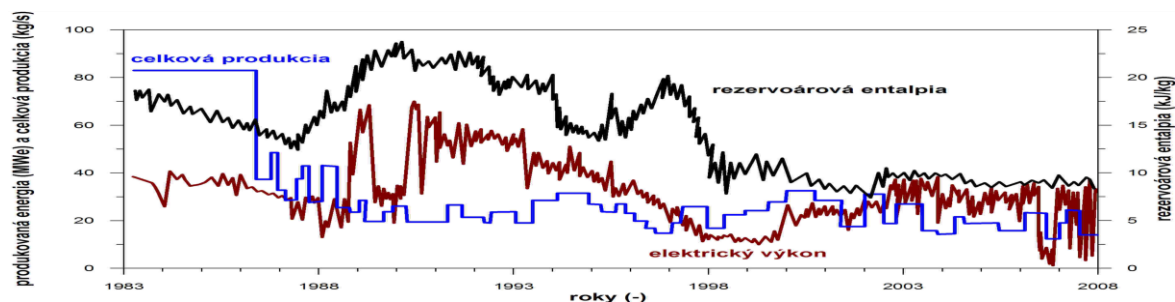


PRÍKLAD: geotermálne pole Ahuachapán v El Salvadore, v rámci vulkanickej zóny Chipilapa, predstavuje vulkanický rezervoárový systém dotovaný aj zrážkovými vodami z povrchu, ktorý ako 2-fázový systém s prevahou vodnej zložky zásobuje geotermálnu elektrárňu pracujúcu s 1- a 2-stupňovými expanznými jednotkami. Rezervoár je lokalizovaný v štruktúrne a tektonicky rozpukaných andezitoch. Produkčný systém zahŕňa 20 produkčných, 8 reinjektážnych a približne 20 monitorovacích a záložných vrtov. Inštalovaný výkon troch aktívnych blokov dosahuje 95 MWe.

INTERPRETÁCIA: Iniciálne otváranie produkcie geotermálnej energie aj napriek postupnému nárastu reinjektáže viedla v rezervoári k strate rezervoárového tlaku, a zároveň k poklesu kvality pary (1975–1983). Vysvetlením bol prienik studeného frontu z reinjektážnych zón = ochladzovanie, a zároveň nedostatočnosť reinjektáže z pohľadu dotovania vodnej zložky. Aj napriek následnému zastaveniu reinjektáže sa rezervoárový tlak stabilizoval, pričom produkované množstvá geotermálnych vôd ostali dlhodobo oscilujúce až do roku 1995, s ich následným poklesom, pričom sa dramaticky zvýšila kvalita pary, čo znamenalo opätovné odparovanie a redukcia účinkov predošlého ochladenia. Od roku 1995 ale rezervoár opätovne zaznamenával pokles kvality (čistoty, vlhkosti, termodynamickej energie) parnej fázy, čo predstavoval výsledok dotekania studeného frontu po krátkom, 5-ročnom reinjektážnom cykle z obdobia 1990–1995, ktorý pomohol zastabilizovať rezervoárový tlak. Následne boli reinjektážne vrty premiestnené = odvítané nové, a pôvodné vtláčacie vrty začali byť využívané ako pozorovacie objekty. Potreba ďalších blokov elektrárne viedla k spusteniu masívnej produkcie z nových produkčných vrtov, podporenej reinjektážou na novom poli. Množstvo geotermálnej pary je prakticky nemenné, čo je ale spôsobené väčšími produkovanými objemami dvojitej fázy z rezervoáru – toho jasným prejavom je dramatický nárast produkovanej vodnej frakcie. Zároveň dramaticky od roku 2004 narastali aj reinjektované množstvá, ktoré nemali vplyv na množstvo pary, ale významne ovplyvňovali jej kvalitu, so stále klesajúcim trendom. To je možné opätovne vysvetliť skôr návratom rezervoáru k iniciálnym podmienkam, v ktorých prevláda vodná zložka nad parnou frakciou pri jej takmer pôvodnej, prirodzenej vlhkosti, a teda kvalite.

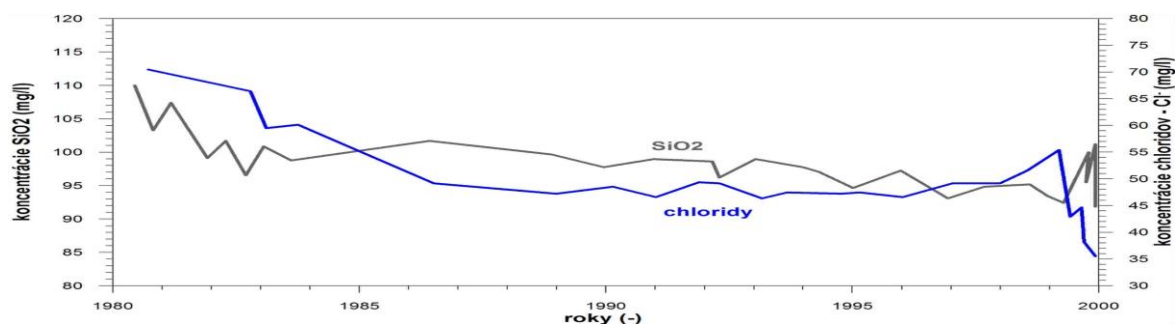
ZÁVER: Pôvodná produkcia rezervoárového prostredia bola z pohľadu dlhodobej produkcie neudržateľná, a zaznamenala prejavy kondenzácie a ochladzovania, a zároveň stratu vodnej zložky dvojitej fázy. Zmena pozície reinjektážnych vrtov následne umožnila návrat rezervoáru ku kvázi-iniciálnym podmienkam a udržanie produkovaných množstiev pary, hoci pri väčšej celkovej produkcii média, pričom reinjektáž teraz umožňuje dlhodobú rezervoárovú produkciu.

PRÍKLAD 4.14: Rezervoárová odozva dlhodobej produkcie geotermálneho poľa Momotombo, Nikaragua, podľa poklesu produkcie elektrickej energie a pary. Upravené podľa: Porras (2008)



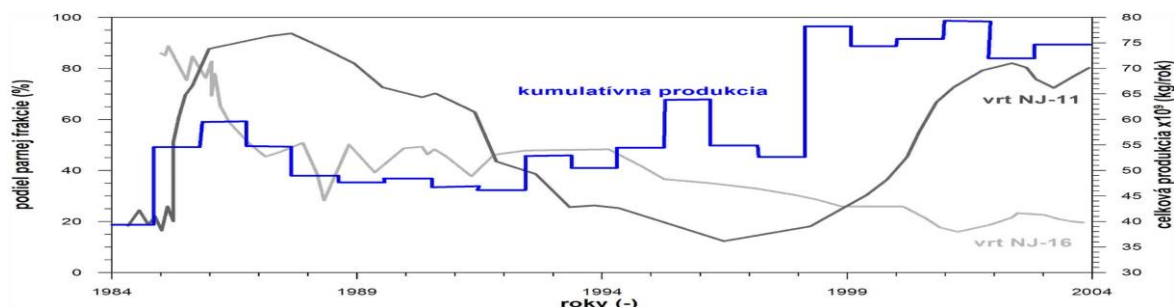
Geotermálne pole Momotombo v Nikarague predstavuje 2-fázový systém s prevahou vodnej frakcie v rezervoári, produkovaný pre miestnu expanznú elektrárňu s inštalovaným výkonom 77 MW. Kontinuálny záznam monitoringu produkcie a rezervoárovej entalpie (poukazujúcej na množstvo a energetickú kvalitu rezervoárového média, respektíve parnej fázy) poukazuje viacero štádií odozvy rezervoáru na jeho produkciu a reinjektáž v monitorovanom období. Po iniciálnom otvorení produkcie v období 1987–1987 dochádzalo k rapidnému poklesu entalpie, čo súviselo s prítokom plytkých, a chladnejších periférnych vôd do systému formovaním tlakového gradientu v okolí produkčnej zóny. Následne bola produkcia znížená. Obdobie 1987–1995 viedlo k obnoveniu pôvodných podmienok, pravdepodobne znížením prítoku z periferie (ohrievanie) a poklesu tlaku v rezervoári. Napriek tomu, že produkcia bola stabilne udržiavaná aj po roku 1995 na úrovni 60 % v porovnaní s otvorením, rezervoárová entalpia opätovne poklesla. Prevládal všeobecný konsenzus o vplyve prieniku studeného frontu z reinjektážnej zóny k produkčnej oblasti geotermálnych vrtov, ktorý sa prejavil ochladením rezervoárového prostredia a čiastočnou kondenzáciou parnej frakcie na vodnú zložku.

PRÍKLAD 4.15: Ochladzovanie pozorované na základe chemického monitoringu geotermálneho poľa Laugaland, Island. Upravené podľa: Kristmansdottir (2009); Axelsson et al. (2001b)



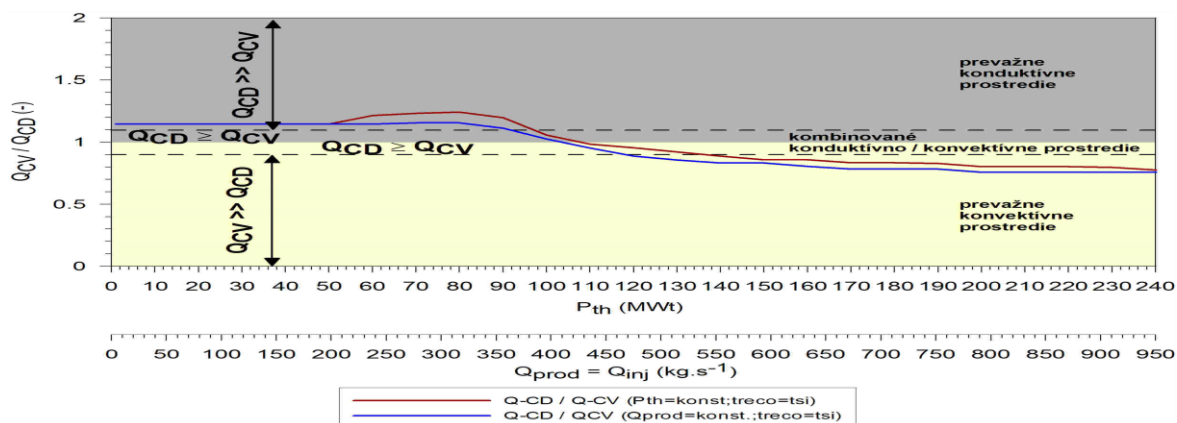
Geotermálne pole Laugaland je jedným z mnohých takzvaných nízko-teplotných systémov Islandu, lokalizovaný južne od mesta Akureyri, využívaný ako zdroj pre centralizované zásobovanie mesta a prilahlých komunít teplom. Kritickými parametrami hydrochemického monitorovania indikujúcimi zmiešavanie, respektíve ochladzovanie pôvodného rezervoárového média sú chloridy, ktorých množstvo býva vo vode stabilné (sú takzvané konzervanty a nevstupujú do chemických reakcií pri pomerne nízkych teplotách), a silikáty, v tomto prípade odrážajúce litologickú povahu rezervoárového prostredia – silikátové hyaloklasty a lávové breccie. V monitorovacom období boli na koncentráciách oboch parametrov zaznamenané kontinuálne poklesy. Výnimkou je obdobie 1999–2000 kedy bolo v oblasti silnejšie zemetrasenie. Z interpretácií trendov vyplýva, že ich pokles súvisí s ochladzovaním rezervoáru jeho prirodzeným dopĺňaním o zrážkovú vodu (obe nízke na Cl a SiO₂) a zároveň z reinjektáže po vychladení vo výmenníkových staniciach, ktorá stráca najmä silikáty v dôsledku ich riadenej precipitácie.

PRÍKLAD 4.16: Zmeny na niektorých vrtoch geotermálneho poľa Nesjavellir, Island. Upravené podľa: Kristmansdottir (2009)



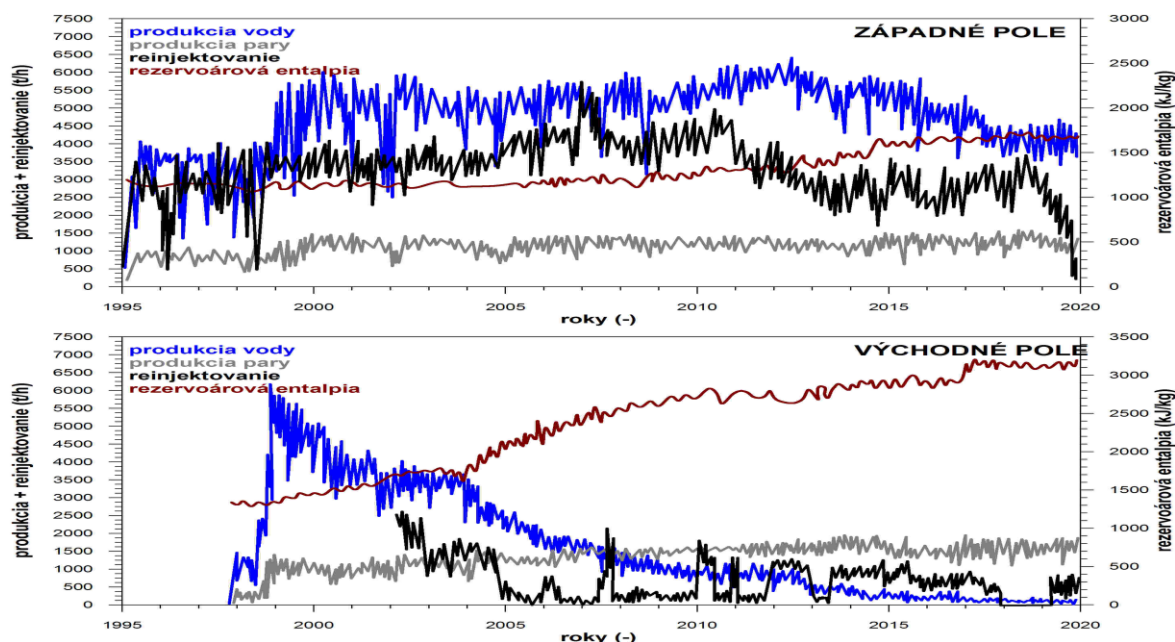
Geotermálne pole Nesjavellir produkuje rovnomenná kogeneračná elektrárňa. Je typickým príkladom dvojfázového geotermálneho poľa, v pôvodnom stave s prevahou parnej fázy. Vrt NJ-11 je situovaný severne od elektrárne a reinjektážneho poľa. Vrt NJ-16 východne. Produkcia geotermálnej energie sa odráža na podiele produkovanej parnej fázy v oboch častiach rôzne. Vo vzťahu k reinjektáži vo vrte NJ-11 dochádza po otvorení produkcie k dramatickému nárastu podielu parnej fázy, čo súvisí s poklesom tlaku a vyprázdňovaním rezervoáru, ktoré vystriedalo obdobie stabilizácie (1991-1998) obnovením tlakových pomerov reinjektážou. Zvýšenie produkcie rezervoáru po 1998 viedlo opätovne k vyprázdňovaniu rezervoáru = poklesu tlaku = nárastu kvality pary. Vo vrte NJ-16 je od otvorenia monitoringu viditeľný trendový pokles parnej frakcie. Ide o dôsledok prenikania tlakového frontu a zvyšovania tlaku v tejto časti rezervoárového poľa, hoci priamo pokles termodynamickej kvality parnej fázy (entalpie, exergie) pozorovaný nebol, preto nedošlo (1984-2004) a nedochádza k rezervoárovému ochladzovaniu a produkcia, aj napriek poklesu parnej frakcie vo vrte, nie je ohrozená a stabilne udržiavaná.

PRÍKLAD 4.17: Model vývoja tepelného charakteru rezervoárového prostredia na lokalite Ďurkov v súvislosti s rôznymi scenármi konštantnej produkcie. Upravené podľa: Fričovský et al., (2020b)



Dynamika rezervoárového systému je založená na funkcii hydrogeologického režimu, teplotných a tlakových pomerov. Ďurkovská depresia je príkladom prostredia s prevládajúcou kondukciou (teplota je funkcia hĺbky) nad konvekciou. Modelové riešenie pre scenáre produkcie v pôvodnej schéme vrtov GTD-1 až GTD-3 na konci obnovovania rezervoárového prostredia preukazuje, že pôvodné podmienky ($Q_{CD} > Q_{CV}$) je možné nadobudnúť po obnovení produkcie z maximálneho tepelného výkonu 96 MWt. Znamená to, že model predpokladá opätovné prevládanie kondukcie s obmedzenými a izolovanými konvekčnými bunkami. Extrémne vysoké modelované produkcie však podľa modelu môžu viesť ku prevažne-konvektívnemu prostrediu, t.j. dramatickým zmenám chemického zloženia geotermálnej vody/dvojitej fázy, fázovým pomerom voda/vlhká para, a zmenám v prítokových možnostiach zdroja geotermálnej energie k vrtom.

PRÍKLAD 4.18: Prejavy zmeny fázových rozhraní rezervoárového média vplyvom produkcie na geotermálnom poli Salak, Indonézia. Upravené podľa: Wijaya et al. (2021)

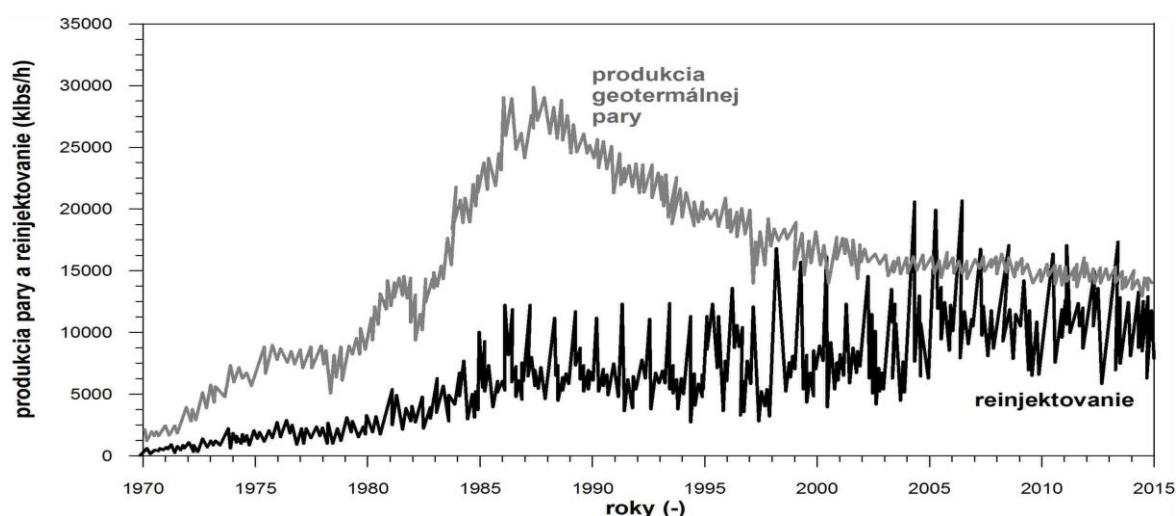


PRÍKLAD: Geotermálna zóna Salak v Indonézii je zložitým systémom pôvodne dvojfázových rezervoárov s prevahou vodnej zložky v západnom aj východnom geotermálnom poli viazaných na vulkanické systémy „ohnivého kruhu“, s reinjektážnym systémom na južnej a západnej strane celého systému. Geotermálna energia sa využíva na niekoľko blokov miestnej elektrárne pracujúcej s expanznými cyklami, t.j. vybudovanou sieťou povrchového separovania povrchovej parnej a vodnej zložky a následnou tlakovou expanziou pary v kondenzačných turbínových komorách. Reinjektáž je založená na kombinácii opätovného vtláčania separovanej vodnej zložky, ako aj kondenzátu z chladiaceho systému elektrárne. Produkcia geotermálnej elektrárne bola najprv otvorená v západnej, neskôr vo východnej časti geotermálneho poľa.

INTERPRETÁCIA: Z realizovaného monitoringu je evidentný rozdiel medzi východnou a západnou časťou celého geotermálneho systému. Monitoring chloridov v západnom poli (kritický marker separovanej geotermálnej vody reinjektovanej späť), ktorý priložené grafy neukazujú, zaznamenal v posledných 10 rokoch významný nárast, čo poukazuje na príchod chemického frontu z reinjektážnych zón k produkčnej oblasti. Prejavy chemického frontu znamenali zníženie reinjektážnych množstiev, čo sa odrazilo na znížení produkcie geotermálnej vody, ale parná frakcia ostala zachovaná. Špecifická rezervoárová entalpia, t.j. termodynamická energia zdroja narastá, korelovateľná s poklesom produkcie geotermálnej vody, ako funkcia parnej frakcie. Reinjektáž teda negatívne neovplyvňuje západnú rezervoárovú zónu – nateraz. Východnú oblasť ovplyvňuje reinjektáž z juhu, otvorená výrazne neskôr. Napriek etapovitému manažmentu reinjektovania je zrejmé, že pôvodný pokles produkovaného množstva vodnej zložky od otvorenia rezervoáru kontinuálne klesá, od roku 2008 vo východnej zóne prevládajú prietokové objemy pary nad vodnou frakciou. Prudký nárast rezervoárovej entalpie zároveň znamená, že pôvodne dvojfázový rezervoár s prevahou vodnej zložky vplyvom produkcie postupne prechádza do dvojfázového rezervoáru s prevahou parnej zložky. Keďže monitoring chloridov (nezobrazený, ale v zdrojovej literatúre viditeľný) preukázal aj v tomto prípade ich nárast, rezervoároví inžinieri predpokladajú, že fázová zmena v rezervoári je dôsledkom nedostatočnej komunikácie medzi produkčnou a reinjektážnou časťou východného poľa, a parná frakcia vzniká postupným poklesom rezervoárového tlaku. Napriek tomu nie je produkcia geotermálneho poľa ohrozená.

ZÁVER: Údaje z monitoringu jasne poukazujú na možnosť udržiavania rezervoárových podmienok aj v prípade rozsiahlej reinjektáže (západ), a dynamiku rezervoárových zmien vplyvom produkcie (východ), ktorá nemusí byť nevyhnutne negatívna.

PRÍKLAD 4.19: Vplyv depletačnej produkcie na rezervoárový systém suchej geotermálnej pary geotermálneho poľa The Geysers, California. Upravené podľa: Enedy (2016), Sanyal – Enedy (2011)

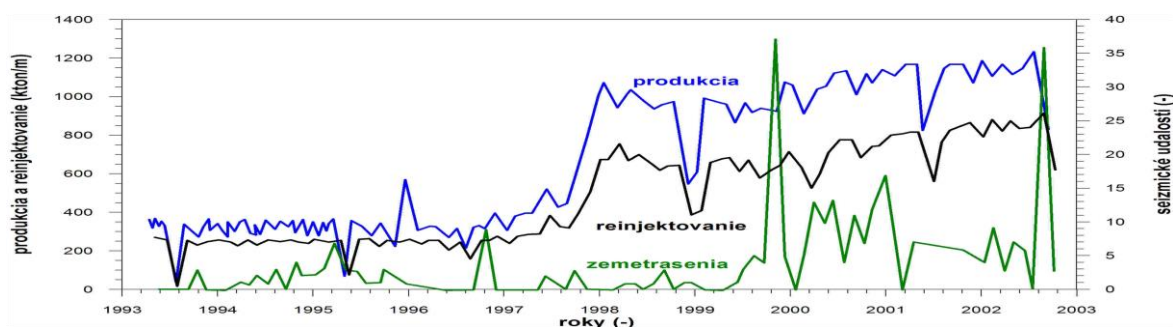


PRÍKLAD: Geotermálne pole The Geysers patrí medzi 11 lokalít s prítomnosťou suchej geotermálnej pary na svete. Reálne spustenie prevádzky v roku 1960 začalo s inštalovaným výkonom 11 MWe. V roku 1980 dosiahol inštalovaný výkon všetkých elektrární na poli už 500 MWe, na prelome 1989/1990 dosiahol maximum, 2000 MWe (reálny priemerný ročný výkon elektrární v tomto období dosiahol 1 200 MWe), ako výsledok 22 elektrární pracujúcich vo všetkých 32 blokoch s priamymi, suchopárnymi turbínami.

INTERPRETÁCIA: Postupná inštalácia jednotlivých elektrární a ich produkčných blokov postupne viedla k viac ako 6-násobnej produkcii suchej geotermálnej pary. Reinjektáž na suchopárnych geotermálnych poliach má svoje zákonitosti vzhľadom na kritické teplotno-tlakové podmienky ich formovania a udržiavania. Zároveň možnosti reinjektáže boli pôvodne obmedzené len na kondenzát z chladiacich veží, čo v prvých dekádach viedlo k jej nedostatočným množstvám, ktoré bolo nevyhnutne postupne, s rozvojom technológií, dotovať využívaním plytkých podzemných vôd alebo odpadových vôd z lokálneho komunálu. Napriek postupnému zvyšovaniu reinjektáže, reálna produkcia suchej geotermálnej pary píkovovala v období 1985–1990, kým inštalovaný výkon elektrární (a teda aj požadované množstvá produkovanej pary v nových produkčných vrtoch naďalej rástli). Po tomto období napriek pokračujúcemu rastu reinjektážnych objemov (limitovaných podmienkami suchopárneho rezervoáru) produkcia geotermálnej pary kontinuálne začala poklesávať, hoci so spomaľujúcim sa trendom. Medziročný pokles produktivity postupne klesol z 25 % (1985–1990) na súčasných 5 %, čo však zároveň súvisí s nevyhnutným obmedzením produkcie geotermálnej energie (aktuálny priemerný ročný výkon dosahuje takmer 900 MWe), a odpojením 5 elektrární s ich 7 blokmi.

ZÁVER: Základom formovania suchopárnych rezervoárov je kombinácia extrémne vysokej teploty a pomerne nízkych tlakov, s minimálnym prirodzeným prítokom vodnej frakcie do rezervoáru, aby bola zabezpečená jeho tlaková stabilita, a nedochádzalo ku kondenzácii parnej frakcie na vodu. Z toho vyplývajú obmedzené možnosti reinjektáže. Extrémne zvyšovanie produkcie geotermálnej pary a podhodnotená reinjektáž mali za následok (pri zachovaní teplotných podmienok) ďalší pokles tlaku v rezervoári. To viedlo k procesu takzvaného prehrievania (superheating) a vysušania geotermálnej pary, ktoré zdanlivo znamenalo krátkodobý nárast produktivity pary, ale len vplyvom dodatočného odparovania, nad rámec jej prirodzenej tvorby, a zároveň úniku parnej frakcie do iných, neprodukovaných polôh, čoho dôsledkom bol od cca 1990 jej sústavný pokles. Až kombinácia zvýšeného reinjektovania a obmedzenia produkcie evidentne vedie k zastaveniu neudržateľného odparovania v rezervoári, a pravdepodobne približuje rezervoár k stabilným, hoci nie iníciaľným podmienkam. Ide o najextrémnejší príklad depletačnej produkcie, ktorý je v odbornej literatúre dokumentovaný.

PRÍKLAD 4.20: Seizmicita územia ako následok produkcie zdrojov geotermálnej energie a reinjektáže do rezervoárového prostredia. El Berlín, El Salvador. Upravené podľa: Rivas et al. (2005)



PRÍKLAD: Ako mnoho geotermálnych oblastí viazaných na vulkanické systémy, aj geotermálne pole (El) Berlín v El Salvádore sa nachádza v rámci aktívnych seizmických zón – vulkanický komplex Tacapa. V roku 1993 bola spustená rozsiahla monitorovacia kampaň zameraná na sledovanie vývoja seizmickej aktivity územia v súvislosti s plánovaným nárastom produkcie elektrickej energie mestnej elektrárne, a spustením reinjektážneho manažmentu.

INTERPRETÁCIA: Postupná výstavba blokov geotermálnej elektrárne Berlín sa odrazila na krokovej zvyšovaní produkcie. V prvom kroku (1993 – 1998) systém nezaznamenal žiadne seizmické anomálie mimo „bežných“ otrasov. Dramatické zvýšenie produkcie dvojitej fázy, a s tým aj reinjektáže na úrovni 3-násobku viditeľne zvýšilo početnosť výskytu seizmických udalostí s magnitúdom do 3,5, aj keď tento trend je v danom období pomerne nevýrazný, a početnosť z roku 1999 odráža výrazné zemetrasenie s magnitúdom nad 5, po ktorom nasledovali prirodzené dotrasy.

ZÁVER: Realizovaný monitoring v danom období odhalil možnú súvislosť zvýšenej produkcie zdrojov GTE a početnosti seizmických udalostí, avšak ani produkcia, ani reinjektáž, neboli ich jediným dôvodom.

5 ZDROJE GEOTERMÁLNEJ ENERGIE NA SLOVENSKU

Výskyt a formovanie zdrojov geotermálnej energie na Slovensku ovplyvňuje kombinácia:

- geologických faktorov (litológia hornín, priestorové vzťahy horninových a litologických celkov) a tektoniky (lokálne a regionálne zlomové systémy, morfológické členenie)
- geotektonického vývoja krajiny (formovanie kotlín, sedimentárnych bazénov – panví, regionálne vertikálne pohyby, paleokrasové periódy) v predchádzajúcich geologických obdobiach a geodynamiky regiónu Západných Karpát (vzťah ku aktívnym litologickým rozhraniam, hrúbka zemskej kôry, vzťah ku aktívnemu vulkanizmu)
- hydrogeologických pomerov (systémy lokálneho a regionálneho prúdenia podzemných vôd, otvorenosť horninového prostredia a priaznivé podmienky pre filtráciu) a hydrogeologického vývoja
- geotermických pomerov (koncové členy transportu tepla, obsah rádioaktívnych prvkov horninových formáciách, termofyzikálne parametre horninových komplexov).

5.1 Stručný prehľad geologickej stavby Západných Karpát

Pre prehľad o prítomnosti a podmienkach výskytu a formovania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku je nevyhnutné aspoň orientačne, získať znalosti o geologickej stavbe, a najmä vertikálnych vzťahoch jednotlivých tektonických celkov Západných Karpát.

Územie Slovenska je budované alpínskym pásmovým pohorím Západných Karpát, ktoré v súčasnosti vykazuje významnú zonálnu stavbu (Obr. 5.1), v dôsledku viacerých etáp genézy. Práve podľa etáp tektonogenézy sú Západné Karpaty rozdelené do troch zón (PLAŠIENKA, 1999; BEZÁK ET AL., 2004A,B; PLAŠIENKA ET AL., 2006; ZLOCHA ET AL., 2020):

- vonkajšie Západné Karpaty (externidy)
- vnútorné Západné Karpaty (internidy)
- Bradlové pásmo tvoriace prechodnú zónu.

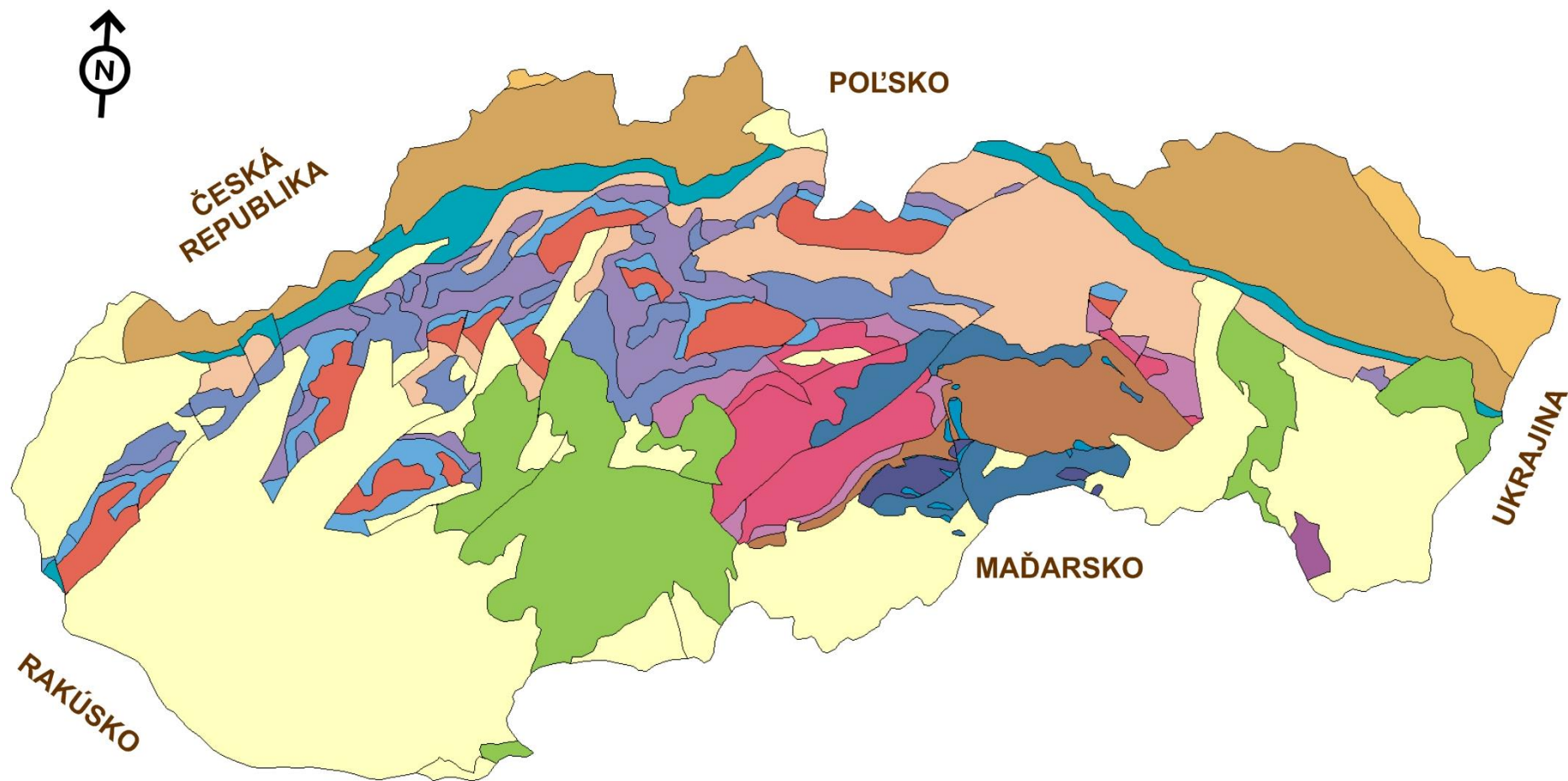
5.1.1 Externidy a bradlové pásmo

Externidy sú tvorené **flyšovým pásmom**. Na území Slovenska vystupujú dve základné skupiny, tzv. sliezka jednotka (Západné Beskydy) / duklianska jednotka (Nízke Beskydy) a magurskou jednotkou. Ich charakteristikou je vrásovo-šupinatá stavba. Z geologického hľadiska ide o flyšové, respektíve flyšoidné súvrstvia, t.j. striedanie pieskovcových a ílovitých súvrství. Vplyvom geologického vývoja bola magurská jednotka, ktorú predstavujú račiansky, bystrický, krynický a bielokarpatský príkrov, tektonicky presunutá na sliezskú / dukliansku jednotku (Obr. 5.2). Z pohľadu výskytu podzemných, respektíve geotermálnych vôd ide o deficitné, až neperspektívne územie, nakoľko kombinovaná geologická stavba výrazne obmedzuje lokálne, aj regionálne prúdenia podzemných vôd.

Bradlové pásmo charakterizujú typické morfológické útvary – bradlá pieninského typu. Na ich stavbe sa podieľajú jursko-spodokriedové vápence s polohami kriedových až paleogénnych slieňovcov a flyšoidných sekvencií v nadloží. Geológia bradlového pásma je stále predmetom geologických, geotektonických a geodynamických diskusií. Jeho najvyužívanejšie členenie, často uvádzané v literatúre, vychádza z charakteru depozičného prostredia, v ktorom jeho litologické komplexy vznikali, t.j. na takzvané plytkomorské a hlbokomorské sekvencie (čorštýnska a kysucká sekvencia a rad prechodných sekvencií (manínska a klapská sekvencia). Aj v tomto prípade je možné hovoriť o nateraz obmedzenom potenciáli výskytu zdrojov geotermálnej energie (geotermálnych vôd). Litologická stavba, v ktorej dominujú organické vápence až slieňovce (silne ílovité vápence) v priestorovom vzťahu k flyšu, sa prejavuje najmä polo-izolátormi až izolátormi. Aj preto výrazné postihnutie zlomovými systémami, ktoré v prípade vnútrohorských kotlín (viď nižšie) podporujú lokálne a regionálne prúdenia geotermálnych vôd, v tomto prípade takúto funkciu pri súčasnom stave poznatkov neplní.

5.1.2 Internidy

Geologická stavba interníd, t.j. Vnútrotných Západných Karpát, je odrazom takzvaného pred-alpínskeho vývoja (paleozoikum) a alpínskej tektoniky, ktorej výsledkom je zložitá príkrovová stavba paleozoických a mezozoických komplexov, a na nich ležiacich kenozoických sedimentárnych a vulkanických formácií. Pre zjednodušenie bude postup založený na jednotlivých tektonických jednotkách:



Obrázok 5.1 Časť A: Zjednodušená tektonická mapa Slovenska. Upravené podľa: Bezák et al., 2004

	vonkajšie flyšové pásmo krosniansky flyš Flysh belt Krosno zone
	vonkajšie flyšové pásmo magurský flyš Flysh belt Magura zone
	bradlové pásmo Klippen belt
	kryštalinikum tatrika Tatricum basement
	sedimetárny obal tatrika Tatricum cover unit
	fatrikum Fatricum
	hronikum Hronicum
	kryštalinikum veporika Veporicum basement
	sedimentárny obal zemplinika Zemplinicum cover unit
	sedimentárny obal veporika Veporicum cover unit
	gemerikum Gemicum
	meliatikum Meliaticum
	turnaikum Turnaicum
	silicikum Silicicum
	vnútrokarpatský paleogén Inner Carpathian Paleogene
	neogénne sedimentárne panvy Neogene basins
	neogénne vulkanity Neogene volcanicas

Obrázok 5.1 Časť B: Vysvetlivky ku zjednodušenej tektonickej mape Slovenska. Upravené podľa: Bezák et al., 2004



Obrázok 5.2 Pozícia flyšového pásma na území Slovenska vo vzťahu k bradlovému pásmu. Zdroj: Zlocha et al., 2020

5.1.2.1 Kôrové komplexy a ich obalové jednotky

Tatrikum / kryštalínikum tatrika (vek: silúr – spodný karbón, t.j. paleozoikum) reprezentuje jeden z kôrových príkrovov ^{5.1}, t.j. jednotku s hrúbkami 10-tok kilometrov, ktoré vytvárajú zemskú kôru, a zároveň takzvané kryštalínikum Západných Karpát. Jeho základnou litologickou náplňou sú komplexy metamorfítov (najmä ruly, svory, amfibolity) a magmatitov (granity, diority, granodiority) v podloží mladších (vek: stredný karbón až spodný trias) sedimentárnych (pieskovce, zlepenice, kremence, bridlice) až vulkanosedimentárnych hornín. Súčasťou tatrika je takzvaná **obalová jednotka tatrika** (vek: spodný trias – spodná krieda, t.j. mezozoikum), ktorá reprezentuje sedimentárny obal (pokryv) kryštalického podložia, pričom vystupuje ako para-autochtónny príkrov ^{5.2}. Jedná sa o typické mezozoické sekvencie, opisované aj nižšie, t.j. prechod od typických karbonátov – vápencov a dolomitov (stredný trias) ku ílovcom až ílovitým vápencom (vrchný trias), respektíve organogénnym až slieňitým vápencom v jure až strednej kriede (Obr. 5.3).

^{5.1} príkrov (v angl. nappe) = súbor hornín, respektíve súvrství, s rozmermi presahujúcimi 1-ty až 10-ty kilometrov, presunutých na vzdialenosť aspoň 5 kilometrov (allochtón) (Michalík et al., 2007; Petránek et al., 2016)

^{5.2} para-autochtónny príkrov príkrovové teleso presunuté na vzdialenosť menšiu ako 5 km, pričom ale na báze je výrazne tektonicky oddelená od svojho podložia – v terminológii Západných Karpát sa týmto termínom označujú sedimentárne, obalové jednotky kôrových príkrovov kryštalínika

Z pohľadu zdrojov geotermálnej energie:

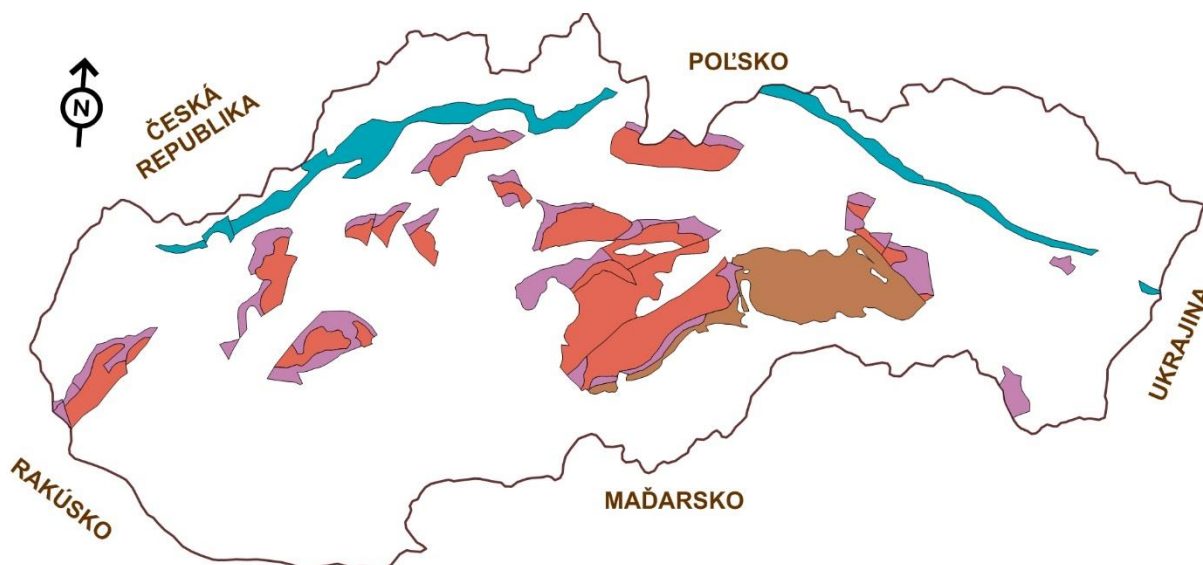
- kryštalinikum tatrika je vzhľadom na litologické zloženie neperspektívne z pohľadu tzv. prirodzených (viď 2.2) zdrojov geotermálnej energie
- v obalovej jednotke tatrika sú charakteristické rezervoárové polohy identifikované v strednotriasových karbonátoch (vápence, dolomity, dolomitické vápence), napríklad v Ilavskej kotline, Trnavskom zálive, Trenčianskej kotline

Veporikum / kryštalinikum veporika (vek: silúr – spodný karbón, t.j. paleozoikum) je prakticky južnejšie položeným analógom tatrika, v ktorom prevažujú metamorfity nad magmatitmi. V ich nadloží opätovne vystupujú sedimenty a vulkanosedimenty (vek: stredný karbón až spodný trias). K jednotke je priradovaná aj **obalová jednotka veporika** (vek: spodný trias – spodná krieda, t.j. mezozoikum) s para-autochtónnou pozíciou, a litologickým zložením podobným nižšie opisovanému fatriku (Obr. 5.3). Z pohľadu zdrojov geotermálnej energie:

- kryštalinikum veporika je pre prirodzené zdroje geotermálnej energie neperspektívne
- v obalovej jednotke veporika sú charakteristické rezervoárové polohy identifikované v strednotriasových karbonátoch (vápence, dolomity, dolomitické vápence), napríklad v Bátovsko-rykinčickej depresii, Zvolenskej kotline, Turovsko-levickej hrasti

Gemerikum / kryštalinikum gemerika (vek: silúr – spodný karbón, t.j. paleozoikum) je priradovaný síce ku kryštaliniku, ale v jeho litologickej stavbe vystupujú predovšetkým nízko- (pararuly, fylity) až vysoko- (ortoruly, svory) metamorfované horniny, flyšoidné komplexy (pieskovce, ílovce) a vulkanosedimentárne formácie. **Obalová jednotka gemerika** (vek: spodný trias – spodná krieda, t.j. mezozoikum) je zachovaná veľmi sporadicky, a vykazuje podobnosť s takzvanou južnou skupinou príkrovov opisovanou nižšie (Obr. 5.3). Z pohľadu zdrojov geotermálnej energie:

- kryštalinikum gemerika je pre prirodzené zdroje geotermálnej energie neperspektívne
- v obalovej jednotke gemerika sú charakteristické rezervoárové polohy identifikované v strednotriasových karbonátoch (vápence, dolomity, dolomitické vápence) v Lúčeneckej kotline



Obrázok 5.3 Pozícia kryštalinických komplexov Západných Karpát a ich obalových para-autochtónnych jednotiek. Upravené podľa: Zlocha et al., 2020

5.1.2.2 Mezozoické príkrovové formácie Západných Karpát

Mezozoické príkrovové formácie môžeme rozdeliť podľa geotektonického vývoja na takzvanú severnú skupinu príkrovov – t.j. príkrovové jednotky **fatrika** a **hronika** (Obr. 5.4) a takzvanú južnú skupinu príkrovov – t.j. jednotky **silicika**, **turnaika**, **meliatika** (Obr. 5.5).

Príkrovové formácie sa vyvíjali v samostatných sedimentárnych bazénoch počas mezozoika (trias – spodná / stredná krieda). Napriek niektorým odlišnostiam je možné zovšeobecniť vertikálnu geologickú stavbu **severnej skupiny príkrovov** na profily:

- spodného triasu: prevažne siliciklastické sedimentárne horniny (bridlice, ílovce, kremence, zlepenec, pieskovce, výnimočne anhydrity a sádrovce)
- stredného triasu: karbonáty (vápence, dolomity a ich vzájomné prechodné formy)
- vrchného triasu: prevažne siliciklastické sedimenty (ílovce, bridlice) a karbonáty (ílovité vápence)
- jury až spodnej kriedy: organické vápence z takzvaného plytkomorského vývoja (krinoidové, piesčité, hľúznaté, organodetritické) a sukcesie takzvaného hlbokomorského vývoja (bridlice, škvrnité vápence, rádiolarity, slienité vápence, slieňovce)
- vrchnej kriedy: organogénne vápence a flyšoidné (pieskovce, ílovce) súvrstvia.



Obrázok 5.4 Pozícia severnej skupiny príkrovových formácií Západných Karpát. Upravené podľa: Zlocha et al., 2020

Z pohľadu potenciálu výskytu a formovania zdrojov geotermálnej energie v severnej skupine príkrovov je možné konštatovať:

- vápence a dolomity fatrika a hronika ^{5.3} stredného triasu sú z regionálneho hydrogeologického hľadiska najvýznamnejšími kolektormi / rezervoármi geotermálnych vôd na území Slovenska
- geotermálne vody viazané na čiastkové príkrovy fatrika boli overené napríklad v Levočskej panve (Z a J časť, respektíve SV časť), Liptovskej kotline, Skorušinskej panve, Žilinskej kotline, Humenskom chrbte, Košickej kotline
- geotermálne vody viazané na čiastkové príkrovy hronika boli už úspešne overené napríklad v Liptovskej kotline, Levočskej panve (Z a J časť), Zvolenskej kotline, Piešťanskom zálive, Turčianskej kotline, Žiarskej kotline
- horniny spodného a vrchného triasu sú vzhľadom na geologickú stavbu považované za hydrogeologické izolátory
- horniny jury a kriedy sú považované za hydrogeologické polo-izolátory, za výrazného príspevku zlomov ako transportné zostupné a vzostupné / výstupné cesty

^{5.3} tektonické jednotky fatrika a hronika sa v literatúre častokrát udávajú synonymicky ako križňanský (fatrikum) a chočský (hronikum) príkrov – v skutočnosti však ide o názvy priestorovo najviac zastúpených príkrovov oboch tektonických jednotiek a ich regionálna geologická stavba je omnoho zložitejšia, vrátane členenia aj príkrovov na samostatne nazývané sukcesie podľa ich plytko- a hlbokomorského vývoja

V južnej skupine príkrovov je možné hovoriť skôr o priestorových fragmentoch, nakoľko vzhľadom na geologický vývoj, kedy medzi vrchnou kriedou a spodným paleogénom došlo k masívnemu výzdvihu pred-kenozoického reliéfu Západných Karpát, a boli položené najvyššie, boli zároveň vystavené rapídному zvetrávaniu a redukciám hrúbky. Zároveň sa jednotlivé jednotky južnej skupiny príkrovov vyvíjali v prostredí riftovej zóny, v rôznej priestorovej pozícii, čo ovplyvňuje ich litologické zloženie. Spodný a stredný trias týchto jednotiek je prakticky totožný so severnou skupinou. Jursko-kriedový profil sa ale častokrát vyznačuje anomáliami, ako sú bázické vulkanity / bazalty (meliatikum) alebo rôznymi stupňami teplotnej metamorfózy (meliatikum, turnaikum). Silicikum, ako najvrchnejšie postavená príkrovová jednotka je redukovaná zvyčajne až na profil strednotriasových karbonátov (Obr. 5.5). Z pohľadu výskytu a formovania zdrojov geotermálnej energie je možné konštatovať pri doterajšom stave preskúmanosti:

- strednotriasové vápence a dolomity v južnej skupine príkrovov sú potenciálnymi rezervoárovými prostrediami geotermálnych vôd
- overené boli rezervoárové prostredia v Moldavskej kotline, Rimavskej kotline, Lúčeneckej kotline a Hornádskej kotline (východný okraj Levočskej panvy, Z a J časti)
- nadložné, jursko-kriedové a podložné, strednotriasové sekvencie sú vzhľadom na metamorfózu považované za neperspektívne, t.j. hydrogeologické (polo)izolátory



Obrázok 5.5 Pozícia južnej skupiny príkrovových formácií Západných Karpát. Upravené podľa: Zlocha et al., 2020

5.1.2.3 Popriekrovové formácie Západných Karpát

Skupinu popriekrovových formácií Západných Karpát je možné rozdeliť na niekoľko jednotiek rozdielnej genézy v období kenozoika (paleogén – recent) respektíve terciéru^{5.4}, pričom ich spoločným znakom je superpozícia na tektonických jednotkách kryštalinika, ich obalov, respektíve mezozoických priekrovových formácií:

- vnútrokarpatský paleogén (Obr. 5.6)
- neogénne vnútrohorské kotliny a panvy (Obr. 5.7)
- neogénne vulkanity (Obr. 5.7)

Vnútrokarpatský paleogén (vek: paleogén) reprezentuje takzvaná *podtatranská skupina* a predstavuje sedimentárny záznam transgresie mora na pred-kenozoický reliéf. Litologická stavba začína takzvaným bazálnym, alebo transgresívnym súvrstvom – borovské súvrstvie (zlepence, brekcie, pieskovce, zriedka karbonáty), ktoré následne prechádza do hutianskeho súvrstvia (ílovce prevládajú nad pieskovicami) a zubereckého súvrstvia (flyšoidné súvrstvie, pomer pieskovcov a ílovcov sa vyrovnáva) až bielopotockého súvrstvia (prevažujú pieskovce). Ekvivalentom podtatranskej skupiny je priestorovo obmedzený *budínsky paleogén* (Obr. 5.6) v južnej časti Slovenska. Z pohľadu výskytu a formovania zdrojov geotermálnej energie:

- rezervoárovými polohami sú hrubozrnné sedimenty bazálneho – borovského súvrstvia (zlepence, brekcie, pieskovce) overené napríklad v Liptovskej kotline, Žilinskej kotline, Bánovskej kotline – zväčša však vystupujú ako sekundárne rezervoáre, t.j. akumulujú alebo „prepúšťajú“ geotermálnu vodu z mezozoických rezervoárových polôh
- nadložné ílovcové a flyšové súvrstvia sú izolátory regionálneho významu
- vrchné pieskovcové, borovské súvrstvie je zachované sporadicky, a vzhľadom na povrchovú expozíciu nie je zdrojom geotermálnych vôd

Vnútrohorské kotliny a panvy (vek: neogén), syn. *sedimentárny neogén*, predstavujú súbory n-10 až n-1000 km hrubých sedimentárnych formácií rozšírených prakticky na celom území Slovenska. Ide prevažne o sedimentárne záznamy morských depozičných prostredí,

^{5.4} v staršej odbornej literatúre, ale aj v novších publikáciách sa využíva často chronostratigrafický termín terciér (paleogén + neogén) – podľa Medzinárodnej komisie pre stratigrafiu (ICS) bol termín terciér nahradený termínom kenozoikum (paleogén + neogén + kvartér); na podmienky Slovenska bol kodifikovaný publikáciou Pelech et al., 2021

menej kontinentálnych až riečnych (eventuálne deltových), ktoré sa rôzne vyvíjali v priestore (Obr. 5.7) a čase, takže ich priestorová korelácia nie je možná (ako napríklad v prípadoch mezozoických príkrovov). Výhodnejšie je preto charakterizovať priamo hydrogeologické funkcie litotypov:

- piesky, pieskovce, zlepenec: plnia funkciu hydrogeologických kolektorov, t.j. potenciálne predstavujú rezervoáre geotermálnych vôd
- ílovce, prachovce, evapority: plnia funkciu hydrogeologických polo-izolátorov až izolátorov

Z pohľadu výskytu a formovania priaznivých rezervoárových podmienok potom:

- geotermálne vody viazané na neogénne súvrstvia boli spoľahlivo overené v Centrálnej depresii Podunajskej panvy (ďalej CDPP), Dubníckej depresii, Lúčeneckej kotline, Trebišovskej panve
- vzhľadom na povrchovú expozíciu a variabilnú hrúbku neogénnych formácií je energetický potenciál a termodynamická kvalita priestorovo výrazne variabilná, pričom napríklad v CDPP sú pieskovce rezervoárovým prostredím, avšak v Košickej kotline s rovnakým neogénnym pokryvom rezervoárové prostredie v neogéne overené nebolo

Neogénne vulkanity (vek: neogén) syn: **vulkanosedimentárny neogén**, predstavujú predovšetkým lávové prúdy a explozívne (vulkanoklastiká) produkty andezitového a ryolitového, menej dacitového vulkanizmu a zriedka bazaltového vulkanizmu, ktoré vzhľadom na vek prerážajú kryštalinické, mezozoické, aj staršie kenozoické formácie, s charakteristickým vývojom stratovulkanických až dómových štruktúr. Podobne ako v prípade „sedimentárneho neogénu“, je pre prehľadnosť možné uviesť skôr hydrogeologické funkcie jednotlivých litotypových skupín:

- kompaktné lávové (efuzívne) prúdy = hydrogeologické izolátory
- epiklastiká a hyaloklasty = hydrogeologické polo-izolátory
- tufity = hydrogeologické izolátory
- tufy, vulkanické brekcie = hydrogeologické kolektory.

Z pohľadu podmienok tvorby a výskytu zdrojov geotermálnej energie boli doteraz prítoky geotermálnych vôd overené len v Trebišovskej panve, v oblasti Beša – Čičarovce. Analogicky je ale možné predpokladať (s extrémne vysokým rizikom neúspechu) prítomnosť rezervoárových prostredí aj v analogických, pochovaných vulkanických telesách.



Obrázok 5.6 Pozícia vnútrokarpatského paleogénu. Upravené podľa: Zlocha et al., 2020



Obrázok 5.7 Pozícia sedimentárneho a vulkanosedimentárneho neogénu Západných Karpát. Upravené podľa: Zlocha et al., 2020

Aj na základe pomerne zjednodušenej geologickej stavby Západných Karpát je teda zrejماً jej komplikovanosť a priestorová členitosť (Obr. 5.8), čo sa následne odráža na podmienkach formovania a výskytu zdrojov geotermálnej energie v rozdielnych rezervoárových pozíciách, hĺbkach, s rôznymi energetickými a termodynamickými parametrami. Aj preto je „slepé“ využívanie analogických princípov veľmi rizikové. Zdroje geotermálnej energie viazané na pred-kenozoické podložie sú limitované nielen litológiou, ale aj možnosťami prúdení alebo akumulácie geotermálnych vôd, pričom extrémne veľkú úlohu zohrávajú zlomové systémy najmä vo vzťahu k nadložíu a sedimentárnemu obalu. Zdroje geotermálnej energie v paleogénnych a neogénnych sedimentárných formáciách sú zasa ovplyvnené priestorovými obmedzeniami priepustných polôh (pieskovcov, zlepenčov, brekcií), ktoré sa prejavujú častokrát tvorbou izolovaných šupín a dosiek v inak nepriepustných horninách.

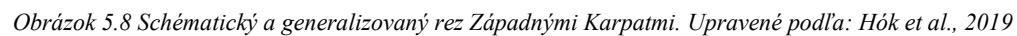
5.2 Výskyt, rozšírenie a charakteristika zdrojov geotermálnej energie

Nasledujúce časti textu sú venované predovšetkým opisu preskúmanosti aktuálneho stavu poznania o výskyte, formovaní a zákonitostiach zdrojov geotermálnej energie a rezervoárových systémov na Slovensku pre podporu teoretických podkladov k predbežným hodnoteniam projektov využívania geotermálnej energie v RCUE.

5.2.1 Útvary geotermálnych vôd

Historicky je možné rozvoj systematického prieskumu a výskumu zdrojov geotermálnej energie vymedziť do začiatkov 70-tych rokov, ako dôsledok globálnej reakcie na tzv. prvú palivovú krízu. Prvým syntetickým dielom z pohľadu hodnotenia zdrojov geotermálnej energie je bezpochyby *Atlas geotermálnej energie Slovenska* (FRANKO ET AL., 1995)^{5.5}, ktorý vychádza z poznatkov z obdobia 1970 – 1994. Jeho súčasťou bolo prvý krát aj ucelené vymedzenie takzvaných **perspektívnych geotermálnych oblastí**, s celkovým počtom 26.

^{5.5} dostupné aj online v slovenskej / anglickej verzii vrátane scanu mapových podkladov na <https://www.geology.sk/geoinfoportal/mapovy-portal/atlas/atlas-geotermalnej-energie/>



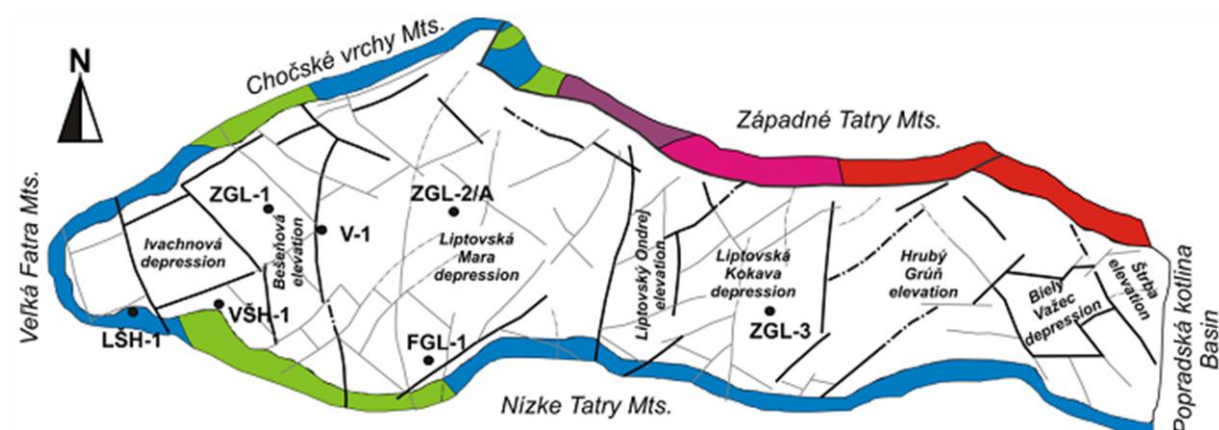
Samotný koncept PGO ale nemal oporu v medzinárodnej systematike a klasifikácii geotermických prostredí, napriek tomu bol dlhodobo využívaný (Tab. 5.1).

Terminologický prechod na tzv. **útvary geotermálnych vôd (ÚGV)** vychádza zo zavedenia Rámcovej smernice o vodách – EU Water Framework Directive 2000/60/EC (KULLMAN ET AL., 2005) do hydrogeologickej výskumnej a prieskumnej praxe, čo sa odrazilo v priemete do národných hodnotiacich úloh o kvalitatívnom a kvantitatívnom stave ÚGV (MARCIN ET AL., 2016, 2020). Priestorové vymedzenie jednotlivých útvarov geotermálnych vôd bolo následne premietnuté do NV č. 452/2020 Z.z.^{5,6} (Obr. 5.9; Tab. 5.1). Aktuálne je vzhľadom na preskúmanosť územia Slovenska vymedzených **31 útvarov geotermálnych vôd**.

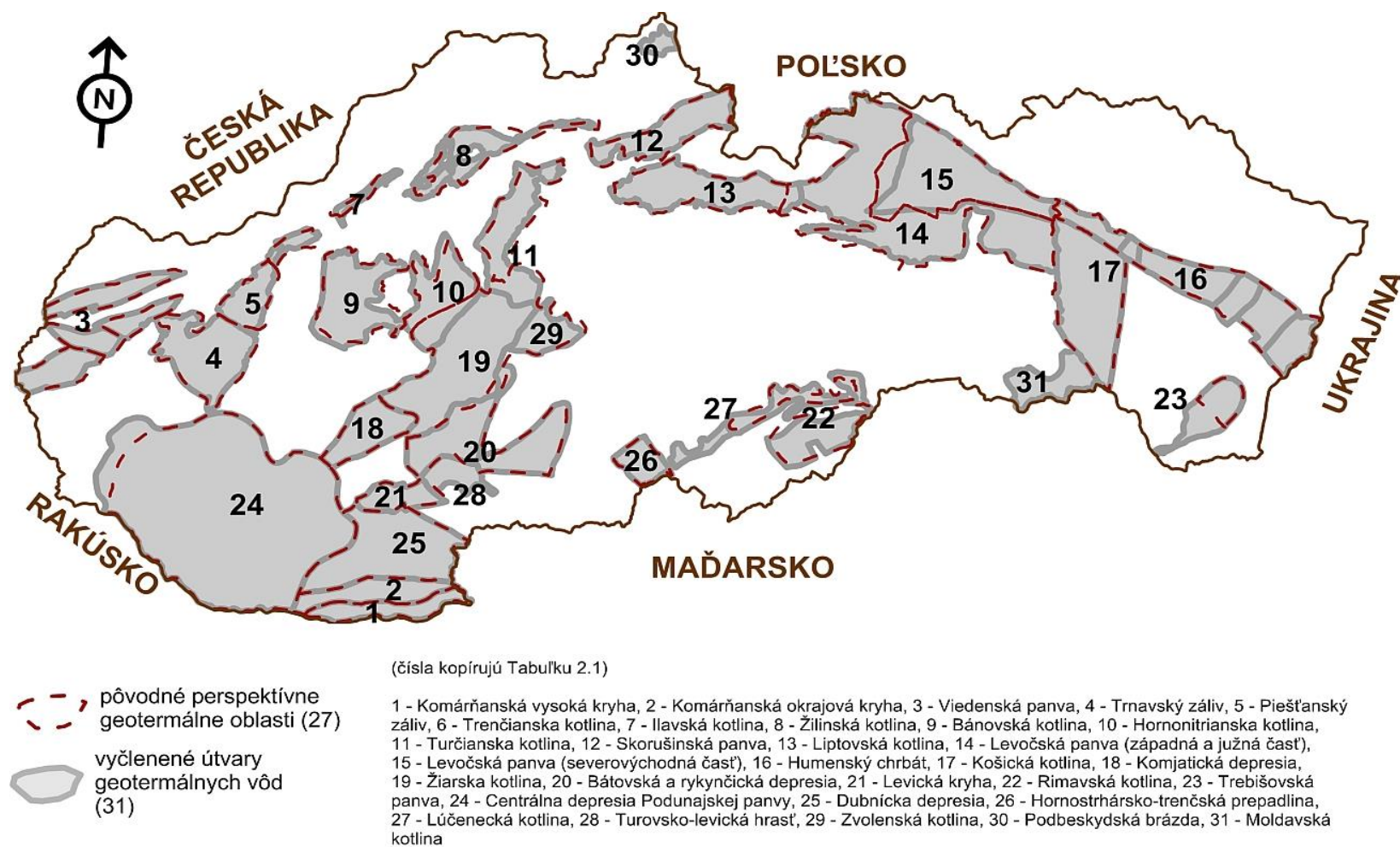
Vymedzenie a využívanie útvarov geotermálnych vôd má svoje opodstatnenie pri tvorbe národných koncepcií, stratégií, plánovaní aj v súvislosti s udržateľnosťou, obnoviteľnosťou a účinnosťou produkcie geotermálnej energie, ale nemá alternatívu, ekvivalent v rámci globálnej stratifikácie (hydro)geotermálnych systémov (viď 2.2), preto je nevyhnutné stále chápať, že ide o priestorovo rozsiahle hydrogeologické a geografické celky.

PRÍKLAD 5.1: Rozdiel medzi vymedzením útvaru geotermálnych vôd a štruktúrnym členením

Liptovská kotlina je vymedzená ako útvar geotermálnych vôd SK300130FK (Marcin et al., 2020). Zároveň však v rámci útvaru je možné vyčleniť *niekoľko hydrogeotermálnych štruktúr* (depresii a elevácií pred-kenozoického podložia) s vlastným hydrogeologickým režimom prúdenia a komunikácie, ako aj tvorby chemického zloženia geotermálnych vôd – napríklad Bešeňovská elevácia alebo depresia Liptovskej mary (Remšík et al., 1998; Fričovský et al., 2016a)



^{5,6} Nariadenie vlády č. Slovenskej republiky 452/2020 Z.z. zo dňa 4. decembra 2019, ktorým sa mení a dopĺňa nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 282/2010 Z.z., ktorým sa ustanovujú prahové hodnoty a zoznam útvarov podzemných vôd



Obrázok 5.9 Porovnanie priestorovej rozlohy vymedzených útvarov geotermálnych vôd a perspektívnych geotermálnych oblastí. Stav ku roku 2023. Upravené podľa: Marcin et al., 2020, Fričovský et al. 2020a

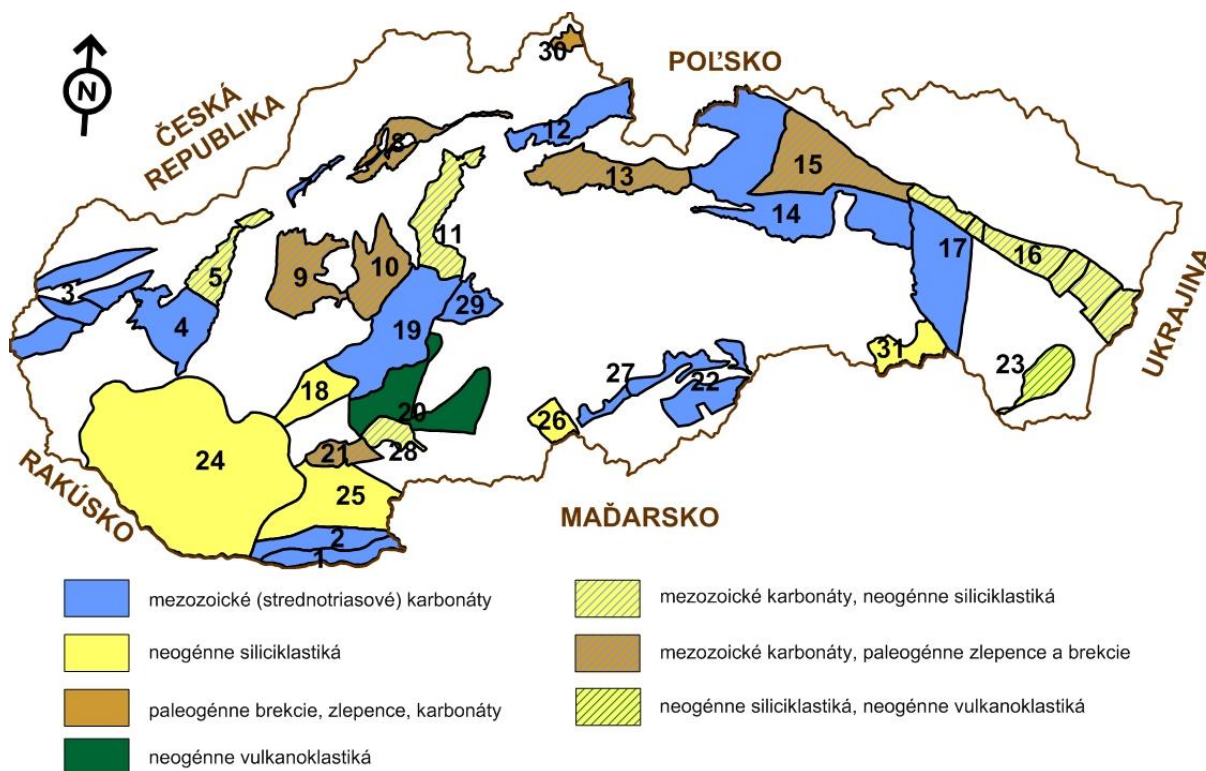
Tabuľka 5.1 Vymedzenie útvarov geotermálnych vôd k roku 2023. Zdroj: Marcin et al. 2020

Kód útvaru	Názov útvaru	Plocha útvaru (km ²)	Zvodnence geotermálnych vôd	Vek kolektora
SK300010FK	Komárňanská vysoká kryha	248,412	karbonáty	jura - trias
SK300020FK	Komárňanská okrajová kryha	311,691	karbonáty	jura - trias
SK300030FK	Viedenská panva	709,784	karbonáty	jura - trias
SK300040FK	Trnavský záliv	583,950	karbonáty	mezozoikum
SK300050FK	Piešťanský záliv	242,075	karbonáty	mezozoikum
SK300060FK	Trenčianska kotlina	47,975	karbonáty	mezozoikum
SK300070FK	Ilavská kotlina	47,522	karbonáty	mezozoikum
SK300080FK	Žilinská kotlina	305,517	karbonáty	trias
SK300090FK	Bánovská kotlina	557,964	karbonáty	trias
SK300100FK	Hornonitrianska kotlina	477,468	karbonáty	mezozoikum
SK300110FK	Turčianska kotlina	492,925	karbonáty	trias
SK300120FK	Skorušinská panva	419,602	karbonáty	trias
SK300130FK	Liptovská kotlina	609,865	karbonáty	trias
SK300140FK	Levočská panva - (západná a južná časť)	1791,658	karbonáty	trias
SK300150FK	Levočská panva - (severovýchodná časť)	853,013	karbonáty	trias
SK300160FK	Humenský chrbát	982,814	karbonáty	mezozoikum
SK300170FK	Košická kotlina	846,858	karbonáty	trias
SK300180FK	Komjatická depresia	322,645	karbonáty	trias
SK300190FK	Žiarska kotlina	983,493	karbonáty	mezozoikum – trias
SK300200FK	Bátovská a rykynčická depresia	751,810	karbonáty	mezozoikum – trias
SK300210FK	Levická kryha	185,334	karbonáty	trias
SK300220FK	Rimavská kotlina	529,699	karbonáty	mezozoikum – trias
SK300230FP	Trebišovská panva	141,859	andezity a ich pyroklastiká	neogén
SK300240PF	Centrálna depresia podunajskej panvy	3426,870	piesky, pieskovce a zlepenice	neogén
SK300250PF	Dubnická depresia	851,324	piesky, pieskovce a zlepenice	neogén
SK3002600P	Hornostrehársko-trenčská prepadlina	156,710	piesky	neogén
SK30027FKP	Lučenecká kotlina	77,109	karbonáty, piesky	mezozoikum, neogén
SK30028FKP	Turovsko-levická hrast'	159,485	karbonáty, neovulkanity, piesky	mezozoikum, neogén
SK300290FK	Zvolenská kotlina	201,030	karbonáty	mezozoikum
SK300300FP	Podbeskydská brázda	60,718	pieskovce, tektonické brekcie	paleogén
SK300310FP	Moldavská kotlina	260,888	karbonáty, piesky	mezozoikum, neogén

5.2.2 Geologická charakteristika

Zdroje geotermálnej energie sa teda viažu na špecifické litologické (horninové) a litostratigrafické (tektonické jednotky definované vekom) komplexy (viď 5.1), ktoré je možné zhrnúť nasledovne (Obr. 5.10):

- mezozoické karbonáty = vápence, dolomity, dolomitické vápence (napríklad Bánovská kotlina, Žiarska kotlina)
- paleogénne zlepenice, brekcie, pieskovce a karbonáty (napríklad Podbeskydská brázda, Hornonitrianska kotlina)
- neogénne piesky, pieskovce, brekcie, zlepenice (napríklad CDPP, Trebišovská panva, Turčianska kotlina)
- neogénne vulkanoklastiká = tufy, vulkanické brekcie, hyaloklasy (napríklad Trebišovská panva, Bátovsko-rykynčická depresia).



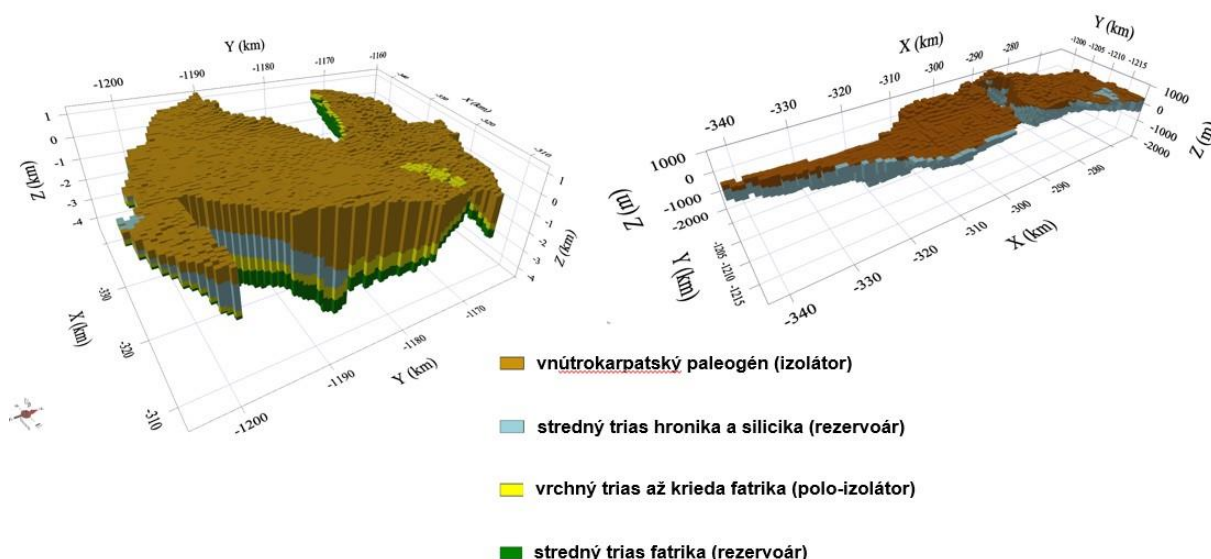
Obrázok 5.10 Rozloženie litologických typov a ich stratigrafické zaradenie v útvaroch geotermálnych vôd na Slovensku. Upravené podľa: Fričovský et al., 2023. Kódovanie podľa Obrázka 5.9

Pre komplikovanú geologickú stavbu, predovšetkým vertikálnu súslednosť jednotlivých litotektonických jednotiek, sú však v mnohých útvaroch geotermálnych vôd a ich hydrogeotermálnych štruktúrach rezervoáre **stratifikované** (Obr. 5.11). Znamená to prítomnosť izolovaných, alebo vzájomne komunikujúcich rezervoárových prostredí umiestnených pod sebou, oddelených zvyčajne aspoň jedným horizontom izolátorov, alebo polo-izolátorov, pričom ich komunikácia (tzv. hydraulické prepojenie) je zabezpečená najmä zlomami. Z toho vyplýva, že v prípade stratifikovaných rezervoárov môžu byť hĺbkové rozdiely medzi spodným a vrchným rezervoárom aj viac ako 1000 m. Aj z tohto dôvodu boli doteraz overené rezervoáre – respektíve ich strop identifikované v hĺbkach n-10 až 3000 m.

5.2.3 Hydrogeologická charakteristika

Hydrogeologickú charakteristiku rezervoárového prostredia geotermálnych vôd na území Slovenska je možné opísať na základe:

- charakteristík výdatnosti
- hydrogeologickej funkcie horninových komplexov
- obehových a akumulčných režimov



Obrázok 5.11 Príklady stratifikovaných rezervoárov (vľavo: Popradská kotlina a Ružbašský ostrov) a jednoduchých rezervoárov (vpravo: Hornádská kotlina) v rámci útvaru geotermálnych vôd Levočská panva – Z a J časť. Upravené podľa: Fričovský et al., 2023b

5.2.3.1 Výdatnosť

Výdatnosť (l.s^{-1} , $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, kg.s^{-1} ; angl. yield, deliverability) charakterizuje množstvo geotermálnych vôd, ktoré je možné získať z vrtu

- *prelivom*, pri ktorom vplyvom vytlačania gasliftom (uvoľňovanie viazaného plynu) alebo termoliftom (teplotné vztlínanie) dochádza k spontánnemu výstupu geotermálnych vôd z rezervoárovej pozície na povrch
- čerpaním, t.j. vyvolaním tlakových zmien technickým zásahom tak, aby bolo indukované prúdenie geotermálnych vôd z rezervoárového prostredia k povrchu.

Z hydrogeologického hľadiska závisí najmä na hydraulických parametroch rezervoárového prostredia (priepustnosť, koeficient filtrácie, koeficient priepustnosti, charakteristika priepustnosti), technických parametroch vrtu, ale aj od geometrie a priestorového ohraničenia rezervoáru (WRIGHT, 2001).

Výdatnosť (hydro)geotermálnych vrtov sa stanovuje hydrodynamickými skúškami, ktoré sú v zmysle legislatívnej úpravy ^{5.7} nevyhnutné pre legislatívne stanovené ukončenie projektov prieskumu zdrojov geotermálnej energie záverečnou správou z geologickej úlohy.

V rámci prieskumov zameraných na overenie geotermálnych vôd (FENDEK ET AL., 2015) bola overená výdatnosť sledovaná na úrovni $0,001 \text{ l.s}^{-1}$ (napr. vrt B-2 Trenčianske Teplice) až 100 l.s^{-1} (vrt OZ-2 Oravice). Zároveň je značný rozdiel medzi:

- **overenou výdatnosťou** = maximálna, hydraulicky možná výdatnosť daného vrtu, ktorá v zmysle spomínanej legislatívy môže byť vykonávaná krátkodobou hydrodynamickou skúškou; a
- **povolenou výdatnosťou**, alebo **povolením na odber geotermálnych vôd**, ktoré v zmysle legislatívnej úpravy ^{5.8} vyžaduje realizáciu aspoň 21-dňovej hydrodynamickej skúšky, respektíve spoľahlivé preukázanie dlhodobej produktivity vrtu bez ovplyvnenia kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia, vrtu, alebo jeho okolia, a ktoré vydáva na základe súhlasu Komisie pre klasifikáciu zásob pri MŽP SR príslušný úrad s platnosťou na 5 rokov, prípadne ďalšími obmedzeniami alebo (nedostatočne) povinnosťami monitorovania.

^{5.7} Zákon č. 569/2007 Z.z. Zákon o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov, t.č. Zákon č. 253/2022 Z.z.; a Vyhláška MŽP SR č. 22/2015 Z.z. ktorou sa vykonáva geologický zákon

^{5.8} Zákon č. 74/2023 Z.z. Zákon, ktorým sa mení a dopĺňa Zákon č. 364/2004 Z.z. o vodách (vodný zákon) a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov

5.2.3.2 *Hydrogeologická funkcia horninových komplexov Západných Karpát*

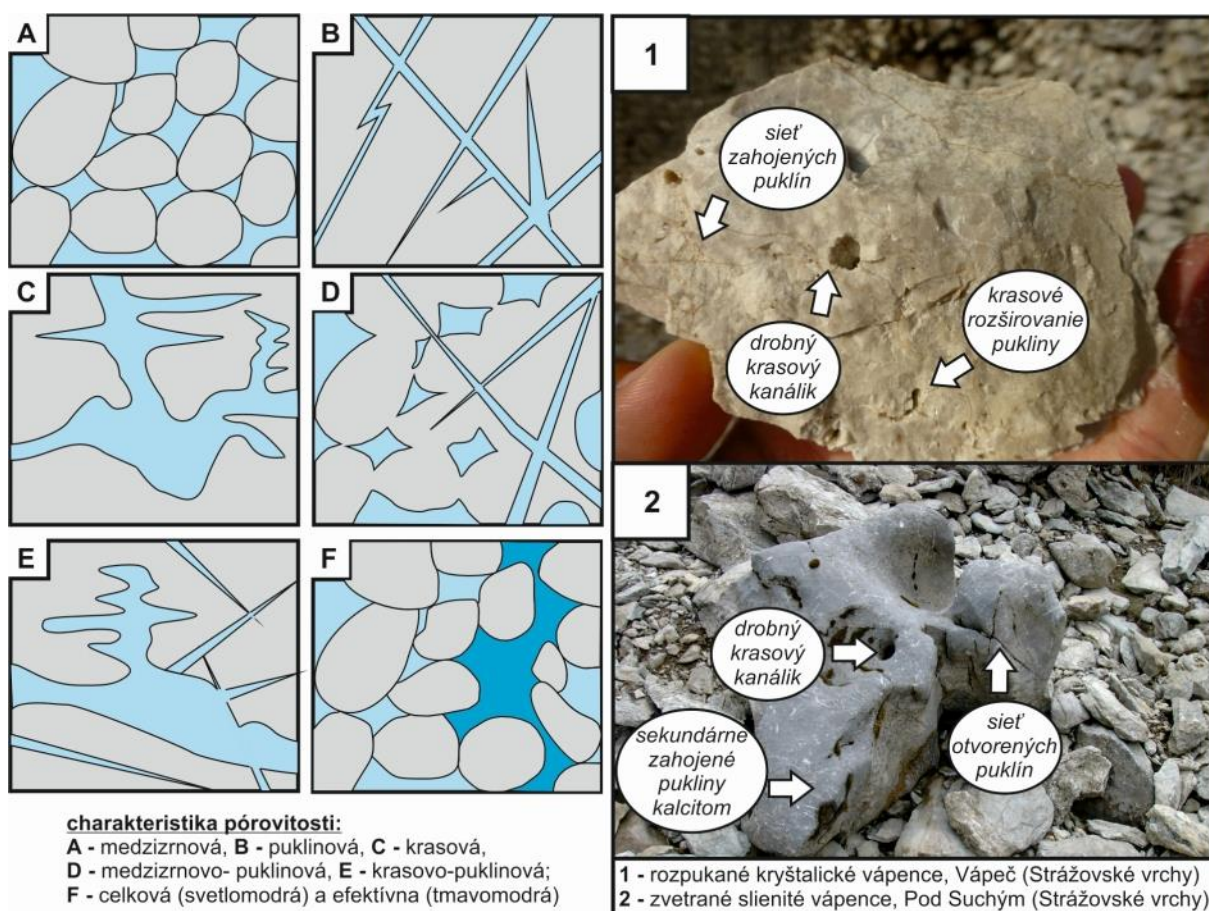
Podľa všeobecných hydrogeologických definícií (WRIGHT, 2001; HISCOCK, 2005; NIELD – BEJAN, 2006) je možné **hydrogeologickú funkciu** horninových komplexov rozdeliť do troch základných skupín na základe schopností podporovať, alebo umožňovať prúdenie rezervoárového média:

- kolektory (ang. aquifer) – horninové komplexy schopné prirodzeného transportu, akumulácie a produkcie podzemných (geotermálnych) vôd
- polo-izolátory (ang. aquiclude) – horninové komplexy schopné akumulácie a obmedzeného transportu podzemných (geotermálnych) vôd a rezervoárového média, s produktivitou nedostačujúcou pre ich ekonomické a technické využívanie
- izolátory (ang. aquitard) – horninové komplexy neumožňujúce pohyb alebo akumuláciu podzemných (geotermálnych) vôd a rezervoárového média.

Základnou kvalitatívnou charakteristikou pre vymedzenie hydrogeologickej funkcie je **priepustnosť** (ang. permeability) horninového komplexu, t.j. schopnosť horniny voľnými priestormi prepúšťať, alebo akumulovať rezervoárové médium. Z pohľadu **obdobia vzniku** priepustnosti je možné rozlíšiť:

- primárnu priepustnosť = ktorá vzniká v čase formovania horniny (napríklad póry v sedimentujúcich pieskoch)
- sekundárnu priepustnosť = ktorá vzniká po formovaní horniny (napríklad puklinová priepustnosť porušených lávových prúdov)
- kombinovanú priepustnosť = ktorá je kombináciou predchádzajúcich (napríklad medzizrnovo-puklinová priepustnosť pieskovcov, kedy pri sedimentácii pieskov a neskôr kompácii pieskov na pieskovce bola primárna priepustnosť zachovaná, a v neskorších geologických obdobiach, napríklad tektonickými procesmi, bola daná hornina sekundárne porušená puklinovými systémami).

Charakter (mechanizmus) vzniku priepustnosti vychádza z konceptu chápania pórov ako všetkých voľných priestorov v hornine, ktoré môžu byť vyplnené (ľubovoľným) rezervoárovým médiom (Obr. 5.12).



Obrázok 5.12 Vľavo: Príklady geometrie (charakteru) priepustnosti / pórovitosti. Vpravo: demonštrácia príkladov vzniku a zániku pórovitosti. Zdroj: Fričovský et al. (nepublikované), Foto: RNDr. Dušan Laurinc, PhD (ŠGÚDŠ).

Z pohľadu **charakteru (mechanizmu) vzniku**, respektíve tvaru priepustnosti, hydrogeologická literatúra opakovane využíva predovšetkým:

- medzizrnovú priepustnosť (ang. intragranular, porous) = voľné priestory vznikajú nedokonalým spájaním zŕn sedimentárnych hornín počas ich sedimentácie
- krasovú priepustnosť (ang. karst permeability) = voľné priestory vznikajú chemickým rozpúšťaním a mechanickou eróziou hornín prúdiacou povrchovou, respektíve podzemnou vodou
- puklinovú priepustnosť (ang. fissure permeability) = voľné priestory vznikajú štruktúrnymi a tektonickými poruchami už kompaktných hornín, zvyčajne po období jej vzniku
- kombinovaná priepustnosť, najčastejšie krasovo-puklinová (ang. karst-fissured) alebo medzizrnovo-puklinová (intragranular-fissured).

Z pohľadu funkčnosti, alebo reálnej schopnosti prepúšťať, akumulovať, alebo dotovať rezervoárové médium, je nevyhnutné vymedziť:

- celkovú pórovitosť (ang. total / absolute porosity, permeability) = celkový objem voľných priestorov v hornine
- efektívnu pórovitosť (ang. effective, open permeability) = objem voľných priestorov v hornine, ktoré sú vzájomne poprepájané a umožňujú prúdenie rezervoárového média.

Zhrnutie základných kvalitatívnych parametrov významných litologických, horninových komplexov Západných Karpát z pohľadu hydrogeologickej funkcie udáva Tabuľka 5.2.

5.2.3.3 *Obehové a akumulačné režimy zdrojov geotermálnej energie*

Zdroje geotermálnej energie, ktoré doteraz boli identifikované na území Slovenska sú hydrogeotermálne (viď 2.2), tzn. zdrojom geotermálnej energie je prúdiace rezervoárové médium (viď 5.2.6). Z tohto dôvodu je pre posudzovanie projektov na využitie a využívanie geotermálnej energie nevyhnutné vnímať hydrogeotermálne štruktúry, respektíve útvary geotermálnych vôd, s ktorými sú spojené, ako obehové a akumulačné systémy podzemných vôd. V rámci **základných regionálnych a lokálnych systémov akumulácie a prúdenia** je možné vymedziť (FRANKO ET AL., 1995; FRANKO ET AL., 1998; FENDEK ET AL., 1999A,B; HISCOCK, 2005; KJARAN – ELIASSON, 2008):

- **otvorené hydrogeotermálne štruktúry / útvary**, v ktorých geologické a hydrogeologické pomery umožnili formovanie infiltračnej, tranzitnej zostupnej, akumulačnej, tranzitnej výstupnej a výverovej oblasti; a preto:
 - chemické zloženie rezervoárového média závisí na horninovom prostredí a dĺžke obehu, pričom celková mineralizácia môže dosahovať n-mg.l^{-1} až n-g.l^{-1} ; chemický typ geotermálnych vôd je zvyčajne karbonátogénny (Ca-Mg-HCO_3), sulfátogénny (Ca-SO_4), prechodný ($\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ alebo $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$); menej hydrosilikátogénny (Ca-Na-HCO_3 , Na-Ca-HCO_3), raritne zmiešaný
 - teplota rezervoárového média závisí na hĺbke a dĺžke obehu a lokálnych geotermických podmienkach
- **polo-otvorené hydrogeotermálne štruktúry** sa formujú zvyčajne z otvorených štruktúr (deštruktívne), pričom vplyvom tektoniky alebo sedimentárneho prekrytia dôjde

k zániku ich infiltračnej a tranzitnej zostupnej obehovej vetvy, respektíve sekundárnym vyhojením (zakrytím) puklinových a zlomových výstupných smerov precipitáciou minerálov z vlastného rezervoárového média. Menej často vznikajú z uzavretých hydrogeologických štruktúr (konštruktívne) aktivovaním zostupných smerov prúdenia z infiltračnej oblasti, čím dochádza k postupnému naried'ovaniu pôvodného rezervoárového média, prípadne (ak je zostupná vetva intenzívna) aj k strate pôvodnej teploty rezervoáru

- chýbajú povrchové prejavy geotermickej aktivity (výrony CO₂ alebo pramene)
- chemické zloženie závisí od spôsobu vzniku štruktúry, pri konštruktívnom má celková mineralizácia tendenciu klesať naried'ovaním, pri deštruktívnom má celková mineralizácia tendenciu narastať (predlžuje sa kontakt na rozhraní voda-hornina); chemický typ najčastejšie prechodný (Ca-Mg-HCO₃-SO₄ alebo Ca-Mg-SO₄-HCO₃) alebo zmiešaný, genetický typ najčastejšie petrogénny alebo polygenetický, respektíve degradovaný-marínogénny
- teplota rezervoárového prostredia závisí na hĺbke, pri konštruktívnom režime dochádza k jej znižovaniu oproti primárnej, pôvodnej teplote
- **polo-uzavreté hydrogeotermálne štruktúry** sa zvyčajne formujú konštruktívne z uzavretých systémov aktivovaním vzostupnej tranzitnej oblasti k povrchu, najčastejšie vplyvom tektonickou aktivitou územia, alebo eróziou nepriepustného nadložia
 - problémom je prirodzené dopĺňanie rezervoárového média (chýba infiltračná a zostupná tranzitná oblasť)
 - celková mineralizácia rádovo obvykle vyššia v dôsledku predchádzajúceho dlhodobého kontaktu na rozhraní voda – hornina, t.j. n-g.l⁻¹ až n10 g.l⁻¹, typ chemického zloženia zvyčajne hydrosilikátogénny (Ca-Na-HCO₃, Na-Ca-HCO₃), respektíve marínogénny (Na-Cl), genetický typ je najčastejšie marínogénny, menej petrogénny
 - teplota závisí na hĺbke uloženia rezervoárového prostredia a geotermických procesoch transportu tepla v okolí
- **uzavreté hydrogeotermálne štruktúry** sú z pohľadu štruktúrnej stavby najjednoduchším typom obehovo-akumulačných systémov, nakoľko majú len rezervoárovú = akumulačnú oblasť a od okolia sú uzavreté litologicky nepriepustnými horninovými

komplexmi, tektonicky (takzvané tektonické pasce a uzavreté zlomové systémy), alebo kombináciou oboch faktorov

- neexistuje prirodzené dopĺňanie rezervoárového média = nevyhnutná je reinjektáž
- celková mineralizácia rádovo $n10 \text{ g.l}^{-1}$, typ chemického zloženia je zvyčajne marínogénny (Na-Cl), alebo polygenetický (v prípade, ak pred celkovým uzavretím štruktúry došlo k nariadeniu pôvodnej morskej vody), geneticky ide najčastejšie o geotermálne vody marínogénne až degradované marínogénne, alebo polygenetické
- charakteristické sú vysoké obsahy chloridov, lítia, v niektorých prípadoch arzénu, jódu
- teplota závisí na hĺbke uloženia rezervoárového prostredia a geotermických procesoch tranportu tepla v okolí

Problémom pri hodnotení projektov z pohľadu udržateľného využívania geotermálnej energie z pohľadu hydrogeologického režimu v útvaroch geotermálnych vôd je predovšetkým skutočnosť, že v rámci jedného útvaru môžu byť lokalizované viaceré typy obehových systémov geotermálnych vôd.

V súvislosti so všeobecnou klasifikáciou obehovo-akumulačných hydrogeotermálnych systémov (viď 2.2) boli doteraz na Slovensku vymedzené len niektoré typy, vzhľadom na geologické prostredie Západných Karpát a od toho odvodenú litológiu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020A, 2022, 2023A,C):

- štruktúry bazénovej segmentácie (napr. Levočská panva Z a J časť)
- štruktúry na zlomových líniách (napr. Ilavská kotlina)
- štruktúry laterálneho prestupu (napr. Liptovská kotlina)
- štruktúry stratifikovaných rezervoárov (napr. Skorušinská panva)
- štruktúry vertikálnej evázie (napr. Piešťanský záliv)
- štruktúry elevovaného kryštalinika (napr. Turovsko-levická hrast')
- štruktúry tefrového vejára (napr. Trebišovská panva).

5.2.4 Hydrogeochemická charakteristika

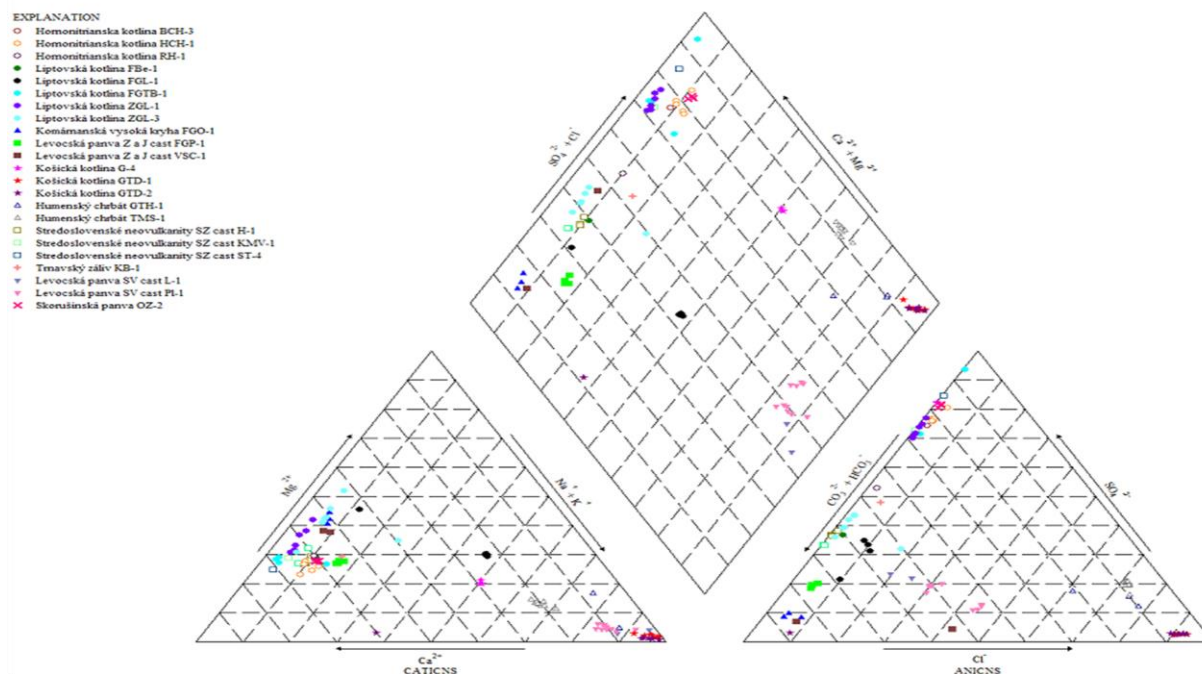
Hydrogeochemické zloženie (typ chemizmu, genetický typ chemizmu, celková mineralizácia) rezervoárového média je v podmienkach Slovenska kontrolované:

- litológiou infiltračnej, tranzitnej zostupnej, akumuláčnej, tranzitnej výstupnej a aj výverovej oblasti
- časom zdržania rezervoárového média v horninovom prostredí (t.j. od jeho prieniku v infiltračnej zóne až k času jeho produkcie vrtom alebo zachyteným prirodzeným prameňom)
- teplotou rezervoárového prostredia
- dynamikou pohybu v rezervoárovom prostredí (vertikálne a horizontálne prúdenia, takzvané konvekčné bunky, prestupy medzi jednotlivými rezervoárovými prostrediami)
- stabilitou rezervoárového prostredia (vertikálne, alebo horizontálne prúdenia ovplyvňujúce zmiešavanie, naried'ovanie, a zmenu chemického zloženia rezervoárového média)
- dynamikou výstupnej oblasti (namiešavanie a naried'ovanie chladnými / obyčajnými podzemnými vodami pri vertikálnom prestupe do plytkých rezervoárov, alebo výverovej oblasti)
- prítomnosťou parnej fázy.

Počas doteraz realizovaných hydrogeotermálnych prieskumov boli overené geotermálne vody s celkovou mineralizáciou 0,7 – 90 g.l⁻¹ (FENDEK – FENDEKOVÁ, 2015; BODIŠ ET AL., 2018), s doteraz zaznamenanými maximami vo vrte GTM-1 Marcelová (ZBOŘIL ET AL., 1986) v útvare geotermálnych vôd Komárňanská okrajová kryha. Extrémne vysoké koncentrácie chloridov, lítia, alebo arzenu boli opakovane dokumentované v geotermálnych vodách d'urkovskej depresie - útvar geotermálnych vôd Košická kotlina (VRANOVSKÁ ET AL., 1999, 2015). V zmysle platnej legislatívy preto predovšetkým pri geotermálnych vodách marínogénneho alebo degradovaného typu, eventuálne geotermálnych vodách, kde naried'ovacia kapacita povrchového recipienta nepostačuje, je nevyhnutná reinjektáž.

Komplikovanosť a komplexnosť tvorby chemického zloženia geotermálnych vôd aj v rovnakom litologickom prostredí dokumentuje nižšie Príklad 5.2.

PRÍKLAD 5.2: Rozdiely chemického zloženia geotermálnych vôd v strednom triase fatrika



Geotermálne vody viazané na stredotriasové karbonáty fatrika majú zvyčajne chemický typ Ca-Mg-SO₄-HCO₃ respektíve Ca-SO₄, nakoľko počas zostupu a akumulácie rozpúšťajú anhydrity a sádrovce nadložia. Práve vysoká dynamika prúdenia geotermálnych vôd v karbonátoch, rôzna miera rozpúšťania sádrovca, a predovšetkým rôzne genetické typy vôd (marínogénne, a degradované-marínogénne) však spôsobujú rozdielne koncentrácie Na⁺ a K⁺, ale predovšetkým Cl⁻ a HCO₃⁻ elementov. Zdroj: Blanárová, 2017

5.2.5 Geotermická charakteristika

Geotermická charakteristika Slovenska je rovnako variabilná, ako jeho geologická a hlboká kôrová stavba. Priaznivé podmienky na formovanie zdrojov geotermálnej energie podporuje kombinácia viacerých faktorov (FENDEK ET AL., 1999B; FRANKO – MELIORIS, 1999):

- rozdielna hrúbka zemskej kôry a nepravidelný prínos tepla do zemskej kôry z astenosféry (konduktívnym transportom)
- orientácia hlavných zlomových systémov a hĺbka ich dosahu podporujúcich transport tepla (vyhojením, uzatvorením) alebo hlboké obehové systémy geotermálnych vôd

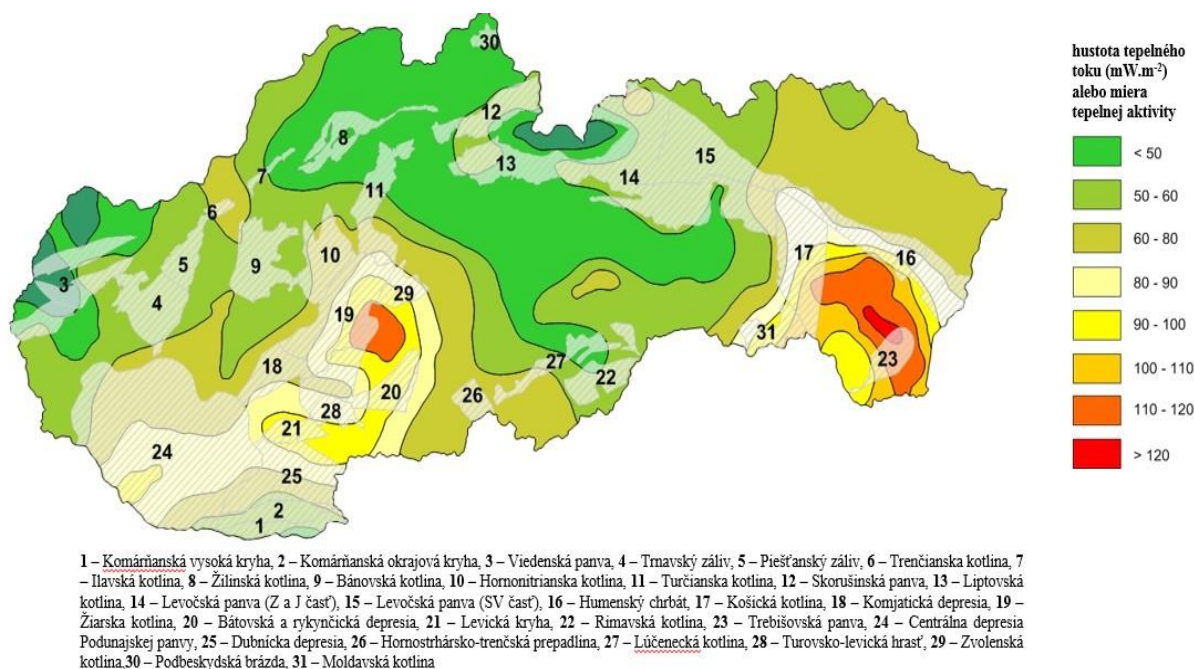
- priestorová distribúcia neogénneho vulkanizmu (chladnutie, distribúcia podpovrchových pochovaných vulkanických komplexov ako zdrojov dodatočného tepla, zvyšovanie objemu rádioaktívnych prvkov v horninovom prostredí)
- distribúcia rádioaktívnych prvkov vo vrchných častiach zemskej kôry mimo vulkanických hornín (predovšetkým objemy Th, U a K)
- hydrogeologické podmienky a režim prúdenia podzemných a geotermálnych vôd ochladzujúcich alebo prehrievajúcich horninové prostredie.

Podľa hustoty tepelného toku (ang. heat flow density) ktorá odráža mieru geotermickej aktivity územia množstvom tepla prirodzene transportovaného k povrchu, je možné na území Slovenska (Obr. 5.13) pozorovať niekoľko samostatných regiónov (FENDEK ET AL., 1999B):

- pásmo strednej až zvýšenej geotermickej aktivity (vnútrohorské kotliny a nížiny interníd Západných Karpát)
- pásmo monotónnej, priemernej až nižšej geotermickej aktivity (externidy Západných Karpát)
- pásmo veľmi nízkej geotermickej aktivity (jadrové pohoria)
- pásmo zvýšenej, až vysokej geotermickej aktivity (CDPP, oblasť stredoslovenských neovulkanitov, východoslovenská nížina = košická kotlina a trebišovská panva).

Povrchová hustota tepelného toku sa pohybuje v intervale $50 - 120 \text{ mW.m}^{-2}$ s priemerom $82,1 \pm 20 \text{ mW.m}^{-2}$, s lokálnymi maximami v priestore Východoslovenskej nížiny ($90 - 130 \text{ mW.m}^{-2}$) a Podunajskej nížiny ($> 90 \text{ mW.m}^{-2}$) a postupným poklesávaním do oblastí terciérnych vnútrohorských kotlín a k flyšovému pásmu (MARCIN ET AL., 2014; BODIŠ ET AL., 2018). Napriek významným rozdielom, ide stále (aj v prípade lokálnych anomálií, ako je Trebišovská panva) o pomerne nízku geotermickú aktivitu, v porovnaní s geotermálnymi poliami s dvojitou fázou, respektíve suchou geotermálnou parou, a kde priemerná hustota tepelného toku dosahuje nad 150 mW.m^{-2} (FLÓVENZ ET AL., 2012).

V rámci doteraz overených teplôt produkovaných geotermálnych vôd sa tie pohybujú v intervale $20 - 135 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; FRIČOVSKÝ ET AL., 2023A,C). Teploty na ústí hydrogeotermálnych vrtov $> 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ boli doteraz spoľahlivo overené len v rámci štruktúry Ďurkov, respektíve Čížatice vrtom Čížatice-1 (ústna komunikácia).



Obrázok 5.13 Povrchová hustota tepelného toku (mW.m⁻²) v priemete na útvary geotermálnych vôd. Zdroj: Fričovský et al. 2023c

Z pohľadu koncových členov transportu tepla (viď 2.2) je možné charakterizovať územie Slovenska z globálneho pohľadu ako prevažne konduktívne. Znamená to, že v regionálnej mierke je teplota rezervoárového prostredia funkcia hĺbky, respektíve potom termofyzikálnych parametrov hornín (objemová hustota, rozťažnosť, tepelná kapacita, tepelná vodivosť, koeficient tepelnej rozťažnosti, pórovitosť, saturácia). Teplotné pomery v rezervoárovom prostredí preto v rámci jedného útvaru geotermálnych vôd, dokonca jeho čiastkových hydrogeotermálnych štruktúr, nie sú rovnaké. Príklad 5.3 demonštruje distribúciu teploty rezervoárového prostredia na povrchu strednotriasových karbonátov v rámci útvaru geotermálnych vôd Bánovská kotlina.

Na základe viacerých modelovacích postupov (FENDEK ET AL., 1999B; MAJCIN ET AL., 2017; FRIČOVSKÝ ET AL., 2024) je možné predpokladať teploty 20 – 80 °C v hĺbke do 1000 m, 50 – 190 °C v hĺbke 3000 m, respektíve teploty 180 – 240 °C v hĺbke 4000 – 6000 m.

Predbežné odhady rezervoárovej teploty opakovane vychádzajú z využitia geotermického alebo **geotermálneho gradientu** (ang. geothermal gradient), ktorý vyjadruje nárast teploty s vertikálnym krokom do hĺbky podľa vzťahu /5.1/:

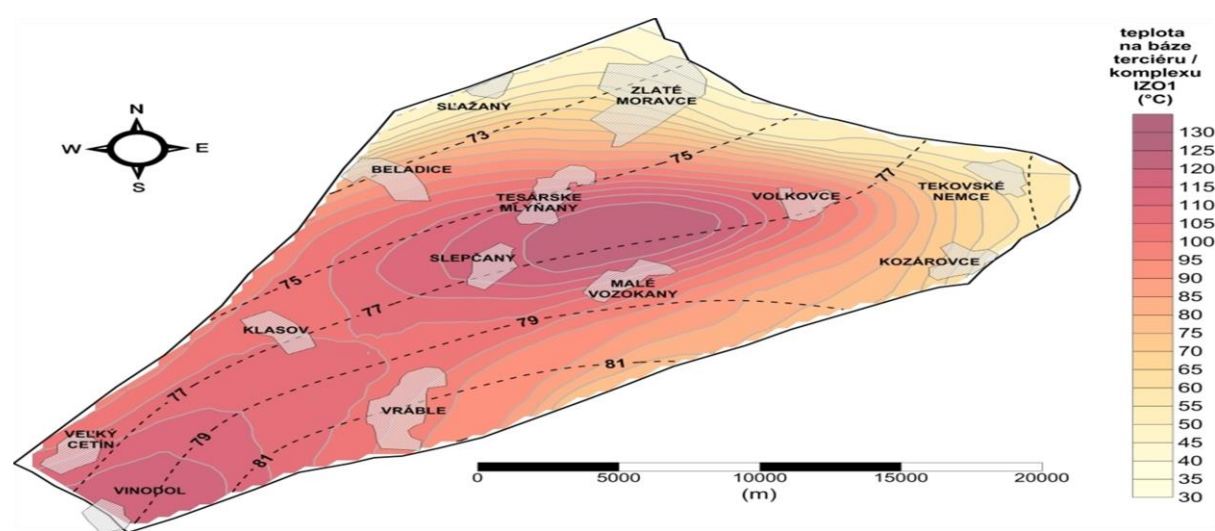
$$T_{i+1} = T_i + \Gamma_{th} \cdot \Delta z \quad /5.1/$$

kde T_{i+1} – teplota v požadovanej hĺbke ($^{\circ}\text{C}$), T_i – teplota na začiatku vertikálneho kroku ($^{\circ}\text{C}$), Γ_{th} je hodnota geotermálneho gradientu ($^{\circ}\text{C.km}^{-1}$) a Δz hĺbka kroku (m).

Geotermálny gradient je funkciou horninového prostredia, jeho litológie a tepelnej vodivosti, preto v rozdielnych prostrediach vykazuje rôzne hodnoty (FENDEK ET AL., 1999B; FRANKO ET AL., 1995; FRANKO – MELIORIS, 1999):

- sedimentárny a vulkanosedimentárny neogén = $25 - 45 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$
- vnútrokarpatský paleogén = $25 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$
- mezozoikum Západných Karpát, okrem stredného triasu = $25 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$
- stredný trias mezozoika Západných Karpát = $15 - 30 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$

PRÍKLAD 5.3: Distribúcia teploty na strope stredného triasu obalovej jednotky tatrika a veporika v Komjatickej depresii. Upravené podľa: Marcin et al. (2020); Fričovský et al. (2024).



Komjatická depresia je jedným z 31 vymedzených útvarov geotermálnych vôd, a tvorí jeden zo severných zálivov Podunajskej nížiny. Stropný izolátor rezervoárov viazaných na stredný trias obalovej jednotky tatrika a veporika (laterálne sa zastupujú) tvorí sedimentárny neogén, ktorého hrúbka narastá od pohorí Vtáčnik a Tríbeč (severný a severovýchodný okraj) k juhu respektíve juhozápadu s hrúbkou do 3300 m. V priestore medzi obcami Slepčany – Malé Vozokany – Volkovce – Tesárske Mlyňany je vyvinutá takzvaná slepčianska priekopa, v ktorej hrúbky dosahujú 2400 – 3300 m. Keďže stropný izolátor je definitívne konduktívne prostredie, teplota na báze terciéru = strope rezervoáru zodpovedá reliéfu neogénneho nadložia (z čoho je jasne viditeľná aj spomínaná slepčianska depresia, ostro vyhranená voči severnému okraju). Odhadované teploty na strope v rozsahu $30 - 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$ znamenajú, že odhadované rezervoárové teploty môžu dosiahnuť $40 - 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, ak predpokladáme jednu rezervoárovú polohu. Je potrebné zdôrazniť, že teploty nad $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ sa budú viazať na doteraz vrtmi neoverené pozície mezozoika pod slepčianskou depresiou. Prerušované čierne izolínie vyjadrujú hustotu tepelného toku v mW/m^2 . To, že teploty priestorovo nesúvisia s geotermickou aktivitou je ďalším prejavom konduktívneho prostredia v Komjatickej depresii.

Z uvedeného vyplýva, že všeobecná konštanta geotermálneho gradientu $30 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ (napr. FRANKO ET AL., 1995; FRIČOVSKÝ ET AL., 2023C) platí skôr pre paleogénne a neogénne prostredie (Obr. 5.14), respektíve na strop mezozoických príkrovov, ale nie je možné ju aplikovať priamo do rezervoárového prostredia v strednotriasových karbonátoch. Pre jednoduchý a **orientačný** odhad teploty rezervoárového prostredia slúži Príklad 5.4.



Obrázok 5.14 Mapa hĺbky stropu pred-kenozoického (pred-terciérneho) podložia (km) v M 1: 500 000. Upravené podľa Plančár et al., 1985 a Zlocha et al., 2020

5.2.6 Rezervoárová dynamika vo vybraných rezervoárových prostrediach

Hydrogeotermálne prostredie Západných Karpát je v ponímaní koncových (prevládajúcich) členov transportu tepla všeobecne považované za konduktívne, t.j. všeobecne existuje predpoklad lineárneho, alebo kvázi-lineárneho nárastu teploty s hĺbkou v zmysle geotermického gradientu. Vyplýva to predovšetkým z bazénového charakteru útvarov geotermálnych vôd a ich asociovaných hydrogeotermálnych štruktúr.

Pri výskume a prieskume zdrojov geotermálnej energie sa ale venuje všeobecne malá pozornosť fenoménom rezervoárovej dynamiky, predovšetkým:

- nerovnomernému bázovému prehrievaniu
- lokálnym konvekčným bunkám

pričom práve tieto fenomény výrazne ovplyvňujú kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárov a rezervoárového média:

PRÍKLAD 5.4: Príklad orientačného výpočtu možnej teploty rezervoárového prostredia geotermickým gradientom

ZADANIE: Projekt na prieskum zdrojov geotermálnej energie na lokalite počíta s dosiahnutím rezervoárovej teploty 90 °C. Z predbežnej geologickej stavby vychádza nasledovná sukcesia: vnútrokarpatský paleogén (1300 m, 30 °C.km⁻¹), sekvencia vrchného triasu až kriedy mezozoika fatrika (800 m, 25 °C.km⁻¹), a rezervoárové prostredie stredotriasových karbonátov fatrika (500 m, 18 °C.km⁻¹), priemerná ročná teplota na povrchu dosahuje 8 °C.

- a) aký je predbežný odhad teploty na strope a báze rezervoáru?
b) sú predbežné odhady teploty 90 °C realistické?

RIEŠENIE:

- pre strop očakávaného rezervoáru

$$T_{i+1} = T_i + \sum_{i=1}^n \Gamma_{th} \cdot \Delta z = 8 + (1,3 \times 30) + (0,8 \times 25) = 8 + 39 + 20 = 67^\circ C$$

- pre bázu očakávaného rezervoáru

$$T_{i+1} = T_i + \sum_{i=1}^n \Gamma_{th} \cdot \Delta z = 8 + (1,3 \times 30) + (0,8 \times 25) + (0,5 \times 18) = 8 + 39 + 20 + 9 = 76^\circ C$$

ODPOVEĎ:

- a) predbežný odhad teploty na strope a báze rezervoáru za predpokladu zachovania odhadovanej geometrie a horninovej sukcesie je 67 - 76 °C
b) ak bude geometria štruktúry podobná očakávanej geologickej stavbe, predpokladaný odhad rezervoárovej teploty (90 °C) nie je v daných podmienkach pravdepodobný

- vertikálnu filtráciu geotermálnych vôd priamo v rezervoárovom telese
- možnosti prestupov geotermálnych vôd tepelným vztláním po zlomových systémoch a ich prienik do vyšších (napríklad sekundárnych) rezervoárov
- rezervoárovú odozvu na dlhodobú produkciu zdrojov geotermálnej energie (spomaľovanie alebo zrýchľovanie prieniku studeného frontu medzi infiltračnou a produkčnou oblasťou, alebo reinjektážnou a produkčnou zónou v prípade geotermálnych dubletov)
- kvalitu a kvantitu tvorby rezervoárovej parnej fázy (spontánny adiabatický var v rezervoároch, ktorý vedie k formovaniu parnej fázy je možný jedine v prípade rezervoárovej konvekcie)

- saturačné stavy minerálnych fáz (ovplyvňujúcich technicko-technologické podmienky využívania geotermálnych vôd, inkrustačný alebo korózný potenciál počas zmeny tlaku a chladnutia geotermálnych vôd)
- zlyhávajúce geotermometrie založené na chemickom modelovaní teploty termodynamickkej rovnováhy vybraných minerálnych fáz a tým nadhodnotenie alebo podhodnotenie výslednej rezervoárovej teploty v prípade jej aplikácie.

Z pohľadu dlhodobého využívania zdrojov geotermálnej energie ide o kľúčové parametre, ktoré by mali byť známe, prípadne odhadované, ak ide o realizáciu hydrogeotermálnych prieskumov. Doteraz boli na Slovensku realizované len dve lokálne štúdie – v Bešeňovskej elevácii / Liptovská kotlina (FRIČOVSKÝ, 2014; FRIČOVSKÝ ET AL., 2015, 2016A) a Ďurkovej depresii (FRIČOVSKÝ ET AL., 2018, 2020; VIZI ET AL., 2023). Indície o rezervoárovej termodynamickej kvalite (FRIČOVSKÝ ET AL., 2016B,C, 2018B) ^{5.9} ale poukazujú na možnosti regionálnych fenoménov nerovnomerného bazového prehrievania a rezervoárovej konvekcie v útvaroch geotermálnych vôd:

- bez adiabatického varu: Liptovská kotlina, Levočská panva – Z a J časť, Centrálna depresia Podunajskej panvy, Trnavský záliv, Žiarska kotlina, Levická kryha, Dubnícka depresia
- s prítomnosťou adiabatického varu: Trnavský záliv, Žiarska kotlina, Košická kotlina, Trebišovská panva, Levočská kotlina – SV časť.

5.2.7 Fázová charakteristika

Zdroje geotermálnej energie na základe doteraz realizovaných prieskumných prác (vrtov) je možné na Slovensku charakterizovať nasledovne:

- hydrogeotermálne zdroje geotermálnej energie = spôsobom využívania geotermálnej energie je rezervoárové médium
- v doteraz overených pozíciách rezervoárov boli dokumentované predovšetkým 1-fázové zdroje geotermálnej energie – geotermálne vody

^{5.9} problematika hodnotenia, t.j. výskumu a prieskumu rezervoárovej dynamiky, alebo inak analýzy lineárnej stability (ang. linear stability analysis) nie je legislatívne definovaná ako nevyhnutná podmienka a súčasť hydrogeologického prieskumu a vyhládavania zdrojov geotermálnej energie aj napriek jej evidentným a kritickým účinkom na rezervoárové prostredie a médium, najmä v oblastiach s potenciálnou prítomnosťou parnej fázy

- výnimku predstavujú lokality Ďurkov (vrty GTD-1, GTD-2 a GTD-3; VRANOVSKÁ ET AL., 1999; HALÁS ET AL., 2016) respektíve Čížatice-1 (neexistuje k júlu 2023 záverečná správa; ústna komunikácia), kde okrem geotermálnej vody bola dokumentovaná parná frakcia v termodynamickej forme takzvanej vlhkej pary (ang. wetsteam) – vid' 2.2.

Na základe analýzy rezervoárových podmienok, predbežných modelovaní, hydrogeologických charakteristík útvarov geotermálnych vôd a ich hydrogeotermálnych štruktúr sú možnosti formovania parnej fázy v jednotlivých jej formách termodynamickej viazanosti s geotermálnou vodou na Slovensku výrazne obmedzené. Dôvodmi sú najmä (FRIČOVSKÝ ET AL., 2016B,C, 2023A,C):

- vysoké rezervoárové tlaky (hlĺbka uloženia rezervoárov) pri termodynamicky nezodpovedajúcej rezervoárovej teplote vyhovujúcej adiabatickému varu
- predpokladaný pokles permeability prostredia s hlĺbkou, ako funkcia prirodzenej kompaktie hornín vplyvom nadložia, respektíve sekundárnym vyhojením puklinových a krasových systémov v karbonátoch vplyvom teploty a vyzrážavania (predovšetkým) kalcitov
- prevládajúci konduktívny transport tepla s limitovanou konvekciou – ak, tak priestorovo limitovanou, čo ovplyvňuje možnosti adiabatického varu
- samotná limitovaná rezervoárová konvekcia s rozpätím v rámci izolovaných tektonických blokov
- slabé účinky nerovnomerného prehrievania bázy rezervoáru vplyvom bazénového charakteru hydrogeotermálnych štruktúr.

Prehľad útvarov geotermálnych vôd, kde je očakávaná / pravdepodobná prítomnosť parnej frakcie, je spomenutý vyššie. Ak je možné uvažovať o parnej frakcii, potom pravdepodobne:

- pôjde o tzv. **vlkú paru (wetsteam)**, t.j. parnú frakciu separovateľnú pri extrémnych zmenách (poklesoch) tlaku na úroveň atmosférického tlaku, s extrémnou vlhkosťou
- podiely parnej frakcie v rámci produktivity jednotlivých vrtov zrejme nepresiahnu 20 %, čo je ekonomicky výhodný pomer pre jej termodynamicky efektívnu separáciu a následné využitie.

Výnimkami z predpokladov objemových / prietokových pomerov môžu byť Trebišovská panva a Žiarska kotlina, avšak s extrémnou úrovňou neistoty. Z tohto dôvodu nie je realistické uvažovať o produkcii elektrickej energie na Slovensku inak, ako tzv. binárnymi systémami.

5.2.8 Koncepčná klasifikácia

Koncepčná klasifikácia zdrojov geotermálnej energie na Slovensku vychádza z adaptácie a rozšírenia globálnej klasifikačnej schémy (MOECK, 2014; MOECK – BEARDSMORE, 2014; viď 2.2) na geologické, tektonické a hydrogeotermálne pomery útvarov geotermálnych vôd a ich hydrogeotermálnych štruktúr na Slovensku (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020A, 2022, 2023A,C). Základným princípom je sledovanie rovnakých geologických, štruktúrno-tektonických, hydrogeologických, hydrogeotermických, a rezervoárových parametrov prieskumu a produkcie podľa akceptovateľnej analógie. V podmienkach Západných Karpát (Slovenska) preto môžeme vymedziť (Tab. 5.3):

a) vnútrohorské depresie – CD2a

- najčastejšie stratifikované rezervoáre v strednotriasových karbonátoch, t.j. minimálne 2 príkrovové jednotky v superpozícii
- sekundárne alebo tranzitné rezervoáre v neogénnych alebo paleogénnych siliciklastikách
- pramenné vývery
- najspoľahlivejší prieskum: seizmika, pre plytké rezervoáre gravimetria
- nevyhnutnosť využívať multikomponentové geotermometrické modelovanie pre odvodenie najväčšej rezervoárovej teploty a možnosti prestupov geotermálnych vôd medzi rezervoármi

b) vonjakšie zálivy neogénnych sedimentárnych bazénov – CD2b

- ak sú prítomné rezervoáre v neogéne (pieskovce, piesky, zlepence) aj mezozoiku (vápence, dolomity a ich prechodné formy), ide o samostatné, hydraulicky nekomunikujúce, a vzájomne sa neovplyvňujúce rezervoárové prostredia
- v severných bazénoch (Trnavský záliv, Trenčianska kotlina, Ilavská kotlina, Piešťanský záliv) je mezozoikum stratifikované, a hydraulicky oddelené
- v južných bazénoch (Komjatická depresia, Levický záliv, Turkovsko-levická hrast') sa mezozoické formácie laterálne zastupujú na kryštalinickom podloží
- zriedkavé pramenné vývery
- najspoľahlivejší prieskum: kombinácia seizmiky a gravimetrie
- geochemické a geotermometrické modelovanie v lokalitách mimo výstupných transportných ciest', multikomponentová geotermometria pre koncepčné modely

c) systémy neovulkanických predpolí a priľahlých nížin – CD2c

- rezervoáre v stredotriasových karbonátoch mezozoika (vápence, dolomity a ich prechodné formy) a vulkanoklastikách neogénu – cirkulačné alebo akumulčné (vulkanické brekcie, tufy, hyaloklasty, štruktúrne poškodené lávové prúdy) prepojené, alebo vzájomne izolované
- pramenné vývery, vo výverových oblastiach výrazné zmiešavanie a ochladzovanie
- najspolahlivejší prieskum: seizmika + gravimetria + magnetotelurika
- bezpodmienečná multikomponentová geotermometria pre rozlíšenie koncepčného modelu prúdenia a ložiskovej (rezervoárovej) teploty, silikátová geotermometria v kombinácii so zmiešavacími geochemickými modelmi
- časté vertikálne a laterálne prestupy
- hlboké rezervoáre v spodných príkrovových a obalových jednotkách hydraulicky izolované

d) neogénne sedimentárne panvy – CD2d

- plošne rozsiahle bazénové systémy s nízkym rizikom ovplyvňovania
- primárne rezervoáre v mezozoiku (vápence, dolomity, a ich prechodné formy) a neogéne (zlepence, brekcie, štrky, piesky, pieskovce), zvyčajne hydraulicky izolované
- zvyšajne len jedna príkrovová jednotka v podloží
- pramenné vývery zriedkavé
- najspolahlivejší prieskum: seizmika + gravimetria
- multikomponentová geotermometria pre rezervoáre v mezozoiku, silikátová geotermometria pre rezervoáre v neogéne, zmiešavacie modely

e) pochované vulkanické centrá a ich vejáre – CV2a/CV3a

- rezervoáre v hydraulicky izolovaných vulkanoklastikách (tufy), vulkanických brekciách, hyaloklastoch a lávových prúdoch
- uzavreté systémy bez vzájomnej komunikácie, nízke výdatnosti
- bez pramenných výverov
- najspolahlivejší prieskum: magnetotelurika, geoelektrika, magnetometria, seizmika
- silikátová geotermometria a kationová geotermometria pre stanovenie hlbokých rezervoárových teplôt

Tabuľka 5.3 Koncepčná klasifikácia hydrogeotermálnych systémov Západných Karpát. Upravené podľa: Fričovský et al., 2022, 2023a

koncepčné subsystémy	hydrogeologický režim	rezervoárová stratigrafia	prevládajúca rezervoárová litológia	prevládajúce hydrogeologické štruktúry prúdenia	príklady
vnútrohorské depresie – CD2a	otvorené až uzavreté	stredný trias paleogén neogén	karbonáty (mezozoikum) klastiká (paleogén, neogén)	bazénová segmentácia, zlomové línie, laterálny prestup, vertikálna evázia, elevované kryštalínium, stratifikované rezervoáre	Liptovská kotlina, Levočská panva (Z a J časť), Levočská panva (SV časť), Skorušinská panva, Turčianska kotlina, Žilinská kotlina, Bánovská kotlina
vonkajšie zálivy neogénnych sedimentárnych bazénov – CD2b	otvorené a polootvorené	stredný trias neogén	karbonáty (mezozoikum) klastiká (neogén)	stratifikované rezervoáre, laterálny prestup, vertikálna evázia, elevované kryštalínium	Piešťanský záliv, Ilavská kotlina, Trenčianska kotlina, Trnavský záliv, Levická kryha, Turovsko-levická hrast'
systemy neovulkanických predpolí a priľahlých nížin – CD2c	otvorené až uzavreté	stredný trias neogén	karbonáty (mezozoikum) vulkanoklastiká (neogén)	zlomové línie, laterálny únik, elevované kryštalínium	Zvolenská kotlina, Hornonitrianska kotlina, Žiarska kotlina, Bátovsko- rykynčická depresia, Turovsko-levická hrast', východný a severovýchodný okraj Košickej kotliny
neogénne sedimentárne panvy – CD2d	polouzavreté až uzavreté	stredný trias neogén	karbonáty (mezozoikum) klastiká (neogén) vulkanoklastiká (neogén)	stratifikované rezervoáre, vertikálna evázia, bazénová segmentáci	Centrálna depresia Podunajskej panvy, Viedenská panva, Komárňanská okrajová kryha, Komárňanská vysoká kryha, Dubnícka depresia, Hornostřásko- trenčská prepadlina, Moldavská kotlina, Rimavská kotlina, Lúčenecká kotlina, Humenský chrbát, Košická kotlina
počované vulkanické centrá a ich vejáre – CV2/3a	polouzavreté až uzavreté	neogén	vulkanoklastiká (neogén)	zlomové línie, tefrové vejáre, vertikálna evázia, laterálny unik	Košická kotlina (východná časť), Trebišovská panva

5.3 Využitie a využívanie geotermálnej energie

Nasledujúce údaje o využití a využívaní zdrojov geotermálnej energie na Slovensku sú pripravené na základe oficiálneho reportu – tzv. Country Update vydávanom pre Medzinárodnú geotermálnu asociáciu (International Geothermal Association – IGA) ^{5.10} a ňou organizovaný Svetový geotermálny kongres (World Geothermal Congress) ^{5.11}. Zároveň asociácia poskytuje bezodplatne databázu článkov z vedeckých konferencií, ktoré sama organizuje, prípadne ktoré organizujú jej partnerské a pridružené inštitúcie ^{5.12}. Ďalšiu skupinu údajov a oficiálnych publikácií o využití a využívaní geotermálnej energie na Slovensku reprezentujú príspevky reportované k Európskej geotermálnej asociácii (EGA) a ňou organizovanému Európskemu geotermálnemu kongresu (European Geothermal Congress, EGC) ^{5.13}. Prehľad príspevkov v predchádzajúcich reportovacích obdobiach:

- Remšík, A., Fendek, M., 1995: Geothermal Country Update for Slovakia, Proceedings World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, 1-5
- Fendek, M., Franko, J., 2000: Country Update for the Slovak Republic, Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 1-7
- Fendek, M., Fendeková, M., 2005: Country Update of the Slovak Republic, Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 1-9
- Fendek, M., Fendeková, M., 2010: Country Update of the Slovak Republic, Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 1-10
- Fendek, M., Fendeková, M., 2015: Country Update of the Slovak Republic, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 1-8
- Fendek, M., Fendeková, M., Fričovský, B., Blanárová, V., 2016: Geothermal Energy Use, Country Update for Slovak Republic, Proceedings European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 1-11

^{5.10} všeobecná webová stránka <https://www.lovegeothermal.org/>

^{5.11} kongres bol pôvodne organizovaný v 5-ročnom období (výnimkou je nateraz WGC2023 v Pekingu a v dôsledku covid-pandémie najskôr v online-priestore, neskôr on-site WGC2020+1 Reykjavík)

^{5.12} <https://www.lovegeothermal.org/explore/our-databases/conference-paper-database/>

^{5.13} www.europeangeothermalcongress.eu

- Fričovský, B., Černák, R., Marcin, D., Blanárová, V., Benková, K., Pelech, O., Fendek, M., 2019: Geothermal Energy Use, Country Update for Slovakia, Proceedings European Geothermal Congress 2019, Den Haag, Neetherlands, 1-15
- Fričovský, B., Černák R., Marcin, D., Blanárová, V., Benková, K., Pelech, O., Fordinál, K., Bodiš, D., Fendek, M., 2020: Geothermal energy use – country update for Slovakia, Proceedings World geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland, 1-19
- Fričovský, B., Marcin, D., Benková, K., Černák, R., Fordinál, K., Pelech, O., 2022: Geothermal energy use, Country update for Slovakia. Proceedings European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany, 1-14
- Fričovský, B., Černák, R., Fordinál, K., Benková, K., Pelech, O., Marcin, D., 2023a: Geothermal energy use – Country update for Slovakia (2019 – 2022). Proceedings World Geothermal Congress 2023, Beijing, China, 1-14.

5.3.1 Využitie zdrojov geotermálnej energie

Na Slovensku je geotermálna energia využívaná nateraz len v **priamych systémoch**, t.j. pre produkciu a zásobovanie tepla v rôznych segmentoch (Tab. 5.4 a 5,5).

Segment centrálného zásobovania teplom je aktívny na 4 lokalitách (Galanta, Šaľa, Veľký Meder, Sereď) v hybridnom zapojení so zemným plynom, pričom podiel geotermálnej energie je v rozsahu 35 % (Šaľa) – 99 % (Galanta). Na systémy GCZT pripadá v sledovanom období najvyšší priemerný ročný tepelný výkon na 1 vrt (celkovo 5 aktívnych), t.j. 1,25 MWt a najvyššia priemerná kumulatívna produkcia geotermálnych vôd – 0,2 .106 m3, podobne ako segmentovo najvyšší priemerný faktor zaťaženia a kapacity, zhodne 0,38. To je dané najmä stabilnou produkciou v základnom výkone pri zabezpečovaní vykurovania a produkcie teplej vody pre rôzne orientovaných odoberateľov, a zároveň extrémne nízkou citlivosťou na vonkajšie faktory, v porovnaní, napríklad, so segmentom rekreácie. Vychádzajúc z plánov AGES je v ďalšej etape rozvoja existujúcich GCZT potrebné ich predizajnovanie z otvorených, na uzavreté produkčné systémy podporu hydraulického stability rezervoárov, v tomto prípade neogénnych pieskovcov Centrálnej depresie Podunajskej panvy.

Segment individuálneho vykurovania (objektov) je ako primárny stupeň využívania geotermálnej vody aktívny na 10 lokalitách s využitím 10 vrtov s kaskádovým napojením na

rekreačné účely (napr. Liptovský Trnovec, Diakovce, Poprad) alebo poľnohospodárstvo (Podhájska). Ako vyplýva z Tabuľky 3, ako primárny stupeň kaskád (alebo samostatného projektu) je segment využívaný okrem CDPP aj v útvaroch geotermálnych vôd Liptovská kotlina, Trebišovská panva, Levočská panva. Pre lokalitu Komárno po rekonštrukcii vrtu M-2 nie sú, po znovuotvorení, aktuálne prístupné dáta o produkcii geotermálnych vôd. Priemerný ročný tepelný výkon na 1 vrt dosahuje 0.99 MWt pri priemernom ročnom faktore zaťaženia a kapacity na úrovni 0,34 a 0,36.

Segment poľnohospodárstva a akvakultúry je využívaný ako primárny stupeň na 11 lokalitách pomocou 12 vrtov, v niektorých prípadoch s kaskádovo napojenými rekreačnými účelmi (Tvrdošovce, Topoľníky). Na lokalitách ako Chalmová, Podhájska, Virt, Bešeňová) predstavuje využitie geotermálnych vôd pre skleníkové hospodárstvo nižší stupeň kaskád. Väčšina lokalít je lokalizovaná v CDPP (napr. Zlatná na Ostrove, Vlčany, Šurany, Zemné), s výnimkou lokality Koš – Laskár (Hornonitrianska kotlina), alebo Vrbov (Levočská panva – J a Z časť) a Turčianske Teplice (Turčianska kotlina), ktoré sú zároveň využívané pre chov rýb. Charakteristiky produkcie geotermálnej energie sú v Tabuľke 4. Pri priemernej ročnej produktivite geotermálnych vrtov 0,14 .106 m³ je výsledný faktor zaťaženia a kapacity na úrovni 0,26 a 0,31, predovšetkým ako dôsledok sezónnosti a zároveň rozdielmi medzi overenými (podmieňujú inštalovaný výkon) a reálne produkovanými množstvami (podmieňujú aktuálny výkon) geotermálnych vôd, čo je často dané rozlohou skleníkov.

Segment rekreácie je dlhodobý ako samostatný-, primárny- alebo nižší- stupeň kaskádového využívania dlhodobý najvýraznejší z pohľadu počtu aktívnych vrtov (49) ako aj lokalít (41). geotermálne vody sú využívané v priamej a nepriamej architektúre, respektíve pracujú so zmiešavaním / riedením pred bazénmi, t.j. v kontaktnom alebo bezkontaktnom režime. Na viacerých lokalitách je rekreácia využívaná ako nižší kaskádový stupeň. Prehľad lokalít, kde sú geotermálne vody primárne využívané pre rekreačné účely je v Tabuľke 5. Priemerný ročný faktor zaťaženia a kapacity, t.j. 0,2 a 0,26 sú evidentne nižšie v porovnaní s inými segmentmi ako dôsledok mimoriadnej citlivosti na sezónne a klimatické faktory, eventuálne návštevnosť, čo sa odráža najmä na lokalitách s vonkajšími bazénmi. Priemerný aktuálny ročný tepelný výkon vrtov na primárnom stupni 0,4 MWt odráža ako rozdiely medzi overenými a produkovanými množstvami geotermálnych vôd v dôsledku pomerne nízkej energetickej náročnosti viazanej na vykurovacie potreby bazénov, ako aj primárne nižšie teploty geotermálnych vôd na ústí produkčných vrtov (priemer T = 39 °C) v porovnaní s inými segmentmi, napr. GCZT (priemer T = 76 °C) alebo poľnohospodárstvom (priemer T = 68 °C).

Segment balneoterapie s využitím geotermálnych, respektíve termo-minerálnych vôd pre liečebné účely je spojený s 11 lokalitami (Tab. 5) a 46 aktívnymi vrtmi. Segment je špecifický ako náročnosťou na prírodné podmienky rezervoárového prostredia, tak aj na povoľovacie procesy a procesy odberu geotermálnych a termo-minerálnych vôd, vrátane monitoringu, a zároveň vnútorného manažmentu infraštruktúry v kúpeľoch, a rozšírenia ochranných pásiem. Tieto faktory výrazne ovplyvňujú využívanie geotermálnej energie v tomto sektore. Z pohľadu produkcie geotermálnej energie (Tab. 4) sa na segment viaže pomerne nízky priemerný aktuálny tepelný výkon vrtov (0,2 MWt), pri relatívne vysokom faktore zaťaženia a kapacity, t.j. 0,34 a 0,36. V porovnaní s poľnohospodárstvom, alebo rekreáciou, sú vyššie faktory produkcie a využitia dané najmä zabezpečením celoročnej prevádzky kúpeľov – t.j. využívaných bazénových a iných kúpeľných terapií. Segment balneoterapie nie je, vzhľadom na legislatívne obmedzenia, viazaný na viacstupňové, alebo by-pass využitie.

Poznámky:

- na základe Zákona o vodách ^{5.14} je odoberateľ zvyčajne povinný reportovať odoberané množstvá geotermálnych vôd v jednotlivých mesiacoch kalendárneho roka po dobu 5-tich rokov v rámci daného platného povolenia na odber geotermálnych vôd voči SHMÚ, čím vzniká rozsiahly priestor pre skreslenia, nakoľko systémy reportingu nie sú automatizované a s výnimkou lokalít s automatizovanými prietokomermi neexistuje spôsob overenia a kontroly reportovaných údajov

Tabuľka 5.4 Základné charakteristiky priameho využívania geotermálnej energie na Slovensku v období 2021-2022. Zdroj: Fričovský et al., 2023c

Segment	Vrty	Lokalita	P_{th_inst} (MWt)	P_{th_act} (MWt)	E_{TH} (GWh,t)	EQ (TJ)	LF (-)	CF (-)	Q_{cum} 10^6 m^3
GCZT	5	4	20,6	7,5	64	221	0,38	0,39	1,02
Individuálne vykurovanie	10	10	33,4	9,8	80	289	0,34	0,37	2,35
Poľnohospodárstvo, rybochov	12	11	41,2	10,1	81	293	0,26	0,31	1,73
Rekreácia	49	41	96,5	19,7	159	572	0,20	0,26	6,29
Balneoterapia	46	11	37,7	10,1	86	310	0,34	0,36	2,93

vrtý – celkový počet aktívnych vrtov na lokalite, lokalita – počet geotermálnych projektov a lokalít s využívaním geotermálnej energie, P_{th_inst} – inštalovaný výkon aktívnych geotermálnych vrtov (MWt), P_{th_act} – aktuálny priemerný tepelný výkon vrtov v roku (MWt), E_{TH} – množstvo produkovanej geotermálnej energie (GWh,t), EQ – množstvo tepla produkované zo zdrojov geotermálnej energie (TJ), LF – faktor záťaže (-), CF – faktor využitia (-), Q_{cum} – kumulatívne množstvo odoberaných geotermálnych vôd v segmente v sledovanom období (m^3)

^{5.14} Zákon č. 74/2023 Z.z. Zákon, ktorým sa mení a dopĺňa Zákon č. 364/2004 Z.z. o vodách (vodný zákon) a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov

Tabuľka 5.5 Prehľad lokalít podľa segmentu primárneho využitia geotermálnej energie na Slovensku v období 2021-2022.

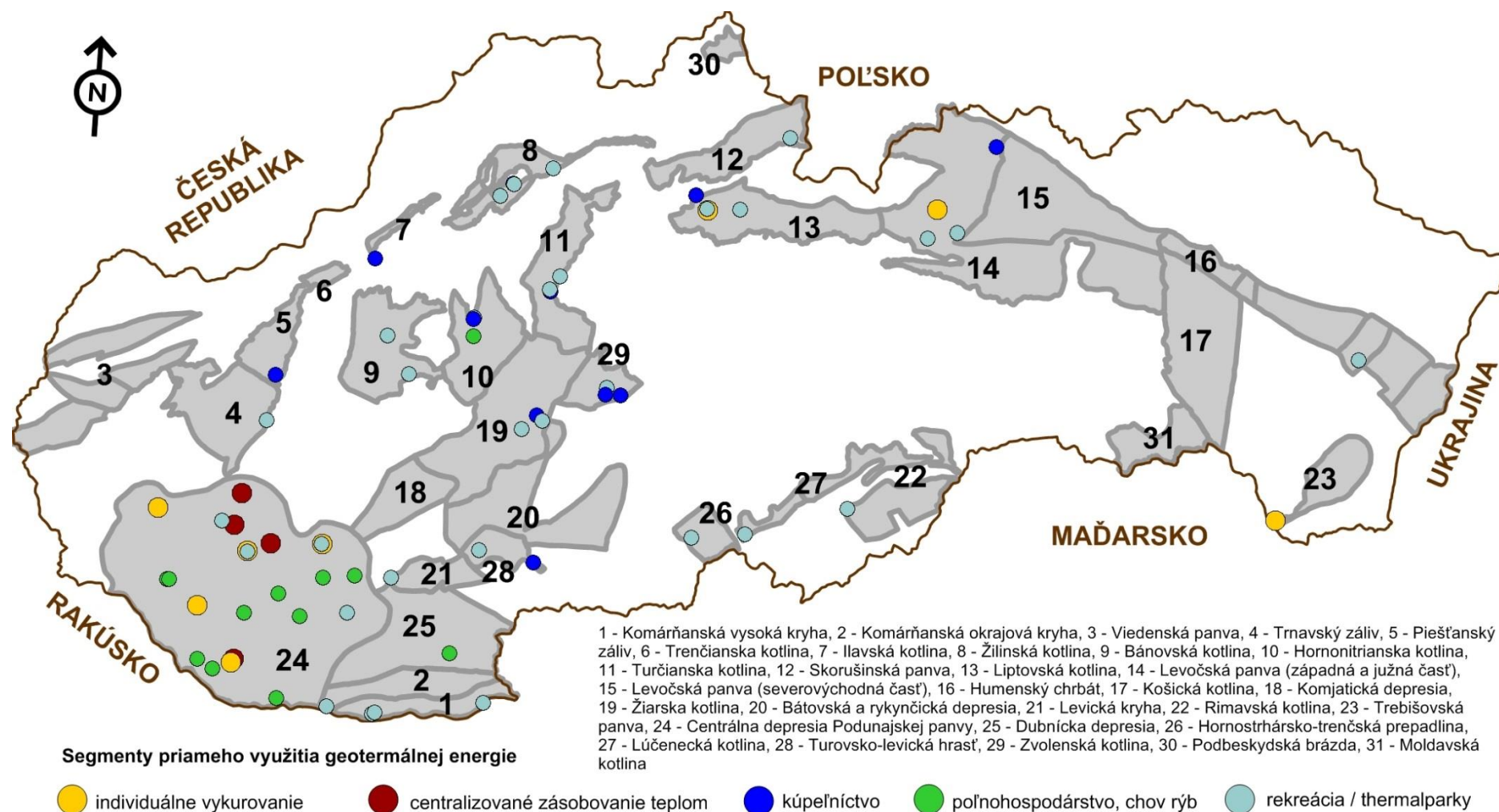
Zdroj: Fričovský et al., 2023c

Segment	Lokalita (počet vrtov / inštalovaný výkon – MWt / ročná produkcia tepla - TJ)
GCZT	Veľký Meder (1 / 3,28 / 61), Sereď (1 / 1,81 / 12,6), Galanta (2 / 12,9 / 88,9), Šaľa (1 / 3,39 / 58,5),
Individuálne vykurovanie	Bešeňová (1 / 6,5 / 54,7), Liptovský Trnovec (1 / 5,5 / 54,9), Veľká Lomnica (1 / 6,5 / 5), Kremnica (1 / 2,96 / 50), Borša (1 / 0,58 / 7,7), Diakovce (1 / 2,66 / 37,5), Veľký Meder – Čalovo (1 / 3,03 / 40), Dunajská Streda (1 / 3,85 / 10,6), Poľný Kesov (1 / 0,6 / 7,2), Senec (1 / 17 / 20,8)
Poľnohospodárstvo, rybochov	Koš (Nováky) – Laskár (1 / 3,8 / 29,2), Vrbov (1 / 5,76 / 108), Tvrdošovce (1 / 4,6 / 2,7), Dunajská Streda (1 / 4,51 / 32,5), Ňarád – Topoľovec (1 / 3,5 / 12,5), Zlatná na Ostrove (1 / 1,1 / 17), Topoľníky (1 / 5,4 / 5,3), Horná Potôň (2 / 9,1 / 37,6), Čiližská Radvaň (1 / 1,8 / 6), Zemné (1 / 2,38 / 7,9), Nesvady (1 / 0,48 / 14,1), Bruty (1 / 3,54 / 49,3)
Rekreácia	Štúrovo (3 / 12,3 / 19,2), Patince (1 / 2,2 / 2,9), Virt (3 / 1,4 / 25), Koplotovce (1 / 0,5 / 0,99), Rajecké Teplice (1 / 0,4 / 7,2), Rajec (1 / 0,98 / 0,6), Strážavy (1 / 0,8 / 2,7), Partizánske (1 / 0,3 / 0,33), Malé Bielice (1 / 0,85 / 4,9), Bánovce nad Bebravou (1 / 1,8 / 14,6), Bojnice (2 / 0,8 / 0,95), Mošovce-Drienok (1 / 0,06 / 0,36), Turčianske Teplice (1 / 0,18 / 0,4), Oravice (1 / 11,4 / 7,6), Oravice (1 / 4,9 / 2,7), Bešeňová (1 / 5,3 / 119,9), Liptovský Ján (1 / 1,2 / 13,1), Vrbov (1 / 4,6 / 43), Poprad (1 / 8,05 / 58,2), Gánovce (1 / 0,1 / 0,5), Kaluža (1 / 0,4 / 5,2), Sklené Teplice (1 / 0,3 / 5,9), Vyhne (3, 0,95 / 4,2), Podhájska (1 / 13,5 / 57,5), Kurinec – Zelená voda (1 / 1,01 / 4,9), Diakovce (1 / 0,4 / 1,3), Veľký Meder – Čalovo (1 / 2,59 / 26), Nové Zámky (1 / 0,78 / 6,8), Galanta – Sládkovičovo (1 / 2,1 / 24,9), Poľný Kesov (1 / 2,4 / 8,9), Nová Stráž (1 / 0,48 / 1,1), Kolárovo (1 / 5,15 / 38,9), Dolná Strehová (1 / 0,34 / 5,3), Vinica (1 / 0,24 / 0,4), Rapovce (1 / 1,04 / 3,9), Kaličiakovo (2 / 1,51 / 2,5), Sielnica (1 / 0,23 / 0,22), Santovka (1 / 0,69 / 1,5), Chalmová (2 / 1,45 / 8,5)
Balneoterapia	Piešťany (6 / 15,7 / 106,9), Trenčianske Teplice (6 / 2 / 42,4), Rajecké Teplice (6 / 1,4 / 12,9), Bojnice (5 / 3,53 / 37,3), Turčianske Teplice (5 / 1,29 / 17,1), Lúčky / Kalameny (4 / 4,7 / 10,6), Vyšné Ružbachy (1 / 0,4 / 0,3), Sklené Teplice (10 / 4,03 / 69,5), Dudince (1 / 0,52 / 1,7), Sliač – Rybáre (1 / 0,79 / 3,1), Kováčová (1 / 3,14 / 11,9)

- výnimku predstavujú balneoterapeutické lokality = kúpele, kde povinnosti monitorovania kvalitatívnych a kvantitatívnych znakov produkcie (aj) termo-minerálnych vôd upravuje tzv. Kúpeľný zákon ^{5.15}, v zmysle ktorého má Inšpektorát kúpeľov a žriedel pri Ministerstve zdravotníctva SR vybudovaný komplexný systém ochrany prírodných liečivých termálnych a minerálnych vôd, vrátane automatizovanej databázy a náročných kritérií kvalitatívneho a kvantitatívneho monitoringu kľúčových parametrov produkcie
- väčšina lokalít je hodnotená z pohľadu primárneho využitia geotermálnej energie, t.j. jej prvostupňového využitia v prípade kaskádovej schémy (viď Kapitola 3), respektíve energeticky náročnejšieho segmentu v prípade by-passu

^{5.15} Zákon č. 538/2005 Z.z. Zákon o prírodných liečivých vodách, prírodných liečebných kúpeľoch, kúpeľných miestach a prírodných minerálnych vodách a o zmene a doplnení niektorých zákonov (Kúpeľný zákon)

- väčšina lokalít na území Slovenska pracuje so systémom 1 lokalita = 1 segment = 1 vrt (výnimky sú najmä v systémoch GCZT a rekreácii)
- kaskádové využívanie zdrojov geotermálnej energie je výrazne obmedzené
- systémy reinjektáže doteraz pracujú len na lokalite Podhájska, spustenie reinjektáže je plánované v najbližšom období na lokalite Ďurkov v prípade realizácie projektu GCZT pre mesto Košice, respektíve na lokalitách s plánovaným využitím zdrojov geotermálnej energie pre binárnu produkciu elektrickej energie (Lovča – Žiarska kotlina a Teriakovce – Košická kotlina) firmy PW Energy
- by-pass systémy na Slovensku fungujú v ešte väčšej limitácii, než kaskádová produkcia, vzhľadom na nezáujem investorov zvyšovať primárne náklady do vybudovania sekundárnych, alebo by-pass segmentov využívaného zdroja, a rovnako vzhľadom na (v pomeroch na Slovensku) štandardne nepravnej konkurenčné prostredie
- systémy reinjektáže sú plánované, v prípade vhodných schém verejného a podporného financovania aj pre systémy GCZT v mestách Veľký Meder, Galanta, Šaľa, Sereď za účelom zvyšovania hydraulického udržateľnosti rezervoárového prostredia, eventuálne rozšírenia produkcie geotermálnej energie
- všeobecná komunikácia medzi producentmi a verejnou správou, respektíve verejnými inštitúciami so zákonne ukotvenou funkciou kontroly, výskumu, prieskumu a manažmentu prírodných surovín, alebo geologickej a hydrologickej služby, je nedostačujúca, a v súčasnej dobe prevláda skôr všeobecný nezáujem, respektíve nevôľa investorov zdieľať s výskumnými a rezortnými výskumnými inštitúciami svoje technicko-energetické údaje
- na Slovensku chýba ucelená legislatívna podpora kontroly, monitorovania a externého manažmentu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov využívaných hydrogeotermálnych systémov, ktorá by vymedzovala, respektíve podporovala spoluprácu súkromného a verejného sektora pri aplikovaní princípov trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie napriek skutočnosti, že práve kontinuálny monitoring a interpretácia jeho výsledkov môžu z dlhodobého hľadiska predĺžiť životnosť geotermálnych projektov a pri vhodnej aplikácii technických, hydrogeologických, hydrogeochemických a rezervoárovo-inžinierskych postupov zabrániť predčasnému, alebo neočakávanému kolapsu geotermálnych projektov



Obrázok 5.15 Mapa lokalít s využívaním zdrojov geotermálnej energie na Slovensku v období 2021-2022. Upravené podľa: Fričovský et al., 2022, 2023a,c

5.3.2 Využívanie zdrojov geotermálnej energie

Podľa zdrojovej literatúry (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020A, 2022, 2023A,C) overilo zdroje geotermálnej energie 283 vrtov rôzneho určenia v celkovo 30 z 31 vymedzených útvarov geotermálnych vôd. Pre obdobie 2021 – 2022 bolo aktívnych 122 vrtov v 22 ÚGV na 77 lokalitách (Tab. 3). Dlhodobu je tak najpreskúmanejším, a najvyužívanejším útvarom geotermálnych vôd Centrálna depresia Podunajskej panvy. V sledovanom období produkciu geotermálnej energie charakterizujú nasledovné údaje:

- overené zásoby geotermálnej energie: $R_{pv} = 441 \text{ MWt}$
- inštalovaný výkon $P_{th\_in} = 233 \text{ MWt}$
- priemerný ročný tepelný výkon aktívnych vrtov $P_{th\_act} = 58 \text{ MWt}$
- kumulatívne množstvo produkovaných geotermálnych vôd $Q_{cum} = 14,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
- ideálne množstvo produkovanej geotermálnej energie $E_{TH\_IN} = 2\,014 \text{ GWh}_t$
- aktuálne množstvo produkovanej geotermálnej energie: $E_{TH} = 470 \text{ GWh}_t$
- aktuálne množstvo produkovaného tepla $EQ = 1\,684 \text{ TJ}^{5.16}$

Z uvedeného je zrejmé, že produkcia geotermálnej energie dosahuje aktuálne približne 23 % ideálnej kapacity. To je dané:

- vplyvom sezónnych podmienok ovplyvňujúcich vykurovacie potreby
- ročným faktorom produkcie ovplyvneným predovšetkým v sektore rekreácie striedaním období produkcie a útlmu najmä v otvorených – exteriérových bazénoch
- štruktúrou vstupných dát, ktoré zohľadňujú primárne účely využitia v kaskádových systémoch (údaje pre následné stupne dostupné nie sú), t.j. v skutočnosti môže byť produkcia geotermálnej energie vyššia o niekoľko percent.

Prehľad stavu využívania geotermálnej energie na základe útvarov geotermálnych vôd je uvedený v Tabuľke 5.6. V následnej Tabuľke 5.7 je uvedené porovnanie základných ukazovateľov produkcie geotermálnej energie medzi obdobiami 2019 – 2020 (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020A) a 2021 – 2022 (FRIČOVSKÝ ET AL., 2023A,C).

^{5.16} lexikologické, terminologické a energetické vysvetlenie jednotlivých pojmov je uvedené v časti 3.3

Tabuľka 5.6 Prehľad stavu využívania geotermálnej energie na Slovensku v období 2021-2022 v útvaroch geotermálnych vôd. Zdroj: Fričovský et al., 2023c

Útvar geotermálnych vôd	Vrty	Aktívne vrty	Lokality	R _{pv} (MWt)	P _{th_in} (MWt)	P _{th_act} (MWt)	Q _{pv} (kg/s)	Q _{cum} (m3/rok)	E _{TH_IN} (GWh,th)	E _{TH} (GWh,th)	EQ (TJ)	Lokality
Komárňanská vysoká kryha	11	7	3	19	16	2	258	1.26	138	13	47	R
Komárňanská okrajová kryha	5	0	0	3	0	0	19	0	0	0	0	
Viedenská panva	2	0	0	9	0	0	35	0	0	0	0	
Trnavský záliv	1	1	1	1	1	0	14	0.06	5	1	1	R
Piešťanský záliv	16	6	1	20	16	3	120	0.64	138	30	107	B
Trenčianska kotlina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ilavská kotlina	12	6	1	3	2	1	45	0.55	18	12	42	B
Žilinská kotlina	13	9	4	7	4	1	95	0.5	31	6	23	R,B
Bánovská kotlina	8	3	3	5	3	1	62	0.25	25	5	20	R,B
Hornonitrianska kotlina	18	10	4	15	10	3	115	0.83	85	21	76	R,B
Turčianska kotlina	16	6	3	11	2	1	92	0.24	13	4	15	R,B
Skorušinská panva	2	1	2	18	16	0	128	0.09	143	3	10	R
Liptovská kotlina	22	8	5	30	23	9	282	2.34	201	70	253	I,R,B
Levočská panva (Z a J časť)	20	6	6	36	25	7	268	1.7	223	59	215	I,A,R,B
Levočská panva (SV časť)	5	0	0	5	0	0	22	0	0	0	0	
Humenský chrbát	4	1	1	1	0	0	12	0.07	4	1	5	R
Košická kotlina	4	0	0	73	0	0	173	0	0	0	0	
Komjatická depresia	1	0	0	3	0	0	11	0	0	0	0	
Žiarska kotlina	18	15	4	10	8	4	85	1.14	73	36	130	I,R,B
Bátovsko-rykynčická depresia	1	0	0	2	0	0	12	0	0	0	0	
Levická kryha	5	1	1	28	14	2	114	0.37	119	19	67	R
Rimavská kotlina	4	1	1	2	1	0	59	0.08	7	1	5	R
Trebišovská panva	10	1	1	3	1	0	27	0.16	5	2	8	I
Centrálna dep. Podunajskej p.	49	27	25	104	78	20	507	3.25	680	165	580	D,I,A,R,B
Dubnícka depresia	4	1	1	5	4	2	34	0.24	31	14	49	A
Hornostrehársko-trenčská prepadlina	8	2	2	7	1	0	89	0.12	5	1	6	R
Lúčenecká kotlina	1	1	1	1	1	0	11	0.06	9	1	4	R
Turovsko-levická hrast'	9	4	3	4	3	1	84	0.2	23	2	6	R,B
Zvolenská kotlina	7	3	3	14	4	1	139	0.16	38	4	15	R,B
Podbeskydská brázda	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Moldavská kotlina	5	0	0	1	0	0	45	0	0	0	0	

vysvetlivky k lokalitám: R – rekreácia, B – balneoterapia, I – individuálne vykurovanie, D – centralizované vykurovanie, A - poľnohospodárstvo

Tabuľka 5.7 Porovnanie stavu využívania zdrojov geotermálnej energie medzi reportovacími obdobiami WGC2020 a WGC2023

Parameter	WGC2015 ^{5.15}	WGC2020	WGC2023
overené zdroje geotermálnej energie	365	437	437
počet aktívnych vrtov	68	114	122
počet aktívnych lokalít	56	74	77
inštalovaný výkon	149	229	233
priemerný ročný tepelný výkon vrtov	136	74	58
ročná produkcia tepelnej energie	1 243	530	470
ročná produkcia tepla	2 185	1 988	1 684

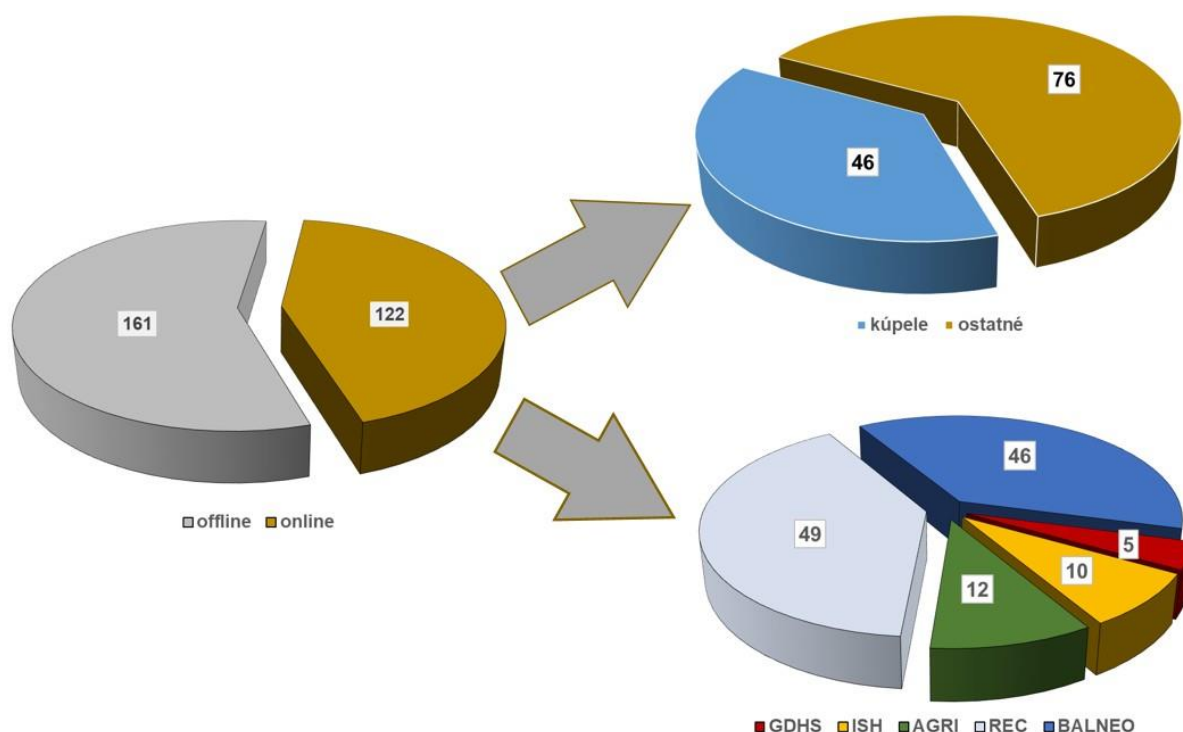
Poznámky:

- je štandardné a prirodzené, že kvantitatívnej produktivity sa menia nielen medziročne, ale aj medzi sledovanými reportovacími obdobiami a ich výstupmi, preto je potrebné každoročne sledovať reportovacie výstupy:
 - priamym dotazovaním v rámci Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra (viď 10.2.1)
 - sledovaním reportovacích publikácií v rámci výstupov EGC (2-ročne) a WGC (štandardne 5-ročne)
- aktuálna databáza vrtov (prieskumných, hlbokých štruktúrnych, ropných, plynových, balneologických, hydrogeologických, hydrogeotermálnych), ktoré overili prítomnosť zdrojov geotermálnej energie je neustále dopĺňaná a môže byť poskytnutá na vyžiadanie zo strany ŠGÚDŠ, pričom je predpoklad zmien v celkovom počte vrtov a tým aj overených množstvách geotermálnej energie do budúcnosti
- celkový počet 283 vrtov, ktoré overili zdroje geotermálnej energie na území Slovenska je potrebné vnímať ako počet realizovaných vrtov – z toho je aktuálne 122 vrtov využívaných, následne ďalšie vrty sú alebo „zablombované“ alebo aktívne nepoužívané
 - z celkového počtu nevyužívaných vrtov nie je zrejmý ich technický a technologický stav, respektíve ich existencia, u prakticky väčšiny – z tohto dôvodu získal ŠGÚDŠ na obdobie 2023 – 2026 programové prostriedky v rámci

^{5.15} metodika hodnotenia využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie pre report WGC2015 (Fendek – Fendeková, 2015; Fendek et al, 2016) prešla pre ďalšie reportovacie obdobie výraznými zmenami, z čoho vyplývajú zásadné rozdiely medzi výslednými hodnotami sledovaných ukazovateľov

balíka RePowerEU, z ktorého bude údaje o ich stave kontinuálne aktualizovať a zvereňovať prístupnú databázu na svojom webe

- z prehľadových tabuliek vyplýva, že takmer 38 % aktívnych vrtov je lokalizovaných v rámci kúpeľov, a podmienky ich využívania tak podliehajú príslušnej kúpeľnej legislatíve (Obr. 5.16)
- základnými faktormi ovplyvňujúcimi na Slovensku pomerne nízke faktory produktivity, ako faktor záťaže (priemerný LF = 0,28) a faktor využitia (priemerný CF = 0,32) v porovnaní s celosvetovým priemerom (LUND – TOTH, 2020) sú najmä (FRIČOVSKÝ ET AL., 2023C):
 - málo rozvinutý systém kaskádového využívania zdrojov geotermálnej energie
 - málo rozvinutý systém by-pass využívania zdrojov geotermálnej energie v lokalitách s výrazným sezónnym ovplyvnením
 - pomerne nízka energetická náročnosť geotermálnych projektov (aktuálny výkon) vo vzťahu k pomerne vysokej produktivite geotermálnych vrtov v dôsledku priaznivého rezervoárového prostredia (inštalovaný výkon)
 - sezónnosť predovšetkým v segmente rekreácie a open-pool (outdoor) charakter rekreačných rezortov.



Obrázok 5.16 Rozdelenie aktívnych vrtov využívajúcich zdroje geotermálnej energie v období 2021-2022

5.3.3 Aktuálne perspektívy rozvoja produkcie geotermálnej energie

Zjednodušeným postupom prieskumu a využívania geotermálnej energie je v zmysle platnej legislatívy^{5.16} je nasledovný súbor po sebe idúcich krokov:

- 1) stanovenie prieskumného územia a realizovanie prieskumných, eventuálne vyhľadávacích prác (geotermálnych vrtov) podľa projektu geologickej úlohy, ktorý je predložený pred schválením MŽP SR na posúdenie
- 2) realizovanie prieskumných prác, vyhotovenie záverečnej správy z projektu geologickej úlohy, vrátane realizovania hydrodynamickej skúšky pre stanovenie povolení pre odber geotermálnych vôd pred Komisiou pre klasifikáciu zásob – KKZ (podzemných vôd) MŽP SR
- 3) posudzovanie realizovaných hydrodynamických skúšok pre KKZ
- 4) vodoprávne povolenie vydané príslušnými úradmi
- 5) realizovanie povrchovej projektovej prípravy
- 6) spustenie prevádzky;

preto čas potrebný medzi zámerom (projekt geologickej úlohy, vymedzenie prieskumného územia), riešením projektu geologickej úlohy (geologické práce realizované v prieskumnom území s následným schvaľovaním záverečnej správy z geologickej úlohy, vrátane oponentského konania), vodoprávnym povolením (komisia pre KKZ, vydanie povolení), a napojením geotermálnych vrtov na produkčnú schému (povrchová príprava, eventuálne hľadanie investora atp) je diametrálne odlišný a nedá sa pevne stanoviť. Z tohto dôvodu pre obdobie 2022 – 2023 a najbližší časový rámec vyčleňujeme:

a) projekty v pokročilom štádiu realizácie

- termalpark Lipany (Levočská panva): vrt Lipany-2 je po rekonštrukcii a realizácii hydrodynamických skúšok, aktuálne údaje o produkcii geotermálnych vôd a tým aj produkčné charakteristiky nie sú dostupné (segment rekreácie)
- termalpark Komárno (Komárňanská vysoká kryha): vrt M-2 je využívaný v kaskádovom zapojení individuálneho vykurovania s následným vyhrievaním bazénov po komplexnej rekonštrukcii; primárne dáta nateraz nie sú od operátora dostupné

^{5.16} Zákon č. 569/2007 Z.z. Zákon o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov, t.č. Zákon č. 253/2022 Z.z.; a Vyhláška MŽP SR č. 22/2015 Z.z. ktorou sa vykonáva geologický zákon

- geotermálny vrt GTP-1 Piešťany (Piešťanský záliv): ukončené zákonom stanovené hydrodynamické skúšky pre vodoprávne konania a povolenia na odber geotermálnych vôd, plánované využitie v segmente rekreácie
- geotermálny vrt ČZT-1 Čížatice (Košická kotlina): ukončené vrtné práce a geofyzikálne merania, bez realizovaných hydrodynamických skúšok; ako jeden z mála vrtov v rezervoárovom prostredí overil frakciu vlhkej pary; v prípade využívania bude nevyhnutná reinjektáž vzhľadom na hydrauliku rezervoárového prostredia a chemického zloženia geotermálnej vody a parnej frakcie; napriek tomu je otázna komunikácia rezervoárového prostredia so štruktúrou Ďurkov, ktorá jeho využívanie môže obmedziť
- geotermálny vrt v Kežmarku (Levočská panva – Z a J časť) bol úspešne ukončený, podľa dostupných informácií prebehli na vrte ako karotážne merania, tak aj stimulácia vrtu respektíve hydrodynamické skúšky, vrt čaká na vodoprávne konanie – primárnym cieľom vrtu je systém GCZT pre mesto Kežmarok
- geotermálny vrt v Liptovskom Mikuláši (Liptovská kotlina) je v štádiu ukončovania vrtných prác a realizácie geofyzikálnych meraní a interpretácie – plánovaný účel vrtu je dodávka tepla pre lokálny kožiarsky priemysel
- geotermálny vrt GVL-1 Veľká Lomnica (Levočská panva – Z a J časť) bol opätovne testovaný hydrodynamickými skúškami pre povolenie zvýšeného odberu geotermálnych vôd a zásobovanie tepla pre vykurovanie rekreačného rezortu eventuálne bazénov
- geotermálne vrty Vr-1 a Vr-2 Vrbov (Levočská panva – Z a J časť) boli podrobené hydrodynamickým skúškam pre zvýšenie povolení na odber geotermálnych vôd za účelom zásobovania teplom pre miestne rekreačné stredisko a chov rýb

b) projekty pred realizáciou vrtných prác

- projekty binárnych geotermálnych elektrární Lovča (ÚGV Žiarska kotlina) a Teriakovce (ÚGV Košická kotlina), kde aktuálny stav zodpovedá ukončovaciemu procesu EIA a pilotných geologických prác pred spustením vrtného prieskumu; s plánovanými inštalovanými výkonmi 20 – 40 MWe v závislosti na parametroch produkovaného zdroja geotermálnej energie

- aktuálne platné prieskumné územia ^{5.17} pre variabilné účely využitia zdrojov geotermálnej energie na Slovensku ďalej zahŕňajú:
 - lokalita Vlčany (Centrálnej depresia Podunajskej panvy) – poľnohospodárstvo
 - lokalita Krupina (Bátovsko-rykynčická depresia) – nešpecifikovaný účel
 - lokalita Dargov (východný okraj Košickej kotliny) – nešpecifikovaný účel
 - lokalita Gecel', Dolný Kubín (Žilinská kotlina) – individuálne vykurovanie
- aktuálne medializované informácie ohľadom projektu využitia hlbokých ropných prieskumných vrtov na lokalite Beša – Čičarovce ako vertikálnych podzemných výmenníkov tepla uvádzajú zámer na systémy centrálneho zásobovania teplom okolia mesta Trebišov a priľahlých sídel

c) lokalita Ďurkov

Lokalita Ďurkov (Košická kotlina) má špecifické postavenie v rámci využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku:

- prvá etapa prieskumu bola realizovaná v 70-tych rokoch v rámci vyhľadávania ložísk ropy a zemného plynu (napr. ČVERČKO ET AL., 1983, 1992)
- vyhľadávací prieskum na zdroje geotermálnej energie prebiehal koncom 90-tych rokov, s realizovaním 3 geotermálnych vrtov GTD-1, GTD-2 a GTD-3 a sprievodnými hydrodynamickými skúškami (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; VRANOVSKÁ, 2001)
- prvé plány a optimalizácie využitia zdrojov geotermálnej energie na lokalite počítali so systémami centrálneho zásobovania teplom (napr. BEŇOVSKÝ ET AL., 1999; HALÁS ET AL., 1999; VRANOVSKÁ ET AL., 2002; HALÁS, 2015) alebo optimalizovaním produkcie elektrickej energie z konvenčných binárnych (napr. FRIČOVSKÝ ET AL., 2013; KUKURUGYOVÁ ET AL., 2015A) alebo Kalinových (KUKURUGYOVÁ ET AL., 2015B) cyklov v otvorenom (atmosférickom) alebo uzavretom (kondenzačnom) režime chladenia
- opätovne boli realizované hydrodynamické skúšky geotermálneho vrtu GTD-2 pre získanie povolení na odber množstiev geotermálnych vôd (HALÁS ET AL., 2016)

^{5.17} zoznam a pozícia platných prieskumných území, ktorý je priebežne aktualizovaný, vrátane katalógového uvádzania konkrétnych povolení a ich účelov je na webe: <http://apl.geology.sk/geofond/pu/>

V súčasnosti prebieha proces pridelenia štatútu národného geotermálneho projektu pre lokalitu Ďurkov s plánovaným spustením prevádzky v prvej etape na existujúcej schéme vrtov GTD-1 až GTD-3 do roku 2026 a následným rozšírením lokality a produkčnej schémy o ďalšie 3 vrty, pri simultánnom napájaní lokálnej produkčnej schémy na teplovodnú sústavu mesta Košice. To vytvára významný predpoklad úspešnej realizácie projektu, ktorým sa daný projekt stane dovtedy energeticky a technologicky najnáročnejším projektom na území Slovenska, komplexnosťou takmer porovnateľný s projektmi binárnej produkcie elektrickej energie z geotermálnych zdrojov na lokalitách Lovča a Teriakovce.

6 **ENERGETICKÝ POTENCIÁL ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE NA SLOVENSKU**

Odhady energetického potenciálu zdrojov geotermálnej energie na Slovensku boli opakovane premietnuté do regionálnych hydrogeotermálnych hodnotení vymedzených perspektívnych oblastí (FRANKO ET AL., 1995; REMŠÍK ET AL., 2011; MARCIN ET AL., 2014), dnes útvarov geotermálnych vôd. V porovnaní s globálnou praxou výskumu a prieskumu zdrojov geotermálnej energie (KJARAN – ELIASSON, 2008; BRUHN ET AL., 2010; GRANT – BIXLEY, 2011; CUMMING, 2016) ale regionálne hydrogeotermálne hodnotenia na základe diskretných a 3D modelov malo niekoľko základných obmedzení, ktoré môžu vplývať na výpovednú hodnotu:

- nízka hustota geofyzikálnych prieskumných meraní (predovšetkým profilovaní) vzhľadom na plochu perspektívnej geotermálnej oblasti
- nízka hustota prieskumných, vytyčovacích, alebo overovacích vrtov v rámci sledovaného rezervoárového prostredia (opakovane aj 1 vrt na celú plochu útvaru)
- nekomplexnosť geochemického výskumu, častokrát limitovaná na základné hydrogeochemické charakteristiky rezervoárového média a izotopové analýzy
- nízka výpovedná hodnota vo vzťahu k analýze rizika potenciálnych investorov.

Kapitola 6 uvádza výsledky geologickej úlohy „**Analýza možností trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku – I. časť**“ (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024) riešenej na Štátnom geologickom ústave Dionýza Štúra v období 2020 – 2024 pod interným kódom čísla geologickej úlohy 03 20-001, ktorej objednávatelom je Sekcia geológie a prírodných zdrojov Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky. Táto geologická úloha bola otvorená za účelom konštrukcie modelov odhadu potenciálu zdrojov GTE na základe pravdepodobnostných modelov. Výsledky z riešenej geologickej úlohy sú archivované v printovej forme (Záverečná správa + prílohy) v rámci Geofondu ŠGÚDŠ ^{6.1} respektíve na príslušnej webovej prezentácii ^{6.2}.

^{6.1} <https://www.geology.sk/sluzby/geofond/>

^{6.2} <https://www.geology.sk/geoinfoportal/>

6.1 Diskrétné metódy hodnotenia zdrojov geotermálnej energie na Slovensku

Diskrétné modely odhadov boli založené na jednoduchej substitúcii „reprezentatívnych parametrov“ získaných z údajov geofyzikálneho alebo vrtného prieskumu (zvyčajne priemerných hodnôt) do funkčných vzťahov založených na rozlišovaní medzi potenciálom povrchového zneškodnenia odpadových geotermálnych vôd (energetická bilančná metóda) a nevyhnutnosťou reinjektáže (objemová metóda). Ako základné nekonzistencie predchádzajúcich etáp regionálneho hydrogeotermálneho hodnotenia boli vytypované (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020B, 2024):

- využívanie rozdielnych metód odhadu / výpočtu bez logického a koncepčného odôvodnenia
- využívanie konštánt vo výpočtových vzťahoch namiesto aproximatívneho matematického modelovacieho aparátu
- rôzne referenčné teploty
- rôzne bilančné doby odhadovanej produkcie.

Prezentovaný model celkového a udržateľného energetického potenciálu útvarov geotermálnych vôd na Slovensku má za cieľ zjednotením modelovej metodiky, a empirickým definovaním referenčného stavu, a presným stanovením bilančnej doby produkcie (mimo analýzy citlivosti) limitovať tieto nedostatky. Porovnania udáva Tabuľka 6.2

6.1.1 Bilančná metóda (*heat budget method*)

Bilančná metóda /6.1/ vychádza z jednoduchej bilancie medzi teplom (vyjadreným hustotou tepelného toku „ q_s “ ktorý v priemete na plochu „ A “ vyjadruje celkové množstvo tepla prirodzene prestupujúceho k povrchu a tepelno-energetickým spádom, ktorý vyjadruje pomer technických možností využitia geotermálnej energie (rozdiel teploty zdroja geotermálnej energie na ústí produkčného vrtu „ T_{wh} “ a referenčnej teploty zneškodnenia „ T_{ref} “) a energetického potenciálu (rozdiel teploty rezervoárového prostredia „ T_{res} “ a priemernej teploty na povrchu „ T_s “

$$P_t = A \cdot q_s \cdot \frac{T_{wh} - T_{ref}}{T_{res} - T_s} \quad /6.1/$$

Metóda bola využívaná na princípe, že energetický potenciál predstavuje rovnováhu voči množstvu tepelnej energie, ktorá prechádza, a môže prechádzať rezervoárovým prostredím (FRANKO ET AL., 1994, 1995; FENDEK ET AL., 2005), čomu zároveň zodpovedá prirodzené množstvo geotermálnych vôd dopĺňaných do systému /6.2/, ktoré je možné odoberať, bez narušenia energetickej bilancie

$$Q_{dyn} = \frac{A \cdot q_0}{(T_{res} - T_s) \cdot c_w \cdot \rho_w} \quad /6.2/$$

Znamená to, že metóda predpokladala otvorenosť hydrogeotermálnych systémov. Jej kritický nedostatok je v tom, že spočíva v bilancii, ktorej teoretický základ bol odvodený pre aktívne hydrotermálne – vulkanické a magmatické systémy (WHITE – WILLIAMS, 1975), v ktorých je prúdenie geotermálnych vôd a ich prítok do efektívnej časti rezervoáru ovplyvňované „spontánnou konvekciou“. Tieto podmienky však v hydrogeotermálnych štruktúrach na Slovensku neplatia – respektíve platia limitovane.

6.1.2 USGS objemová metóda (volumetric / heat-in-place method)

Objemová metóda je takzvaná teoretická, a vychádza z jednoduchého odhadu a modelovania množstva tepelnej energie /6.3/ viazanej na horninové prostredie „E_M“, respektíve rezervoárové médium „E_F“, pri saturácii vodnou „S_w“ alebo parnou „S_v“ fázou, a ich kombináciou /6.4/

$$E_T = E_M + E_F \quad /6.3/$$

$$E_F = E_W + E_S \begin{cases} E_F = E_W (S_V = 0) \\ E_F = E_V (S_W = 0) \\ E_F = E_W \cdot S_W + E_V \cdot (1 - S_W) \end{cases} \quad /6.4/$$

V rezervoárových podmienkach zodpovedá celkové množstvo geotermálnej energie /6.5/, celkovej energetickej kapacity rezervoáru „γ_t“ je definovaná podľa γ_t /6.6/ pri jeho danom

objeme „V“ (MUFFLER – CATALDI, 1978; GRANT ET AL., 1982; WILLIAMS ET AL., 2008; GRANT, 2014A, QUINAO – ZARROUK, 2014; GARG – COMBS, 2015):

$$E_T = \int_0^V \gamma_t \cdot (T_{\text{res}} - T_{\text{ref}}) dV \quad /6.5/$$

$$\gamma_t = \left[(1 - \phi_{(z)}) \cdot \rho_m \cdot c_m \right] + \left(\phi_{(z)} \cdot \rho_w \cdot c_w \right) \quad /6.6/$$

Výraz /6.3/ v kombinácii s výrazom /6.5/ následne udávajú bilančnú formuláciu objemovej metódy odhadu **celkového množstva tepla (J)** viazaného na zdroj geotermálnej energie pri danom teplotnom spáde ($T_{\text{res}} - T_{\text{ref}}$) /6.7/

$$E_T = E_M + E_W + E_V \quad \left\{ \begin{array}{l} E_M = A_t \cdot \Delta z \cdot \left[\rho_m \cdot c_m \cdot (1 - \phi) \cdot (T_{\text{res}} - T_{\text{ref}}) \right] \\ E_W = A_t \cdot \Delta z \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot \phi \cdot (T_{\text{res}} - T_{\text{ref}}) \cdot S_w \\ E_S = A_t \cdot \Delta z \cdot \rho_s \cdot c_s \cdot \phi \cdot (h_{\text{res}} - h_{\text{ref}}) \cdot (1 - S_w) \\ T_{\text{ref}} \in \langle T_{\text{ref}}; T_{\text{inj}} \rangle \\ S_w \in \langle 0; 1 \rangle \end{array} \right. \quad /6.7/$$

Tento výraz bol v rámci nižšie opisovaného pravdepodobnostného modelu využitý pre pravdepodobnostnú simuláciu (viď 6.2.1). V zahraničnej literatúre (napríklad WILLIAMS, 2004; CLOTWORTHY ET AL., 2006; BEARDSMORE ET AL., 2010; LAWLESS ET AL., 2010; ZARROUK – SIMIYU, 2013; GRANT, 2014A,B, 2018; CIRIACO ET AL., 2020) je modifikácia objemovej metódy /6.8/ využitá pre vyjadrenie **energetickej kapacity rezervoárového prostredia** (MWt) z pohľadu produkcie tepelnej alebo elektrickej energie pri danom koeficiente dostupnosti geotermálnej energie „R0“, plánovanej dobe produkcie „t_{prod}“, plánovanom faktore produktivity „PF“ odhadovanej energetickej / termodynamickej účinnosti cyklu „η_{th}“

$$W_T = \frac{E_T \cdot R0 \cdot \eta_{\text{th}}}{t_{\text{prod}} \cdot PF} \quad \left\{ \begin{array}{l} \eta_{\text{th}} \in \langle 0; 1 \rangle \\ PF \in \langle 0; 1 \rangle \end{array} \right. \quad /6.8/$$

Kým celkové množstvo geotermálnej energie vyjadruje tepelnú energiu akumulovanú ako v horninovom prostredí rezervoáru, tak aj v rezervoárovom médiu, **dostupné množstvo geotermálnej energie E₀ (J)** predstavuje tú časť geotermálnej energie, ktorá je v rezervoárovom prostredí vôbec k dispozícii na technický alebo technologický „odber“

a produkciu v príslušných kvalitatívnych triedach McKelveyovej schémy /6.9/. Jeho výsledný odhad ovplyvňuje opätovne koeficient dostupnosti geotermálnej energie R_0 (MUFFLER – CATALDI, 1978; GRANT ET AL., 1982; CIRIACO ET AL., 2020)

$$E_0 = E_T \cdot R_0 \quad /6.9/.$$

Práve **koeficient dostupnosti geotermálnej energie R_0 (recovery coefficient, recovery factor)**, ktorý nadobúda logické hodnoty $R_0 \in (0; 1)$, vyjadruje „*množstvo geotermálnej energie odoberateľnej zo systému voči množstvu geotermálnej energie uloženej v systéme*“ respektíve „*množstvo geotermálnej energie, ktoré je možné exploatovať zo systému pri jeho definovaných geologických, hydrogeologických a geotermických parametroch a technicko-technologických možnostiach rezervoárovej produkcie*“, keďže len časť energie v rezervoárovom systéme môže byť exploatovaná. To je základná slabosť celej objemovej metódy, keďže jeho nesprávne nastavenie môže spôsobovať rapidne nadhodnotenie alebo podhodnotenie potenciálu zdrojov geotermálnej energie na úrovni násobkov, až rádov (GARG - COMBS, 2010, 2011, 2015; GRANT, 2014B) podľa vzťahu /6.9/. Pre potlačenie možného skreslenia výsledkov využívaním konštant, bolo do praxe uvedených niekoľko metód jeho odhadu, keďže samotná dostupnosť zdrojov geotermálnej energie je funkciou:

- koncepcnej typológii konkrétnych geotermálnych polí / štruktúr / útvarov
- geologickej stavbe a architektúre územia
- hydrogeologických podmienkach
- geotermických pomeroch
- technológii a účele využitia.

Metóda **efektívneho rezervoárového objemu (effective volume method)** odhadu R_0 /6.10/ je založená na modelovaní dostupného množstva geotermálnej energie v rámci rezervoárového prostredia na základe (SANYAL – BUTLER, 2005; BROWN ET AL., 2012; CLOTWORTHY ET AL., 2006; WILLIAMS ET AL., 2008; SUTTER ET AL., 2011; FOX ET AL., 2014):

- pomeru medzi efektívnou (subskript „e“) / perspektívnou plochou geotermálneho systému (plocha, kde sa predpokladá produkcia, plocha anomálie geotermickej aktivity, akumulčná zóna) a celkovou plochou rezervoáru

- príslušného energetického spádu počítaného pre efektívnu plochu, ktorý vyjadruje pomer medzi teplotou ochladenia T_{cool} (maximálne 10 % voči iniciálnym podmienkam) a prirodzeným teplotným spádom $T_{res} - T_{ref}$
- kým spádové ochladenie vychádza z podmienok v efektívnej ploche, prirodzený spád je stanovený pre celú plochu rezervoáru

$$R0 = \frac{A_e \cdot \Delta z_e \cdot \phi_e}{A \cdot \Delta z \cdot \phi_e} \cdot \frac{0,9 T_{res,ini}}{(T_{res,ini} - T_{ref})} = \frac{A_e \cdot \Delta z_e \cdot \phi_e}{A \cdot \Delta z \cdot \phi_e} \cdot \frac{T_{cool}}{(T_{res,ini} - T_{ref})} \quad /6.10/$$

Dostupné množstvo geotermálnej energie preto podľa tejto metódy rastie so zväčšujúcim sa objemom efektívnej plochy, a zároveň s poklesom rezervoárovej teploty, nakoľko hranica využiteľnosti energie je obmedzená tolerovaným ochladením. Práve možnosť zohľadniť celý geotermálny systém, vrátane jeho infiltračnej, tranzitnej, akumuláčnej, a výverovej oblasti, vrátane ich rozdielnych geotermických pomerov, umožňuje túto metódu aplikovať na všetky útvary geotermálnych vôd, ktoré sú hydrogeologicky otvorené, alebo v ktorých nie je, vzhľadom na súčasný stav ich poznania, dôvod očakávať reinjektáž (FRIČOVSKÝ ET AL., 2023B).

Princíp **metódy účinnosti rezervoárovej produkcie vychádza (effective production method)** odhadu $R0$ (ANTICS ET AL., 2005; UNGEMACH ET AL., 2005, 2007, 2009; FRANCO – DONATINI, 2017; GONZÁLEZ-GARCIA ET AL., 2021) vychádza z technickej možnosti odoberať geotermálnu energiu „ Q_{prod} “ pre čas „ t_{prod} “ v intenzite špecifickej tepelnej kapacity rezervoároveho média na ústí geotermálnych vrtov „ γ_{wh} “ z rezervoáru definovaného objemom efektívnej plochy a celkovou tepelnou kapacitou „ γ_t “ pri intenzite, ktorú vyjadruje pomer technického ($T_{res} - T_{inj}$) a prirodzeného ($T_{res} - T_s$) spádu /6.11/

$$R0 = \frac{Q_{prod}}{A_e \cdot \Delta z} \cdot \frac{\gamma_{wh}}{\gamma_t} \cdot t_{prod} \cdot \frac{T_{res} - T_{inj}}{T_{res} - T_0} \quad /6.11/.$$

Metóda je založená na zohľadnení advektívneho postupu studeného frontu medzi reinjektážnou a produkčnou zónou rezervoáru (ANTICS ET AL., 2005; UNGEMACH ET AL., 2005), a preto bola ako vhodná metóda vybratá pre rezervoárové prostredia s uzavretým hydrogeologickým režimom alebo plánovanou reinjektážou v pilotnom, aj kalibrovanom pravdepodobnostnom modeli (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020A,B,C,2024).

6.2 Pravdepodobnostný model odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľnej rezervoárovej kapacity zdrojov geotermálnej energie na Slovensku - 2024

Pravdepodobnostný model odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľnej rezervoárovej kapacity predstavuje prvý, národne orientovaný ucelený projekt odhadu udržateľného potenciálu zdrojov geotermálnej energie na Slovensku pri empiricky danej, zjednotenej metodike modelovacích postupov. Výsledná celková energetická kapacita E_T , korigovaná lokálne-špecifikovaným koeficientom dostupnosti geotermálnej energie R_0 na dostupné množstvo geotermálnej energie E_0 , je následne vyjadrená v podobe energetickej bilancie /6.12/ a na základe interpretačných postupov s využitím McKelveyovej schémy (2.2.4.2, Tabuľka 2.3) katalogizovaná pre jednotlivé útvary geotermálnych vôd

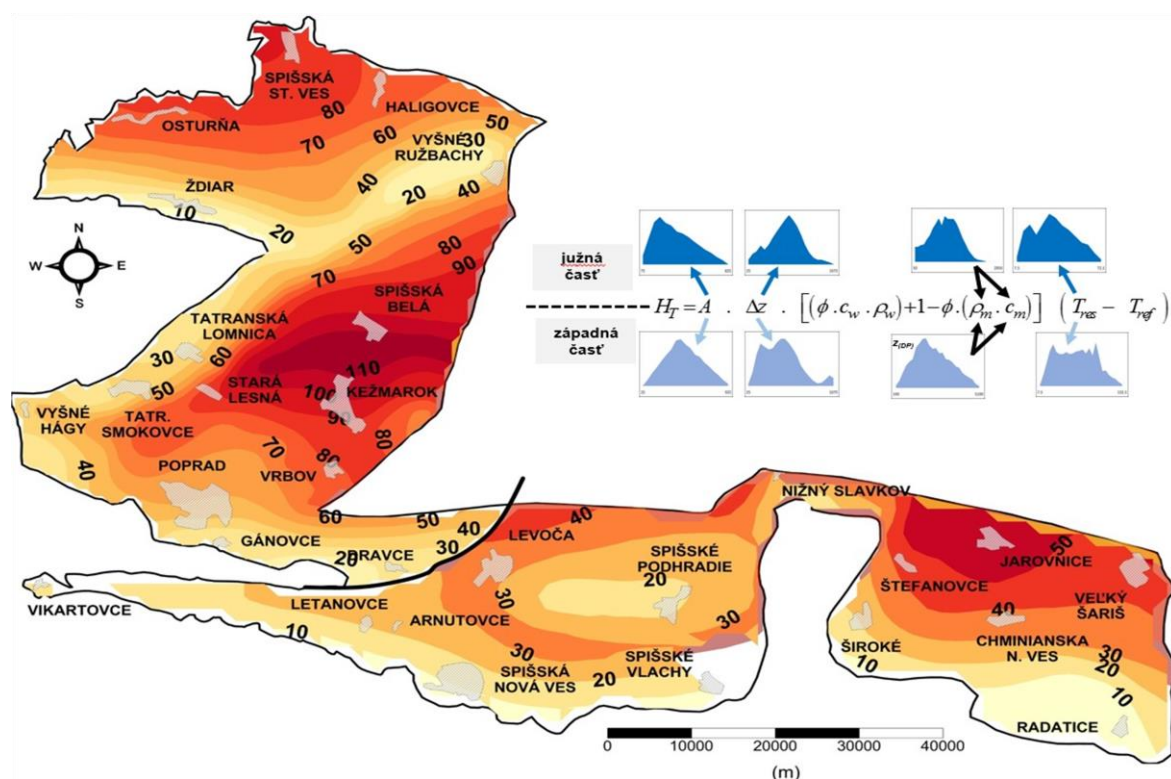
$$H_0 = \frac{E_T \cdot R_0}{t_{\text{prod}}} = \frac{E_0}{t_{\text{prod}}} \quad /6.12/$$

6.2.1 Princípy konštrukcie pravdepodobnostného modelu

Pravdepodobnostný model odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľnej rezervoárovej kapacity je založený na niekoľkých základných pilieroch:

- 1) konštrukcia geologických modelov geotermálnych systémov (štruktúr) ako základ pre geotermický model a pravdepodobnostné modelovanie rezervoárovej geometrie (hlbky, hrúbky, plocha, distribúcia hydraulických a geotermických parametrov ako funkcie hĺbky)
- 2) konštrukcia geotermických modelov geotermálnych systémov, predovšetkým ale rezervoárového prostredia (Príklad 6.1) ako základ pre pravdepodobnostné modelovanie teploty, definíciu rozlohy perspektívnej oblasti, a modelovanie geotermických parametrov ako funkcie teploty
- 3) aplikovanie **pravdepodobnostnej – podmienenej – Monte Carlo simulácie** pre výrazy /6.7/ a /6.10 – 6.11/ pre jednotlivé útvary geotermálnych vôd na základe ich koncepčného modelu (USGS objemová metóda, koeficient dostupnosti R_0)

PRÍKLAD 6.1: Príklad konštrukcie diskretného a pravdepodobnostného modelu odhadu celkového množstva geotermálnej energie v útvare geotermálnych vôd Levočská panva – Z a J časť. Upravené podľa: Fričovský et al. (2023b)



ZADANIE: Obrázok znázorňuje priemernú mapu teploty rezervoárového prostredia (spodný rezervoár) v útvare geotermálnych vôd Levočská panva – Z a J časť, ktorý predstavuje kombináciu Hornádskej kotliny (juh) a Podtatranskej kotliny spolu s ružbažským ostrovom a severovýchodným predpolím Belianskych Tatier (západ), samozrejme v rozdielnych hĺbkach podľa geometrie rezervoárového prostredia (preto sú teploty nespojité na hranici oboch častí). Zároveň je v mape zobrazená formulácia odhadu celkovej energetickej bázy podľa výrazu /6.7/ podľa výsledkov geologického a geotermického podkladového modelu so simulačným nastavením Monte Carlo simulácie podľa histogramov jednotlivých modelov.

INTERPRETÁCIA: Pravdepodobnostné nastavenie vstupných parametrov do Monte Carlo simulácie odhadu energetickej bázy (celkového množstva tepla) jednoznačne zohľadňuje pri stanovenom počte simulačných opakovaní – iterácií – 10 000 ako geometriu rezervoáru, tak aj vzájomné funkčné vzťahy, čo znamená, že výsledok simulácie, na základe skúseností z globálnej praxe, je pri bilančných metódach odhadu omnoho presnejší, ako aplikovanie „reprezentatívnych hodnôt“. Ako príklad rozdielu môžeme využiť teplotu rezervoárového prostredia. V južnej časti je priemerná teplota modelu 31 °C. Podľa histogramu až 72 % rezervoárového prostredia má teplotu nižšiu, ako je priemerná hodnota, pretože tá je výrazne bimodálne distribuovaná). V západnej časti je priemerná teplota rezervoáru podľa modelu 61 °C, a pre skôr lognormálne rozdelenie je takmer 55 % rezervoárového prostredia chladnejšieho. Z oboch uvedených príkladov jednoznačne vyplýva, že využitím priemernej teploty by ako v južnej, tak aj v západnej časti došlo k nadhodnoteniu teplotných podmienok, a následne aj odhadu energetickej bilancie rezervoáru, čo by malo následne dosah na hodnotenie stavu udržateľnosti aktuálnej produkcie zdrojov geotermálnej energie, tak aj na klasifikáciu a hodnotenie rizík z pohľadu jej budúceho rozvoja.

ZÁVER: V skutočnosti sú reprezentatívne hodnoty využívané v diskretných modeloch založené na výsledkoch niekoľkých vrtov, nie celých modelov, čo ešte viac zvyšuje riziko chyby odhadu energetickej bilancie rezervoárového prostredia.

- 4) interpretácia energetickej bilancie /6.12/ na základe výsledkov podmienených pravdepodobnostných simulácií a konštrukcia McKelveyovej schémy pre jednotlivé útvary geotermálnych vôd (Tabuľka 2.3)
- 5) analýza citlivosti pravdepodobnostných modelov vo vzťahu k variabilnému R_0 a vo vzťahu k variabilnej dobe produkcie
- 6) model odhadu udržateľnej energetickej kapacity rezervoárového prostredia útvarov geotermálnych vôd využitím modifikácií koeficientu kapacity zásob
- 7) model odhadu termodynamickej kvality rezervoárového prostredia na základe modelu progresívnej saturácie parnou fázou
- 8) klasifikácia útvarov geotermálnych vôd na základe udržateľného potenciálu a perspektivity pre potreby národných rozvojových stratégií

6.2.2 Klasifikačné schémy zdrojov geotermálnej energie na základe udržateľnosti a perspektivity rozvoja produkcie

6.2.2.1 Koeficient kapacity zásob

Koeficient kapacity zásob patrí do tzv. bilančnej skupiny modelov (BJARNADOTTIR, 2010; SHORTALL ET AL., 2015A), t.j. podlieha obmedzeniam, ktoré táto skupina modelov sprevádza, t.j. citlivosť na vzťah medzi mierou zjednodušenia (vyplýva zo skutočnosti, že model je postavený na energetickej bilancii rezervoáru a mieru jeho odozvy len odhaduje) a mierou spoľahlivosti, ktorá je daná minimom nevyhnutných aproximáciám (GRANT ET AL., 1982; GRANT – BIXLEY, 2011; O’SULLIVAN – O’SULLIVAN, 2016). **Kapacita zásob geotermálnej energie** R_{cap} (MWt) je definovaná ako množstvo dostupnej geotermálnej energie so spoľahlivou hladinou odhadu ostávajúcej na overenie pri aktuálnej kapacite ich využitia zodpovedajúcej aktuálnej kapacite ich overenia /6.13/. Pôvodný **koeficient kapacity zásob geotermálnej energie** /6.14/, navrhnutý pre bilančnú štúdiu udržateľnosti produkcie geotermálnych polí na Islande (BJARNADOTTIR, 2010) definuje pomer množstva geotermálnej energie na overenie vo vzťahu k predpokladanému energetickému potenciálu rezervoárového prostredia

$$R_{cap} = R_{pb} - R_{pv} \quad /6.13/$$

$$r_{cap} = \frac{R_{pb} - R_{pv}}{R_{pb}} \quad /6.14/$$

Keďže v pôvodnej práci platil predpoklad, že všetky overené zásoby geotermálnej energie sú produkované (alebo claimované), koeficient kapacity zásob vyjadroval mieru využitia geotermálneho poľa s ohľadom na jeho energetickú kapacitu (vyjadrenú pravdepodobnými zásobami geotermálnej energie R_{pb}). To viedlo k stanoveniu piatich tried udržateľnosti produkcie rezervoárového prostredia (BJARNADOTTIR, 2010)

- depletačná produkcia
 - masívna depletácia (produkcia presahujúca odhad pravdepodobných zásob geotermálnej energie); $r_{cap} < 0$
 - depletácia (produkcia dosahuje odhad pravdepodobných zásob geotermálnej energie); $r_{cap} = 0$ až $0,24$
 - potenciálna depletácia (produkcia presahuje polovicu pravdepodobných zásob, a neponecháva energetický potenciál pre korekciu a rezervoárový manažment v prípade chyby odhadu); $r_{cap} = 0,25$ až $0,49$
- udržateľná produkcia
 - udržateľná produkcia (produkcia nepresahuje polovicu pravdepodobných zásob a necháva priestor pre aplikáciu stratégií rezervoárového manažmentu vzhľadom na rezervoárovú odozvu a monitoring); $r_{cap} = 0,5$ až $0,74$
 - veľmi udržateľná produkcia (aktuálna produkcia umožňuje aplikovanie rozsiahlych stratégií, vrátane zdvojnásobenia produkcie alebo predĺženia produkcie na takmer 2-násobnú periódu, podľa výsledkov dlhodobého monitoringu); $r_{cap} \geq 0,75$.

Následne, kombináciou výrazov /6.13/ a 6.14/ s definíciami udržateľnej produkcie je možné stanoviť bilančne kritické limity produkcie geotermálnej energie, ak úroveň overenia zásob geotermálnej energie nahradíme produkovanými množstvami geotermálnej energie /6.15/:

$$r_{cap} = \frac{R_{pb} - P_{th}}{R_{pb}} \Rightarrow P_{th(\varsigma)} = (1 - \varsigma) R_{pb} \quad /6.15/.$$

Tento princíp bol následne aplikovaný čiastočne v nekalibrovanom (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020C; MARCIN ET AL., 2020), tak aj v kalibrovanom modeli pravdepodobnostného odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľného energetického potenciálu útvarov geotermálnych vôd na Slovensku (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024).

PRÍKLAD 6.2: Výpočet koeficientu kapacity zásob a stanovenie kritickej udržateľnej rezervoárovej kapacity.

ZADANIE: Z výsledkov pravdepodobnostného modelu odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie pre útvár geotermálnych vôd Rimavská kotlina vyplýva pravdepodobný tepelno-energetický potenciál na úrovni $TTP_{(p)} = 33$ MWt pre dobu produkcie 100 rokov a $TTP_{(p)} = 88$ MWt pre dobu produkcie 40 rokov. Za predpokladu, že úroveň produkcie geotermálnej energie ostane konštantná, t.j. $P_{th,ref} = 17$ MWt následne:

- stanovte koeficient kapacity zásob aktuálnej produkcie geotermálnej energie pre krátkodobý a dlhodobý horizont produkcie
- klasifikujte produkciu geotermálnej energie pre krátkodobý a dlhodobý horizont produkcie
- je z dlhodobého hľadiska možné uvažovať o navýšení produkcie geotermálnej energie o ďalšie 3 MWt ?

RIEŠENIE: podľa vzťahu /6.16/ jednoduchý odhad $r_{cap(U)}$ je vyjadrený:

$$r_{cap(U,40)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{88 - 17}{88} = 0,81$$

$$r_{cap(U,100)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{33 - 17}{33} = 0,48$$

$$r_{cap(U,100)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{33 - (17 + 3)}{33} = \frac{33 - 20}{33} = 0,39$$

INTERPRETÁCIA: na základe využitia koeficientu kapacity zásob aktuálnej produkcie geotermálnej energie zodpovedá krátkodobý manažment produkcie veľmi udržateľnému režimu ($r_{cap(U,40)} = 0,81$), kým pre dlhodobý (udržateľný) horizont produkcie koeficient klesá na hladinu $r_{cap(U,40)} = 0,48$; čo zodpovedá depletačnému manažmentu. Z tohto dôvodu nie je možné navýšiť produkciu geotermálnej energie o ďalšie 3 MWt referenčného výkonu, pretože to by viedlo k poklesu úrovne $r_{cap(U,100)}$ stále v pásme depletačného manažmentu. Jedinou možnosťou by bolo prípadne zvýšenie energetickej účinnosti využívania geotermálnej energie na strane odoberateľa.

6.2.2.2 Udržateľnosť aktuálnej produkcie geotermálnej energie

Prvou modifikáciou pôvodného koeficientu kapacity zásob je využitie takzvaného **pravdepodobného tepelno-energetického potenciálu** $TTP_{(p)}$ vyjadrujúceho odhad množstiev geotermálnej energie v rezervoárovom prostredí na hladine pravdepodobnostného odhadu $P50(H_0/t_{prod})$. Z pohľadu pravdepodobnostného modelu ide o kritickú hladinu odhadu rozlišujúcu medzi zónou vysokého a nízkeho rizika.

Zápis $r_{cap(U)}$ /6.16/ vyjadruje podiel geotermálnej energie v rezervoárovom prostredí dostupný pre ďalšie rozširovanie produkcie voči jeho energetickej kapacite na zodpovedajúcej úrovni odhadu $TTP_{(p)}$ (Tabuľka 6.1):

$$r_{cap(U)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{TTP_{(p)} - \sum_{i=1}^n P_{th,ref(i)}}{TTP_{(p)}} = \frac{P50(H_0 / t_{prod}) - \sum_{i=1}^n P_{th,ref(i)}}{P50(H_0 / t_{prod})} \quad /6.16/.$$

Tabuľka 6.1 Klasifikačné schéma hodnotenia udržateľnosti aktuálnej produkcie geotermálnej energie

interval r_{cap}	definícia produkcie	charakteristika produkcie
$r_{cap(U)} < 0$	kritická depletácia	produkcia prekračuje odhad pravdepodobného potenciálu
$r_{cap(U)} = 0 - 0,49$	depletácia	produkcia dosahuje odhad pravdepodobného potenciálu
$r_{cap(U)} = 0,5 - 0,74$	udržateľná produkcia	produkcia nepresahuje 50 % pravdepodobného potenciálu
$r_{cap(U)} = 0,75 - 1,0$	veľmi udržateľná produkcia	produkcia nepresahuje 25 % pravdepodobného potenciálu

Výraz $r_{cap(U)}$ podľa /6.16/ označujeme ako **koeficient kapacity zásob aktuálnej produkcie geotermálnej energie**. V kombinácii s pôvodným koeficientom kapacity zásob (BJARNADOTTIR, 2010) geotermálnej energie, podľa Tabuľky 6.1 a výrazu /6.16/ vyplýva (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024):

- **kritická depletácia** znamená, že aktuálna produkcia geotermálnej energie z rezervoárového prostredia prekračuje spodnú hranicu rizika (chyby odhadu) a úroveň, ktorá zodpovedá pravdepodobnosti overenia geotermálnej energie 50 %, a zároveň:
 - riziko z pohľadu energetickej kapacity rezervoáru a možnosti dlhodobej produkcie bez ohľadu na udržateľnosť je vysoké respektíve extrémne vysoké
 - pre rozdielnú rýchlosť postupu reakčných frontov je pritom pravdepodobné, že dochádza k energetickému a rezervoárovo-dynamickému ovplyvňovaniu blízkych lokalít aj napriek nepozorovaným indikáciám v makrochemizme alebo zmenách teplotno-tlakových pomerov produkcie
 - dlhodobá produkcia pri kritickej depletácii s určitosťou vyvolá ochladenie okolí produkčných vrtov a rezervoárového prostredia
 - riziko dočasných, alebo trvalých zmien v dynamickom režime rezervoáru je extrémne vysoké (zmena koncových členov transportu tepla, formovanie izolovanej konvekcie v prevažne konduktívnom prostredí, zmena chemického zloženia geotermálnych vôd)
 - extrémne vysoké riziko fázových zmien a termodynamickej saturácie parnej frakcie vo vzťahu k vodnej zložke v prípade, ak je v rezervoárovom prostredí prítomná, prechod dvojitej fázy do stavu vlhkej pary a podobne
- **depletácia** vyjadruje aktuálny stav využitia, kedy sa množstvo energie odoberanej zo systému limitne približuje 50 % pravdepodobnosti overenia z pohľadu pravdepodobnostného modelu, a teda pravdepodobnému tepelno-energetickému

potenciálu, pričom „zostatok“ energie v rezervoárovom prostredí pre jej rozvoj a využívanie sa limitne približuje nule a zároveň:

- riziko z pohľadu energetickej kapacity rezervoáru je nízke-stredné, približujúce sa kritickej prijateľnosti s tým ako $r_{cap(U)}$ sa limitne približuje nule, t.j. $P(P_{th,ref}) \rightarrow \lim P50(H_0)$
 - riziko konduktívneho alebo advektívneho ochladenia rezervoárového prostredia sa zvyšuje s poklesom $r_{cap(U)}$
 - zmeny dynamických procesov v rezervoári nie je možné definitívne vylúčiť, keďže hladina energetickej kapacity rezervoáru $TTP_{(p)}$ je len 50 %, ale ich amplitúda a čas nástupu sa predlžujú so zvyšovaním $r_{cap(U)}$ a to aj napriek konduktívnemu, alebo prevažne-konduktívnemu prostrediu
 - zmeny stavových – fázových procesov sú vzhľadom na rezervoárové prostredie málo pravdepodobné
- **udržateľná produkcia** vyjadruje stav využitia zdrojov geotermálnej energie, kedy aktuálna produkcia geotermálnej energie nepresahuje 50 % jej pravdepodobného tepelno-energetického potenciálu. Z pohľadu energetickej bilancie rezervoárového prostredia potom pri akceptovaní definície $TTP_{(p)}$ v rezervoári ostáva najmenej rovnaké množstvo geotermálnej energie, než aké je aktívne odoberané zo systému, čo znižuje energetické dopady produkcie na stabilitu dynamických rezervoárových procesov, fázovú stabilitu, energetickú interakciu medzi lokalitami zapojenými do produkcie, a znižuje riziko významného ochladenia produkčných zón
 - **veľmi udržateľná produkcia** vyjadruje stav, pri ktorom miera aktuálneho využívania / produkcie geotermálnej energie nepresahuje 25 % pravdepodobného tepelno-energetického potenciálu. Z pohľadu rezervoárového inžinierstva ide o produkciu s nízkym alebo veľmi nízkym rizikom dlhodobého energetického výkonu rezervoárového prostredia a nízkym, alebo veľmi nízkym rizikom z pohľadu dynamických zmien v rezervoárovom prostredí alebo zmien vo fázovej stabilite parnej frakcie. Podobne nízke až veľmi nízke je riziko prieniku studeného frontu a ochladenia presahujúceho 10 % iniciálnych podmienok, zároveň však pre produkciu vyjadrenú $r_{cap(U)} > 0,75$ platí možnosť zdvojnásobenia aktuálneho výkonu, alebo zdvojnásobenia doby produkcie bez ohrozenia udržateľnosti produkcie s ohľadom na udržateľnú kapacitu rezervoáru.

Následne **kritická udržateľná kapacita rezervoárového prostredia** $P_{th(S)}$ (MWt) vyjadruje množstvo geotermálnej energie, ktoré je možné z rezervoárového prostredia pri jeho geologických a geotermických parametroch odoberať bez ohrozenia teplotných, tepelných, dynamických a fázových pomerov pri nízkom riziku chyby odhadu a energetickej depletácie /2.18/:

$$P_{th(S)} = 0,5.TTP_{(p)} = 0,5 \cdot \left[\frac{(P50(H_T)) \cdot R0}{t_{prod}} \right] = 0,5 \cdot P50 \left(\frac{H_0}{t_{prod}} \right) \quad /6.17/.$$

6.2.2.3 Udržateľnosť maximálnej produkcie geotermálnej energie

Udržateľnosť maximálnej produkcie geotermálnej energie je zameraná na hodnotenie jej odberu v prípade, ak by všetky vrty vzťahované na dané rezervoárové prostredie pracovali pri maximálnom, t.j. inštalovanom výkone /6.18/. Zo vzťahu vyplýva, že koeficient $r_{cap(U^*)}$ hodnotí podiel energie naďalej prítomnej v rezervoári pri jeho maximálnej produkcii vo vzťahu k jeho energetickému potenciálu na kritickej hladine odhadu (Tabuľka 6.2). Koeficient $r_{cap(U^*)}$ podľa /2.19/ je možné preto charakterizovať ako **koeficient kapacity zásob geotermálnej energie pri maximálnej produkcii rezervoárového prostredia** (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024):

$$r_{cap(U^*)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,inst}}{TTP_{(p)}} = \frac{TTP_{(p)} - \sum_{i=1}^n P_{th,inst(i)}}{TTP_{(p)}} = \frac{P50(H_0 / t_{prod}) - \sum_{i=1}^n P_{th,inst(i)}}{P50(H_0 / t_{prod})} \quad /6.18/.$$

6.2.2.4 Udržateľnosť rozvoja aktuálnej produkcie geotermálnej energie

Substitúciou kriticky udržateľnej rezervoárovej kapacity /6.17/ namiesto bilančnej energetickej bázy $TTP_{(p)}$ do výrazu /6.16/ je vyjadrený **koeficient perspektivity udržateľného rozvoja aktuálnej produkcie** (geotermálnej energie) $r_{cap(S)}$ /6.19/. Definuje pomer odberu geotermálnej energie voči udržateľnej rezervoárovej kapacite, o ktorý je ešte možné zväčšiť aktuálnu produkciu geotermálnej energie z konkrétneho rezervoárového prostredia, čo je mierou perspektivity útvarov geotermálnych vôd:

$$r_{cap(S)} = \frac{P_{th(S)} - P_{th,ref}}{P_{th(S)}} = \frac{(0,5.TTP_{(p)}) - \sum_{i=1}^n P_{th,ref(i)}}{0,5.TTP_{(p)}} = \frac{0,5[P50(H_0 / t_{prod})] - \sum_{i=1}^n P_{th,ref(i)}}{0,5[P50(H_0 / t_{prod})]} \quad /6.19/.$$

Tabuľka 6.2 Klasifikačná schéma hodnotenia udržateľnosti produkcie geotermálnej energie pri inštalovanom výkone

interval r_{cap}	definícia produkcie	charakteristika produkcie
$r_{cap(U^*)} < 0$	určite neudržateľný výkon	IV prekračuje odhad pravdepodobného potenciálu
$r_{cap(U^*)} = 0 - 0,49$	neudržateľný výkon	IV dosahuje odhad pravdepodobného potenciálu
$r_{cap(U^*)} = 0,5 - 0,74$	udržateľný výkon	IV nepresahuje 50 % pravdepodobného potenciálu
$r_{cap(U^*)} = 0,75 - 1,0$	určite udržateľný výkon	IV nepresahuje 25 % pravdepodobného potenciálu

Klasifikačná schéma (Tabuľka 6.3) definuje perspektívnosť rozvoja produkcie geotermálnej energie z pohľadu zachovania jej udržateľnej kapacity. Vo všeobecnosti môže byť ako perspektívny útvar označený len ten, v ktorom existuje priestor pre rozvoj produkcie geotermálnej energie, ktorý nepresiahne jeho udržateľnú rezervoárovú kapacitu:

- **neperspektívny a neudržateľný rozvoj produkcie geotermálnej energie** znamená, že pri aktuálnej produkcii nie je možné zvyšovať odber geotermálnej energie z rezervoárového prostredia bez toho, aby nedochádzalo k významnému zvýšeniu rizika energetickej depletácie
 - ak $r_{cap(S)} < 0$ potom $r_{cap(U)} \leq 0,5$, čo znamená, že doporučenou stratégiou v danom rezervoárovom prostredí je obmedzenie produkcie, nie jej zvyšovanie
 - ak $r_{cap(S)} \in < -1 ; 0 >$ potom $r_{cap(U)} \in < 0 ; 0,5 >$ a akékoľvek zvyšovanie produkcie vedie nevyhnutne k zvyšovaniu rizika energetickej depletácie, respektíve dynamických zmien v rezervoári, ako aj k zvyšovaniu rizika nominálneho udržania produkcie
 - $r_{cap(S)} < -1$ potom $r_{cap(U)} \leq 0$, a teda pri výrazne depletačnej produkcii by akékoľvek zvyšovanie tepelno-energetického výkonu rezervoáru nevyhnutne prešlo do vysokého pásma rizika s dlhodobými, a častokrát nezvratnými zmenami rezervoárovej dynamiky alebo fázovej povahy
- **málo perspektívny a udržateľný rozvoj produkcie** znamená, že s ohľadom na udržateľnú rezervoárovú kapacitu je k dispozícii menej ako 50 % jej množstva na ďalšie zvyšovanie produkcie, či zvyšovaním $P_{th,ref}$ na existujúcich lokalitách, alebo inštaláciou nových vrtov, t.j. $r_{cap(U)} < 0,75$. Preto rozvoj produkcie je možné realizovať pri nízkom riziku pre energetickú kapacitu rezervoáru, nominálnu produkciu geotermálnej energie, alebo fázovú stabilitu

Tabuľka 6.3 Klasifikačná schéma hodnotenia perspektivity rozvoja aktuálnej produkcie geotermálnej energie

interval r_{cap}	definícia rozvoja produkcie	charakteristika rozvoja produkcie
$r_{cap(S)} < 0$	neudržateľný, neperspektívny	stredné až vysoké riziko energetickej depletácie
$r_{cap(S)} = 0 - 0,49$	málo perspektívny, udržateľný	nízke riziko energetickej depletácie
$r_{cap(S)} = 0,5 - 0,74$	perspektívny, udržateľný	minimálne riziko energetickej depletácie
$r_{cap(S)} = 0,75 - 1,0$	veľmi perspektívny, udržateľný	bez rizika depletácie

- **perspektívny udržateľný rozvoj produkcie** vyjadruje stav, pri ktorom je na ďalšie zvyšovanie v rezervoárovom prostredí prítomných 50 – 75 % udržateľných zásob geotermálnej energie, pričom $r_{cap(U)} < 0,9$. Preto každé zvyšovanie produkcie geotermálnej energie, a to zvyšovaním aktuálneho (referenčného) výkonu alebo inštalácia nových geotermálnych vrtov až na úroveň kritickej udržateľnej rezervoárovej kapacity prináša nízke alebo veľmi nízke riziko energetickej depletácie a zmeny rezervoárovej dynamiky, respektíve fázovej povahy
- **veľmi perspektívny udržateľný rozvoj produkcie** vyjadruje možnosti rezervoárového prostredia zvyšovať produkciu geotermálnej energie o viac ako 75 % udržateľných zásob (udržateľnej rezervoárovej kapacity) geotermálnej energie, pričom počiatočné riziko prakticky neexistuje vzhľadom na vysoké $r_{cap(U)} > 0,9$, a každé navýšenie produkcie po úroveň udržateľnej rezervoárovej kapacity zvyšuje riziko zmien v rezervoárovom prostredí minimálne, respektíve na prijateľnej úrovni.

Potom **udržateľný potenciál rozvoja aktuálnej produkcie** /6.20/ $P_{th(D)}$ (MWt) je možné definovať ako „množstvo geotermálnej energie, ktoré je dostupné pre ďalší rozvoj pri zachovaní súčasného stavu jej využívania s perspektívou jeho dlhodobej udržateľnosti a nízkeho rizika pre energetickú bilanciu a kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia“ s vysokou hladinou pravdepodobnosti overenia: $P(P_{th(D)}) > P50(H_0/t_{prod})$:

$$P_{th(D)} = P_{th(S)} - P_{th,ref} = 0,5 \cdot TTP_{(P)} - P_{th,ref} = 0,5 \cdot \left[P50 \left(\frac{H_0}{t_{prod}} \right) \right] - [Q_{act} \cdot c_{wh} \cdot (T_{wh} - T_{ref})] \quad /6.20/$$

6.2.2.5 Udržateľnosť rozvoja inštalovaného výkonu

Perspektívnosť rozvoja produkcie je hodnotená z pohľadu inštalovaného výkonu prostredníctvom koeficientu $r_{\text{cap}(S^*)}$ – **koeficientu perspektivity udržateľného rozvoja inštalovaného výkonu** (=maximálnej produkcie) /6.21/. Substitúciou $P_{\text{th,inst}}$ namiesto $P_{\text{th,ref}}$ vo vzťahu je možné hodnotiť podiel stále dostupnej geotermálnej energie, o ktorý je možné zvýšiť produkciu geotermálnej energie z rezervoárového prostredia, ak všetky lokality pracujú s nominálnym, t.j. maximálnym – inštalovaným výkonom. Ide o potenciál rozvoja geotermálnej energie bez ohľadu na sezónnosť rozkolísania priemerovaných aktuálnych mesačných alebo ročných tepelných výkonov. Z tohto pohľadu je $r_{\text{cap}(S^*)}$ parametrom reálnej perspektivity rezervoárových prostredí z pohľadu rozvoja geotermálnej energie, čo sa premieta aj do klasifikačnej stupnice v Tabuľke 6.4 (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024):

$$r_{\text{cap}(S^*)} = \frac{P_{\text{th}(S)} - P_{\text{th,inst}}}{P_{\text{th}(S)}} = \frac{(0,5 \cdot TTP_{(P)}) - \sum_{i=1}^n P_{\text{th,inst}(i)}}{0,5 \cdot TTP_{(P)}} = \frac{0,5 \left[P50(H_0 / t_{\text{prod}}) \right] - \sum_{i=1}^n P_{\text{th,inst}(i)}}{0,5 \left[P50(H_0 / t_{\text{prod}}) \right]} \quad /6.21/.$$

Dosadením inštalovaného výkonu do vzťahu /6.20/ je možné vyjadriť **udržateľný potenciál rozvoja inštalovaného výkonu** $P_{\text{th}(D^*)}$ /6.22/ ako „množstvo geotermálnej energie, ktoré je dostupné pre ďalší rozvoj pri predpoklade maximálnej produkcie súčasných geotermálnych vrtov s perspektívou jeho dlhodobej udržateľnosti a nízkeho rizika pre energetickú bilanciu a kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia“ s vysokou hladinou pravdepodobnosti overenia a produkcie:

$$P_{\text{th}(D^*)} = P_{\text{th}(S)} - P_{\text{th,inst}} = 0,5 \cdot TTP_{(P)} - P_{\text{th,inst}} = 0,5 \cdot \left[P50 \left(\frac{H_0}{t_{\text{prod}}} \right) \right] - \left[Q_{\text{pv}} \cdot c_{\text{wh}} \cdot (T_{\text{wh}} - T_{\text{ref}}) \right] \quad /6.22/.$$

Tabuľka 6.4 Klasifikačná schéma hodnotenia perspektivity udržateľného rozvoja inštalovaného výkonu

interval r_{cap}	definícia rozvoja produkcie	charakteristika rozvoja produkcie
$r_{\text{cap}(S^*)} < 0$	neudržateľný, neperspektívny	vysoké riziko energetickej depletácie
$r_{\text{cap}(S^*)} = 0 - 0,49$	málo perspektívny, udržateľný	nízke riziko energetickej depletácie
$r_{\text{cap}(S^*)} = 0,5 - 0,74$	perspektívny, udržateľný	minimálne riziko energetickej depletácie
$r_{\text{cap}(S^*)} = 0,75 - 1,0$	veľmi perspektívny, udržateľný	bez rizika depletácie

6.2.2.6 Celkový udržateľný potenciál zdrojov geotermálnej energie

Interpretácie pravdepodobnostného modelu McKelveyovej schémy sú v kalibrovanom modeli realizované samostatne pre jednotlivé útvary geotermálnych vôd. Preto aj vyjadrenia odhadov jednotlivých koeficientov udržateľnosti, alebo nominálnych tried udržateľnej energetickej kapacity a energetického potenciálu sú vyjadrované per-partes. V snahe stanoviť **celkový udržateľný tepelno-energetický potenciál zdrojov geotermálnej energie $TTP_{(S)}$** (MWt) všetkých útvarov geotermálnych vôd na Slovensku jeho definícia: „*množstvo geotermálnej energie útvarov geotermálnych vôd na Slovensku, ktoré je možné produkovať udržateľne a s minimálnym rizikom deplecie zdrojov geotermálnej energie počas danej bilančnej doby produkcie pri zachovaní nízkeho rizika odhadu a overenia*“ podmieňuje jeho matematický zápis ako jednoduchý aritmetický súčet kritickej udržateľnej kapacity jednotlivých rezervoárových prostredí. Z pohľadu pravdepodobnostných modelov a ich konštrukcie je nevyhnutné počítať s pravdepodobnosťou ich overenia nižšou ako 70 % /6.23/ (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024):

$$TTP_{(S)} = \sum_{i=1}^n P_{th(S),i} = \sum_{i=1}^n [0,5.TTP_{(p),i}] = \sum_{i=1}^n \left[0,5.P50 \left(\frac{H_{(0),i}}{t_{prod}} \right) \right] \quad /2.23/.$$

Zároveň pre celkový udržateľný potenciál zdrojov geotermálnej energie platí:

- definícia je pravdivá len pre model aritmetického súčtu, ktorý predpokladá (ako všetky diskrétné, aritmetické modely) spojitosť a koreláciu medzi jednotlivými útvarmi, preto ju nie je možné aplikovať na nelineárne a nerovnomerné metódy sčítavania
- v absolútnych hodnotách zodpovedá udržateľný potenciál zdrojov geotermálnej energie 50 % pravdepodobného tepelno-energetického potenciálu
- stanovený potenciál hodnotí bilančnú udržateľnosť rezervoárového prostredia = stav a energetický výkon, pri ktorom aspoň rovnaké množstvo geotermálnej energie, jej statickej aj dynamickej zložky, ostane v rezervoári, ako je produkované
- v budúcnosti, pri pokračovaní projektu bude potrebné analyzovať aj obnoviteľnosť a obnovovaciu kapacitu rezervoárového prostredia, ktorá kladie dôraz práve na dynamickú zložku geotermálnej energie v rezervoári, t.j. čistý geotermálny potenciál mal byť kombináciou udržateľného (výrazný vplyv statickej zložky) a obnoviteľného (výrazný vplyv dynamickej zložky) energetického potenciálu.

PRÍKLAD 6.2: Výpočet a hodnotenie udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa bilančných koeficientov

ZADANIE: Z pravdepodobnostného modelu odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľnej rezervoárovej kapacity pre Liptovskú kotlinu vyplýva pravdepodobnostný tepelno-energetický potenciál $TTP(p) = 164$ MWt pre 40 ročnú a $TTP(p) = 66$ MWt pre 100 ročnú produkciu. Inštalovaný výkon všetkých aktívnych vrtov predstavuje 22 MWt, referenčný výkon zodpovedá úrovni 11,5 MWt. Za predpokladu, že bilančné a produkčné parametre ostanú zachované, vyjadrite:

- koeficienty udržateľnosti aktuálnej produkcie a inštalovaného výkonu $r_{cap(U)}$ a $r_{cap(U^*)}$
- koeficient perspektivity udržateľného rozvoja aktuálneho výkonu $r_{cap(S)}$ a inštalovaného výkonu $r_{cap(S^*)}$
- kritickú udržateľnú kapacitu rezervoároveho prostredia $P_{th(S)}$
- udržateľný potenciál rozvoja aktuálneho výkonu $P_{th(D)}$
- udržateľný potenciál rozvoja inštalovaného výkonu $P_{th(D^*)}$
- charakterizujte triedy udržateľnosti a perspektivity podľa stanovených koeficientov
- stanovte pre danú produkciu región citlivosti a rizikovosti na zodpovedajúcich mapách (Obr. 6.1 a 6.2)
- stanovte pre danú produkciu triedu perspektivity (6.2.4, Obr. 3)
- stanovte riziko udržateľnosti rozvoja produkcie geotermálnej energie

RIEŠENIE: základom hodnotenia je vyjadrenie kľúčových indikátorov udržateľnosti a perspektivity podľa zodpovedajúcich koeficientov, a ich následná interpretácia (body a až e):

$$r_{cap(U,40)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{164 - 11,5}{164} = 0,93$$

$$r_{cap(U,100)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{66 - 11,5}{66} = 0,82 \quad r_{cap(U^*,100)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,inst}}{TTP_{(p)}} = \frac{66 - 22}{66} = 0,67$$

$$P_{th(S,100)} = 0,5 \cdot TTP_{(p)} = 0,5 \cdot 66 = 33 \text{ MWt}$$

$$P_{th(D,100)} = P_{th(S)} - P_{th,ref} = 33 - 11,5 = 21,5 \text{ MWt}$$

$$P_{th(D^*,100)} = P_{th(S)} - P_{th,inst} = 33 - 22 = 11 \text{ MWt}$$

$$r_{cap(S)} = \frac{P_{th(S)} - P_{th,ref}}{P_{th(S)}} = \frac{33 - 11,5}{33} = 0,64 \quad r_{cap(S^*)} = \frac{P_{th(S)} - P_{th,inst}}{P_{th(S)}} = \frac{33 - 22}{33} = 0,33$$

f) aktuálny stav produkcie a manažmentu rezervoáru je možné charakterizovať vzhľadom na dlhodobú produkciu (100 rokov) geotermálnej energie ako:

- veľmi udržateľná produkcia; $r_{cap(U,100)} = 0,93$
- udržateľný výkon; $r_{cap(U^*,100)} = 0,67$
- perspektívny, udržateľný rozvoj aktuálnej produkcie; $r_{cap(S,100)} = 0,64$
- málo perspektívny, udržateľný rozvoj inštal. Výkonu; $r_{cap(S^*,100)} = 0,33$

g) región citlivosti: I (dlhodobo udržateľná produkcia), región rizikovosti Ia (nízke riziko dlhodobej udržateľnosti aktuálnej produkcie)

h) podľa parametrov $r_{cap(U,40)}$, $r_{cap(U,100)}$ a $r_{cap(S^*,100)}$ zodpovedá trieda perspektivity so súradnicami [5,5,1] triede B (udržateľne produkované a perspektívne útvary geotermálnych vôd)

i) podľa tabuľky 6.7 zodpovedá triede B mierne riziko udržateľnosti rozvoja produkcie geotermálnej energie nad hranicu inštalovaného výkonu

ZÁVER: pri aktuálnom stave je možné Liptovskú kotlinu označiť ako útvary geotermálnych vôd produkovaný vo veľmi udržateľnom režime, s perspektivou ďalšieho rozvoja produkcie s možnosťou doplnenia 11 MWt pri zachovaní mierneho rizika negatívneho dopadu rezervoárovej odozvy, avšak s odporúčaním dôsledného a komplexného aplikovania rezervoároveho monitoringu a jeho interpretácií.

6.2.3 Mapovacie schémy citlivosti a udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie

Mapovacie schémy citlivosti a udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie boli navrhnuté pre nekalibrovaný (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020C) a kalibrovaný (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024) model odhadu udržateľnej energetickej kapacity na Slovensku. Vychádzajú z porovnávania jednoduchých kvantitatívnych parametrov v závislosti na hodnotení koeficientov udržateľnosti a perspektivity.

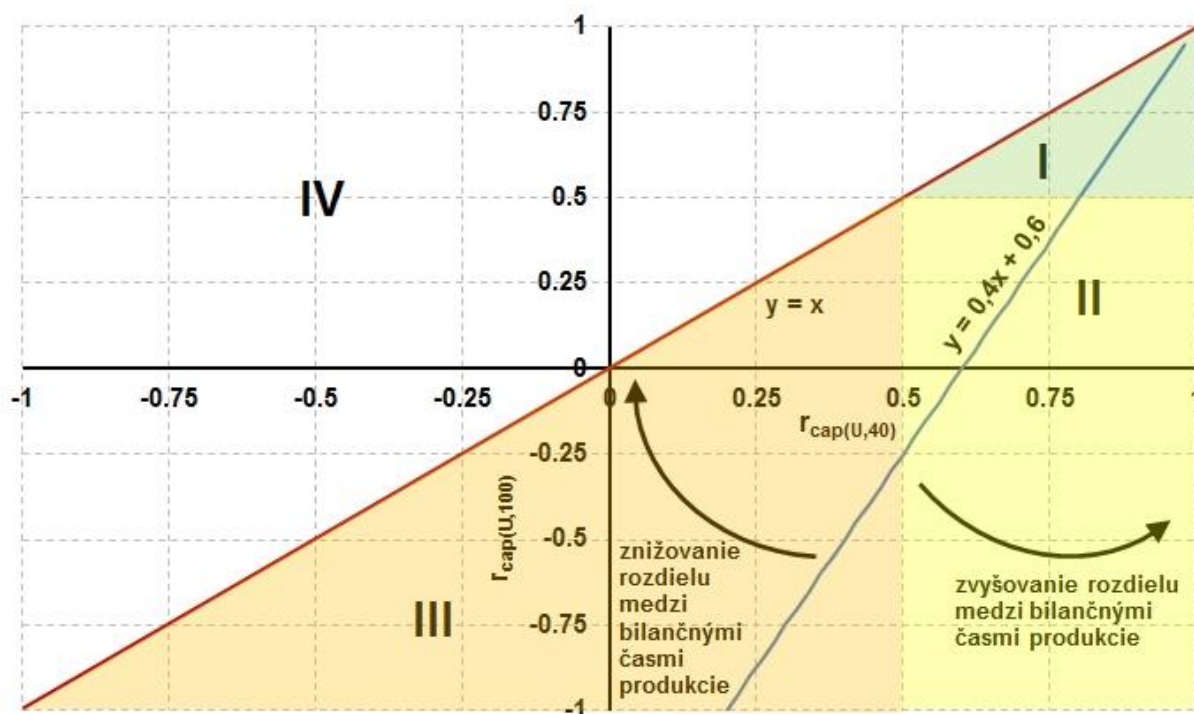
6.2.3.1 Mapa citlivosti udržateľnosti produkcie geotermálnej energie

Mapa citlivosti (Obr. 6.1) pri hodnotení udržateľnosti produkcie geotermálnej energie je založená na vzťahoch koeficientu kapacity zásob aktuálnej produkcie geotermálnej energie $r_{\text{cap}(U)}$ takzvaného krátkodobého horizontu produkcie $t_{\text{prod}} = 40$ rokov – $r_{\text{cap}(U,40)}$, a dlhodobého = udržateľného horizontu produkcie $t_{\text{prod}} = 100$ rokov – $r_{\text{cap}(U,100)}$. Výhodou mapy je možnosť porovnávania ľubovoľných produkčných časových horizontov pri vykreslení $r_{\text{cap}(U,t_1,t_2)}$ na os [X] respektíve [Y], alebo odhadov vývoja budúcej produkcie. Pre zvolené časové intervaly odhadovanej produkcie geotermálnej energie platí:

- ak je udržateľnosť produkcie geotermálnej energie dlhodobá, recipročne a automaticky platí, že rovnaká produkcia bude udržateľná aj pre kratší časový horizont
- rizikovosť neudržateľnej produkcie sa zvyšuje s predlžovaním odhadovaného času produkcie.

Samotná mapa citlivosti udržateľnosti produkcie geotermálnej energie vymedzuje 4 regióny s ich jednoznačnými charakteristikami, ktoré vychádzajú z rezervoárových procesov a rezervoárovej dynamiky, ktoré je možné očakávať v prípade rôznych spôsobov produkcie zdrojov geotermálnej energie vzhľadom na energetickú kapacitu rezervoáru:

- **región I – dlhodobo udržateľná produkcia:** definuje **krátkodobu a dlhodobo udržateľné útvary geotermálnych vôd**, pre ktoré platí $r_{\text{cap}(U,100)} \geq 0,5$ a zároveň $r_{\text{cap}(U,40)} \geq 0,5$. Riziko dlhodobého využívania zdrojov geotermálnej energie v týchto štruktúrnych jednotkách je hodnotené ako nízke ak $r_{\text{cap}(U,100)} \geq 0,75$ až mierne pre $r_{\text{cap}(U,100)} = 0,5 - 0,75$. Zároveň sú v tomto regióne definované všetky štruktúrne jednotky, ktoré aktuálne využívané nie sú, a teda kde platí $r_{\text{cap}(U,100)} = r_{\text{cap}(U,40)} = 1$



Obrázok 6.1 Mapa citlivosti udržateľnosti produkcie geotermálnej energie pre časový horizont 40/100 rokov

- **región II – krátkodobo udržateľná produkcia:** definuje **dlhodobu neudržateľné útvary geotermálnych vôd**, keďže $r_{\text{cap}(U,100)} < 0,5$, ktoré sú ale **z pohľadu krátkodobej produkcie hodnotené ako udržateľné** $r_{\text{cap}(U,40)} \geq 0,5$. Keďže krátkodobá udržateľnosť produkcie sa zvyšuje s narastajúcim $r_{\text{cap}(U,40)}$, vytvára to priestor pre optimalizovanie a plánovanie produkcie geotermálnej energie, ako aj optimalizáciu monitoringu s cieľom identifikovať možné, nastupujúce prejavy rezervoárovej depletácie. Zároveň je tak otvorený priestor pre kalibráciu a overenie výsledkov existujúcich bilančných modelov za účelom prehodnotenia, alebo zníženia rizika znehodnotenia rezervoáru jeho excesívnou produkciou.
- **región III – neudržateľná produkcia:** pokrýva **neudržateľné útvary geotermálnych vôd**, bez ohľadu na zvolenú časovú škálu. Pre ÚGV platí $r_{\text{cap}(U,40, 100)} < 0,5$ pre oba časové rady platí $P_{\text{th,ref}} > P_{\text{th}(S)}$. Pre útvary geotermálnych vôd platí zvýšené až vysoké riziko energetickej depletácie aj pri krátkodobom produkovani rezervoárového prostredia. Riziko je vysoké aj napriek zdanlivej udržateľnosti tlakových podmienok definovaných, napríklad, hydrodynamickými skúškami. Rizikovosť produkcie samozrejme stúpa s poklesom $r_{\text{cap}(U)}$ a posúvaním sa útvarov geotermálnych vôd alebo scenárov produkcie diagonálne k ľavému dolnému okraju

- **región IV – nelogické hodnoty:** slúži ako kontrolná skúška, nakoľko presahuje jednotkové funkcie $y = x$, pričom ako z matematického, tak aj rezervoárového hľadiska nie je možné, aby bola produkcia zdrojov geotermálnej energie udržateľná dlhodobo a neudržateľná krátkodobo, respektíve naopak.

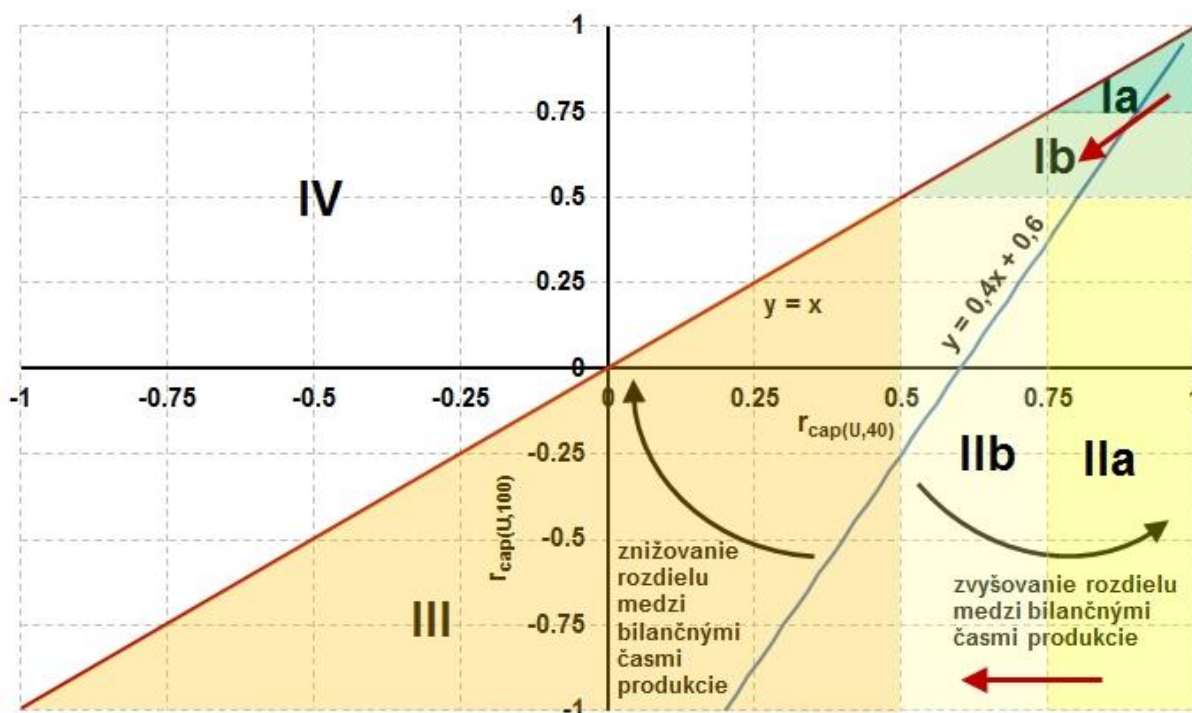
6.2.3.2 Mapa rizikovosti udržateľnosti produkcie geotermálnej energie

Mapa rizikovosti udržateľnosti produkcie geotermálnej energie (Obrázok 6.2) vznikla modifikáciou mapy citlivosti udržateľnosti produkcie geotermálnej energie s cieľom graficky vykresliť rizikovosť aktuálneho stavu produkcie geotermálnej energie. Preto pozíčne môžu byť útvary geotermálnych vôd, eventuálne scenáre produkcie, vykreslené v niektorých z vymedzených (a empiricky definovaných) regiónov:

- **región Ia – nízke riziko dlhodobej udržateľnosti** - definuje okrajová podmienka $r_{cap(U,100)} > 0,75$, ktorá zodpovedá definícii a opisu veľmi udržateľnej produkcie geotermálnej energie. Útvary geotermálnej energie zobrazené v tomto regióne majú nízke, respektíve veľmi nízke riziko ohrozenia energetickej bilancie rezervoáru. Ako vyplýva z predchádzajúcich bilančných hodnotení, aj pre dlhodobý horizont produkcie existuje stále potenciál ďalšieho rozvoja produkcie geotermálnej energie bez ohrozenia udržateľnej rezervoárovej kapacity.
- **región Ib – mierne riziko dlhodobej udržateľnosti** - charakterizuje nízke až mierne riziko dlhodobej udržateľnosti aktuálnej produkcie, podľa $r_{cap(U,100)} \in < 0,5 ; 0,75 >$, pričom z dlhodobej perspektívy jeho miera klesá s poklesom $r_{cap(U,100)}$. Mieru rizika krátkodobej udržateľnosti je možné stále charakterizovať ako veľmi nízku až nízku. Pozícia ÚGV v tomto regióne preto zodpovedá udržateľnej produkcii geotermálnej energie. Nízka až nízka-stredná, v závislosti na $r_{cap(U,100)}$ je aj hladina rizika overenia a produkcie s $P_{th,ref} \in < P70(H_0/t_{prod}) ; P85(H_0/t_{prod}) >$. Región Ib z dlhodobej perspektívy preto charakterizuje útvary geotermálnych vôd, ktorých dlhodobá produkcia môže viesť k parciálnym zmenám v rezervoárovom prostredí, prípadne k tolerovateľnému ochladeniu rezervoárového prostredia na hranici bilančnej doby produkcie, ale prakticky vylučuje dlhodobé, alebo nezvratné zmeny v rezervoárovej dynamike
- **región IIa – nízke riziko krátkodobej udržateľnosti** - lokalizuje ÚGV, ktorých kumulatívna produkcia presahuje dlhodobú udržateľnú energetickú kapacitu rezervoáru. Z pohľadu rizikovosti krátkodobej produkcie platí charakteristika veľmi

udržateľnej produkcie a opisu regiónu Ia. Z pohľadu dlhodobej rizikovosti je pozícia ÚGV v regióne IIa hodnotená ako mierna až stredná, keďže $r_{\text{cap}(U,100)} \in < 0 ; 0,5 >$, a pravdepodobnosť dlhodobých alebo nezvratných zmien v rezervoárovom prostredí narastá s limitným približovaním $r_{\text{cap}(U,100)} \approx 0$. Je možné predpokladať, že rezervoárový manažment a monitoring sú schopné odhaliť iniciálne štádiá zmien v rezervoárovom prostredí a optimalizácia produkcie a produkčnej siete môže jeho dlhodobé zmeny zároveň odvrátiť

- **región IIb – mierne riziko krátkodobej udržateľnosti** – združuje útvary geotermálnych vôd, pre ktoré platia z pohľadu krátkodobej udržateľnosti rovnaké charakteristiky udržateľnosti, ako v regióne Ib pre dlhodobú udržateľnosť, respektíve charakteristiky tzv. udržateľnej produkcie pre $r_{\text{cap}(U,40)} \in < 0,5 ; 0,75 >$. Z pohľadu dlhodobej udržateľnosti však v závislosti na energetickej bilancii rezervoárového prostredia je dlhodobá produkcia geotermálnej energie depletačná, respektíve veľmi depletačná, s príslušnými dôsledkami rizika
- **región III – neudržateľná produkcia** – predstavuje, podobne ako na mape citlivosti (Obr. 6.1), oblasť charakterizujúcu vysoké až veľmi vysoké riziko pre dlhodobú, a v závislosti na $r_{\text{cap}(U)}$ aj krátkodobú produkciu geotermálnej energie



Obrázok 6.2 Mapa rizikovosti udržateľnosti produkcie geotermálnej energie pre časový horizont 40/100 rokov

6.2.3.3 Časové rady na mapách citlivosti a rizikovosti udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie

Možnosť vykresľovať na mapách citlivosti pozície útvarov geotermálnych vôd za jednotlivé hodnotené obdobia (napr. roky, ev. mesiace) poskytuje podklady pre hodnotenie rizikovosti rezervoárového manažmentu daného rezervoárového prostredia. Jednotlivé pozície je možné opísať nasledovne:

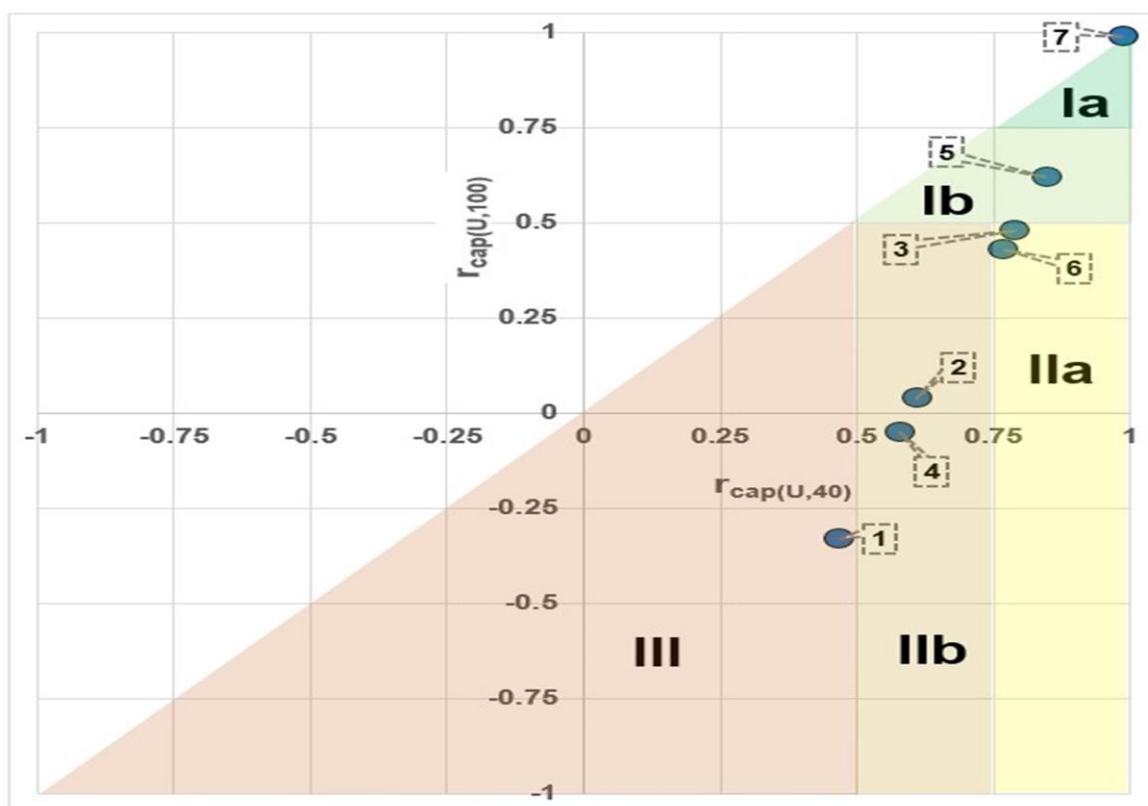
- *oscilácia časových radov alebo ich prekryvanie v regióne I respektíve Ia a Ib* – stabilný a udržateľný rezervoárový manažment s nízkym rizikom ohrozenia dlhodobou udržateľnej produkcie
- *diagonálny postup po ose [Y] v regióne I respektíve medzi regiónmi Ia a Ib* – znižovanie rizika dlhodobou udržateľnej produkcie a negatívnej rezervoárovej odozvy na produkciu spojený s možnosťou dosiahnutia úrovne produkcie na hranici obnoviteľnej produkcie
- *diagonálny pokles po ose [Y] v regióne I respektíve medzi regiónmi Ia a Ib* – zvyšovanie rizika dlhodobou udržateľnej produkcie s približovaním sa aktuálnej produkcie geotermálnej energie dlhodobou udržateľnej rezervoárovej kapacity $P_{th(S)}$
- *oscilácia časových radov medzi regiónmi I a II* – v závislosti na miere variability $r_{cap(U)}$ a časovými rozstupmi v oscilácii pravdepodobne redukcia rizika energetickej deplecie rezervoáru, pri zvýšenom riziku ochladzovania produkčných zón alebo energetickej a termodynamickej interakcie medzi lokalitami, s rezervoárovou odozvou podobnou prejavom pri cyklickom utlmovaní a prevyšovaní produkcie
- *oscilácia časových radov medzi regiónmi I a III* - v závislosti na miere variability $r_{cap(U)}$ a časovými rozstupmi v oscilácii pravdepodobne spomalenie depletačného rezervoárového manažmentu pri stále strednom až vysokom riziku dlhodobých alebo trvalých zmien kvalitatívnych alebo kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia, pravdepodobne od druhého až tretieho kvartálu dizajnovanej doby produkcie
- *diagonálny pokles po ose [Y] v regióne I respektíve medzi regiónmi I a III* – postupné zvyšovanie rizika dlhodobou udržateľnej produkcie v závislosti na poklese $r_{cap(U)}$ a zrejmy nástup energetického prečerpávania rezervoárového prostredia, pričom oddialenie účinkov deplecie je závislé na trvaní udržateľného rezervoárového manažmentu a predchádzajúcej hladiny $r_{cap(U)}$

- *diagonálny postup po ose [Y] medzi regiónmi III a II* – pravdepodobne spomaľovanie dôsledkov predchádzajúcej depletačnej fázy rezervoárového manažmentu a produkcie geotermálnej energie v závislosti na zmenách $r_{cap(U)}$ a trvaní depletačného až veľmi depletačného rezervoárového manažmentu s pretrvávajúcim miernym až vysokým rizikom dlhodobých zmien v rezervoárovom prostredí podľa jeho energetickej bilancie
- *diagonálny postup po ose [Y] medzi regiónmi III a I* – pravdepodobne utlmovanie dôsledkov predchádzajúcej depletačnej fázy rezervoárového manažmentu a produkcie geotermálnej energie v závislosti na zmenách $r_{cap(U)}$ a trvaní depletačného až veľmi depletačného rezervoárového manažmentu s pretrvávajúcim miernym až nízkym rizikom krátkodobých až dlhodobých zmien v kvalitatívnych a kvantitatívnych parametroch rezervoárového prostredia
- *oscilácia časových radov alebo ich prekryvanie v regióne III* – v závislosti na energetickej kapacite rezervoárového prostredia a jeho nešpecifikovanej obnoviteľnej kapacite, ako aj hladine $r_{cap(U)}$ v regióne III zrejmy depletačný manažment vyžadujúci okamžité zásahy pre minimalizovanie, alebo zmenšenie rizika energetickej depletácie a dlhodobých, respektíve nezvratných zmien v rezervoárovej dynamike a jeho kvalitatívnych a kvantitatívnych parametroch.

Pri hodnotení časových radov, alebo vykresľovaní pozície útvarov geotermálnych vôd na jednotlivé mapové schémy je potrebné zvážiť:

- pri zvažovaní vývoja časových radov pre jednotlivé rezervoárové prostredia je nevyhnutné analyzovať rad aspoň 10 ročných meraní preto, aby bolo možné analyzovať trendy a možné vplyvy na rezervoárové prostredie (na ročnej, alebo mesačnej báze)
- časové rady je nevyhnutné očistiť o krátkodobé a lokálne extrémne podoby, ako pri analýzach regresných korelácií
- trendy interpretované na základe časových radov na bilančnom diagrame nemôžu nahradiť (a nevedia nahradiť) výsledky dôsledného monitorovania a modelovania rezervoárovej odozvy na základe realizovaného monitoringu podľa princípov prezentovaných v časti 4.3
- pozície jednotlivých útvarov sa nevyhnutne musia meniť s tým, ako sa so spresňovaním pravdepodobnostných modelov odhadu bude upravovať ich celková, a teda aj udržateľná rezervoárová kapacita

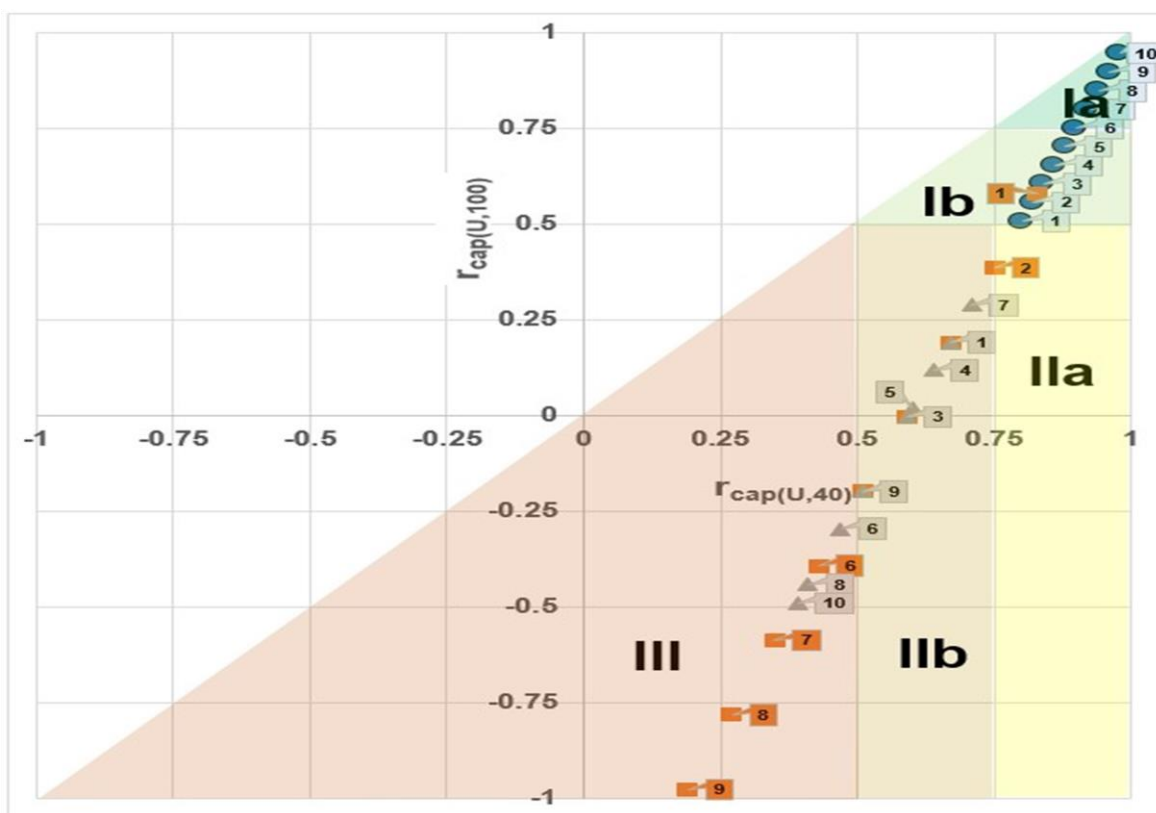
PRÍKLAD 6.3: Interpretovanie mapy citlivosti udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa výsledkov nekalibrovaného modelu pravdepodobnostného odhadu udržateľnej rezervoárovej kapacity. Upravené podľa: Fričovský et al. (2020c), Marcin et al. (2020)



ZADANIE: v rámci pilotného, nekalibrovaného pravdepodobnostného modelu odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľnej rezervoárovej kapacity bolo klasifikovaných všetkých 31 ÚGV vzhľadom na stav ich využívania k roku 2019. Medzi nimi Piešťanský záliv (1), Iľavská kotlina (2), Skorušinská panva (3), Zvolenská kotlina (4), Liptovská kotlina (5), Levická kryha (6) a Humenský chrbát (7). Podľa vzťahu /6.16/ bol koeficient udržateľnosti aktuálnej produkcie počítaný pre referenčný priemerný ročný výkon všetkých vrtov produkujúcich geotermálnu energiu v rámci útvaru voči pravdepodobnému tepelno-energetickému potenciálu.

INTERPRETÁCIA: Príkladová mapa citlivosti je zámerne redukovaná na niekoľko útvarov geotermálnych vôd vzhľadom na ich pozíciu v jednotlivých regiónoch citlivosti. Ako príklad neudržateľného využívania geotermálnej energie bol klasifikovaný ÚGV Piešťanský záliv (1), ktorý v danom období produkoval geotermálne vody len v rámci kúpeľného areálu, avšak extrémnym príkladom so súradnicami $r_{cap}(U,40/1000) = [-1,93; -6,13]$ (nezobrazený v schéme) bola aj Komárňanský vysoká kryha s lokalitami Obid, Štúrovo, Komárno a Virt. Na základe interpretácie mapy citlivosti je v týchto útvaroch odporúčané dôsledne monitorovať rezervoárovú odozvu a ďalší rozvoj produkcie geotermálnej energie by mal byť podmienený spoľahlivými modelmi a dôslednou kontrolou s cieľom minimalizovať negatívne vplyvy produkcie. Naopak, v Liptovskej kotline (5) sú využívané lokality Bešeňová, Liptovský Trnovec, Liptovský Ján, Lúčky, Kalameny, pritom je vzhľadom na aktuálne produkované množstvá geotermálnej energie a jeho energetickú bilanciáciu útvary geotermálnych vôd možné považovať za dlhodobu udržateľne využívanú s miernym rizikom negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy. To umožňuje ďalší rozvoj produkcie geotermálnej energie až na hranicu $r_{cap}(U,100)=0,5$, avšak monitoring geotermálnych vôd je nevyhnutný pre včasnú identifikáciu nezvratných zmien v rezervoárovom prostredí. Humenský chrbát (7) s lokalitou Kaluža, je príkladom pozície v regióne Ia (dlhodobu udržateľné využívanie s nízkym rizikom), kde nie je pri súčasnom stave predpoklad výrazných rezervoárových zmien a rezervoárovej dynamiky.

PRÍKLAD 6.4: Charakteristika citlivosti a rizikovosti dlhodobej produkcie geotermálnej energie z rezervoárového prostredia



ZADANIE: Mapa rizikovosti vykresľuje tri rôzne scenáre produkcie (označené rôznymi symbolmi) v desiatich sledovaných časových obdobiach (označené číslami 1 až 10). V takejto konfigurácii môže byť mapa využitá pre sledovanie a odhad reakcií rezervoáru na dlhodobú produkciu, prípadne na predikciu amplitúdy (intenzity) rezervoárovej odozvy na dlhodobú produkciu.

INTERPRETÁCIA: Pre prehľadnosť budú jednotlivé scenáre interpretované samostatne, hoci ich spoločným znakom je organizácia záznamov $r_{cap}(U,40,100)$ na funkčnej diagonále, ktorá vyplýva zo vzťahu medzi krátkodobým a dlhodobým horizontom produkcie, ktorý je použitý pre energetickú bilanciu rezervoárového prostredia.

- scenár 1 (modré krúžky) je charakteristickým záznamom postupnej zmeny rizikovosti dlhodobej produkcie geotermálnej energie, keďže časové údaje prechádzajú z regiónu Ib do regiónu Ia, napríklad pre krokové znížovanie produkcie geotermálnej energie, čo môže postupne viesť k oddiaľovaniu negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy a predlžovaniu doby samotnej produkcie, aj nad rámec bilancovaných 100 rokov
- scenár 2 (oranžové štvorce) je príkladom opačným, kedy poukazuje na prechod medzi dlhodobou udržateľnou (Ib; 1), krátkodobou udržateľnou (IIa, IIb, 2-5) a neudržateľnou (III, 6-10) rezervoárovým manažmentom, dôsledkom čoho prudko narastá riziko negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy a urýchlenie zmien v rezervoárovom prostredí kontinutálne v čase – logickým odporúčaním by bolo okamžité znížovanie, alebo utlmenie produkcie, vzhľadom na výsledky (najmä) termochemickeho a geotermometrického monitoringu
- scenár 3 (sivé trojuholníky) je záznamom oscilácie medzi krátkodobou udržateľnou a neudržateľnou manažmentom, pričom rezervoárová odozva môže byť (vzhľadom na osciláciu) pomalšia, ako v scenári 2, na základe energetickej bilancie je ale možné očakávať zmeny (aj nezvratné) v rezervoárovom prostredí za čas výrazne kratší, ako je bilancovaná doba dlhodobej produkcie 100 rokov.

6.2.4 3D klasifikačná schéma perspektivity zdrojov geotermálnej energie

Klasifikačná schéma perspektivity zdrojov geotermálnej energie bola navrhnutá pre špecifické potreby národných stratégií rozvoja a udržiavania produkcie geotermálnej energie na Slovensku ako pre potreby verejnej správy a autorít, tak aj pre potreby budúcich alebo aj súčasných súkromných investorov s cieľom sprehľadnenia stavu útvarov geotermálnych vôd a možných rizík v rámci toho-ktorého územia. Bola navrhnutá v rámci geologickej úlohy „Analýza možností trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku – I. časť“ (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024), s perspektívou jej ďalšieho zverejňovania a kontinuálnej aktualizácie v printovej aj digitálnej podobe.

Klasifikačná schéma je založená na vzájomnom vzťahu parametra $r_{\text{cap}(U)}$ pre krátkodobý a dlhodobý výhľad produkcie, a potenciálu rozvoja inštalovaného výkonu $r_{\text{cap}(S^*)}$ pre $t_{\text{prod}} = 100$ rokov. Z pohľadu koncepcie TURP umožňuje prehodnotiť ako citlivosť udržateľnosti produkcie pri rôznych časových škálach, tak potenciál zvyšovať tepelný výkon útvarov geotermálnych vôd nad hranicu aktuálneho inštalovaného výkonu, ktorý zodpovedá limitom udržateľnej rezervoárovej kapacity.

Grafickým zobrazením klasifikačnej stupnice (Obr. 6.3) je súradnicový systém $[X,Y,Z] = [5 \times 5 \times 2]$. Horizontálne rozhranie $[X,Y]$ vyjadruje vzťah $r_{\text{cap}(U)}$ pre krátkodobý a dlhodobý horizont produkcie, os $[Z]$ znázorňuje $r_{\text{cap}(S^*)}$ pre $t_{\text{prod}} = 100$ rokov. Spoločným znakom osí $[X]$ a $[Y]$ je priradenie $r_{\text{cap}(U,40)}$ a $r_{\text{cap}(U,100)}$ do piatich rovnakých tried podľa kľúča zohľadňujúceho aj kvalitatívnu charakteristiku útvarov geotermálnych vôd na základe vzťahu ich energetickej bilancie a aktuálnej produkcie (Tabuľka 6.1; časť 6.2.2.2):

- $x = 1 ; y = 1$ pre $r_{\text{cap}(U)} \in (-\infty ; 0 > ;$ útvary s kriticky depletačnou produkciou
- $x = 2 ; y = 2$ pre $r_{\text{cap}(U)} \in (0 ; 0,4 > ;$ útvary s depletačnou produkciou
- $x = 3 ; y = 3$ pre $r_{\text{cap}(U)} \in (0,4 ; 0,6 > ;$ útvary na hranici udržateľnej produkcie (v tomto prípade rozsah $r_{\text{cap}(U)} = 0,4$ až $0,6$ zohľadňuje možné chyby odhadu so strednou hodnotou $r_{\text{cap}(U)} = 0,5$ vyjadrujúcou kritickú hranicu udržateľnej produkcie)
- $x = 4 ; y = 4$ pre $r_{\text{cap}(U)} \in (0,6 ; 0,75 > ;$ útvary s udržateľnou produkciou
- $x = 5 ; y = 5$ pre $r_{\text{cap}(U)} \in (0,75 ; 1 > ;$ útvary s veľmi udržateľnou produkciou, alebo bez produkcie ($r_{\text{cap}(U)} = 1$).

Pre súradnicu osi [Z] je použitá 3-stupňová škála intervalov vypočítaného $r_{cap}(S^*)$ pre čas produkcie $t_{prod} = 100$ rokov podľa nasledovného kľúča:

- $z = 0$; pre $r_{cap}(S^*) \in < -\infty ; 0 >$; útvary bez možnosti udržateľného rozvoja inštalovaného výkonu
- $z = 1$; pre $r_{cap}(S^*) \in < 0 ; 0,5 >$; útvary s otáznym rozvojom inštalovaného výkonu vzhľadom na energetickú bilanciu
- $z = 2$; pre $r_{cap}(S^*) \in < 0,5 ; 1 >$; potenciálne útvary s možnosťou rozvoja inštalovaného výkonu na úroveň udržateľnej kapacity s minimálnym rizikom ohrozenia dlhodobej udržateľnosti.

V takomto systéme je potom každá trieda definovaná svojimi hranicami v bodoch ortogonálnej siete A – B respektíve A – D, z ktorých každý má svoje presné súradnice [X,Y,Z] na báze a A' – B' respektíve A' – D' so súradnicami [X,Y,Z] na strope, pričom vo väčšine prípadov platí $A = A'$, $B = B'$, $C = C'$ a $D = D'$, keďže väčšina tried je definovaná len jednou súradnicou [Z].

Základnými parametrami 3D klasifikačnej schémy udržateľnosti a perspektivity útvarov geotermálnych vôd, ktoré vyplývajú zo samotných využitých bilančných hodnotení, sú:

- udržateľnosť produkcie
- perspektivita rozvoja produkcie a inštalovaného výkonu
- riziko udržateľnosti dlhodobej produkcie
- riziko udržateľného rozvoja produkcie

Za **udržateľne produkované útvary geotermálnych vôd** sú považované tie, „ktorých aktuálna produkcia geotermálnej energie nie je vyššia, ako modelmi stanovená kritická udržateľná kapacita rezervoárového prostredia pre bilančnú dobu produkcie aspoň 100 rokov“. Z definície a interpretačných postupov ďalej vyplýva:

- $r_{cap}(U,40,100) > 0,5 \rightarrow P_{th,ref} \leq P_{th(S)}$ pre $t_{prod} = 100$ rokov
- riziko overenia a produkcie: nízke až veľmi nízke: $P_{th,ref} < P75(H_0/t_{prod}) \rightarrow P(P_{th,ref}) > P75(H_0/t_{prod})$
- riziko zmien v rezervoárovom prostredí: nízke až mierne, stúpajúce so znižovaním $r_{cap}(U)$

Recipročne, za **neudržateľne produkované útvary geotermálnych vôd** sú považované tie, „ktorých aktuálna produkcia geotermálnej energie prekračuje modelmi stanovenú kritickú udržateľnú kapacitu rezervoárového prostredia pre bilančnú dobu produkcie aspoň 100 rokov“. Z definície vyplýva, že ako neudržateľne produkované útvary geotermálnych vôd sú označené aj tie, ktorých $r_{\text{cap}(U,40)} > 0,5$, a teda:

- $r_{\text{cap}(U,100)} < 0,5 \rightarrow P_{\text{th,ref}} \geq P_{\text{th}(S)}$ pre $t_{\text{prod}} = 100$ rokov
- $r_{\text{cap}(U,40)} > 0,5 \rightarrow P_{\text{th,ref}} \leq P_{\text{th}(S)}$ pre $t_{\text{prod}} = 40$ rokov
- riziko zmien v rezervoárovom prostredí: mierne až vysoké podľa $r_{\text{cap}(U,100)}$.

Za **perspektívne útvary geotermálnych vôd** sú definované tie, „ktorých inštalovaný výkon nepresahuje modelmi stanovenú kritickú udržateľnú kapacitu rezervoárového prostredia pre bilančnú dobu produkcie aspoň 100 rokov, a ktorých udržateľný potenciál rozvoja inštalovaného výkonu je nenulový“. Z definície vyplýva:

- perspektívne útvary geotermálnych vôd sú vždy udržateľné, keďže $P_{\text{th,inst}} \leq P_{\text{th,ref}}$ a teda ak $r_{\text{cap}(S^*)} > 0$, potom $r_{\text{cap}(U,100)} > 0,5$, čiže zároveň platí $P_{\text{th}(D)} > 0$ a zároveň $P_{\text{th}(D^*)} > 0$
- nie všetky udržateľné útvary sú zároveň perspektívne, ak $r_{\text{cap}(S^*)} > 0$, potom $P_{\text{th,inst}} \leq P_{\text{th}(S)}$
- riziko zmien v rezervoárovom prostredí: nízke až mierne, podľa hladiny $r_{\text{cap}(S^*)}$.

Neperspektívne útvary geotermálnych vôd sú tie, „ktorých inštalovaný výkon presahuje modelmi stanovenú kritickú udržateľnú kapacitu rezervoárového prostredia pre bilančnú dobu produkcie aspoň 100 rokov, a pri ktorých zároveň nemôžeme hovoriť o možnosti udržateľného rozvoja aktuálneho inštalovaného výkonu“, čiže::

- neperspektívne útvary sú zároveň neudržateľné, ak $P_{\text{th,inst}} \geq P_{\text{th,ref}} > P_{\text{th}(S)}$
- neperspektívne útvary sú udržateľné, ak $P_{\text{th,inst}} \geq P_{\text{th,ref}}$ a $P_{\text{th,inst}} \leq P_{\text{th}(S)}$ a teda $r_{\text{cap}(S^*)} \leq 0$ a $r_{\text{cap}(U,100)} > 0,5$; riziko overenia a ďalšej produkcie stúpa s poklesom $r_{\text{cap}(S^*)}$
- každý ďalší rozvoj produkcie geotermálnej energie nad hodnotu inštalovaného výkonu a pri maximálnej produkcii rezervoárového prostredia nevyhnutne zvýši riziko dlhodobých alebo nezvratných zmien rezervoárového prostredia
- v prípade maximálnej produkcie je odporúčané cyklicky utlmiť produkciu pre spomalenie rezervoárovej odozvy, respektíve realizovať kroky na minimalizáciu účinkov energetickej depletácie.

Riziko, že rezervoárové prostredie bude schopné produkovať dané množstvo geotermálnej energie v zmysle udržateľnej produkcie, t.j. pri zachovaní iniciálnych alebo pseudo-iniciálnych rezervoárových podmienok a bez zmien v rezervoárovej dynamike, chemickom zložení geotermálnych vôd, distribúcii koncových členov transportu tepla alebo stability fázových pomerov parnej frakcie, je hodnotené na základe koeficientu $r_{cap(U,100)}$ ako **riziko udržateľnosti**:

- nízke riziko: $r_{cap(U,100)} \in < 0,6 ; 1 >$
- mierne riziko: $r_{cap(U,100)} \in < 0,4 ; 0,59 >$
- vysoké riziko: $r_{cap(U,100)} \in < -\infty ; 0,39 >$.

Riziko, že rezervoárové prostredie bude schopné produkovať geotermálnu energiu až na úroveň inštalovaného výkonu v zmysle udržateľného rezervoárového manažmentu, t.j. pri zachovaní iniciálnych alebo pseudo-iniciálnych rezervoárových podmienok a bez zmien v rezervoárovej dynamike, chemickom zložení geotermálnych vôd, distribúcii koncových členov transportu tepla alebo stability fázových pomerov parnej frakcie, je hodnotené na základe koeficientu $r_{cap(S^*)}$ ako **riziko udržateľného rozvoja produkcie**:

- nízke riziko: $r_{cap(S^*)} \in < 0,5 ; 1 >$
- mierne riziko: $r_{cap(S^*)} \in < 0 ; 0,49 >$
- vysoké riziko: $r_{cap(S^*)} \in < -\infty ; 0 >$.

Na základe konštrukcie klasifikačnej schémy perspektivity útvarov geotermálnych vôd (Tabuľka 6.6) vyplýva 8 klasifikačných tried (A – H) a región bez logických hodnôt definovaný súradnicovou pozíciou, ktorý je na mapách citlivosti (Obr. 6.1) a rizikovosti (Obr. 6.2) vyjadrený regiónom IV (Obrázok 6.3):

$$\begin{matrix} A & B \\ C & D \end{matrix} = \begin{bmatrix} [3,1,0] & [5,1,0] \\ [3,3,0] & [3,5,0] \end{bmatrix} \wedge \begin{matrix} A' & B' \\ C' & D' \end{matrix} = \begin{bmatrix} [3,1,2] & [5,1,2] \\ [3,3,2] & [3,5,2] \end{bmatrix}$$

- **trieda H: neudržateľne produkované a neperspektívne útvary geotermálnych vôd**
- pokrýva jednotky, ktoré nie sú udržateľné ani z krátkodobého, ani dlhodobého hľadiska, v ktorých nie je možnosť akéhokoľvek rozvíjania produkcie nad rámec inštalovaného výkonu v súlade s koncepciou trvalo udržateľnej rezervoárovej

produkcie. Trieda je v schéme definovaná nasledovne: $r_{\text{cap}(U,40)} < 0,4$; $r_{\text{cap}(U,100)} < 0$, a $r_{\text{cap}(S^*)} < 0$. Rozsah definuje pozície $[X] \in < 1 ; 2 >$, $[Y] \in < 1 ; 2 >$, $[Z] = 0$

$$\begin{array}{cc} A & B \\ C & D \end{array} = \begin{array}{cc} [1,1,0] & [2,1,0] \\ [1,2,0] & [2,2,0] \end{array}$$

- **trieda G: neudržateľne produkované a neperspektívne útvary geotermálnych vôd**
- pokrýva jednotky, ktoré nie sú udržateľne produkované z dlhodobého hľadiska, a ktorých krátkodobá udržateľnosť je pravdepodobná, respektíve riziková, s ohľadom na $r_{\text{cap}(U,40)}$. Zároveň ide o útvary geotermálnych vôd, ktoré sú neperspektívne. Trieda je v schéme definovaná nasledovne: $r_{\text{cap}(U,40)} \in < 0,4 ; 0,6 >$; $r_{\text{cap}(U,100)} \in < -\infty ; 0,4 >$; $r_{\text{cap}(S^*)} \leq 0$. Rozsah definuje pozície $[X] \in < 1 ; 2 >$, $[Y] = 3$, $[Z] = 0$:

$$A \quad B = [1,3,0] \quad [2,3,0]$$

- **trieda F: neudržateľne produkované a neperspektívne útvary geotermálnych vôd**
- pokrýva jednotky, ktoré nie sú udržateľne produkované z dlhodobého hľadiska, avšak s vysokou pravdepodobnosťou sú udržateľne krátkodobo, s ohľadom na $r_{\text{cap}(U,40)}$. Zároveň ide o útvary geotermálnych vôd, ktoré sú neperspektívne. Trieda je v schéme definovaná nasledovne: $r_{\text{cap}(U,40)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{\text{cap}(U,100)} \in < -\infty ; 0,4 >$; $r_{\text{cap}(S^*)} \leq 0$; a jej rozsah definuje pozície $[X] \in < 1 ; 2 >$, $[Y] \in < 4 ; 5 >$, $[Z] = 0$:

$$\begin{array}{cc} A & B \\ C & D \end{array} = \begin{array}{cc} [1,4,0] & [2,4,0] \\ [1,5,0] & [2,5,0] \end{array}$$

- **trieda E: udržateľne produkované a neperspektívne útvary geotermálnych vôd** - združuje jednotky, ktoré sú aktuálne pravdepodobne udržateľne produkované z dlhodobého, a teda aj krátkodobého hľadiska, pri zohľadnení rizika chyby odhadu a rizika pre udržateľný rezervoárový manažment, a ktoré sú zároveň neperspektívne z pohľadu rozširovania produkcie geotermálnej energie nad hranice inštalovaného výkonu. Trieda je v schéme definovaná parametrami: $r_{\text{cap}(U,40)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{\text{cap}(U,100)} \in < 0,4 ; 0,6 >$; $r_{\text{cap}(S^*)} \leq 0$; s pozíciou: $[X] = 3$, $[Y] \in < 4 ; 5 >$, $[Z] = 0$:

$$A \quad B = [3,4,0] \quad [3,5,0]$$

- **trieda D: udržateľne produkované a perspektívne útvary geotermálnych vôd** - združuje jednotky, ktoré sú aktuálne pravdepodobne udržateľne produkované z dlhodobého, a teda aj krátkodobého hľadiska, pri zohľadnení rizika chyby odhadu a rizika pre udržateľný rezervoárový manažment, a v ktorých rozširovanie produkcie geotermálnej energie nad úroveň inštalovaného výkonu je obmedzené z pohľadu pomeru medzi udržateľnou rezervoárovou kapacitou a inštalovaným výkonom. Triedu definujú ukazovatele: $r_{\text{cap}(U,40)} \in < 0,4 ; 0,6 >$; $r_{\text{cap}(U,100)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{\text{cap}(S^*)} \in < 0 ; 0,5 >$, s pozíciou v schéme $[X] = 3$, $[Y] = < 4 ; 5 >$, $[Z] = 1$:

$$A \quad B = \begin{bmatrix} 3,4,1 \\ 3,5,1 \end{bmatrix}$$

- **trieda C: udržateľne produkované a neperspektívne útvary geotermálnych vôd** - združuje jednotky, ktoré sú aktuálne udržateľne produkované z dlhodobého, a teda aj krátkodobého hľadiska, s nízkym rizikom chyby odhadu a nízkym rizikom pre udržateľný rezervoárový manažment, ale ktorých úroveň inštalovaného výkonu prevyšuje udržateľnú rezervoárovú kapacitu prostredia a každé ďalší rozvoj inštalovaného výkonu by viedol k významnému ohrozeniu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoáru. Triedu definujú: $r_{\text{cap}(U,40)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{\text{cap}(U,100)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{\text{cap}(S^*)} < 0$ a pozícia v súradnicovom systéme $[X] \in < 4 ; 5 >$, $[Y] \in < 4 ; 5 >$, $[Z] = 0$:

$$\begin{matrix} A & B \\ C & D \end{matrix} = \begin{bmatrix} 4,4,0 \\ 4,5,0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 5,4,0 \\ 5,5,0 \end{bmatrix}$$

- **trieda B: udržateľne produkované a perspektívne útvary geotermálnych vôd** - združuje jednotky, ktoré sú aktuálne udržateľne produkované z dlhodobého, a teda aj krátkodobého hľadiska, nízkym až veľmi-nízkym rizikom chyby odhadu a pre udržateľný rezervoárový manažment, a v ktorých rozširovanie produkcie geotermálnej energie nad úroveň inštalovaného výkonu je obmedzené z pohľadu pomeru medzi udržateľnou rezervoárovou kapacitou a inštalovaným výkonom. Trieda je charakterizovaná parametrami $r_{\text{cap}(U,40)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{\text{cap}(U,100)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{\text{cap}(S^*)} \in < 0 ; 0,5 >$ a pozíciou $[X] \in < 4 ; 5 >$, $[Y] \in < 4 ; 5 >$, $[Z] = 1$:

$$\begin{matrix} A & B \\ C & D \end{matrix} = \begin{bmatrix} 4,4,1 \\ 4,5,1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 5,4,1 \\ 5,5,1 \end{bmatrix}$$

Tabuľka 6.6 Odporúčania rezervoárového manažmentu vyplývajúce z charakteristiky tried perspektivity – časť A. Upravené podľa: Fričovský et al. (2024)

trieda A	trieda B	trieda C	trieda D
• prehodnocovať a rekalibrovať bilančné modely odhadu zdrojov a zásob GTE v prípade zásadných zmien v primárnych vstupných podkladoch, realizovať analýzu rizika • overovanie a zvyšovanie produkcie geotermálnej energie nad hranicu $P_{th,inst}$ musí byť sprevádzané interferenčnými skúškami medzi lokalitami, a pri postupnom poklese pod $r_{cap(S^*)} = 0,5$ aj komplexným monitoringom rezervoárového prostredia s cieľom identifikovať indikátory prienikov frontov rezervoárovej odozvy • optimalizovať energetickú a tepelnú účinnosť produkcie geotermálnej energie na základe mapovania termodynamickej kvality s cieľom zvýšiť energetickú produkciu ($P_{th,act}$) pri zachovaní referenčného množstva geotermálnej energie odoberanej zo systému ($P_{th,ref}$) • v prípade indícií dlhodobo negatívnej rezervoárovej odozvy na produkciu vzhľadom na mierne riziko je odporúčaný prechod k stratégii krokového znižovania produkcie	• prehodnocovať a rekalibrovať bilančné modely odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie v prípade zásadných zmien v primárnych vstupných podkladoch, realizovať analýzu rizika • overovanie a zvyšovanie produkcie geotermálnej energie nad hranicu $P_{th,inst}$ podporiť komplexným monitoringom (teplota, chemické zloženie, rezervoárová entalpia, saturačné stavy definičných minerálnych fáz, index entalpického stavu rezervoáru, viazanosť a frakčný podiel parnej fázy) s cieľom identifikovať indikátory zmien v rezervoárovom prostredí a už pri súčasnej produkcii geotermálnej energie, ako sa $r_{cap(U)}$ bude približovať hladine 0,5 • optimalizovať energetickú a tepelnú účinnosť produkcie geotermálnej energie na základe mapovania termodynamickej kvality • v prípade indícií dlhodobo negatívnej rezervoárovej odozvy prechod k stratégii krokového znižovania produkcie	• overovanie a zvyšovanie produkcie GTE nie je odporúčané, kým relevantnými modelmi nedôjde k zmene energetickej bilancie a preklasifikovaniu • dôsledný rezervoárový monitoring (teplota, chemické zloženie, rezervoárová entalpia, saturačné stavy definičných minerálnych fáz, index entalpického stavu rezervoáru, viazanosť a frakčný podiel parnej fázy) s cieľom identifikovať indikátory zmien v rezervoárovom prostredí a indikátory prienikov frontov rezervoárovej odozvy • optimalizovať energetickú a tepelnú účinnosť produkcie geotermálnej energie na základe mapovania termodynamickej kvality • v prípade indícií dlhodobo negatívnej rezervoárovej odozvy na produkciu vzhľadom na nízke riziko je odporúčaný prechod k stratégii krokového znižovania produkcie • zvyšovanie produkcie geotermálnej energie je možné len v intervale $P_{th(D)} \in < P_{th,ref} ; P_{th(S)} >$	• dôrazne je odporúčané prehodnotiť a rekalibrovať podkladové bilančné modely vrátane analýzy citlivosti s cieľom potvrdiť aktuálnu klasifikáciu alebo preklasifikovanie • overovanie a zvyšovanie produkcie geotermálnej energie nad hranicu inštalovaného výkonu musí sprevádzať komplexný rezervoárový monitoring (teplota, chemické zloženie, rezervoárová entalpia, saturačné stavy definičných minerálnych fáz, index entalpického stavu rezervoáru, viazanosť a frakčný podiel parnej fázy) s cieľom identifikovať indikátory zmien v rezervoárovom prostredí a jeho kvalitatívnych a indikátory prienikov frontov rezervoárovej odozvy už pri súčasnej produkcii • odporúča sa za optimalizovať energetickú a tepelnú účinnosť produkcie geotermálnej energie na základe mapovania termodynamickej kvality • v prípade indícií negatívnej rezervoárovej odozvy je odporúčaný prechod k stratégii krokového znižovania produkcie

Tabuľka 6.6 Odporúčania rezervoárového manažmentu vyplývajúce z charakteristiky tried perspektivity – časť B. Upravené podľa: Fričovský et al. (2024)

trieda E	trieda F	trieda G	trieda H
• prehodnotiť a rekalibrovať podkladové modely vrátane analýzy citlivosti s cieľom potvrdiť aktuálnu klasifikáciu alebo preklasifikovanie • overovanie a zvyšovanie produkcie GTE nie je odporúčané, kým relevantnými modelmi nedôjde k zmene energetickej bilancie, ktorá by umožnila preklasifikovanie ÚGV • odporúčaný je dôsledný rezervoárový monitoring (teplota, chemické zloženie, rezervoárová entalpia, saturačné stavy definičných minerálnych fáz, index entalpického stavu rezervoáru, viazanosť a frakčný podiel parnej fázy) s cieľom identifikovať indikátory zmien v rezervoárovom prostredí a indikátory prienikov frontov rezervoárovej odozvy • optimalizovať energetickú a tepelnú účinnosť produkcie geotermálnej energie na základe mapovania termodynamickej kvality • v prípade indícií dlhodobo negatívnej rezervoárovej odozvy na produkciu vzhľadom na mierne riziko je odporúčaný prechod k stratégii krokového znižovania produkcie	• zvyšovanie produkcie geotermálnej energie nie je odporúčané, kým relevantnými modelmi nedôjde k zmene energetickej bilancie, ktorá by umožnila preklasifikovanie ÚGV • odporúčaný je dôsledný rezervoárový monitoring (teplota, chemické zloženie, rezervoárová entalpia, saturačné stavy definičných minerálnych fáz, index entalpického stavu rezervoáru, viazanosť a frakčný podiel parnej fázy) s cieľom sledovať indikátory zmien v rezervoárovom prostredí a indikátory prienikov frontov rezervoárovej odozvy • odporúča sa optimalizovať tepelnú (termodynamickú) účinnosť a parametrické ukazovatele produkcie • odporúča sa optimalizovať produkčný režim do manažmentu cyklického utlmovania alebo krokového znižovania produkcie, kým nedôjde k zmene energetickej bilancie a prehodnoteniu klasifikácie útvaru geotermálnych vôd, alebo kým nebude dlhodobým monitoringom, interpretáciami a modelovaním preukázaný len krátkodobý vplyv depletácie na rezervoárové parametre	• zvyšovanie produkcie geotermálnej energie nie je odporúčané, kým relevantnými modelmi nedôjde k zmene energetickej bilancie, ktorá by umožnila preklasifikovanie ÚGV • odporúčaný je dôsledný rezervoárový monitoring (teplota, chemické zloženie, rezervoárová entalpia, saturačné stavy definičných minerálnych fáz, index entalpického stavu rezervoáru, viazanosť a frakčný podiel parnej fázy) s cieľom identifikovať indikátory zmien v rezervoárovom prostredí a indikátory prienikov frontov rezervoárovej odozvy • odporúča sa optimalizovať tepelnú a termodynamickú účinnosť, alebo parametrické ukazovatele produkcie • odporúča sa optimalizovať produkčný režim do manažmentu cyklického utlmovania kým nedôjde k zmene energetickej bilancie a prehodnoteniu klasifikácie útvaru geotermálnych vôd, alebo kým nebude dlhodobým monitoringom, interpretáciami a modelovaním preukázaný len krátkodobý vplyv depletácie na rezervoárové parametre	• ďalšie a zvyšovanie produkcie geotermálnej energie nie je odporúčané, kým relevantnými modelmi nedôjde k zmene energetickej bilancie, ktorá by umožnila preklasifikovanie ÚGV • odporúčaný je dôsledný rezervoárový monitoring (teplota, chemické zloženie, rezervoárová entalpia, saturačné stavy definičných minerálnych fáz, index entalpického stavu rezervoáru, viazanosť a frakčný podiel parnej fázy) s cieľom identifikovať indikátory zmien v rezervoárovom prostredí a indikátory prienikov frontov rezervoárovej odozvy • na pravidelnej báze realizovať interferenčné skúšky medzi lokalitami • optimalizovať produkciu geotermálnych vôd a optimalizovať tepelnú a termodynamickú účinnosť aj parametrické ukazovatele produkcie • odporúča sa optimalizovať produkčný režim do manažmentu cyklického utlmovania, prípadne cyklického uzavretia, za účelom oddiaľovania alebo utlmovania prejavov rezervoárovej odozvy na depletačný manažment rezervoárového prostredia

Tabuľka 6.7 Charakteristiky tried 3D klasifikácie perspektivity zdrojov geotermálnej energie. Upravené podľa: Fričovský et al. (2024)

charakteristika parametra	charakteristika triedy udržateľnosti produkcie a rozvoja produkcie							
	A	B	C	D	E	F	G	H
charakteristika udržateľnosti	udržateľné	udržateľné	udržateľné	udržateľné	udržateľné	neudržateľné	neudržateľné	neudržateľné
perspektivita rozvoja	perspektívne	perspektívne	neperspektívne	perspektívne	neperspektívne	neperspektívne	neperspektívne	neperspektívne
krátkodobá udržateľnosť	áno	áno	áno	áno	áno	áno	áno	nie
riziko krátkodobej udržateľnosti	nízke	nízke	nízke	nízke	nízke	nízke	mierne	vysoké
dlhodobá udržateľnosť	áno	áno	áno	áno	áno	nie	nie	nie
riziko dlhodobej udržateľnosti	nízke	nízke	nízke	mierne	mierne	vysoké	vysoké	vysoké
potenciál rozvoja produkcie	áno	áno	nie	áno	nie	nie	nie	nie
riziko udržateľného rozvoja	nízke	mierne	vysoké	mierne	vysoké	vysoké	vysoké	vysoké
$r_{\text{cap}}(U,40)$	0,6 – 1	0,6 – 1	0,6 – 1	0,6 – 1	0,6 – 1	0,6 – 1	0,4 – 0,6	$\leq 0,4$
$r_{\text{cap}}(U,100)$	0,6 – 1	0,6 – 1	0,6 – 1	0,4 – 0,6	0,4 – 0,6	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$
$r_{\text{cap}}(S^*)$	$\geq 0,5$	0 – 0,5	≤ 0	0 – 0,5	≤ 0	≤ 0	≤ 0	≤ 0

Obrázok 6.3 Klasifikačné triedy udržateľnosti a perspektivy zdrojov geotermálnej energie

- **trieda A: udržateľne produkované a perspektívne útvary geotermálnych vôd** - združuje jednotky, ktoré sú aktuálne udržateľne produkované z dlhodobého, a teda aj krátkodobého hľadiska, nízkym až veľmi-nízkym rizikom chyby odhadu a pre udržateľný rezervoárový manažment, a v ktorých potenciál udržateľného rozšírenia inštalovaného výkonu dosahuje viac ako násobok jeho aktuálnej úrovne pri zachovaní udržateľnej rezervoárovej kapacity. Trieda je definovaná podľa $r_{cap(U,40)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{cap(U,100)} \in < 0,6 ; 1 >$; $r_{cap(S*)} \in < 0,5 ; 1 >$, a následne s parametricky identifikovanou pozíciou $[X] \in < 4 ; 5 >$, $[Y] \in < 4 ; 5 >$, $[Z] = 2$

$$\begin{array}{cc} A & B \\ C & D \end{array} = \begin{array}{cc} [4,4,2] & [5,4,2] \\ [4,5,2] & [5,5,2] \end{array}$$

7 RIZIKOVÉ FAKTORY A MANAŽMENT ÚTVAROV GEOTERMÁLNYCH VÔD

7.1 Rezervoárový manažment v špecifických prípadoch

Vzhľadom na komplexnosť zdrojov geotermálnej energie z pohľadu ich foriem výskytu, formovania, fázovej povahy, geotermických parametrov, hydraulických vlastností, termodynamických parametrov, alebo chemizmu, nie je možné špecifikovať každú jednu z možných situácií, ktoré môžu nastať. Najbližšie časti preto predstavujú heslovitý výber najpravdepodobnejších scenárov, ktoré sú očakávateľné v rámci geologického, hydrogeologického a hydrogeotermálneho prostredia rezervoárov v rámci útvarov geotermálnych vôd na Slovensku v prípade, ak:

- komplexný a súladný monitoring preukáže nástup alebo postup zmien kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia, a rezervoárového média, vrátane rezervoárovej dynamiky
- prejavy výrazných zmien v rezervoárovej dynamike a parametroch ako zdroja geotermálnej energie, tak aj rezervoárového média sú už aktuálne pozorované; alebo ak
- projekty zdrojov geotermálnej energie sú plánované na realizáciu v útvaroch geotermálnych vôd, ktoré modelmi udržateľnej rezervoárovej kapacity a mapovaním perspektivity sú definované ako neperspektívne; alebo ak
- projekty zdrojov geotermálnej energie sú v blízkosti, alebo v rámci už definovaných ochranných pásiem ^{7.1} termominerálnych zdrojov;

a riešení, ktoré môžu RCUE v prípade kompetencií alebo vyžadovať, alebo kontrolovať, pri spracovávaní, alebo posudzovaní žiadostí ako o podporu vyhľadávania nových zdrojov geotermálnej energie, tak aj otvorenia produkcie, respektíve jej rozšírenia. Cieľom tejto časti pritom nie je priniesť manuál na aplikáciu rezervoárového manažmentu, ale vytypovať kroky, ktoré by mali byť realizované alebo vyžadované v konkrétnych situáciách.

^{7.1} Zákon č. 538/2005 Z. z. Zákon o prírodných liečivých vodách, prírodných liečebných kúpeľoch, kúpeľných miestach a prírodných minerálnych vodách a o zmene a doplnení niektorých zákonov

7.1.1 Manažment pri rezervoárovej strate tlaku (produktivity)

Strata rezervoárového tlaku je jedným zo základných fenoménov, a najbežnejších, akými sa rezervoárová odozva na krátkodobú, respektíve dlhodobú produkciu, prejavuje. Príčinami straty rezervoárového tlaku môžu byť (GRANT ET AL., 1982; KJARAN – ELIASSON, 2008; CLOTWORTHY ET AL., 2010; ANDERSON – REZAIE, 2019; SOLTANI ET AL., 2021):

- **nástup odparovania**, respektíve prehrievania, pri ktorom dochádza ku zintenzívneniu adiabatického varu v rezervoárovom prostredí (ochladzovaním alebo poklesom dopĺňania rezervoárového média) a zvyšovanie podielu parnej frakcie; čo sa týka rezervoárov s dvojitou fázou, respektíve suchou geotermálnou parou; čo zároveň nie je predpokladaný prípad fázovej povahy zdrojov geotermálnej energie na Slovensku
- **strata prirodzeného dopĺňania rezervoáru** nastáva predovšetkým v situácii, kedy otvorené, alebo polo-otvorené obehové štruktúry vplyvom vonkajších faktorov, alebo extrémnou produkciou, stratia bilanciu medzi odoberanými a dopĺňanými množstvami geotermálnych vôd z infiltračnej oblasti (alebo okolia), a tým dôjde k prirodzenému poklesu rezervoárového tlaku (7.1.1.1), pričom k tomuto priradujeme aj možnosť likvidácie vlastných prístupových ciest / filtračných ciest sekundárnym vyhojením puklín alebo pórov precipitáciou minerálnych fáz priamo z média
- **vyprázdňovanie rezervoáru** je príčinou predovšetkým v prípade ako otvorených, tak aj hydrogeologicky / hydraulicky uzavretých rezervoárových prostredí, pričom samotná strata tlaku súvisí s vyčerpávaním rezervoárového média, čo spôsobuje pokles tlaku medzi rezervoárom a produkčným vrtom, a teda aj pokles produktivity, ktorú práve kontroluje gradient tlaku (7.1.1.2)
- **neefektívnosť reinjektáže** je charakteristickou príčinou poklesu tlaku v prípade, ak je produkcia optimalizovaná na rezervoárový tlak udržiavaný v kritických hraniciach reinjektážou, alebo jej kombináciou s prirodzeným dopĺňaním rezervoáru, pričom základným dôvodom je neefektivita kontroly tlaku reinjektovaným rezervoárovým médiom na periférii rezervoáru, alebo v jeho bazálnej alebo vrchnej časti (v závislosti na reinjektážnej stratégii) a teda strata reinjektovaného média mimo takzvanú efektívnu filtračnú plochu, alebo efektívny filtračný profil (7.1.1.3) do horninového prostredia, ktorého súčasťou je aj rezervoár.

7.1.1.1 Strata dopĺňania rezervoáru

Strata dopĺňania rezervoáru je proces, ktorý sa štandardne prejavuje najpomalšie z pohľadu postupného poklesu rezervoárového tlaku, pretože rezervoárové dopĺňanie nie je lineárny proces (AXELSSON, 2008A), a je prirodzeným záznamom počas monitorovania tlaku, že samotný parameter kolíše sezónne (v závislosti na hydrologickom, meteorologickom, alebo klimatickom režime oblasti, z ktorej je rezervoár dopĺňaný), ale aj v čase, keďže štandardne aj v rámci jednej rezervoárovej formácie a tranzitnej zóny je dopĺňanie realizované cez viacero rôznych efektívnych filtračných ciest (AXELSSON, 2003; HISCOCK, 2005).

Najčastejšie prejavy straty dopĺňania z monitoringu:

- oscilovanie rezervoárového tlaku so zväčšujúcou sa amplitúdou
- oscilovanie rezervoárového tlaku s poklesovým trendom (lineárny, nelineárny)
- oscilovanie rezervoárovej teploty s rastúcim trendom na úroveň teploty stacionárneho geotermického prostredia (a zároveň nárast rezervoárovej entalpie)
- nárast celkovej mineralizácie
- zmena rezervoárového chemizmu bez prejavov vybraných druhov zmiešavania ^{7.2}
- zmena termodynamicky saturenej parnej frakcie pri dvojitej fáze, ktorá sa prejavuje nárastom separovanej parnej frakcie pri prietokových meraniach
- zmena kontrolujúceho silikátového geotermometra
- zužovanie rozptylu kriviek TSI multikomponentovej geotermometrie

Základy rezervoárového manažmentu a požadovaných krokov:

- realizovanie komplexného hydrogeologického prieskumu v infiltračnej oblasti s cieľom zdokumentovať na základe archívnych a krátkodobých režimových a dokumentačných meraní
- prejsť do režimu ústupovej stratégie na lokalitách, kde sa indikácie poklesu dopĺňania začínajú prejavovať – až do výsledku hydrogeologického prieskumu
- prejsť do režimu cyklických útlmových stratégií produkcie, kde sa indikácie poklesu dopĺňania prejavujú aktívne – až do výsledku hydrogeologického prieskumu
- zvýšiť frekvenciu tlakového monitoringu a podľa možností prítokometrie vo vertikálnych profiloch vrtov

^{7.2} heterochemické / anizochemické zmiešavanie (tj ak prejavy zmiešavania sú čitateľné podľa toho, že dve zmiešavané médiá majú rozdielny chemizmus; najčastejšie nariedovanie, alebo zahusťovanie); respektíve anizotermické (ochladzovanie, zahrievanie pri zmiešavaní)

- vo frekvencii 4 – 6 x ročne realizovať multikomponentovú geotermometriu na monitorovaných objektoch
- realizovať doplnujúce stopovacie skúšky v rámci monitorovacieho systému infiltračnej oblasti, alebo medzi infiltračnou oblasťou a efektívnou produkčnou zónou
- na základe výsledkov realizovaného doplnujúceho prieskumu navrhnúť situáciu a optimalizovať pozície reinjektážnych vrtov
- v prípade hydraulicky oddelených tektonických systémov v rámci obehovej štruktúry rozšíreným geofyzikálnym prehľadom vyhľadať tektonické bloky, ktoré by boli vhodné na produkciu doplnenú reinjektážou v rámci toho istého rezervoárového systému
- do vyriešenia zastaviť povoľovacie procesy na otváranie nových produkčných vrtov.

Proces straty dopĺňania rezervoáru uzatvorením filtračných ciest rezervoárovým médium znamená, že pod vplyvom termodynamickej rovnováhy, respektíve nerovnováhy, dochádza v horninovom prostredí k precipitácii minerálnych fáz, ktorým je rezervoárové médium presýtené v prípade, ak nie je možnosť ionovýmeny na rozhraní médium – hornina (SPYCHER ET AL., 2014). K takejto precipitácii, zvyčajne kalcitových minerálov, dochádza pri strate teploty, alebo náhlom poklese tlaku, teda zvyčajne v situácii, keď je rezervoár dopĺňaný z hlbších obehových zón (KRISTMANSDÓTTIR, 2009).

Doplňujúce prejavy uzatvorenia filtračných ciest:

- pokles saturačných stavov zvyčajne kalcitových minerálov (vplyv precipitácie)
- nárast voľného CO₂ v rezervoárovom médiu
- zmena termodynamických vzťahov systému albit – adulár
- nárast saturačných stavov dolomitu a Mg-kalcitu
- oscilácia teploty produkovaného média, okolo úrovne stacionárnej teploty prostredia.

Doplňujúce, alebo preferované systémy rezervoárového manažmentu:

- navýšiť frekvenciu monitorovania všetkých dostupných objektov na 2-mesačný cyklus po dobu 1 – 2 rokov
- každý monitorovací cyklus samostatne, a v rámci časových radov následne (vrátane predchádzajúceho monitoringu) vyhodnotiť komplexne geotermometricky a termochemicky
- optimalizovať chemickú stimuláciu vo vrtov (produkčných, reinjektážnych) v prípade, ak očakávané zóny sekundárneho vyhojenia filtračných systémov môžu byť v ich efektívnom okolí.

7.1.1.2 Vyprázdňovanie rezervoáru

Vyprázdňovanie je špecifický prípad, keď nedochádza k zmene dotovania rezervoárového prostredia, ale produkcia zdrojov geotermálnej energie je väčšia, ako prítoková / hydraulická bilancia (GRANT – BIXLEY, 2011). Možností, ktorými sa vyprázdňovanie dá zachytiť chemicky, respektíve geochemicky (geotermometria), sú výrazne obmedzené na prejav tlakových pomerov v rezervoári, respektíve, pri dvojfázových zdrojov geotermálnej energie kombináciu poklesu parnej frakcie, alebo poklesu parnej frakcie a zároveň aj vodnej frakcie (KRISTMANSDÓTTIR, 2009).

Najčastejšie prejavy vyprázdňovania z monitoringu:

- zmena oscilácie rezervoárového tlaku na súvislý, respektíve zrýchľujúci sa poklesový trend záznamu
- exponenciálny nárast poklesu produktivity
- trend v zmene rezervoárovej teploty nebýva pozorovaný
- pokles parnej frakcie výrazne pomalší ako pokles vodnej zložky

Základy rezervoárového manažmentu a požadovaných krokov:

- okamžitý prechod na cyklické útlmové stratégie (ak neexistujú záložné vrty, ak existujú, len do doby ich spustenia, ak to hydraulická a rezervoárová situácia dovoľuje)
- tlakový a teplotný monitoring (profilovanie) na všetkých dokumentačných bodoch s cieľom identifikovať dosah depletačného stavu rezervoáru
- tlakové profilovanie s cieľom vymedziť preferenčné smery a zóny depletácie
- geoelektrický a gravimetrický prieskum pre identifikovanie rozsahu rezervoárovej depletácie
- v prípade priestorovo limitovanej produkcie aktivovať fill-in alebo make-up záložné vrty na okamžité zabezpečenie produkcie, ak sú v neovplyvnených produkciách
- spustiť komplexný prieskum rezervoárového prostredia pre vytýčenie nových perspektívnych produkčných zón (blokov, krýh, sekvencií atp) a umiestnenie nových záložných vrto
- pri uzavretí produkcie zintenzívniť chemický monitoring odpojených vrto pre sledovanie parametrov rezervoárového dopĺňania (termochemické modelovanie) a zmien rovnovážnych stavov minerálnych fáz vo vzťahu k iniciálnym podmienkam

7.1.1.3 Neefektívnosť reinjektáže

Neefektívnosť reinjektáže predstavuje stav, kedy nedochádza k optimalizovanému / požadovanému / plánovanému účinku na rezervoárové prostredie, teda najmä k (AXELSSON, 2008B, 2012C; AXELSSON – KRISTMANSDOTTIR, 2009; CLOTWORTHY ET AL., 2010; KAYA ET AL., 2011; SPYCHER ET AL., 2014; DIAZ ET AL., 2016; KAMILA ET AL., 2021):

- poklesu celkovej produktivity
- variabilitou produktivity parnej frakcie (pri rezervoároch s dvojitou fázou) podľa miery poklesu tlaku a odparovania
- nárastu podielu parnej frakcie (poklesom rezervoárového tlaku) a poklesu stupňa termodynamickej viazanosti parnej frakcie (pri rezervoároch s vlhkou geotermálnou parou alebo dvojitou fázou)
- poklesu rezervoárového tlaku.

Neefektívnosť reinjektáže, respektíve riziko, že k danému stavu dôjde, narastá s tým, ako sa pozícia reinjektážnych vrtov (horizontálne aj vertikálne) vzdiaľuje od produkčnej zóny, prakticky ide presne o protiklad indukovaného ochladzovania a negatívnym dôsledkom vplyvu reinjektáže na stav produkčnej zóny.

Najčastejšie prejavy neefektívnej reinjektáže z monitoringu:

- pokles rezervoárového tlaku, kvázi-exponenciálny, alebo exponenciálny s predĺženým nástupom, respektíve oscilácia rezervoárového tlaku s exponenciálnym trendom
- spontánne odparovanie, alebo spontánne prehrievanie prejavujúce sa nárastom podielu parnej frakcie v suchopárnych rezervoároch a v rezervoároch s dvojitou fázou
- strata produktivity, ktorá sa prejavuje podobne ako strata prirodzeného dopĺňania, t.j. postupná oscilácia rezervoárového tlaku a nástup poklesového trendu hodnoty, okolo ktorej tlak osciluje
- oscilácia rezervoárovej teploty so stúpajúcim trendom, respektíve trendom orientovaným k stacionárnym podmienkam rezervoáru
- pokles objemu rozpustných a voľných plynov (ktoré reinjektáž prirodzene zvyšuje)
- nárast hustoty vodnej frakcie vyvolaný nárastom celkovej mineralizácie v dôsledku odparovania
- rekalibrácia termodynamickej rovnováhy predovšetkým kalcitu a systému albit-adulár
- zmena tvaru TSI kriviek multikomponentovej geotermometrie

Základy rezervoárového manažmentu a požadovaných krokov:

- podľa možností aktivovať záložné reinjektážne vrty v bližších pozíciách a optimalizovať produkciu vzhľadom na nové pozície reinjektážnych vrtov (ak sú k dispozícii)
- dočasne zvýšiť reinjektované množstvá podľa akceptačnej kapacity rezervoárového prostredia so zapojením externých zdrojov (plytké podzemné vody, povrchové vody)
- realizácia stopovacích skúšok s cieľom identifikovať a reinterpretovať efektívne filtračné profily
- realizovať geoelektrický a gravimetrický prieskum medzi zónou reinjektáže a produkčnou zónou pre overenie pohybu hydraulického a studeného frontu
- realizovať seizmický a gravimetrický prieskum pre identifikáciu tektoniky prostredia a vyhľadanie potenciálnych reinjektážnych zón
- aktivovať frekvenčne častejší monitoring v prípade zapojenia reinjektážnych vrtov v bližších pozíciách

7.1.2 Manažment pri ochladzovaní rezervoáru

Ochladzovanie rezervoárov je rovnako typickou odpoveďou rezervoárového prostredia alebo rezervoárového média na dlhodobú produkciu, predovšetkým ak je vyvolané dôsledkom zvolenej stratégie ich exploatácie. Ochladenie najčastejšie spôsobuje: (TESTER ET AL., 2006; KJARAN – ELIASSON, 2008; GRANT – BIXLEY, 2011; JACOBO – MONTALVO, 2013; MONTEROSSA – AXELSSON, 2013)

- **prienik studeného frontu** súvisí predovšetkým s postupom zóny ochladenia z reinjektáže (7.1.2.1) alebo infiltračnej oblasti (7.1.2.2) vplyvom zmien tlakových pomerov v takzvanom efektívnom filtračnom profile, t.j. v tej časti rezervoárového prostredia, ktorá umožňuje pohyb podzemných vôd medzi zónou produkcie a jej okolím
- **prestup studeného frontu** je, napriek terminologickej podobnosti, špecifickým prípadom, kedy je teplotné, tepelné a dynamické rezervoárové prostredie ovplyvnené rýchlym zostupom podzemných (geotermálnych) vôd z plytkých rezervoárov, zvyčajne po zlomových, alebo krasových systémoch, ktoré boli aktivované zmenami tlakového režimu v zasiahnutom rezervoári (7.1.2.3), a ktoré neboli rýchlym postupom schopné vyrovnať svoje teplotné podmienky s rezervoárom, do ktorého prenikajú

- **indukovaný adiabatický var** je proces, pri ktorom dochádza vplyvom rapídneho a okamžitého poklesu tlaku k formovaniu parnej fázy (adiabatický var) pričom stratou parnej frakcie a jej únikom k povrchu, respektíve do iných plytkých rezervoároch, dochádza k prudkému chladnutiu rezervoáru (7.1.2.4)

7.1.2.1 Prienik studeného frontu z reinjektážnej oblasti

Prienik studeného frontu z reinjektážnej oblasti je najmä dôsledkom nerovnováhy medzi advektívnym ochladzovaním vtláčaním reinjektovanej geotermálnej vody a difúznym (konduktívnym, v podstate rozptýleným) zahrievaním rezervoárového prostredia; pričom najintenzívnejšie (najkratšie) prieniky sú dokumentované v puklinových rezervoároch s vysokou priepustnosťou; naopak, pomalší je v prípade, ak je prostredie kombinované konduktívno-konvektívne, respektíve konvektívne a viazané na aktívne geodynamické systémy – napríklad vulkanizmus, kde k prirodzenému konduktívnemu prírastku do rovnováhy vstupuje zároveň aj konvekcia (POULSEN ET AL., 2015; ONUR ET AL., 2016; PATTERSON ET AL., 2020).

Najčastejšie prejavy prieniku studeného frontu z reinjektáže pri monitoringu:

- postupné zintenzívňovanie oscilácie rezervoárovej teploty s prechodom k poklesovému trendu oscilácie
- exponenciálny pokles rezervoárovej teploty a teploty na ústí produkčných vrtov
- oscilácie rezervoárového tlaku s miernym, lineárnym trendom nárastu
- pokles produktivity parnej frakcie bez poklesu produktivity vodnej zložky
- krátkodobý nárast produktivity parnej frakcie s poklesom produktivity vodnej zložky
- nárast nestlačiteľných a voľných plynov v rezervoárovom médiu
- indikátory anizochemického zmiešavania – napríklad pokles Cl⁻ (ak ide o reinjektáž geotermálnej vody meteorického pôvodu) alebo nárast Cl⁻ (ak ide o reinjektáž geotermálnej vody marínogénneho pôvodu), pokles SiO₂
- postupný pokles celkovej teploty termodynamickej rovnováhy podľa multikomponentovej geotermometrie
- prechod medzi kremeňom k chalcedónu alebo chalcedónu k opálu kontrolujúcich termodynamickú rovnováhu SiO₂
- indikátory kondenzácie v rezervoári – predovšetkým zužovanie rozptylu individuálnych TSI kriviek, zrkadlenie saturačných stavov minerálnych fáz oproti iniciálnemu štádiu, najmä nárast saturačného indexu kalcitu

Základy rezervoárového manažmentu a požadovaných krokov:

- okamžitá realizácia stopovacích skúšok
- prechod na ústupové produkčné stratégie v závislosti na miere ochladzovania
- manažment reinjektážnej stratégie (úprava reinjektážnych množstiev, prechod z blízkej na vzdialenú reinjektáž, ak je to možné)
- hydrodynamické skúšky na monitorovacích a pozorovacích vrtoch v smere preniku studeného frontu pre reinterpretáciu hydraulických parametrov horninového prostredia
- teplotné profilovanie na monitorovacích, záložných a iných vrtoch s cieľom reálne ohraničiť zónu prieniku studeného frontu
- geoelektrický prieskum na hranici efektívnej produkčnej zóny s cieľom identifikovať dosah studeného frontu
- gravimetrický prieskum medzi reinjektážnou a produkčnou zónou s cieľom identifikovať postup a rozsah prieniku studeného frontu
- geofyzikálny prieskum systému s cieľom identifikovať nové potenciálne produkčné alebo reinjektážne zóny
- termochemický monitoring zameraný na hodnotenie stability alebo zmien rezervoárových procesov súvislých s ochladzovaním
- aktivácia záložných vrtov v distálnej časti produkčnej zóny vzdialených od vektora prieniku studeného frontu
- kalibrovať modely rezervoárovej odozvy na základe výsledkov monitoringu a rezervoárových prejavov

7.1.2.2 Prienik studeného frontu z infiltračnej oblasti

Prienik studeného frontu z infiltračnej oblasti je režimom a záznamom z monitorovania veľmi podobný prieniku studeného frontu z reinjektážnej oblasti. Významným rozdielom je mechanizmus, ktorým k nemu dochádza, ale najmä výrazne nižšia rýchlosť postupu frontu k efektívnej produkčnej zóne, a častokrát výrazne menšie absolútne prejavy ochladzovania na rezervoárové prostredie – v závislosti na jeho iniciálnych podmienkach (AXELSSON, 2008A, 2009). K postupu studeného frontu dochádza rozširovaním depresného kužeľa do prostredia v smere od produkčnej zóny, čo v iniciálnom štádiu môže vyvolať aj krátkodobý nárast teploty pritekaním teplejších vôd z okolia alebo hlbších pozícií v rámci rezervoárového prostredia, následne je ale termický impulz vystriedaný postupným, plynulým ochladzovaním, ktoré je

v prípade dvojitej fázy doprevádzané aj spontánnou kondenzáciou parnej frakcie, alebo znižovaním termodynamického stupňa voľnosti parnej frakcie v rezervoárovom médiu (PLUMMER ET AL., 2011; ZHANG ET AL., 2018; FADEL ET AL., 2022). Keďže depresný kužeľ sa rozširuje pomaly, zvyčajne je miera ochladenia na začiatku výrazne nižšia, ako v rovnakých podmienkach pri využívaní reinjektáž, keďže k zvyšovaniu rýchlosti prúdenia pod vplyvom tlakových rozdielov medzi akumulácnou a infiltračnou oblasťou dochádza postupne. Jedinou výnimkou je náhla aktivácia rýchlych zostupných transportných ciest, ktorou dôjde neprirodzeným znížením tlaku v geologickom prostredí (KRESIC, 2005; GRANT – BIXLEY, 2011). Zvyčajne zároveň platí, že postup z infiltračnej oblasti je náročný na identifikáciu (ak, tak indikátormi zmiešavania a nariedovania cez termochemický monitoring) prostredníctvom chemického monitoringu, keďže v závislosti na rýchlosti postupu môže dôjsť k vyrovnaní makro-chemických ukazovateľov, ktoré nemusia byť viditeľné pri aplikácii základných analytických chemických postupov (KJARAN – ELIASSON, 2008; AXELSSON – KRISTMANSDOTTIR, 2009; KRISTMANSDOTTIR, 2009) a indikovanie geotermometrami a multikomponentovou geotermometriou je často zanedbávané bez iných značných príznakov.

Najčastejšie prejavy prieniku studeného frontu z dopĺňania pri monitoringu:

- nezvyčajný termický impulz so rozkolísaním teplôt nad úrovňou dlhodobých priemerov a dlhodobých trendov (vrátane predošlej oscilácie) bez rovnakého tlakového impulzu
- pokles parnej frakcie alebo stupňa voľnosti parnej frakcie bez poklesu produktivity vodnej zložky
- pokles rezervoárovej entalpie bez poklesu produktivity
- pokles SiO_2 korelovateľný s nárastom Mg^{2+} , zvyčajne pokles Cl^- v prípade, ak nejde o dopĺňanie z marínogénnych vôd
- postupná rekalibrácia saturačných stavov minerálnych fáz a zužovanie intervalu celkovej a multikomponentovej termodynamickej rovnováhy

Základy rezervoárového manažmentu a požadovaných krokov:

- ústupové stratégie produkcie
- realizácia geofyzikálneho prieskumu v distálnej časti produkčnej zóny pre situáciu nových vrtov
- zvýšený termochemický monitoring pre sledovanie intenzity a trendu zmiešavania, respektíve intenzity ochladzovania v produkčnej zóne

- zintenzívnený termochemický monitoring pre sledovanie intenzity a trendu zmiešavania v infiltračnej a zostupnej tranzitnej oblasti
- teplotné a tlakové profilovanie na monitorovacích a záložných vrtoch s cieľom identifikovať plošný rozsah prieniku studeného frontu
- hydrodynamické skúšky vo vrtoch na periférii produkčnej zóny s cieľom prehodnotiť hydraulické parametre horninového prostredia a rekalibrovať modely prúdenia
- rekalibrácia modelov rezervoárovej odozvy

7.1.2.3 Prestup studeného frontu z plytkých rezervoárov

Prestup – alebo invázia (downflow) studeného frontu z plytkých rezervoárov je špecifickým prípadom ochladzovania rezervoárového prostredia, pri ktorom pokles tlaku vyvolaný depletáciou / prečerpávaním rezervoárového média aktivuje zlomové systémy alebo krasové vertikálne systémy, dovtedy „blokované“ rezervoárovým tlakom, po ktorých dôjde zvyčajne k rýchlej invázii chladnejších vôd do rezervoáru (AXELSSON, 2009). Ak je prienik intenzívny a dôjde k vyrovnaniu tlakov, ide o (relatívne) krátkodobý proces, ak k vyrovnaniu tlakov nedôjde, ide o proces kontinuálny (KJARAN – ELIASSON, 2008; AXELSSON – KRISTMANSDOTTIR, 2009; BJORNSSON, 2009; KRISTMANSDOTTIR, 2009). V oboch prípadoch ale platí, že je extrémne náročné predpovedať aktiváciu režimu vertikálneho prestupu.

Najčastejšie prejavy vertikálneho prestupu studeného frontu:

- vyrovnávanie poklesávajúceho tlaku alebo jeho oscilácie (postupný) alebo pomerne strmý nárast tlaku z predtým poklesávajúceho trendu (náhly)
- rozkolísanie (oscilácia) teploty na ústí (postupný) alebo prudký pokles teploty (náhly)
- typologické krivky vertikálneho ochladzovania = znižovanie gradientu teploty vo vrchnej časti rezervoáru (krivky sa približujú k osi Y) a zvyšovanie gradientu teploty v spodnej časti rezervoáru (krivky sa vzdďľujú od osi Y)
- prudký nárast Mg^{2+} (zmiešavanie a ochladzovanie), pokles Cl^- (nariedovanie, keďže spravidla rezervoáre v nadloží majú nižšiu mineralizáciu) a pokles Ca^{2+} respektíve SiO_2 (vyzrážavanie sa z roztoku v rezervoári zmenou saturačných stavov)
- pokles podielu parnej frakcie osciláciou (postupný) alebo okamžitý (náhly) pri zachovaní produktivity vodnej frakcie alebo zvýšení produktivity
- zmeny saturačných stavov TSI kriviek, respektíve zmena ich tvaru v súvislosti s ochladením a/alebo kondenzáciou (v prípade výskytu parnej frakcie)

Základy rezervoárového manažmentu a požadovaných krokov:

- odstavenie, ak je to možné, vrtov ovplyvnených prestupom (zvyčajne býva priestorovo veľmi obmedzený) alebo prechod k cyklickým stratégiám
- realizovanie prítokometrie na ovplyvnených vrtoch s cieľom identifikovať zmeny oproti pôvodnému stavu a identifikovať intenzitu prieniku
- realizovanie karotážnych meraní na ovplyvnených vrtoch
- aktivovať vertikálny chemický monitoring vo vrtoch s cieľom identifikovať faciálnu a chemickú zonalitu a rezervoárové procesy aktivované prestupom
- orientovaný 3D seizmický prieskum v okolí ovplyvnených vrtoch s cieľom identifikovať možné aktivované štruktúry po ktorých dochádza k prestupu v kombinácii s detailnou gravimetriou
- aktivovanie záložných vrtov v prípade, ak sa nachádzajú mimo predpokladanej zóny ovplyvnenia.

7.1.2.4 Indukovaný adiabatický var

Indukovaný adiabatický var je krátkodobým procesom, pri ktorom prudkou stratou tlaku dochádza v rezervoári k vynútenému, prudkému odparovaniu bez výrazných zmien v režime prúdenia rezervoárového média, parná frakcia opúšťa okamžite rezervoárové prostredie, a rezervoárové médium prudko chladne (KJARAN – ELIASSON, 2008). Miera samotného ochladenia je následne funkciou miery termodynamickej rovnováhy medzi vodnou a parnou zložkou pri danom rezervoárovom tlaku (GRANT ET AL., 1982; AXELSSON, 2009). Situáciu komplikuje prítomnosť dvojitej fázy v rezervoári, pri ktorej je prirodzená oscilácia parnej frakcie, a indikátory nástupu adiabatického varu nie je možné zachytiť monitoringom chemických parametrov, s výnimkou súvislého poklesávania tlaku. Preto štandardne dochádza k identifikovaniu ochladenia adiabatickým varom až v prípade, keď k samotnému procesu už dochádza (AXELSSON – KRISTMANSDOTTIR, 2009).

Najčastejšie prejavy indukovaného adiabatického varu:

- zvýšenie amplitúdy oscilácie tlaku pri zachovaní trendu
- prudké zvýšenie produktivity parnej frakcie pri poklese produktivity vodnej frakcie bez dlhodobých príznakov zvýšenej variability
- zmena tvaru kriviek teplotných a tlakových profilov a posúvanie úrovne varu do hlbších častí rezervoáru

- zmena tvaru TSI kriviek s typológiou adiabatického varu
- krátkodobé zvýraznenie trendu oscilovania poklesu teploty
- rapídny pokles hĺbky bodu evázie plynov predovšetkým v rezervoároch s vlhkou saturovanou parou

Základy rezervoárového manažmentu a požadovaných krokov:

- prechod ku cyklickým produkčným stratégiám
- rozsiahly geochemický a termochemický monitoring dostupných vrtov v produkčnej oblasti s cieľom identifikovať možné indikátory adiabatického varu
- vertikálne profilovanie teploty a tlaku v dostupných vrtoch s cieľom identifikovať body evázie plynov a zmien vo vertikálnych záznamoch teploty a tlaku
- prehodnotenie dynamických rezervoárových modelov, predovšetkým so zameraním na možnosti rezervoárovej konvekcie a adiabatického varu s cieľom posúdiť priestorové možnosti rozširovania zóny dosahu indukovaného adiabatického varu vzhľadom na rezervoárové parametre
- gravimetrický prieskum obmedzený na produkčnú zónu za účelom sledovania možného rozširovania parnej frakcie

7.1.3 Manažment vo vzťahu k rezervoárovej konvekcii

Rezervoárová konvekcia je v prípade prevažne-konduktívnych rezervoárových prostredí, ktoré sú typické pre územie Slovenska zdrojom dodatočného prírastku tepla v rámci rezervoárového prostredia vplyvom vzostupných konvekčných prúdení popri dominantnom – difúznom – konduktívnom transporte a rádiogénnym prírastkom tepla, ktorý je rovnako všadeprítomný, ale jeho podiel na celkovej energetickej bilancii rezervoáru je minimálny.

Pojem rezervoárovej konvekcie ale neoznačuje „bežné“ alebo „prirodzené“ prúdenie geotermálnych vôd medzi rôznymi vertikálnymi úrovňami (napríklad tlakovým gradientom vyvolané prúdenie medzi dvoma tektonickými kryhami po zlomovej línii). Rezervoárová konvekcia označuje dynamický proces, pri ktorom dochádza k formovaniu cyklických prúdení vzostupných (prehrievanie vyšších, respektíve plytších rezervoárových hĺbok) a zostupných (ochladzovanie hlbších rezervoárových hĺbok) hmoty a energie vplyvom (JAUPART – MARESCHAL, 2010; GILLOU-FROTIER ET AL., 2013; GLASSLEY, 2015):

- nerovnomerného prehrievania rezervoáru, ktoré je charakteristické pre oblasti zvýšenej geotermickej aktivity s tektonicky (zlomami) segmentovanými rezervoármi

- vertikálnej variability priepustnosti v rezervoári
- gradientu a vertikálnej stratifikácie hustoty rezervoárového média, ktorá podmieňuje jeho vertikálnu filtráciu bez nevyhnutného horizontálneho vektora pohybu
- nedosýtenosťou horninového prostredia, ktorá umožňuje tepelnú expanziu rezervoárového média

Hoci je plošná rezervoárová konvekcia typická zvyčajne pre geodynamicky aktívne zóny a teda skôr vulkanické hydrogeotermálne systémy (Axelsson, 2012), priestorovo limitovaná, alebo izolovaná konvekcia bola opakovane modelmi preukázaná / indikovaná aj v nízkoentalpických a bazénových obehových systémoch, vrátane Slovenska (napr. FRIČOVSKÝ ET AL., 2016, 2018A, 2020B).

Samotná konvekcia ako fenomén rezervoárového prostredia nie je v podmienkach Slovenska dlhodobo študovaný, o to menej vo vzťahu k jeho nožnej dynamike – vývoju, alebo naopak, zániku. Prítomnosť / stabilita / neprítomnosť rezervoárovej konvekcie pritom ovplyvňuje (KRISTMANSDOTTIR – ARMANSSON, 2003; GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON, 2012; STEFANSSON ET AL., 2016):

- udržateľnosť fázovej stability (konvekcia je kritickým faktorom pre adiabatický var a teda formovanie, alebo udržiavanie parnej fázy v rezervoárovom prostredí, bez ohľadu na stupeň termodynamickej voľnosti)
- chemizmus rezervoárového média (od interakcie voda – hornina, po chemické zloženie vodnej a parnej frakcie a termodynamické – saturačné stavy minerálnych fáz)
- technicko-technologické parametre rezervoárového média (strata parnej fázy alebo jej formovanie drasticky mení saturačné stavy najmä karbonátových minerálov a polymorfov SiO₂, respektíve veľkú skupinu tektosilikátov, ako aj evapority a pyrit)
- celkovú energetickú bilanciu rezervoárového systému
- dynamiku a procesy rezervoárovej odozvy, vrátane vplyvu na prienik a postup studeného ale aj chemického a tlakového (hydraulického) frontu medzi reinjektážnou a produkčnou zónou, respektíve medzi infiltračnou zónou a produkčnou zónou
- spoľahlivosť silikátovej a kationovej geotermometrie pri interpretovaní rezervoárovej teploty (stabilitou termodynamickej rovnováhy voči vodnej a/alebo parnej frakcii)
- zlyhávanie izotopovej analytiky (vplyvom tzv. koncepčného prepisovania veku tej-ktorej vzorky, čo môže ovplyvniť odhad zraniteľnosti a veku rezervoárového média).

Prítomnosť izolovanej rezervoárovej konvekcie v zmysle vyššie opísaného nie je možné exaktne preukázať, nakoľko ide o rezervoárový proces. V prípade, ak v rezervoárovom prostredí nedochádza k adiabatickému varu, a rezervoárové médium nemá parnú frakciu, je rezervoárovú konvekciu možné modelovať, respektíve interpretovať kombináciou (RENNER ET AL, 1975; GRANT ET AL., 1982; AXELSSON, 2009, 2012B; GRANT, 2014B):

- analýzy lineárnej stability (ktorá v sebe zahŕňa procesy priestorového 3D modelovania a podmienených simulácií najmä tzv. koeficientu nerovnomerného prehrievania bázy rezervoáru, Rayleighovho čísla, Nusseltovho čísla, kritickej permeability)
- termochemických modelovacích metód
- konvenčnej geotermometrie
- multikomponentovej geotermometrie.

Z tohto dôvodu je rezervoárová dynamika / rezervoárová konvekcia záležitosťou rezervoárového inžinierstva, ktorú je nevyhnutné konzultovať. Podmienky, pri ktorých je možné jej formovanie očakávať (predovšetkým vo forme priestorovo izolovaných konvenčných buniek) v podmienkach Slovenska sú:

- hustota tepelného toku nad $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (overiteľné z mapy distribúcie hustoty tepelného toku ^{7.3})
- rezervoárové prostredie v karbonátoch (overiteľné z projektov geologickej úlohy, respektíve z prevládajúceho litotypu v konkrétnom útvare geotermálnych vôd ^{7.4}) – s výnimkou štruktúry Beša-Čičarovce alebo Malcov v rámci útvaru geotermálnych vôd Trebišovská panva, kde je konvekcia očakávaná v dôsledku prítomnosti pochovaných vulkanických systémov a predpokladaného významného tepelného prírastku; ktoré predstavuje základ pre vertikálnu stratifikáciu priepustnosti v rezervoárovom prostredí
- intenzívne tektonické segmentovanie rezervoárového prostredia s rozdielmi v hĺbke bázy v zostupnej-tranzitnej a akumuláčnej oblasti nad 400 – 500 m (overenie možné zo správ predchádzajúcich etáp geologického a hydrogeotermického prieskumu ^{7.5}; respektíve na základe odborných konzultácií – časť 10.2.1 a 10.2.2), pri ktorom je možné predpokladať formovanie nerovnomerného prehrievania

^{7.3} <https://apl.geology.sk/atlasge/>

^{7.4} <https://apl.geology.sk/gte/>

^{7.5} <https://www.geology.sk/sluzby/digitalny-archiv/>

- prítomnosť hlboko pochovaných vulkanických, respektíve neovulkanických formácií a vulkanických štruktúr v okolí rezervoárového prostredia, alebo priamo v rezervoárovom prostredí (odborné konzultácie s relevantnými inštitúciami, respektíve orientačne podľa tzv. mapy predterciérneho podložia Západných Karpát, v ktorej sú vulkanické systémy vyznačené - ^{7.6}).

Rezervoárový manažment a vhodné produkčné stratégie v prípade systémov s rezervoárovou konvekciou sú opisované aj opakovane vyššie. V prípade, ak môže v rezervoárovom prostredí dochádzať ku konvekcii, je nevyhnutné (AXELSSON, 2009; KRISTMANSDOTTIR, 2009; GRANT, 2014B; GLASSLEY, 2015):

- frekventovaný a periodický chemický monitoring s aplikáciami termochemického a geotermometrického modelovania na overenie rezervoárových procesov
- navrhnuť numerické modelovanie rezervoárového prostredia pred otvorením produkcie a počas produkcie so zameraním na modelovanie numerických indikátorov rezervoárovej konvekcie – s nevyhnutnou podmienkou pravidelnej kalibrácie modelov na základe monitoringu
- doporučiť alebo podmieniť vertikálne profilovanie teploty a tlaku na dostupných objektoch s cieľom identifikovať jej možné prejavy na teplotných a tlakových krivkách, vrátane ich stability alebo zmien v čase
- navrhnuť numerické modelovanie rezervoárovej odozvy, ktoré by v koncepčnom modeli zahŕňalo scenáre prítomnej rezervoárovej konvekcie podľa iníciaľných modelov, a následnú kalibráciu modelov rezervoárovej odozvy podľa stavu a zistení predchádzajúcich modelových riešení a monitoringu (modelovanie rezervoárovej odozvy na Slovensku prakticky neexistuje, respektíve je veľmi obmedzené, a zvyčajné modelové riešenia nesprávne počítajú len s prítomnosťou konduktívneho transportu tepla v rezervoári)

V prípade, ak v rezervoárovom prostredí dôjde k nástupu negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy, je nevyhnutné (GRANT ET AL., 1982; AXELSSON, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011):

- identifikovať, či dochádza k potlačeniu / indukovaniu rezervoárovej konvekcie (kombinácia termochémie a geotermometrie, tlakové merania a tlakové profilovanie)

^{7.6} <https://apl.geology.sk/temapy/>

- realizovať vertikálnu termometriu na monitorovacích objektoch
- rekalibrovať modely rezervoárovej odozvy podľa aktuálnych údajov
- optimalizovať produkčnú stratégiu (najvhodnejšie riešenie je relokácia produkčných vrtov mimo zónu ovplyvnenia)
- optimalizovať reinjektážnu stratégiu na základe odozvy rezervoáru voči konvekcií.

7.2 Rezervoárový manažment v špecifických prípadoch

7.2.1 Princípy prístupu k rozvoju produkcie geotermálnej energie v rizikových útvaroch geotermálnych vôd

Z pohľadu metodickéj príručky je možné za rizikové útvary geotermálnych vôd považovať tie, ktoré sú v zmysle klasifikácie útvarov geotermálnych vôd:

- vyhodnotené ako neperspektívne, t.j. kde $P_{th,inst} > P_{th(S)}$
- vyhodnotené ako dlhodobu udržateľné s miernym rizikom, t.j. $r_{cap(U,100)} = 0,4 - 0,6$
- vyhodnotené ako dlhodobu neudržateľné s vysokým rizikom, t.j. $r_{cap(U,100)} < 0,4$
- cezhraničné útvary geotermálnych vôd;

respektíve ako rizikové je možné označiť aj všetky projekty využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie, ktoré sa nachádzajú v II.-stupni ochranného pásma najmä minerálnych vôd a liečivých minerálnych (termo-minerálnych) vôd (viď 7.1.5).

Podľa klasifikácie zdrojov geotermálnej energie (viď 6.2.4) na Slovensku je v zmysle využitej metodiky možné o rizikových útvaroch geotermálnych vôd hovoriť, ak:

- aktuálny inštalovaný výkon všetkých aktívnych vrtov v útvare geotermálnych vôd presahuje jeho vyjadrenú udržateľnú rezervoárovú kapacitu pre obdobie produkcie 100 rokov v zmysle koncepcie TURM / TURP
- aktuálny tepelno-energetický výkon všetkých aktívnych vrtov v útvare geotermálnych vôd presahuje 50 % definovaného celkového tepelno-energetického potenciálu; respektíve
- aktuálny tepelno-energetický výkon všetkých aktívnych vrtov v útvare geotermálnych vôd presahuje 60 % definovaného celkového tepelno-energetického potenciálu; pričom

trend pohybu záznamov z jednotlivých rokov na mapách citlivosti (časť 6.2.3) a v navrhovanej 3D klasifikačnej stupnici (časť 6.2.4) má v posledných 5 – 10 rokoch záznamov poklesávajúci, zostupný trend.

V zmysle referenčnej metodiky je potom v rezervoárovom prostredí možné predpokladať zvýšené riziko negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy v čase štandardne kratšom, ako je požadovaná, respektíve optimalizovaná doba produkcie, t.j. $t_{\text{prod}} = 100$ rokov podľa koncepcie TURP / TURM (AXELSSON ET AL., 2001).

Ak je v kompetencii RCUE hodnotenie projektov zameraných na využívanie zdrojov geotermálnej energie, potom stanovisko – okrem nižšie uvedených návrhov kritérií (Kapitola 9) by malo zohľadňovať aj prirodzenú ochranu strategickej a energetickej suroviny, ktorou geotermálna energia – respektíve zdroje geotermálnej energie sú, a súhlasné stanovisko, v prípade možností, podmieniť:

- realizovaním monitoringu zdrojov geotermálnej energie v intenciách globálnej praxe (Tabuľka 4.1 až 4.3)
- zaviazaním sa žiadateľa k realizácii nestranného monitorovacieho a hodnotiaceho dohľadu (napríklad prostredníctvom relevantných štátnych, akademických inštitúcií, prípadne právnických osôb s relevantnými skúsenosťami), ktorého náplňou by malo byť:
 - kontinuálne energetické bilancovanie rezervoárového prostredia dotknutého útvaru geotermálnych vôd
 - analyzovanie dát monitoringu z pohľadu vyhodnocovania kvantitatívnych a kvalitatívnych ukazovateľov rezervoárovej odozvy
 - kontinuálne, respektíve frekvenčné modelovanie predikcie rezervoárovej odozvy na základe monitorovacích údajov
- zaviazaním sa žiadateľa ku krokovému zvyšovaniu produkcie s dĺžkou kroku aspoň 3 roky, pričom iniciálny, otvárací krok by nemal byť väčší ako 10 % celkového tepelno-energetického potenciálu; po dobu aspoň 10 rokov

Nakoľko z klasifikácie perspektivity a udržateľnosti zdrojov geotermálnej energie vyplýva, že prioritu by mali dostať projekty orientované do útvarov geotermálnych vôd klasifikovaných ako udržateľné a perspektívne, potom pri posudzovaní rizikových útvarov geotermálnych vôd je v procese posudzovania, prípadne schvaľovania, možné prihliadať predovšetkým na (a následne podľa toho prispôbiť hodnotiace kritériá, respektíve ich bodové hodnoty):

- podkladové údaje, najmä dáta geofyzikálneho prieskumu a podkladového alebo iniciálneho modelovania, z ktorých projekt geologickej úlohy vychádza
- mieru nastaveného geofyzikálneho a geochemického prieskumu
- návrh a realizovaný pred-produkčný monitoring
- energetický účel (ak, tak prioritizované projekty vyššej energetickej náročnosti s plánovaným kaskádovým alebo by-pass režimom produkcie).

7.2.2 Princípy prístupu k rozvoju produkcie geotermálnej energie v ochranných pásmach minerálnych a termo-minerálnych vôd

Špecifickým prípadom rizikových oblastí sú rezervoárové prostredia identifikované v rámci už stanovených ochranných pásiem, predovšetkým liečivých minerálnych a termo-minerálnych zdrojov, ktoré majú samé o sebe mimoriadne vysokú spoločenskú hodnotu a vzhľadom na kombináciu faktorov, ktoré sú nevyhnutné k ich vzniku, tak aj jedinečnosť; a z toho vyplývajúce požiadavky na ich ochranu.

Pri posudzovaní projektov vo vzťahu k stupňu ochrany prírodných liečivých a termo-minerálnych prameňov je nevyhnutné, a zároveň aj definované v tzv. Kúpeľnom zákone:

- zamedziť otvoreniu produkčných polí v ochrannom pásme I. stupňa; t.j. projekty, ktoré by boli situované produkčnými alebo reinjektážnymi vrtmi v tomto stupni ochrany nesmú byť odporúčané na realizáciu
- posudzovať s maximálnou obozretnosťou aktivity v rámci II. stupňa ochrany, t.j. pred schválením, alebo odporúčaním projektu
 - vyžiadať si nezávislé zhodnotenie produkcie zdrojov geotermálnej energie na obehové štruktúry a kvalitatívne a kvantitatívne parametre liečivých alebo termo-minerálnych, respektíve minerálnych vôd
 - zaviazat' žiadateľa o pravidelnú konštrukciu prediktívnych modelov rezervoárovej odozvy, predovšetkým vo vzťahu k produktivite chránených zdrojov, teplote, a najmä vo vzťahu ku ich chemickému zloženiu – s odporúčaním na realizáciu takýchto modelov nezávislými inštitúciami (napríklad uvedenými v časti 10.2)
- podmieniť realizáciu projektu krokovými produkčnými stratégiami bez ohľadu na energetický stav rezervoáru, pričom otvárací tepelný výkon by nemal presahovať 10 %

celkového energetického potenciálu rezervoárového prostredia / útvaru geotermálnych vôd po dobu aspoň 10 rokov a s dĺžkou kroku 3 – 4 roky v prvom a druhom štádiu

- zaviazať žiadateľa realizáciou monitoringu v zmysle globálnej praxe udržateľného rezervoárového manažmentu (Tabuľka 4.1 až 4.3), t.j. nad rámec aktuálne platnej legislatívnej schémy; a zároveň zaviazať žiadateľa nezávislým vyhodnocovaním monitoringu v pravidelných, ročných intervaloch za predchádzajúce obdobie, s dôrazom kladeným na:
 - reprezentatívnosť monitoringu – t.j. zahrnutie všetkých dostupných monitorovacích objektov v portfóliu žiadateľa (t.j. všetky vrty zhotovené v rámci projektu); a zároveň všetky dostupné monitorovacie objekty na strane predmetu ochrany (kúpeľné vrty, kúpeľné pramene, vrty s minerálnou podzemnou vodou atp.)
 - komplexnosť monitoringu – t.j. v zmysle globálnej praxe realizovať ako merania na ústí monitorovacích objektov (v mieste výveru, v prípade prameňov), tak aj vertikálne profilovanie teploty a tlaku, v kombinácii s chemickým monitoringom, so zameraním na:
 - klasickú analytickú chémiu (rozbory a interpretácie na fáciálnej a makrochemickej úrovni)
 - termochémiu (modely zmiešavania, rezervoárovej dynamiky a rezervoárových procesov)
 - konvenčnú a multikomponentovú geotermometriu
- v prípade preukázaných negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy (kvalitatívne a kvantitatívne parametre; zmena rezervoárovej dynamiky a rezervoárových procesov) na zdroj, ktorý je predmetom ochrany, následne zaviazať žiadateľa ku prechodu na útlmové produkčné stratégie, kým nebude aspoň dvomi nezávislými zdrojmi overené, že daný projekt neovplyvňuje svojou aktivitou predmet ochrany
- v prípade preukázaných negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy na zdroj, ktorý je predmetom ochrany, zaviazať žiadateľa k optimalizácii produkčnej stratégie alebo produkčnej schémy (prehodnotenie situovania vrtov podľa situácie) v prípade, ak bude aspoň dvomi nezávislými zdrojmi overené, že daný projekt prispieva, alebo priamo ovplyvňuje svojou aktivitou predmet ochrany.

Vyššie uvedené princípy by mali byť aplikované len v prípade, ak:

- cieľový zdroj geotermálnej energie je situovaný v rovnakej tektonickej jednotke ako predmet ochrany
- cieľový zdroj geotermálnej energie je situovaný v inej tektonickej jednotke, ako predmet ochrany, ale zároveň obe tektonické jednotky spolu preukázateľne hydraulicky komunikujú
- cieľový zdroj geotermálnej energie a predmet ochrany ochranného pásma majú spoločnú infiltračnú oblasť.

Znamená to, že vyššie navrhované kroky nemusia byť aplikované v prípade, ak sú zdroj geotermálnej energie a predmetný zdroj ochrany od seba hydraulicky izolované, napríklad situované v dvoch vzájomne nekomunikujúcich rezervoárových prostrediach rozdielnych tektonických jednotiek.

Rovnako, ako v prípade rozvoja produkcie v rizikových útvaroch geotermálnych vôd, aj v prípade rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie v ochranných pásmach liečivých a termo-minerálnych zdrojov by mali primárne získavať – v prípade schválenia – prioritu energeticky náročnejšie projekty, respektíve projekty s vyššou pridanou hodnotou a energetickou náročnosťou, respektíve projekty, ktoré svojim návrhom vytvárajú odôvodnený predpoklad pre energeticky efektívne a účinné využívanie zdrojov geotermálnej energie.

8 MATICA AKTÍVNEHO HODNOTENIA KOMPLEXNÝCH DOPADOV PROJEKTOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

V súčasnej dobe je hodnotenie environmentálneho dopadu projektov využívajúcich zdroje geotermálnej energie takzvaná EIA (environmental impact assessment)^{8.1}, ktorá je na jednej strane komplexným zdrojom zbierania a hodnotenia informácií o možnej interakcii projektu s jeho okolím (pozitívnej, negatívnej), na druhej strane ale (napr. WOOD, 1999; HAJKOWICZ, 2007; IJÄS ET AL., 2008; SINGH ET AL., 2012; FRIČOVSKÝ ET AL., 2016D; GONZALEZ – ENRÍQUEZ-DE-SALAMANCA, 2018):

- dlhodobo trpí nedostatkom objektívneho kvantifikovania komponentov projektu / okolia a ich vzájomných vplyvov
- dlhodobo nemá presne definované samotné kvalitatívne komponenty, ktorých pozícia, vplyv, a význam vyplýva z národnej alebo príslušnej nadnárodnej legislatívnej normy
- výrazný vplyv subjektívneho hodnotenia komponentov
- výrazný vplyv subjektívneho celkového hodnotenia a posudzovania.

Práve potreba multiparametrického a semi-quantitatívneho hodnotenia podmienila postupný vývoj takzvanej „Matice aktívneho hodnotenia komplexných dopadov“ – Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM) (PASTAKIA – MADSEN, 1995; PASTAKIA, 1998; PASTAKIA – JENSEN, 1998), ktorá je vo svojej podstate schopná:

- súčasne hodnotiť viaceré aspekty projektov (nielen) využívania, respektíve prieskumu zdrojov geotermálnej energie
- rešpektovať dynamiku zdrojov geotermálnej energie a formulovať, prípadne následne vzájomne korelovať jednotlivé scenáre konštrukcie, produkcie, alebo ďalšieho rozvoja zdrojov geotermálnej energie
- zachytiť jednotlivé pozitívne alebo negatívne aspekty projektov zdrojov geotermálnej energie a modelovať zmeny celkovej interakcie projektu s jeho okolím;
- a ktorá zároveň vychádza zo všeobecných teoretických princípov konvenčných EIA.

^{8.1} na Slovensku platí takzvaná „malá EIA“ pre prieskum na zdroje geotermálnej energie do 300 m (zist'ovacie konanie), kým pre hlboké projekty je v zmysle Zákona č. 24/2006 Z.z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie a o zmene a doplnení niektorých zákonov

8.1 Teoretický koncept matice dopadu RIAM

Koncept RIAM je postavený na maticovom systéme vzťahov medzi komponentmi a kritériami (PASTAKIA, 1998; PASTAKIA – JENSEN, 1998; IJÄS ET AL., 2008; KUITUNEN ET AL., 2008), pričom:

- **komponent** predstavuje tú časť environmentu, spoločnosti, alebo služieb, ktorá je priamo ovplyvnená projektom, ktorá prejde zmenou v súvislosti s realizáciou projektu, alebo ktorá ako súčasť projektu priamo vplýva na svoje okolie; pričom do komponentov sú zaradené:
 - **fyzikálno-chemické (PC) komponenty** = zahŕňajú všetky fyzikálne a chemické (napr. výdatnosť, produktivita, teplota, chemická stabilita, seizmicita; svetelný smog, hlukový smog, kontaminácia pôdy a podzemnej vody...) aspekty projektov
 - **biologicko-ekologické (BE) komponenty** = zahŕňajú všetky biologické zložky prostredia a okolia projektu (napr. biodiverzita, geodiverzita, ekosystémy, biotopy, chránené územia a druhy...)
 - **kultúrno-spoločenské (SC) komponenty** = zahŕňajú zložky interakcie človeka s jeho okolím a jeho aktivity v okolí, ktoré ovplyvňujú projekty, alebo môžu byť projektmi ovplyvnené, vrátane zachovania kultúrno-spoločenského dedičstva (napr. turizmus, kultúra, vzdelanie, kvalita života, kvalita bývania ...)
 - **ekonomicko-technické (EO) komponenty** = zahŕňajú ekonomiku projektu a okolia, a ekonomické dopady projektu na okolie alebo ekonomiku jeho realizácie, vrátane projektového manažmentu a údržby (napr. náklady na údržbu, ekonomická cena zdravia, doprava, hodnota majetku, hodnota prostredia ...)
- **kritérium** (Tabuľka 8.1) predstavuje kvantifikované vyjadrenie vplyvu komponentu na svoje okolie, alebo ovplyvnenie okolia vplyvom komponentu, pričom kritériá spĺňajú podmienky:
 - univerzality = využiteľné pri hodnotení rôznych projektov z rôznych odvetví
 - numericity = každé kritérium je presne kvantifikované a definované.

Tabuľka 8.1 Semi-kvantitatívna charakteristika evaluačných kritérií RIAM – časť A: kritériá. Upravené podľa: Pastakia (1998); Ijäs et al. (2008)

RIAM kritérium	Skóre	Semi-numerické hodnotenie
dôležitosť vplyvu		
(a1) – regionálna dôležitosť	+4	dôležitosť / význam na národnej a nadnárodnej úrovni
	+3	regionálna dôležitosť, významný spoločenský význam
	+2	dôležitosť a význam na úrovni blízkeho okolia uzavretého areálu
	+1	lokálny význam a dôležitosť
	0	bez geografickej dôležitosti a spoločenského významu
(a2) – magnitúda vplyvu	+3	veľmi pozitívny vplyv alebo zavedenie významnej právnej a praktickej ochrany
	+2	významné zlepšenie aktuálneho status-quo
	+1	zlepšenie, alebo pozitívny vplyv
	0	bez zmeny aktuálneho status-quo, bez významného pôsobenia
	-1	negatívny vplyv alebo negatívna zmena oproti status-quo
	-2	významne negatívne narušenie status-quo
permanencia / trvanie vplyvu		
(b1) permanencia	+4	permanentný, dlhodobý vplyv (viac ako 10 rokov)
	+3	strednodobý (1 – 10 rokov)
	+2	dočasný, krátkodobý, okamžitý (menej ako rok)
	+1	neaplikovateľné, bez zmeny status-quo
(b2) reverzibilita	+4	nezvratný vplyv
	+3	čiastočne zvratný (pomaly), napravitel'ny vplyv (1 – 15 rokov)
	+2	zvratný (napravitel'ny) vplyv (menej ako rok)
	+1	neaplikovateľné, bez zmeny status-quo
(b3) kumulatívnosť	+4	preukázateľne synergický efekt, vplyv (preukázaná a jasná interakcia)
	+3	synergický vplyv (synergický s neistou interakciou)
	+2	individuálny vplyv
	+1	neaplikovateľné, bez zmeny status-quo
(b4) susceptibilita	+4	extrémne senzitivne a zranitel'ne prostredie
	+3	senzitivne, zranitel'ne prostredie
	+2	stabilné, nezranitel'ne prostredie
	+1	neaplikovateľné, bez zmeny status-quo

Tabuľka 8.1 Semi-kvantitatívna charakteristika evaluačných kritérií RIAM – časť B: komponenty. Upravené podľa: Pastakia (1998); Ijäs et al. (2008)

makrokomponent	komponent	symbol
environment	fyzikálno-chemické komponenty	PC
	biologicko-ekologické komponenty	BE
potreby spoločnosti	kultúrno-spoločenské komponenty	SC
	ekonomicko-technické komponenty	EO

Kombináciou kritérií a vplyvu je vyjadrené **environmentálne skóre (environmental score) ES** /8.1/ (Tabuľka 8.2), ktoré hodnotí celkový dopad projektu na daný komponent, alebo vplyv interakcie komponentu s prostredím, kde platí:

- (a1) = skóre priestorovej dôležitosti
- (a2) = skóre impaktu
- aT = celkové skóre dôležitosti /8.2/
- (b1) = skóre permanencie dopadu
- (b2) = skóre zvratnosti dopadu
- (b3) = skóre kumulatívneho účinku dopadu
- (b4) = skóre citlivosti prostredia
- bT = celkové skóre interakcie /8.3/

$$ES = aT \times bT \quad /8.1/$$

$$aT = (a1) \times (a2) \quad /8.2/$$

$$bT = \Sigma(b1) + (b2) + (b3) + (b4) \quad /8.3/.$$

Kombináciou výrazov /8.1/ až /8.3/ so semi-numerickým hodnotením (Tabuľka 8.1a) je zrejmé, že hodnota environmentálneho skóre dosahuje $192 \leq ES \leq +192$. Práve multiplikácia kritérií dôležitosti zabezpečuje vplyv váhy impaktu komponentu na prostredie, kým jednoduchá sumácia by viedla k rovnakému výsledku pre rôzne priaznivé situácie. Využitie súčtu v odhade interakcie komponentu zaručuje komplexnú dôležitosť interakcie, ale jednotlivé členy nemôžu ovplyvniť výsledok interakcie samostatne (PASTAKIA – JENSEN, 1998; IJÄS ET AL., 2008; KUITUNEN ET AL., 2008).

Tabuľka 8.2 Evaluačný systém environmentálneho skóre. Upravené podľa: Pastakia (1998)

Hodnota ES	Klasifikácia vplyvu	Charakteristika vplyvu komponentu
ES = +192 až +108	D (+4)	veľmi pozitívny vplyv, význam
ES = +108 až +54	C (+3)	výrazne pozitívny vplyv, význam
ES = +53 až +31	B (+2)	významne pozitívny vplyv, význam
ES = +30 až +1	A (+1)	pozitívny vplyv, význam
0	N (0)	bez vplyvu, status quo, bez významu
ES = -1 až -30	-A (-1)	negatívny vplyv, význam
ES = -31 až -53	-B (-2)	významne negatívny vplyv, význam
ES = -54 až -107	-C (-3)	výrazne negatívny vplyv, význam
ES = -108 až -192	-D (-4)	veľmi negatívny vplyv, význam

Tým pádom je RIAM schopná hodnotiť dopad jednotlivých komponentov, alebo makrokomponentov v rámci projektov spoločne, samostatne, alebo jednotlivé komponenty a makrokomponenty v rámci environmentálneho skóre vzájomne korelovať.

Ako vychádza z vyjadrenia environmentálneho skóre /8.1/ nadobúda environmentálne skóre negatívne hodnoty, ak má negatívny dopad na svoje okolie, t.j. $(a_2) < 0$. Keďže kombinácia pozitívnych a negatívnych hodnôt by mohla viesť k nejasnosti výsledkov, je niekedy pri výpočtoch využívaná úprava pôvodného environmentálne skóre (Tabuľka 8.3) podľa vzťahu $ES + 192$ (IJÄS ET AL., 2008).

Podľa schémy udržateľného rozvoja (CHICHILNISKI, 1997; SCHELNNHUBER, 1998, 2001; NEL – COOPER, 2009) je tento definovaný:

- stavom okolia / environmentu - E (kvantitatívne vyjadreného sumou komponentov PC a BE, ktoré odrážajú vplyv projektu na okolie a teda stav zachovania jeho kvality, alebo, naopak, jeho zlepšenia, či ohrozenia)
- statusom spoločnosti, vyjadrenému inverzne definovaním potrieb spoločnosti (human needs) – H_{NI} , pričom čím vyšší je status spoločnosti (spoločenský, technický, ekonomický, kultúrny, ekonomický...), tým nižšie sú jej potreby, pod ktorými je možné rozumieť ďalšie zásahy do status-quo, ekonomické náklady a podobne

Podmienkou udržateľného rozvoja je už z jeho samotnej koncepcie stav, pri ktorom potreby spoločnosti nepresahujú celkovú kapacitu prostredia tieto potreby v prítomnosti, alebo v budúcnosti zabezpečiť.

Tabuľka 8.3 Evaluačný systém environmentálneho skóre. Upravené podľa: Pastakia (1998)

Hodnota ES	Klasifikácia vplyvu	Charakteristika vplyvu komponentu
ES = 301 až 384	D (+4)	veľmi pozitívny vplyv, význam
ES = 246 až 300	C (+3)	výrazne pozitívny vplyv, význam
ES = 223 až 245	B (+2)	významne pozitívny vplyv, význam
ES = 193 až 222	A (+1)	pozitívny vplyv, význam
192	N (0)	bez vplyvu, status quo, bez významu
ES = 162 až 191	-A (-1)	negatívny vplyv, význam
ES = 139 až 161	-B (-2)	významne negatívny vplyv, význam
ES = 85 až 138	-C (-3)	výrazne negatívny vplyv, význam
ES = 0 až 84	-D (-4)	veľmi negatívny vplyv, význam

Následne potom index všeobecnej udržateľnosti je možné vyjadriť vzťahom /8.4/ (IJÄS ET AL., 2008; KUITUNEN ET AL., 2008; PHILLIPS, 2010A,B):

$$S = E - H_{NI} \quad /8.4/$$

Pre rozlíšenie medzi environmentálnou (komplexnou) /8.5/ a ekologickou udržateľnosťou /8.6/ je nevyhnutné substituovať jednotlivé zložky vzťahujúce sa na jednotlivé aspekty hodnotenia (PHILLIPS, 2010A,B):

$$S_E = E - H_{NI} = \left[\frac{\sum PC + \sum BE}{(PC_{\max} + BE_{\max})} \right] - \left[\frac{(SC_{\max} - \sum SC) + (EO_{\max} - \sum EO)}{(SC_{\max} + EO_{\max})} \right] \quad /8.5/$$

$$S_{EB} = E_{EB} - H_{NI} = \left[\frac{\sum (B + A + H + L)}{B + \sum (A_{\max} + L_{\max} + H_{\max})} \right] - \left[\frac{(SC_{\max} - \sum SC) + (EO_{\max} - \sum EO)}{(SC_{\max} + EO_{\max})} \right] \quad /8.6/$$

pričom maximálnu kapacitu komponentu $C_{\max}$ je možné vyjadriť súčtom jeho jednotlivých aspektov „n“ pri maximálnom skóre /8.7/ t.j.:

$$C_{\max} = n \times 384 \quad /8.7/$$

Alfabetické zložky vo výraze /8.6/ vyjadrujú sumárne hodnotenia pre jednotlivé aspekty prostredia, t.j. PC a BE, s definovaným vzťahom ku atmosfére (A), litosfére (L), hydrosfére (H) a biosfére (B) (PHILLIPS, 2010A,B).

Keďže podľa /8.4/ platí, že projekt je možné považovať za (environmentálne / komplexne, alebo ekologicky) udržateľný, t.j. ak platí $S \geq 0$, potom klasifikácia udržateľnosti je možná len v prípade, ak $E > H_{NI}$ (Tabuľka 8.4)

Tabuľka 8.4 Klasifikácia skóre udržateľnosti. Upravené podľa: Phillips (2010a,b)

Interval indexu udržateľného skóre S_E	Charakteristika tried udržateľnosti
$S \leq 0$	neudržateľné
$S = 0,001 - 0,250$	veľmi slabá (veľmi nízka) udržateľnosť
$S = 0,251 - 0,5$	slabá (nízka) udržateľnosť
$S = 0,501 - 0,750$	silná (vysoká) udržateľnosť
$S = 0,751 - 1$	veľmi silná (veľmi vysoká) udržateľnosť

Matica RIAM bola opakovane využívaná aj v prípade hodnotenia projektov využívajúcich zdroje geotermálnej energie, eventuálne manažment vodných zdrojov, napríklad:

- rozvoj geotermálneho poľa El Berlin, El Salvador (AREVALO, 2003)
- geotermálna elektráreň Tuzla, Turecko (BABA, 2005)
- geotermálne pole Balcova, Turecko (BABA ET AL., 2006)
- geotermálna elektráreň Salak, Indonézia (PHILLIPS, 2010A)
- geotermálna elektráreň Sabalan, Irán (YOUSEFI ET AL., 2010)
- geotermálna elektráreň Cerro Prieto, Mexiko (GONZÁLEZ ET AL., 2015)
- rozvoj geotermálneho poľa Assal-Fiale, Džibuti (ABDI, 2018)

8.2 Návrhy posudzovaných aspektov a sub-aspektov hodnotenia pre potreby RCUE

Napriek viacerým (v zozname vyššie sú uvedené len vybrané príklady venujúce sa v publikácii len konštrukcii RIAM matice) štúdiám naďalej absentujú spoločné kritériá pri nastavovaní hodnotení matice RIAM pre projekty s využívaním geotermálnej energie, čo vyplýva z variability:

- prírodného prostredia a povahy samotných zdrojov geotermálnej energie
- prírodného prostredia v okolí projektov využívajúcich zdroje geotermálnej energie
- spoločensko-ekonomickej, kultúrnej, technologickej vyspelosti jednotlivých regiónov
- spôsobov využívania zdrojov geotermálnej energie a technológií
- princípov ochrany prírody, krajiny, a spoločensko-kultúrneho dedičstva v jednotlivých krajinách.

Napriek tomu, pre potreby RCUE je však žiaduce stanoviť aspoň niektoré aspekty v rámci komponentov, ktoré by mali byť posudzované pri konštrukcii matice RIAM, ako jednej z faktorov, ktoré môžu / mali by, vplývať na celkové hodnotenie projektov a zámerov na rozvoj produkcie geotermálnej energie na Slovensku. **Nasledujúce návrhy neboli formalizované, a ich zoznam je navrhovaný špecificky pre potreby RCUE.**

8.2.1 Fyzikálno-chemické komponenty / aspekty (PC)

Fyzikálno-chemické (PC) komponenty je možné rozdeliť na základe

- **vzťahu technických aspektov voči okoliu** (vyjadrujú aktivity súvisiace s vŕtaním, respektíve aktivitou projektu)
 - *efektivita využitia krajiny* = charakteristika vzťahu plochy a jej spoločenského významu voči energetickej kapacite projektu)
 - *technický stav projektu* = vzťah nutnosti ďalšieho rozvoja projektu a jeho infraštruktúry voči okoliu)
 - *zvukový smog* = vzťah hlučnosti projektu ku lokálnym štandardným podmienkam a okoliu, zvyčajne bude neaplikovateľný až mierne pozitívny v prípade existujúcich projektov a projektov slúžiacich predovšetkým na vykurovanie, naopak, negatívny efekt je nevyhnutný pri projektoch vyžadujúcich rozvoj – vŕtanie, logistika, rekreačných účeloch mimo urbanizácie, a elektrárníach – separátory, chladiace veže, tlmiace zariadenia
 - *kvalita povrchovej vody* = hodnotí vzťah povrchového zneškodňovania zvyškového tepla / geotermálnej vody v recipientoch, čiže v prípade špecifických prípadov, napríklad reinjektáže v kombinácii so stabilitou prietokového režimu, môže nadobúdať pozitívny efekt pre udržateľnosť
 - *kvalita podzemnej vody* = vyjadruje vzťah medzi projektom a kvalitatívnym stavom / znečistením blízkych zdrojov podzemnej vody alebo vo fáze prieskumu (zvyčajne nízke negatívne efekty súvisiace s vŕtaním) alebo počas produkcie (negatívne vplyvy môžu byť výrazné pri reinjektážnych alebo precipitačných zdržiach neizolovaných od podlažia)
 - *kvalita pôdy* = vyjadruje vzťah medzi projektom a kvalitatívnym stavom pôdy jej kontamináciou počas inštalácie a rozvoja infraštruktúry projektu (krátkodobé nízke negatívne vplyvy) alebo produkcie samotnej, kedy v špecifických prípadoch (napr. opäť reinjektážne zdrže) môže dochádzať k dlhodobej kontaminácii pôdneho profilu
 - *odor / pachový smog* = vyjadruje zmenu pachových charakteristík ovzdušia vplyvom produkcie / využívania zdrojov geotermálnej energie, predovšetkým pri nutnosti odplyňovania (špecifickými prípadmi môže byť napríklad H₂S

- *svetelný smog* = vyjadruje vzťah svetelnosti a svetelného zaťaženia projektu voči okoliu, pričom môže byť neutrálny (neaplikovateľný) alebo pozitívny v prípade navýšenia energetického výkonu projektu bez zvyšovania svietivosti, alebo negatívny, najmä mimo urbanizácie
- **vzťahu projektu k okoliu** (hodnotí vplyv využívania zdrojov geotermálnej energie na povrchové prejavy zdrojov geotermálnej energie alebo na povrchovú stabilitu)
 - *termálne prejavy* = sleduje časovú a priestorovú stabilitu, alebo zraniteľnosť povrchových termálnych prejavov (sulfatáry, fumaroly, vriace bahná, gejzíry) v súvislosti s produkciou geotermálnej energie; negatívne ak dochádza produkciou k ich pozorovanému úbytku alebo kvalitatívnym zmenám, pozitívne, ak dochádza, napríklad vplyvom reinjektáže, k ich zachovávaní, alebo aktivácii
 - *termálne pramene* = sleduje časovú a priestorovú stabilitu, respektíve zraniteľnosť termálnych a termominerálnych prameňov vo vzťahu k produkcii geotermálnej energie na lokalite – na základe hydrogeologických a hydrochemických rizík, alebo pozorovaných zmien v kvantitatívnych parametroch prameňov; s vplyvmi pozitívnymi alebo negatívnymi rovnakými, ako v prípade termálnych prejavov
 - *mikroseizmicitá* = hodnotí vzťah otvárania, rozvoja, alebo produkcie zdrojov geotermálnej energie vo vzťahu k frekvencii a magnitúde mikroseizmických prejavov (charakteristická skôr pre lokality s reinjektážou, aktívne vulkanické zóny, stimulovanie rezervoárového prostredia v úvodnej fáze prieskumu a rozvoja produkcie atp)
 - *povrchová erózia* = sleduje vplyv rozvoja alebo formovania projektu vo vzťahu k rizikám erózie povrchových vrstiev pôdy, napríklad z dôvodu lesohospodárskych alebo poľnohospodárskych zásahov
 - *svahové pohyby* = sledujú predovšetkým lokalizáciu projektov vo vzťahu k predpokladaným alebo overeným zosuvom, alebo ich neočakávaným výskytom a aktivácií najmä v exponovaných alebo uklonených, či inžiniersko-geologicky nestabilných terénoch
 - *subsistencia* = hodnotí prejavy produkcie zdrojov geotermálnej energie v súvislosti s vertikálnou stabilitou reliéfu; negatívna v prípade zmeny

nadmorskej výšky terénu, pozitívna predovšetkým ak zmenou produkčného manažmentu dochádza k návratu iniciálnych podmienok

- *zmena krajinej štruktúry* = hodnotí vplyv celkových zmien estetiky krajinej štruktúry vyvolanej vplyvom projektu, napríklad výstavbou exponovaných objektov (chladiace veže) v špecifických terénoch mimo urbanizácie alebo mimo priemyselných zón, spôsoby priestorového zasadenia projektov do konceptu krajiny atp.
- **vzťahu projektu k zdroju geotermálnej energie** (vyjadruje vzťah produkcie ku kvalitatívnym a kvantitatívnym parametrom rezervoárového prostredia, jeho energetickej bilancii, udržateľnej alebo obnoviteľnej kapacity, chemickému zloženiu geotermálnych vôd, rezervoárovej dynamike a podobne)
 - *depletácia podzemnej (plytkej) vody* = vyjadruje vzťah projektu k „obyčajnej“ podzemnej vode, t.j. jej zachovaniu alebo depletácii, zmenám v lokálnom hydrogeologickom režime atp.
 - *depletácia povrchovej vody* = vyjadruje vzťah projektu ku kvantitatívnym parametrom povrchovej vody, najmä v prípade, ak je využívaná ako nariadené médium pre povrchové zneškodňovanie zvyškového tepla, alebo ak je využívaná ako doplnujúce médium pre reinjektáž, či v sústavách vlhkých chladiacich veží ako chladiace médium
 - *stabilita parnej fázy* = vyjadruje vzťah projektu k rezervoárovej parnej fáze, a jej stabilite, nakoľko ide o termodynamicky najkvalitnejšiu zložku zdrojov geotermálnej energie, t.j. vychádza napríklad zo stability parnej fázy, možnosti jej produkcie, obnovenia produkcie, alebo naopak kondenzácií atp.
 - *rezervoárový tlak* = aspekt hodnotiaci vzťah projektu ku stabilite, zmenám, alebo obnovovaniu rezervoárového tlaku v súvislosti s produkciou geotermálnej energie, alebo pozitívnym / negatívnym vplyvom zmeny tlaku na rezervoár
 - *prienik studeného frontu* = hodnotí účinky možného prieniku studeného frontu na produkciu zdrojov geotermálnej energie, eventuálne jeho predpokladané riziká založené na modelovaní, alebo kalibrovanom modelovaní rezervoárovej odozvy

Tabuľka 8.5 Prieklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov PC komponentu – časť A

konceptné subsystémy	efektivita využitia krajiny (PC1)	technický stav projektu (PC2)	hlukový smog (PC3)	kvalita povrchovej vody (PC4)
dôležitosť vplyvu (a1)	dôležitosť / urbanizácia krajiny	potreba rozvoja projektu	rozmiestnenie hlukových zdrojov	rozsah kontaminácie
magnitúda vplyvu (a2)	spotreba krajiny (km ² /Tw,h) za rok	vzťah aktuálneho / budúceho výkonu	hlučnosť v decibeloch	ID / IT limity pre povrchové toky
permanencia vplyvu (b1)	možnosti zmien v krajine	doba produkcie / rozvoja projektu	trvanie znečistenia podľa T. 8.1	trvanie znečistenia podľa T. 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
zraniteľnosť (b4)	hodnota ochrany krajiny	urbanizácia krajiny	urbanizácia krajiny	nariedovacia kapacita
zložka (L, H, A, B)	n/a	L	A	H
konceptné subsystémy	kvalita podzemnej vody (PC5)	kvalita ovzdušia (PC6)	kvalita pôdy (PC7)	odor (PC8)
dôležitosť vplyvu (a1)	charakter využitia podzemnej vody	rozmiestnenie zdrojov kontaminácie	rozmiestnenie zdrojov kontaminácie	rozmiestnenie zdrojov kontaminácie
magnitúda vplyvu (a2)	ID / IT limity pre podzemné vody	množstvo emisií	ID / IT limity pre pôdy	stav zápachu v oblasti a okolí
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
zraniteľnosť (b4)	význam zdroja podzemnej vody	urbanizácia / industrializácia krajiny	ekonomická hodnota pôdy	urbanizácia krajiny
zložka (L, H, A, B)	H	A	L	A
konceptné subsystémy	svetelný smog (PC9)	termálne prejavy (PC10)	termominerálne pramene (PC11)	mikroseizmicita (PC12)
dôležitosť vplyvu (a1)	rozmiestnenie zdrojov kontaminácie	vzácnosť termálnych prejavov	liečebný účinok termálnych prameňov	urbanizácia krajiny
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu svetelného smogu	existencia termálnych prameňov	existencia minerálnych prameňov	frekvencia mikroseizmických udalostí
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
zraniteľnosť (b4)	urbanizácia krajiny	úroveň ochrany	úroveň ochrany	urbanizácia
zložka (L, H, A, B)	A	H	H	n/a

Tabuľka 8.5 Prieklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov PC komponentu – časť B

koncepčné subsystémy	erózia povrchu (PC13)	svahové pohyby (zosuvy) (PC14)	subsistencia (PC15)	krajinná štruktúra (PC16)
dôležitosť vplyvu (a1)	členitosť reliéfu	náchylnosť na svahové pohyby	energetická dôležitosť projektu	organizácia / rozmiestnenie projektu
magnitúda vplyvu (a2)	intenzita pôdnej erózie	frekvencia svahových pohybov	progres / obmedzenie subsidencie	narušenie krajinskej štruktúry
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
zraniteľnosť (b4)	úroveň eróznej aktivity	ohrozenie sídel	urbanizácia	hydrogeologická charakteristika rez.
zložka (L, H, A, B)	L	L	L	L
koncepčné subsystémy	depletácia povrchovej vody (PC17)	depletácia podzemnej vody (PC18)	parná fáza (PC19)	rezervoárový tlak (PC20)
dôležitosť vplyvu (a1)	význam zdroja povrchovej vody	význam zdroja podzemnej vody	termodynamická kvalita parnej fázy	význam rezervoáru
magnitúda vplyvu (a2)	zmena prietoku povrchovej vody	zmena hladiny podzemnej vody	zmena kvality parnej fázy	zmena rezervoárového tlaku
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa pravidiel obnoviteľnosti	podľa pravidiel obnoviteľnosti
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa pravidiel obnoviteľnosti	podľa pravidiel obnoviteľnosti
kumulativita vplyvu (b3)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	vplyv na produkciu a projekt	vplyv na produkciu a projekt
zraniteľnosť (b4)	hydrologická sieť	hydrogeologické podmienky	význam alebo typ rezervoáru	význam rezervoáru
zložka (L, H, A, B)	H	H	H	H
koncepčné subsystémy	energetická udržateľnosť (PC21)	prienik studeného frontu (PC22)	rezervoárový chemizmus (PC23)	rezervoárová dynamika (PC24)
dôležitosť vplyvu (a1)	význam rezervoáru	možnosti zmeny produkčnej schémy	význam rezervoáru	fázová povaha rezervoáru
magnitúda vplyvu (a2)	podľa koeficientu kapacity zásob	úroveň tolerovaného ochladenia	zmena chemizmu	úroveň zmeny rezervoárových proc.
permanencia vplyvu (b1)	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti
kumulativita vplyvu (b3)	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti
zraniteľnosť (b4)	termodynamická kvalita rezervoáru	termodynamická kvalita rezervoáru	termodynamická kvalita rezervoáru	koncové členy transportu tepla
zložka (L, H, A, B)	H	H	H	H

Tabuľka 8.5 Príklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov PC komponentu – časť C

konceptné subsystémy	termodynamická účinnosť (PC25)	tepelná účinnosť (PC26)	korózia a inkrustácia (PC27)
dôležitosť vplyvu (a1)	charakter využitia GTE	charakter využitia GTE	fázová povaha rezervoáru
magnitúda vplyvu (a2)	hladina termodynamickej úč.	hladina tepelnej úč.	vplyv na technológiu
permanencia vplyvu (b1)	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	technický stav technológie
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa koncepcie udržateľnosti	podľa koncepcie udržateľnosti	technický stav technológie
kumulativita vplyvu (b3)	vplyv na hospodárstvo	vplyv na hospodárstvo	vplyv na stálosť produkcie
zraniteľnosť (b4)	termodynamická kvalita rez.	termodynamická kvalita rez.	charakter využitia GTE
zložka (L, H, A, B)	n/a	n/a	n/a

- *energetická udržateľnosť* = vychádza zo vzťahu produkcie geotermálnej energie ku energetickej udržateľnej kapacite rezervoárového prostredia, kde môže byť napríklad hodnotenie založené na koeficiente kapacity zásob, pričom vplyv môže byť negatívny (projekt podporuje depletáciu) alebo pozitívny (projekt zvyšuje energetickú produkciu bez ohrozenia udržateľnosti) alebo veľmi pozitívny (projekt vedie k stavu, kedy môže dôjsť k obnovovaniu energetickej kapacity rezervoáru, napríklad krokové znižovanie produkcie atp.)
- *rezervoárový chemizmus* = sleduje vzťah produkcie zdrojov geotermálnej energie na stabilitu, alebo zmeny, respektíve obnovovanie chemického zloženia geotermálnej vody, rezervoárových plynov, alebo geotermálnej pary vo vzťahu k status-quo alebo ich účinkom na produkciu, stav projektu alebo prostredia
- *rezervoárová dynamika* = aspekt zameraný na stabilitu, zmeny, alebo obnovovanie dynamických procesov v rezervoári, napríklad prehrievania, stability konvekcie alebo kondukcie, fázovej stability a podobne, vo vzťahu k účinkom na kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoáru
- *termodynamická účinnosť* = hodnotí priamo termodynamickú účinnosť zdroja vo vzťahu ku globálnym trendom, prípadne kritériom môže byť vhodnosť využívania zdroja geotermálnej energie z pohľadu termodynamického potenciálu
- *tepelná účinnosť* = hodnotí priamo vyjadrenú celkovú tepelnú účinnosť zdroja vo vzťahu ku globálnym trendom

- *korózia a inkrustácia* = sleduje vplyv korózie a inkrustácie na kvalitatívny stav a ekonomickú náročnosť projektu, prípadne kvalitatívny stav životného prostredia okolia projektu

8.2.2 Biologicko-ekologické komponenty / aspekty (BE)

Biologicko-ekologické komponenty (BE) – Tabuľka 8.6 a ich hodnotenie je založené na vzťahu projektu k:

- **biotickej / biologickej / živej zložke životného prostredia** (vzťah projektu k špecifickým, konkrétnym biotickým zložkám životného prostredia na základe ich druhovej a krajinskej funkcie)
 - *terestriálna fauna* = sleduje ovplyvnenie živočíšnych druhov výstavbou alebo produkciou projektu predovšetkým cez úroveň zásahu do ich prirodzeného životného prostredia alebo biotopu
 - *terestriálna flóra* = sleduje ovplyvnenie rastlinných druhov výstavbou alebo produkciou projektu cez úroveň dopadu projektu na rastlinnú zložku, vrátane ovplyvnenia rastlinných biotopov
 - *lesníctvo* = je aspekt špecificky vyčlenený vzhľadom na aktuálne potreby ochrany lesa a manažment lesného hospodárstva, sleduje dopady na ekologický a ekonomický stav lesov ovplyvnených výstavbou alebo existenciou projektu
 - *poľnohospodárstvo* = v súvislosti s konceptom trvalo udržateľného rozvoja a potravinovej udržateľnosti a dostupnosti je vymedzené samostatne, pričom subkomponent hodnotí dopad projektu vo vzťahu k potenciálu, alebo aktívnemu využívaniu lokálnej krajiny na poľnohospodárske účely
- **ekológii životného prostredia** (vzťah projektu ku ekologickým zložkám životného prostredia a zložkám štandardne priradovaných do okruhu ekologických tém a ekologickej / ekonomickej hodnoty)
 - *druhové spoločenstvá* = hodnotí dopad projektu na druhové spoločenstvá predovšetkým z pohľadu ich spoločenskej hodnoty, ekonomickej hodnoty, legislatívnej ochrany alebo druhovej vzácnosti

- *endemitické spoločenstvá* = hodnotí dopad projektu na endemitické spoločenstvá a úroveň vplyvu projektu na ich zachovanie, alebo zmenu ich aktuálneho stavu v prípade, ak sú dokumentované
- *reliktné spoločenstvá* = hodnotí dopad projektu na reliktné spoločenstvá a úroveň vplyvu projektu na ich zachovanie, alebo zmenu ich aktuálneho stavu v prípade, ak sú dokumentované
- *biodiverzita* = hodnotí lokálnu úroveň biodiverzity, jej citlivosť, a dopad projektu na jej aktuálny, alebo budúci status
- *geodiverzita* = vyjadruje vplyv projektu na lokálnu geodiverzitu, pričom dôležitosť komponentu narastá v prípade, ak ide o objekty mimoriadnej vzácnosti, ako sú chránené krajinné útvary, alebo významné ložiská
- *chránené vtáčie územia* = vyjadruje vplyv a dopad projektu na blízke, alebo lokálne chránené vtáčie územia z pohľadu ich rozlohy, vzácnosti, predmetov ochrany a sezónne ovplyvňovanie
- *produktivita pôdy* = vyjadruje účinok projektu na ekonomickú hodnotu pôdy vyjadrenú jej produktívnym potenciálom
- *potenciál poľnohospodárskeho využitia krajiny* = vyjadruje možné ovplyvnenie alebo dopady projektu na potenciál poľnohospodárskeho využitia krajiny, ktoré je vyjadrené deterministicky cez klasifikáciu podľa IAP
- *ekologická stabilita krajiny* = vyjadruje dopad projektu na zmenu (pozitívnu, negatívnu) ekologickej stability krajiny, pričom napríklad založenie liečebných kúpeľov s termominerálnymi prameňmi môže byť pozitívnym impulzom pre ekologickú stabilitu z dôvodu vysokej legislatívnej ochrany prírody a krajiny v chránených pásmách, naopak, negatívnym impulzom pre krajinu môže byť rozširovanie vrtných – produkčných, reinjektážnych polí v už zaťaženej, alebo chránenej krajine, napriek strategickej dôležitosti
- *krajinná estetika* = vyjadruje dopad projektu alebo jeho rozvoja na krajinnú architektúru a jej prirodzený, antropogénny, alebo kombinovaný charakter, prípadne na blízkosť projektu a jeho architektúry k významným krajinným útvarom
- *prirodzený pokryv krajiny* = hodnotí dopad projektu na celkové prirodzené, prírodné pokrytie krajiny pod vplyvom jeho rozvoja, alebo dlhodobej produkcie, vrátane terénnych úprav a zmien vegetačného pokryvu

Tabuľka 8.6 Prieklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov BE komponentu – časť A

konceptné subsystémy	terestriálna fauna (BE1)	terestriálna flóra (BE2)	lesníctvo (BE3)	poľnohospodárska krajina (BE4)
dôležitosť vplyvu (a1)	geografická dôležitosť	geografická dôležitosť	stupeň obmedzenia využitia lesa	stupeň obmedzenia poľnohosp. využ.
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	miera zachovania poľnohosp. krajiny
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	množstvo ovplyvnených druhov	množstvo ovplyvnených druhov	kvalita / ekonomická hodnota lesov	možnosti využitia krajiny
zraniteľnosť (b4)	spoločenský význam	spoločenský význam	zalesnenie / lesný fond	prítomnosť poľnohospodárskej krajiny
zložka (L, H, A, B)	B	B	B	L
konceptné subsystémy	druhovú spoločnosť (BE5)	endemity (BE6)	relikty (BE7)	biodiverzita (BE8)
dôležitosť vplyvu (a1)	geografický význam	stupeň ohrozenia	geografický význam	legislatívna ochrana druhov
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	množstvo ovplyvnených spoločností	množstvo ovplyvnených druhov	množstvo ovplyvnených druhov	množstvo ovplyvnených druhov
zraniteľnosť (b4)	ekonomická hodnota (ochrana)	hustota endemitov v krajine	hustota reliktov v krajine	stupeň biodiverzity
zložka (L, H, A, B)	B	B	B	B
konceptné subsystémy	geodiverzita (BE9)	chránené vtáčie územia (BE10)	produktivita pôdy (BE11)	poľnohospodárske využitie (BE12)
dôležitosť vplyvu (a1)	geografický význam	geografický význam	produkčný potenciál pôd	potenciál poľnohospod. využitia
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	stupeň zaťaženia krajiny	početnosť druhov	členitosť poľnohospodársky okrsk	členitosť poľnohospodársky okrsk
zraniteľnosť (b4)	spoločenská dôležitosť krajiny	ekonomická hodnota druhov	bonita pôdy	bonita pôdy
zložka (L, H, A, B)	L	B	L	L

Tabuľka 8.6 Príklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov BE komponentu – časť B

konceptné subsystémy	ekologická stabilita (BE13)	krajinná estetika (BE14)	prirodzený pokryv (BE15)
dôležitosť vplyvu (a1)	miera ekologickej stability	stupeň urbanizácie krajiny	stupeň prirodzeného pokryvu
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	miera vplyvu na okolie	zasiahnuté zložky spoločnosti	miera urbanizácie krajiny
zraniteľnosť (b4)	spoločenská hodnota druhov	biodiverzita, geodiverzita	miera zalesnenia
zložka (L, H, A, B)	B	L	L

8.2.3 Kultúrno-spoločenské komponenty / aspekty (SC)

Komponent SC je možné rozdeliť na jednoduchom základe

- **sociálnych aspektov** (vychádzajú z vplyvu prostredia na človeka a kvalitu jeho života, existencie, a hodnoty v prostredí ovplyvnenom rozvojom alebo produkciou zdrojov geotermálnej energie)
 - *propagácia regiónu a okolia* = vplyv geotermálneho projektu na jeho spoločenský, národný, alebo medzinárodný význam a prezentáciu regiónu v národnom alebo medzinárodnom meradle
 - *migrácia obyvateľstva* = posúdenie dopadu projektu na imigráciu alebo emigráciu, napríklad vplyvom zmeny v kvalite života (pozitívnej, negatívnej)
 - *rekreačné možnosti* = hodnotí možnosť aktívneho alebo pasívneho oddychu lokálnej komunity ako jedného z princípov psychohygieny a telesného / duševného zdravia
 - *verejné zdravie* = hodnotí pridanú hodnotu projektov s využívaním zdrojov geotermálnej energie na zdravotný stav obyvateľstva, vrátane environmentálnych alebo zdravotných rizík, alebo, naopak, jeho zlepšovanie
 - *klimatická adaptácia* = vychádza z miery príspevku projektu k zmene klímy, z pohľadu produkcie / redukcie skleníkových plynov v súčasnosti a budúcnosti
 - *turizmus* = vplyv geotermálneho projektu na možnosti lokálnej turistiky v krajine a v okolí projektu, ako jedného zo základných ekonomických a región-

propagačných aspektov, ktoré môžu mať pozitívny vplyv na celkový spoločenský stav obyvateľstva

- *poľnohospodárstvo* = vplyv geotermálneho projektu na súčasné poľnohospodárske aktivity alebo budúce možnosti poľnohospodárskych aktivít viazaných, alebo nezávislých na projekte s využívaním geotermálnej energie ako jedného z prirodzených a základných aspektov rurálnej krajiny a spoločnosti na Slovensku
- *akvakultúra* = vplyv geotermálneho projektu na možnosti aktívneho spravovania rybného fondu a jeho využívanie v krajine, pričom najmä rizikové môžu byť aktivity vedúce k povrchovému zneškodňovaniu odpadových vôd z hľadiska polohy rybárskych revírov
- *priemysel* = vplyv projektu geotermálnej energie na udržanie, zachovanie, rozvoj, alebo zmenu priemyslu a priemyselných procesov v súvislosti s produkciou geotermálnej energie
- *verejné služby* = vzťah projektu geotermálnej energie k dynamike verejných služieb v dotknutom regióne
- *spoločenská akceptácia* = vzťah projektu geotermálnej energie k postojom dotknutej, lokálnej verejnosti, pričom predovšetkým ide o akceptovanie jeho konštrukcie alebo produkcie geotermálnej energie a jej vnímanie lokálnym obyvateľstvom
- *spoločenská adaptácia* = vzťah projektu geotermálnej energie k požiadavkám, stresovým faktorom lokálnych komunít a lokálneho spoločenstva, alebo ich relevantným návrhom
- **kultúrnych aspektov** (sledujúcich interakciu medzi projektom, a spoločensko-kultúrnou vyzrelosťou lokálnej komunity alebo spoločnosti, vrátane vzdelávania)
 - *archeológia* = vzťah projektu využívajúceho zdroje geotermálnej energie ku archeologickým náleziskám a možnosti vykonávania archeologického prieskumu v krajine
 - *výchova a vzdelávanie* = posudzuje možnosti projektu rozvoja alebo produkcie geotermálnej energie na priame pôsobenie na úroveň výchovy a vzdelávania laickej, alebo odbornej verejnosti

Tabuľka 8.7 Prikklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov SC komponentu – časť A

konceptné subsystémy	propagácia regiónu (SC1)	migrácia obyvateľstva (SC2)	rekreácia / psychohygiena (SC3)	verejné zdravie (SC4)
dôležitosť vplyvu (a1)	aktuálny stav propagácie	štruktúra obyvateľstva	aktuálne možnosti v regióne	terapeutické možnosti v regióne
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	vplyv na iné aktivity	vplyv na stav spoločnosti / okolia	potenciál rozvoja	zdravotný stav
zraniteľnosť (b4)	územná ochrana	lokálna migrácia	vplyv na rekreačné aktivity	cena zdravia
konceptné subsystémy	klimatická adaptácia (C5)	turizmus (C6)	poľnohospodárstvo (C7)	akvakultúra (C8)
dôležitosť vplyvu (a1)	energetická kapacita projektu	stav turizmu v regióne	stav poľnohospodárstva	stav akvakultúry
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	lokálny energetický mix	predpoklad vplyvu na región	predpoklad vplyvu na región	predpoklad vplyvu na región
zraniteľnosť (b4)	potenciál zmeny emisií	územná ochrana	potenciál poľnohospod. využitia	biodiverzita revíru
konceptné subsystémy	priemysel (C9)	verejné služby (C10)	spoločenská akceptácia (C11)	spoločenská adaptácia (C12)
dôležitosť vplyvu (a1)	stav priemyslu	aktuálna kvalita	stav spoločenskej akceptácie	stav adaptácie
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	vplyv na lokálne emisie	vplyv na lokálne služby	priestorový dosah projektu	spoločenský dosah projektu
zraniteľnosť (b4)	ekologická stabilita krajiny	spoločenská úroveň služieb	energetický význam projektu	energetický význam projektu

Tabuľka 8.7 Prieklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov SC komponentu – časť B

konceptné subsystémy	archeológia (SC13)	výchova / vzdelávanie (SC14)	veda / výskum (SC15)
dôležitosť vplyvu (a1)	hustota archeol. nálezísk	možnosť výchovy, vzdelávania	možnosti vedy / výskumu
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	miera zásahu do lokalít	medzinárodná spolupráca	spektrum zapojenia sektorov
zraniteľnosť (b4)	predpoklad nálezísk	aktuálna úroveň vzdelávania	aktuálna úroveň VaV
konceptné subsystémy	historické dedičstvo (SC16)	kultúrne dedičstvo (SC17)	kultúrne zvyklosti (SC18)
dôležitosť vplyvu (a1)	historické pamiatky	miera propagácie	charakter lokálnych tradícií
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	vplyv na spoločnosť	vplyv na spoločnosť	vplyv na spoločnosť
zraniteľnosť (b4)	technický stav pamiatok	aktuálny stav kultúry	spoločenská hodnota

- *rozvoj vedy a výskumu* = vplyv rozvoja projektu alebo jeho produkcie na rozvoj vedecko-výskumnej a inovačnej úrovne krajiny, školstva, priemyslu, alebo spoločnosti
- *historické dedičstvo* = špecificky hodnotí vzťah projektu alebo jeho rozvoja k zachovaniu a priestorovému, respektíve spoločenskému postaveniu objektov historického dedičstva
- *kultúrne dedičstvo* = charakterizuje dopad rozvoja projektu alebo produkcie geotermálnej energie ku objektom kultúrneho dedičstva, rozvoj kultúrneho fondu, lokálnej, národnej, alebo medzinárodnej kultúry; vrátane súčasných aktivít alebo budúceho potenciálu
- *zachovanie kultúrnych zvyklostí* = charakterizuje dopad projektu, jeho rozvoja, alebo aktívnej produkcie na uplatňovanie lokálnych, alebo regionálnych kultúrnych tradícií

8.2.4 Ekonomicko-technické komponenty (EO)

Ekonomicko technické komponenty (Tabuľka 8.8) vychádzajú z kombinácie ekonomických subkomponentov a projektovania, respektíve prevádzky geotermálneho projektu, preto je možné vyčleniť dve základné skupiny posudzovania komponentu:

- **ekonomické aspekty** (sú zamerané na vzťah projektu rozvoja alebo produkcie geotermálnej energie k jeho vplyvu na lokálnu, alebo národnú ekonomickú situáciu)
 - *kvalita bývania* = vplyv realizácie alebo prevádzky projektu na lokálnu kvalitu bývania z relevantných pohľadov (hlučnosť, svetelnosť, zmeny ceny majetku, pozemkov, infraštruktúra)
 - *hodnota bývania* = hodnotí možné dopady realizácie projektu, ako pozitívne, tak aj negatívne, na hodnotu bývania v súvislosti s jeho dlhodobou aktivitou a vplyvom na všetky zložky spoločnosti v okolí
 - *lokálna cenotvorba* = hodnotí dopady projektu na cenotvorbu energetiky, alebo lokálnu cenotvorbu tovarov a služieb počas jeho aktivity
 - *ekonomika projektu* = hodnotí, alebo odhaduje ekonomické náklady a ich primeranosť rozvoja alebo prevádzky projektu, aj v súvislosti s prevádzkovými nákladmi, ktoré tvoria samostatný aspekt
 - *cena zdravia* = hodnotí vplyv projektu na lokálnu alebo národnú cenu zdravia, čo môže mať pozitívny efekt v prípade podpory služieb vedúcich k psychohygiene alebo zlepšeniu zdravotného stavu, na druhej strane v rurálnej odľahlej oblasti zvyčajne nadobúda efekt negatívny
 - *finančná podpora* = analyzuje ekonomickú udržateľnosť a podporu projektu, predovšetkým z pohľadu verejných výdavkov a verejnej finančnej podpory zo štátneho rozpočtu
 - *zamestnanosť* = hodnotí vzťah a dopad projektu, jeho prípravy, realizácie, alebo činnosti, na lokálnu, regionálnu, alebo národnú zamestnanosť
 - *transport, doprava* = vzťahuje sa na dopad realizácie alebo činnosti projektu na aktuálne existujúcu dopravnú infraštruktúru, možnosti dopravy, prípadne jej zmeny, ktoré vyplývajú z realizácie projektu, pričom práve budovanie infraštruktúry počas prípravy a výstavby projektu môže mať aj pozitívny efekt na lokálnu dopravnú sieť

- **prevádzkové aspekty** (vzťahujú sa na posúdenie technického a technologického stavu projektu, jeho energetický prínos a efektivitu)
 - *aktuálny stav projektu* = hodnotí stav rozvoja projektu využívania geotermálnej energie z pohľadu nevyhnutnosti ďalších investícií alebo krajinných zásahov, ktoré by súviseli s potrebou rozširovania vrtných polí alebo úpravy pozemkov pre areál projektu a jeho produkčnú infraštruktúru
 - *stav technológií* = zameriava sa na analýzu zjavných ukazovateľov technického stavu projektovej / produkčnej infraštruktúry a schémy, ako sú produktovody, tepelné výmenníky, potenciálne riziká súvisiace s koróznym a inkrustačným potenciálom, a následne aj nevyhnutnosť ich výmeny alebo údržby
 - *technický stav objektov* = analyzuje technický stav objektov v rámci projektu, ich životnosť, alebo spôsob realizácie, technického zabezpečenia,
 - *účinnosť využitia plochy* = analyzuje priestorovú rozlohu projektu a organizáciu jeho komponentov, prípadne hodnotí potreby jeho ďalšieho rozširovania
 - *prevádzkové náklady* = hodnotí aktuálny stav alebo riziká spojené s prevádzkovými nákladmi s ohľadom na technický stav komponentov, zariadení, alebo projektovej infraštruktúry, a ich údržbou
 - *údržbové náklady* = hodnotí ekonomiku v súvislosti s dlhodobou produkciou geotermálnej energie vo vzťahu k ich prirodzenej, alebo amortizovanej životnosti a chemicko-technologickým parametrom rezervoárového média
 - *energetická náročnosť* = hodnotí vzťah energetických strát projektu a potrebu externých zdrojov energie k jeho činnosti, napríklad aj v súvislosti s hybridnými dizajnmi kombinujúcimi zdroj geotermálnej energie s konvenčnými palivami
 - *energetická efektívnosť* = hodnotí úroveň energetickej, tepelnej účinnosti projektu vo vzťahu ku globálnym trendom a priemerom v rámci danej technológie, respektíve spôsobu využitia a využívania geotermálnej energie
 - *energetická účinnosť* = hodnotí úroveň termodynamickej účinnosti projektu vo vzťahu ku globálnym trendom a priemerom v rámci danej technológie, respektíve spôsobu využitia a využívania geotermálnej energie
 - *prevádzkové parametre* = hodnotí prevádzkové parametre projektu vo vzťahu ku zdroju geotermálnej energie, s ohľadom na jeho frekvenciu využívania, periodicitu, časovosť, a jeho energetickú dôležitosť

Tabuľka 8.8 Príklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov EO komponentu – časť A

koncepčné subsystémy	kvalita bývania (EO1)	hodnota bývania (EO2)	lokálna cenotvorba (EO3)	ekonomika projektu (EO4)
dôležitosť vplyvu (a1)	urbanizácia, vybavenosť	aktuálny stav k slovenskému priemeru	lokálne ceny služieb	energetická dôležitosť projektu
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	vplyv na hodnotu bývania a cenotvorbu	vplyv na kvalitu bývania	vplyv na propagáciu regiónu	životnosť projektu
zraniteľnosť (b4)	občianska vybavenosť	kúpyschopnosť obyvateľstva	kúpyschopnosť obyvateľstva	financovanie projektu
koncepčné subsystémy	cena zdravia (EO5)	finančná podpora (EO6)	zamestnanosť (EO7)	transport, doprava (EO8)
dôležitosť vplyvu (a1)	lokálne negatívne vplyvy	energetická dôležitosť projektu	energetická dôležitosť projektu	energetická dôležitosť projektu
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	vplyv na verejné zdravie	dodatočné ekonomické náklady	lokálna migrácia obyvateľstva	lokálna dopravná infraštruktúra
zraniteľnosť (b4)	dostupnosť zdravotnej starostlivosti	analogické projekty	stav nezamestnanosti	financovanie projektu
koncepčné subsystémy	aktuálny stav projektu (EO9)	stav technológií (EO10)	technický stav objektov (EO11)	účinnosť využitia plochy (EO12)
dôležitosť vplyvu (a1)	energetická dôležitosť projektu	energetická dôležitosť projektu	energetická dôležitosť projektu	pomer produkcie a celkovej plochy
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	financovanie projektu	financovanie projektu	financovanie projektu	urbanizácia
zraniteľnosť (b4)	aktuálna životnosť vs. dlhodobá životnosť	aktuálna životnosť vs. dlhodobá životnosť	aktuálna životnosť vs. dlhodobá životnosť	spotreba krajiny

Tabuľka 8.8 Príklady navrhovaných limitov posudzovania kritérií aspektov EO komponentu – časť B

konceptné subsystémy	prevádzkové náklady (EO13)	údržbové náklady (EO14)	energetická náročnosť (EO15)
dôležitosť vplyvu (a1)	energetická dôležitosť projektu	energetická dôležitosť projektu	energetická dôležitosť projektu
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	korózia / inkrustácia	korózia / inkrustácia	vplyv projektu na okolie
zraniteľnosť (b4)	financovanie projektu	financovanie projektu	využitie konvenčných palív
konceptné subsystémy	energetická efektívnosť (EO16)	energetická účinnosť (EO17)	prevádzkové parametre (EO18)
dôležitosť vplyvu (a1)	energetická náročnosť projektu	energetická náročnosť projektu	energetická náročnosť projektu
magnitúda vplyvu (a2)	zmena stavu	zmena stavu	zmena stavu
permanencia vplyvu (b1)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
reverzibilita vplyvu (b2)	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1	podľa Tabuľky 8.1
kumulativita vplyvu (b3)	spotreba krajiny	spotreba krajiny	spotreba krajiny
zraniteľnosť (b4)	globálne priemery	globálne priemery	globálne priemery

Tabuľka 8.5 až 8.8 predstavuje záznam všeobecných orientačných limitov posudzovania celkovej (environmentálnej) a biologicko-ekologickej udržateľnosti projektov s využitím matice RIAM. Nakoľko nie sú limity striktné legislatívne kodifikované, v prípade potreby ich je možné meniť aj vo vzťahu k analogickým štúdiám. Cieľom návrhov je vytvoriť univerzálny, teoretický a konceptný základ prístupu k aplikácii RIAM pre projekty využitia a využívania geotermálnej energie, ako súčasti predbežného posudzovania projektov.

Väčšina „limitov“ je dostupných z verejných zdrojov, podstatné verejné zdroje sú uvedené v časti „7.4 Meta-data“ k faktorom manažmentu útvarov geotermálnych vôd.

8.3 Termalpark Bešeňová – príklad aplikácie matice RIAM

Autor si zároveň vyhradzuje právo tieto výsledky aktualizovať, doplniť, a po úprave publikovať v príslušných vedecko-výskumných periodikách.

8.3.1 Príklad 1 – thermalpark Bešeňová

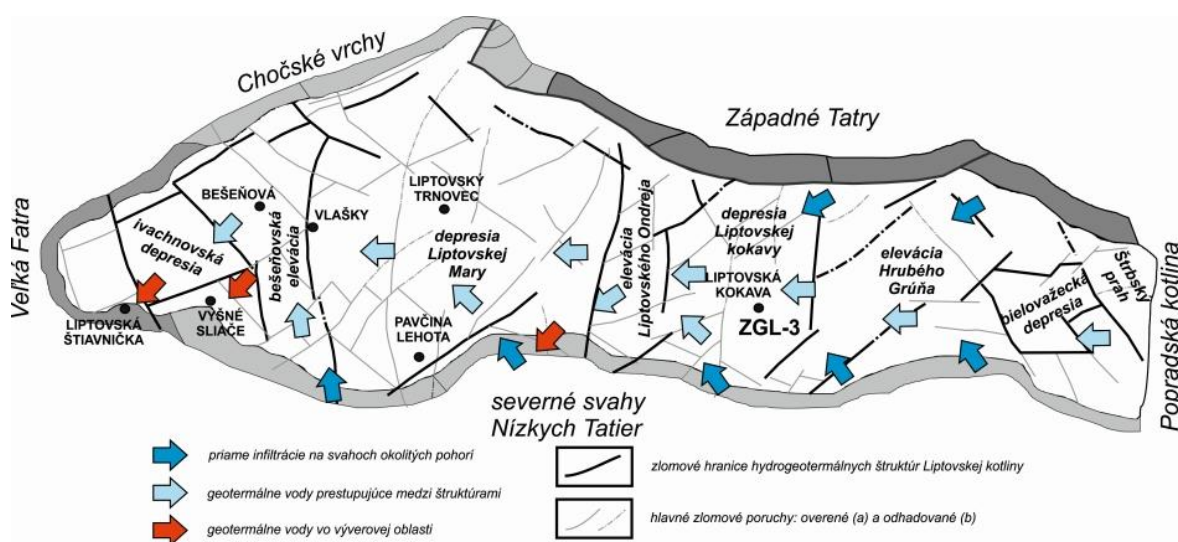
8.3.1.1 Opis projektu – hydrogeotermálna štruktúra, produkcia zdrojov GTE

Hydrogeotermálna štruktúra. Hydrogeotermálna štruktúra Bešeňovskej elevácie je jedným z čiastkových systémov útvaru geotermálnych vôd (geotermického poľa) Liptovská kotlina, v jeho západnej časti (REMŠÍK ET AL., 1998). Koncepčne ide o obehový systém laterálnych prestupov a bazénovej segmentácie s infiltračnou oblasťou na severných svahoch Nízkych Tatier, akumulácnou oblasťou práve v priestore samotnej vymedzenej bešeňovskej elevácie (Obr. 8.1), a rozvetvenou výverovou oblasťou v obci Bešeňová (lokálne travertínové kopy) a Liptovských Sliačoch (juhozápadný okraj štruktúry). Zdroj geotermálnej energie sú 1-fázové geotermálne vody prechodného $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ až $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$ typu, viazané na karbonáty spodného rezervoáru v krížňanskom príkrove (modelovaná teplota 51 – 104 °C) a vrchného rezervoáru v chočskom príkrove (modelovaná teplota 9 – 61 °C). Priestorové a vertikálne prúdenie opakovane spôsobuje prestup geotermálnych vôd medzi oboma rezervoármi a pomerne vysokú krasovo-puklinovú priepustnosť, s prejavmi lokálneho nerovnomerného prehrievania a izolovaného konvekčného prúdenia v spodnom rezervoári v inak prevažne-konduktívnom prostredí (FRIČOVSKÝ ET AL., 2015, 2016A; FENDEK ET AL., 2013, 2017A,B).

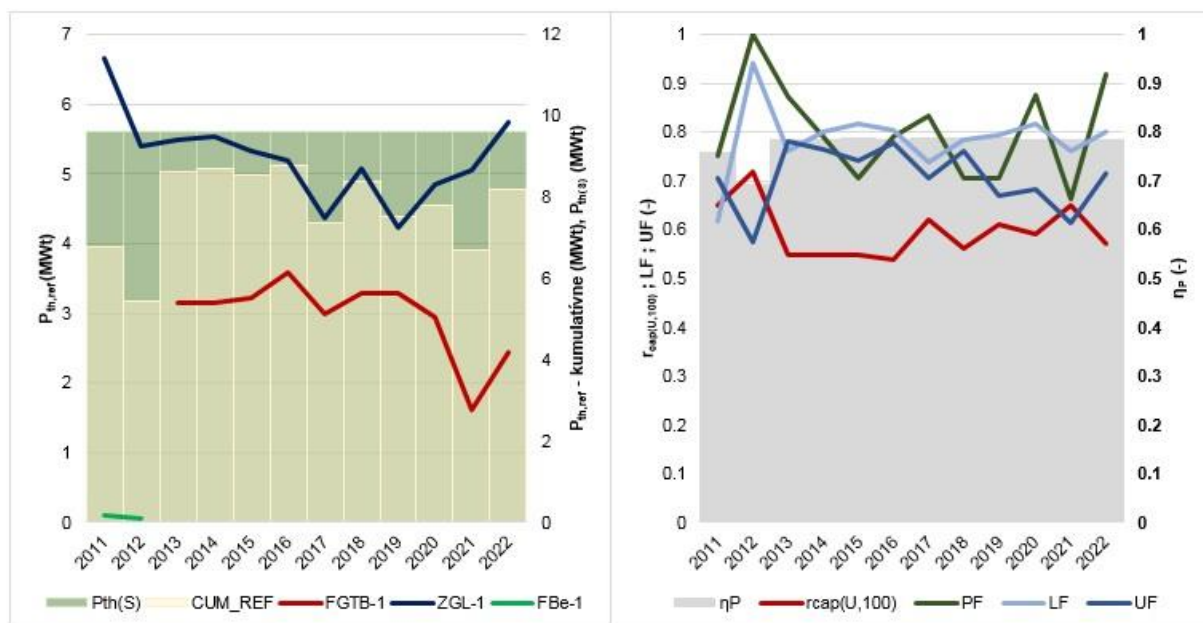
Energetický potenciál. Samostatné hodnotenie udržateľného potenciálu hydrogeotermálnej štruktúry odhaduje jeho úroveň na hladine 9,6 MWt pre $r_{\text{cap}(U,100)} = 0,5$ (FRIČOVSKÝ, 2014), pričom udržateľný energetický potenciál Liptovskej kotliny je odhadovaný na úrovni $P_{\text{th}(S)} = 33$ MWt, rovnako pre obdobie 100 rokov (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024). Prestup geotermálnych vôd v smere východ – západ v rámci Liptovskej kotliny bol preukázaný tlakovými pomermi (REMŠÍK ET AL., 1998), komunikácia hydrogeotermálnej štruktúry s blízkou obehovo-akumulácnou štruktúrou Lúčky – Kalameny s liečebnými termominerálnymi kúpeľmi bola na základe sledovania vzťahu tlakových pomerov vyvrátená (FENDEK ET AL., 2017B) a nehrozí ich vzájomné ovplyvňovanie.

Produkcia zdrojov geotermálnej energie. V rámci bešeňovskej elevácie boli dlhodobo produkované geotermálne vrty ZGL-1 Bešeňová (hlboký rezervoár) a BEH-1 Bešeňová (plytký rezervoár), pričom k inštalácii nových vrtov FBe-1 (plytký) a FGTB-1 (hlboký) a spusteniu prevádzky došlo v roku 2010 respektíve 2013. Overené zásoby geotermálnej energie predstavovali pri ustálenom prelive: $Q_{\text{pv}} = 22$ l/s, $T_{\text{wh}} = 34$ °C, $R_{\text{pv}} = 1,7$ MWt pre BEH-1; Q_{pv}

= 32 l/s, $T_{wh} = 62\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_{pv} = 5,1\text{ MWt}$; $Q_{pv} = 5,4\text{ l/s}$, $T_{wh} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_{pv} = 0,3\text{ MWt}$; a $Q_{pv} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{wh} = 66\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R_{pv} = 6,5\text{ MWt}$ (REMŠÍK ET AL., 1998; VANDROVÁ ET AL., 2009, 2011; FENDEK ET AL., 2013). V monitorovanom období, z ktorého vychádzajú aktuálne záznamy (2011 – 2022) sú využívané vrtý ZGL-1 (rok 1987) a FGTB-1 (rok 2011), pričom vrt FBe-1 produkoval geotermálnu energiu v rokoch 2011 – 2012. Základné produkčné parametre – Obrázok 8.2.



Obrázok 8.1 Priestorové vymedzenie štruktúry Bešeňovská elevácia. Upravené podľa: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)



Obrázok 8.2 Produkčné charakteristiky vrtov lokality Bešeňová. Upravené podľa: Fričovský et al. (nepublikované, 2025?)

8.3.1.2 Opis projektu – *thermalpark Bešeňová*

Rekreačný rezort Bešeňová bol prvými bazénmi uvedený do prevádzky už v roku 1993 na východnom okraji rovnomennej obce. V roku 1996 bola produkcia geotermálnych vôd využitá okrem bazénového hospodárstva aj pre skleníkové pestovanie paradajok, následne od roku 2006 a neskôr 2008 prebehlo niekoľko etáp rekonštrukcie a rozširovania služieb, vrátane ubytovacích kapacít a služieb. Celková plocha areálu, vrátane 3 ubytovacích kapacít a 16 bazénov (vrátane 9 celoročných), produktovodov, a vrtov situovaných priamo v rámci vymedzeného areálu, dosahuje $0,5 \text{ ha} = 0,005 \text{ km}^2$. Rezort je v rámci zastavanej plochy, t.j. nevyžaduje žiadne zásahy do prirodzeného prostredia.

V rámci bezprostredného okolia je dôležité spomenúť národnú prírodnú pamiatku Bešeňovské travertíny, ktorá vzniká dôsledkom výstupu termálnych prameňov zo spodného rezervoáru, cez namiešavanie geotermálnych vôd vo vrchom rezervoári, až po finálny výstup k povrchu, kde dochádza k ich ochladeniu a narietovaniu plytkými a studenými podzemnými vodami. Zmenou teploty a tlaku sa na povrchu formujú travertínové kopy mimoriadne citlivé na chemizmus rezervoárového prostredia, množstvo vertikálne prestupujúcich geotermálnych vôd, a prítomnosť plytkých podzemných vôd v kvartérnom, povrchovom pokryve.

Región Liptova je výrazne závislý od turizmu a jeho propagácie. Nakoľko ubytovacie kapacity v hotelovom rezorte nie sú dostatočné vzhľadom na návštevnosť, je existencia thermalparku mimoriadne prospešná pre lokálne komunity z pohľadu prenájmu ubytovacích zariadení. Okrem viacdňovej turistiky je veľmi rozšírená aj jednodňová turistika s využitím služieb. Samotný areál opakovane prechádza rozvojom atrakcií, alebo starostlivosťou o ubytovacie priestory. Lokálna dopravná sieť nie je areálom ovplyvnená. Prírodné pomery sú limitované, geotermálne vody sú po ochladení a narietení povrchovo vypúšťané.

8.3.1.3 Fyzikálno-chemické aspekty (PC) - zdôvodnenia

- **efektivita využitia krajiny (PC1)** = projekt je situovaný v obytnom území ($a_1 = 1$) s nízkou energetickou hustotou $< 10 \text{ km}^2/\text{TWh,t}$ ($a_2 = 3$), pričom keďže ide o samotný priestor areálu, dopad na okolitú krajinu je aj v prípade rozširovania produkcie alebo služieb minimálny, a možný; t.j. permanencia a trvanie vplyvu sú vysoko pozitívne
- **technický stav projektu (PC2)** = projekt je situovaný v obytnom území ($a_1 = 1$), pričom ďalší rozvoj služieb alebo vykurovacích kapacít je stále možný ($a_2 = 3$) z existujúcich produkčných vrtov na lokalite; podľa vzťahu k udržateľnej rezervoárovej kapacite je

naďalej možné produkovať geotermálne vody aj vzhľadom na TURM ($b_1 = 4$, $b_2 = 4$, $b_3 = 4$, $b_4 = 4$)

- **hlukový smog (PC3)** = v rámci polohy areálu nie je možné hovoriť o výraznom vplyve na environment ($a_1 = 1$) napriek tomu hustota návštevnosti a otváracie doby projektu môžu mať vplyv na okolitý životný štandard spoločnosti, keďže ide o jeden z najnavštevovanejších rezortov ($a_2 = 1$), t.j. problémy hlukového znečistenia mierne znižujú jeho synergiu s krajinou a jej obyvateľstvom (b_1 až $b_4 = 3$)
- **kvalita povrchovej vody (PC4)** = geotermálna voda je povrchovo zneškodňovaná v zmysle legislatívnej úpravy a na základe nariadení kapacít povrchových recipientov, s pomerne stálou hladinou v závislosti na manažmente Liptovskej priehrady; priama kontaminácia nebola preukázaná = neaplikovateľné
- **kvalita podzemnej vody (PC5)** = neexistujú údaje o kontaminácii podzemnej vody v súvislosti s prevádzkou projektu, hoci jeho drobné prejavy nie je možné úplne vylúčiť (neaplikovateľné)
- **kvalita ovzdušia (PC6)** = zdrojom emisií ovzdušia je predovšetkým CO_2 , ktorého kumulatívna produkcia dosiahla v priemere $11 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ ročne pri priemernej koncentrácii voľného CO_2 800 mg/l a odhadovanej ideálnej separácii ($a_2 = -1$), pričom vzhľadom na lokálnu dopravu a antropogénnu produkciu CO_2 ide o zanedbateľný prírastok ($a_1 = 1$, $b_3 = 1$, $b_4 = 1$), pričom ide pomerne o dlhodobý proces produkcie geotermálnych vôd ($b_1 = 4$), ale reverzibilný vhodnou chemickou úpravou geotermálnych vôd, či využitím separovaného plynu ($b_2 = 2$)
- **kvalita pôdy (PC7)** = na lokalite neexistujú indície o znehodnotení kvality pôdy kontamináciou vplyvom samotnej produkcie zdrojov geotermálnej energie, hoci lokálne kontaminácie aktivitou termalparku nie je možné vylúčiť (neaplikovateľné)
- **odor (PC8)** = medzi produkovanými plynmi v rámci lokality a jej bezprostredného okolia nie sú koncentrácie impaktných plynov, ktoré by vplývali na zmeny lokálnej situácie (neaplikovateľné)
- **svetelný smog (PC9)** = projekt je situovaný v urbánnej zóne, napriek tomu ale v teréne s dobrou horizontálnou viditeľnosťou a dosahom, výrazne podfarbený a so svetelnými efektmi ($a_1 = 2$, $a_2 = -2$), pričom jeho vplyv je síce permanentný, ale krátkodobý, regulovaním svetelných atrakcií ($b_1 = 4$, $b_2 = 1$), s pomerne nízkym vplyvom na obyvateľstvo, respektíve faunu ($b_3 = 1$, $b_4 = 1$)

- **termálne prejavy (PC10)** = v oblasti nie sú dokumentované termálne prejavy (gejzíry, solfatáry, fumaroly, horúce bahná), takže komponent nie je aplikovateľný
- **termominerálne pramene (PC11)** = sensu stricto sú termominerálne pramene „prekryté“ efektom vyššie spomínaného nariadenia a ochladzovania, a ich priamymi príznakmi sú travertínové kopy predstavujúce prírodnú pamiatku ($a1 = 4$), ktorých postupné vysychanie ($a2 = -2$) je už niekoľko rokov dokumentované ($b1 = 3$), pričom ide o objekt mimoriadnej štátnej ochrany ($b4 = 4$), s otáznou zvratnosťou ($b2 = 2$), ale z pohľadu zložiek životného prostredia nízkym vplyvom na ostatnú faunu a flóru ($b3 = 2$) s výnimkou negatívneho vplyvu na propagáciu terénu
- **mikroseizmicita (PC12)** = nebola v súvislosti s produkciou geotermálnej energie dokumentovaná, a zároveň ani pri poslednej realizácii vrtných prác nedošlo k stimulácii horninového prostredia, ktorá by viedla k tvorbe mikroseizmických eventov (neaplikovateľné)
- **erózia povrchu (PC13)** = projekt nemá vplyv, pozitívny, ani negatívny, na eróznú zraniteľnosť povrchu (neaplikovateľné)
- **svahové pohyby (PC14)** = svahové deformácie, ktoré by vznikali vplyvom produkcie geotermálnej energie alebo rozvoja projektu termalparku neboli dokumentované (neaplikovateľné)
- **subsistencia (PC15)** = subsistencia nebola na lokalite meraná, vzhľadom na to, že odoberané množstvá geotermálnej energie (a geotermálnych vôd) sú stále pod hladinou udržateľnej rezervoárovej kapacity je ale predpoklad, že k nej vôbec nedochádza (neaplikovateľné)
- **krajinná štruktúra (PC16)** = projekt je koncentrovaného charakteru na ploche s minimálnou spotrebou krajiny, čo prispieva k jej ekonomickému efektívnemu využitiu, keďže ide o urbanizovanú oblasť ($a1 = 4$, $a2 = +2$), pričom existencia projektu viacmenej 30 rokov ($b1 = 4$) a nateraz nie známe plány na rozširovanie projektu, spolu s dostatočným potenciálom aktuálnych vrtov ($b2 = 3$) má pozitívny vplyv aj na spoločnosť ($b3 = 3$), a zrejme významne neovplyvňuje prírodné, ani rezervoárové procesy ($b4 = 4$)
- **depletácia povrchovej vody (PC17)** = povrchová voda nie je v rámci termalparku cielene využívaná, preto je kritérium neaplikovateľné
- **depletácia podzemnej vody (PC18)** = lokálne zdroje podzemnej vody predovšetkým vo výverovej oblasti dotujú významné bešeňovské travertíny spolu s výstupovými cestami termálnych vôd ($a1 = 2$), pričom ich funkciou je podpovrchové zmiešavanie a spolutvorba,

ktorá bola v posledných rokoch dokumentovaná ako ustupujúca ($a_2 = -2$) s nie úplne objasneným vplyvom termalparku; niekoľko rokov dokumentované ($b_1 = 3$), pričom ide o objekt mimoriadnej štátnej ochrany ($b_4 = 4$), s otáznou zvratnosťou ($b_2 = 2$), ale z pohľadu zdrojov podzemnej vody len s parciálnym vplyvom ($b_3 = 2$) s výnimkou negatívneho vplyvu na propagáciu terénu

- **parná fáza (PC19)** = rezervoárové prostredie je nízkoentalpické, jednofázové, s prítomnosťou geotermálnych vôd; neaplikovateľné
- **rezervoárový tlak (PC20)** = rezervoár je významný predovšetkým z pohľadu dotovania jedného z najvýznamnejších termalparkov na Slovensku, pričom ale nepredstavuje z hľadiska termodynamickej kvality a energetického potenciálu prostredie národného významu ($a_1 = 2$); z hľadiska produkcie otvorený už v roku 1987 respektíve 1993, bez výrazných zmien v tlakovom režime ($a_2 = +3$); z pohľadu pravidiel udržateľnosti je možné predpokladať jeho udržateľné využívanie ($b_1 = 4$) a nateraz pri zachovaní produkcie nezvratné ($b_2 = 4$), s pozitívnym vplyvom na fázovú a chemickú stabilitu ($b_3 = 4$), ale vzhľadom na obnoviteľnosť je produkcia náchylná na zmenu najmä z dôvodu hydrogeologickej otvorenosti ($b_4 = 3$)
- **energetická udržateľnosť (PC21)** = podmienky definujúce význam rezervoáru rovnaké ako v PC20 ($a_1 = 2$), pričom podľa vývoja r_{cap} (Obr. 8.2) je produkciu možné hodnotiť ako udržateľnú v nízkom pásme rizika, hoci neperspektívnu z pohľadu rozvoja už inštalovaného výkonu ($a_2 = 2$); z pohľadu pravidiel udržateľnosti je teda rezervoár produkovaný nateraz udržateľne, s drobnými výkyvmi v rámci r_{cap} ($b_1 = 4$), pre nízky rozdiel medzi $P_{th,ref}$ a $P_{th}(S)$ bez predpokladaných výrazných zmien ($b_2 = 4$), s pozitívnym vplyvom na stabilitu rezervoárového prostredia a nízke riziko ($b_3 = 3$), avšak s náchylnosťou na zmenu v prípade výkyvov v navyšovaní produkcie ($b_4 = 2$)
- **prienik studeného frontu (PC22)** = možnosti zmeny produkčnej schémy nie sú možné, nakoľko rezervoár je otvorený, bez reinjektáže, a teda potenciálny prienik studeného frontu by mal plošný charakter ($a_1 = 4$) s nevyhnutnosťou zmien v produkčnej stratégii, z tohto dôvodu nepozorované ochladenie ($a_2 = +3$) je možné považovať stále za prejav udržateľnej produkcie ($b_1 = 4$), kvôli hydrogeologickej otvorenosti a významnému deficitu kontinuálneho a presného monitoringu citlivé na zmenu ($b_2 = 1$; $b_4 = 1$), s pozitívnym vplyvom na rezervoárovú stabilitu a zachovanie jeho dynamiky ($b_3 = 4$)
- **rezervoárový chemizmus (PC23)** = rezervoár je významný, ale nepredstavuje z hľadiska termodynamickej kvality a energetického potenciálu prostredie národného

významu ($a_1 = 2$); z hľadiska produkcie otvorený už v roku 1987 respektíve 1993, bez výrazných zmien v rezervoárovom chemizme ($a_2 = +3$); pričom je možné hovoriť o jeho chemicky-udržateľnom využívaní ($b_1 = 4$), napriek nedostatočnému monitoringu a len odhadovanej permanencii zachovania rezervoárového chemizmu ($b_2 = 1$, $b_4 = 1$), s pozitívnym vplyvom najmä na samotné fungovanie termalparku a primerané náklady na jeho logistickú údržbu ($b_3 = 4$)

- **rezervoárová dynamika (PC24)** = rezervoár je zdrojom 1-fázových geotermálnych vôd, s preukázanými systémami izolovanej konvekcie a opakovaných prestupov geotermálnych vôd ($a_1 = 2$); pričom napriek energetickej udržateľnosti je otázny vplyv skutočného zachovania prirodzenej dynamiky z pohľadu travertínových kôp ($a_2 = 1$) vyžadujúcich dotovanie plytkých rezervoárov podzemnej vody zdrojmi geotermálnej energie s vertikálnymi prestupmi ($b_1 = 2$; $b_2 = 2$; $b_3 = 2$; $b_4 = 2$)
- **termodynamická účinnosť (PC25)** = termodynamická účinnosť nebola doteraz pre termalpark bešeňová počítaná (neaplikovateľné)
- **tepelná účinnosť (PC26)** = v tomto prípade zastúpená faktormi LF, UF a účinnosťou produkcie je dlhodobo v pásme 0,6 – 0,7 (Obr. 8.2) ($a_2 = +1$), čo je nad priemerom projektov priameho využívania geotermálnej energie s kaskádovými systémami ($a_1 = 2$); pričom tieto ukazovatele platia dlhodobo ($b_1 = 4$), vzhľadom na kaskády je možná ich kombinácia v prípade nepriaznivého stavu ($b_2 = 3$), s pozitívnym vplyvom na stabilitu hospodárskeho výkonu termalparku a využívania geotermálnej energie ($b_3 = 4$); pričom termodynamicky ide o rezervoár s nízkou termodynamickou kvalitou, v ktorých účinnosť môže byť pomerne jednoducho upravovaná podľa sezónnych alebo hospodárskych potrieb, prípadne podľa geotermických podmienok rezervoáru ($b_4 = 1$)
- **korózia a inkrustácia (PC27)** = keďže ide o jednofázový zdroj geotermálnej energie s preukázanou rezervoárovou dynamikou ($a_1 = 2$), je vplyv korózie a inkrustácie na projektovú infraštruktúru stále hodnotený ako primeraný ($a_2 = +3$); a doteraz neboli zaznamenané anomálne zmeny alebo potreby technickej a technologickej údržby zariadení nad rámec očakávaného technicko-technologického stavu ($b_1 = 4$, $b_2 = 4$, $b_3 = 4$); aspekt stráca na dôležitosti pre spôsob využívania – rekreačné využívanie s napojením na kaskády ($b_4 = 2$).

8.3.1.4 *Biologicko-ekologické aspekty (BE) - zdôvodnenia*

- **terestriálna fauna (BE1)** = v rámci širšieho okolia termalparku je dokumentovaná prítomnosť viacerých spoločensky významných alebo chránených druhov (napr. hrabač tatranský, hlavátka podunajská, mihul'a Vladykovova, rosnička zelená, sova dlhochvostá, vydra riečna), z ktorých najmä vodné druhy (obmedzená rozmanitosť a početnosť) sú s aktivitou termalparku pre povrchové zneškodňovanie geotermálnych vôd priamo spojené ($a_1 = 2$; $b_3 = 2$), avšak s pozitívnym efektom najmä vzhľadom na zachovanie pôvodného stavu ($a_2 = 1$), a to počas celej produkcie, a pri zachovaní jej parametrov aj s projekciou pokračovania pozitívneho vplyvu ($b_1 = 4$), s potenciálom rýchlej zmeny situácie ($b_2 = 1$), pri rôznorodej spoločenskej dôležitosti druhov ($b_4 = 2$)
- **terestriálna flóra (BE2)** = priamo v rámci areálu flóru významnej spoločenskej druhy dokumentované neboli ($a_1 = 1$) v širšom okolí areálu sú zaznamenané stanovištia chránených, endemitických aj reliktných druhov (napr. klinček, poniklec, horčičník, žerušnica, iskerník); celkovo ale výstavba areálu ovplyvnila, najmä jeho rozloha pôvodne na „zelenej ploche“ pôvodnú flóru ($a_2 = -1$) lokálneho významu ($b_3 = 1$; $b_4 = 2$) počas doby existencie areálu ($b_1 = 4$), so stabilnou permanenciou ($b_2 = 4$)
- **lesníctvo (BE3)** = v rámci využívania zdrojov geotermálnej energie, respektíve konštrukcie a existencie areálu, nebol stav lesov nijako ovplyvnený; neaplikovateľné
- **poľnohospodárska krajina (BE4)** = pôvodná krajina je charakterizovaná stredným zastúpením poľnohospodársky vhodnej pôdy na výmere, s nízkym potenciálom rozvoja poľnohospodárstva ($a_1 = 1$; $b_4 = 1$), ktorá bola výstavbou areálu premenená na zastavanú plochu ($a_2 = -3$), počas celej doby prevádzky areálu, v súčasnosti ale stavebné aktivity prebiehajú len v rámci vymedzeného priestoru ($b_1 = 4$; $b_2 = 4$); čo zároveň trvalo obmedzilo ostatné využívanie krajiny, s výnimkou lokálneho skleníkového hospodárstva v rámci areálu ($b_3 = 3$)
- **druhovú spoločnosť (BE5)** = priamo aktivitou areálu sú ohrozené predovšetkým vodné spoločnosti pri aktuálnej situácii ($a_1 = 2$), z ktorých niektoré sú hospodársky významné, respektíve chránené ($b_4 = 2$), avšak miera ich ovplyvnenia je pravdepodobne nízka ($a_2 = -1$), pričom ide predovšetkým o aktivity vzťahované na svetelný alebo zvukový smog areálu, respektíve povrchové vypúšťanie odpadových geotermálnych vôd do recipientu počas celej doby prevádzky ($b_1 = 4$; $b_2 = 4$; $b_3 = 2$; $b_4 = 2$)
- **endemitizácia (BE6)** = napriek dokumentovanej prítomnosti endemitických druhov, nie je možné hodnotiť vplyv projektu priamo na ich existenciu; neaplikovateľné

- **relikty (BE7)** = napriek dokumentovanej prítomnosti reliktných druhov, nie je možné hodnotiť vplyv projektu priamo na ich existenciu; neaplikovateľné
- **biodiverzita (BE8)** = v rámci lokálnej biodiverzity je len niekoľko druhov chránených alebo pasportizovaných so spoločenskou hodnotou ($a1 = 1$; $b3 = 1$; $b4 = 2$); pričom k zmene pôvodného stavu došlo najmä výstavbou areálu a jeho rozširovaním v sídelnej oblasti ($a2 = -1$), a to po dobu existencie projektu ($b1 = 4$), s nízkou kapacitou regenerácie ($b2 = 3$)
- **geodiverzita (BE9)** = z hľadiska geodiverzity je povrch tvorený typickým kvartérnym pokryvom, respektíve sedimentmi paleogénu, a staršie geologické útvary na povrch nevystupujú, jedinou prírodnou pamiatkou sú bešeňovské travertíny ($a1 = 2$; $b3 = 1$); pričom otázka deficitu ich dotovania podzemnými a geotermálnymi vodami je predmetom diskusií ($a2 = -1$) poslednú dekádu ($b1 = 3$) s pomerne komplikovanou reverzibilitou ($b2 = 4$), pričom ale hrozí ich postupná degradácia a strata z pohľadu environmentálnej udržateľnosti ($b4 = 4$)
- **chránené vtáčie územia (BE10)** = v priestore projektu nie sú vymedzené chránené vtáčie územia, a jeho aktivita na chránené vtáčie územia nevplyva; neaplikovateľné
- **produktivita pôdy (BE11)** = projekt produkcie zdrojov geotermálnej energie nemá vplyv na produktivitu lokálnej pôdy; neaplikovateľné
- **poľnohospodárske využitie (BE12)** = lokálne pôdy majú všeobecne nízky produkčný potenciál ($a1 = 1$); avšak výstavbou projektu došlo k ich trvalému znehodnoteniu ($a2 = -3$; $b1 = 4$), pričom zmena aktuálneho stavu nie je predpokladaná ani pozitívne, ani negatívne ($b2 = 4$); avšak s minimálnym vplyvom na okolie ($b3 = 1$) pri nízkej bonite pôvodnej pôdy ($b4 = 1$)
- **ekologická stabilita (B13)** = celá oblasť je považovaná za ekologicky stredne stabilnú ($a1 = 2$); pričom je možné konštatovať udržanie stavu krajiny napriek neustálemu rozširovaniu služieb ($a2 = +1$), počas dlhodobého rozvoja termalparku ($b1 = 4$), s minimálnou náchylnosťou na zmenu pri zachovaní spôsobov využívania geotermálnej energie ($b2 = 3$), ale pozitívnym vplyvom na stav obyvateľstva a jeho aktivity ($b3 = 4$), pričom však je stále otáznym vplyv produkcie na chránené travertínové kopy ($b4 = 2$)
- **krajinná estetika (BE14)** = projekt je situovaný v urbánnej oblasti ($a1 = 1$), zasadený mimo významných krajinných celkov, pre rekreačný rezort v príhodnej oblasti vodnej plochy s potenciálom zabránenia jej obmedzeného využívania spoločnosťou ($a2 = 1$), pričom tento efekt je dlhodobý a úsporný voči spotrebe krajiny ($b1 = 4$, $b3 = 4$), s nízkym

potenciálom zmeny ($b_2 = 3$) a len otáznym negatívnym vplyvom na krajinné pamiatky ($b_4 = 2$)

- **prirodzený pokryv (BE15)** = projekt je situovaný aktuálne v zastavanej oblasti, ktorá bola predtým poľnohospodárskym územím s nízkym potenciálom ($a_1 = 1$), pričom všetky aktivity naďalej prebiehajú v rámci areálu a nevplývajú negatívne na okolitý prirodzený pokryv ($a_2 = +3$) od založenia termalparku a jeho sprievodných činností ($b_1 = 4$) s otáznym potenciálom na zmenu vzhľadom na obmedzené možnosti ($b_2 = 4$), zachovávaním využitia krajiny ($b_3 = 4$) v rámci areálu ($b_4 = 1$)

8.3.1.5 Kultúrno-spoločenské aspekty (SC) - zdôvodnenia

- **propagácia regiónu (SC1)** = termalpark bešeňová je významným prvkom regionálneho turizmu s medzinárodnou aj domácou návštevnosťou ($a_1 = 4$), čo výrazne ovplyvnilo lokálnu ekonomiku a všeobecné povedomie o regióne ($a_2 = +3$), s postupným nárastom a stabilitou návštevnosti vďaka rozvoju miestnych služieb ($b_1 = 4$; $b_3 = 4$), pričom región je silne závislý od existencie projektu ($b_2 = 4$) a teda citlivý na jeho prípadné obmedzenia ($b_4 = 1$)
- **migrácia obyvateľstva (SC2)** = región nie je prirodzeným migračným centrom ($a_1 = 4$) ale rozvojom termalparku a napojených služieb je v regióne pozorovaná prirodzená imigrácia, a naopak, spomalenie ekonomickej emigrácie, s podielom pod 0,5 ($a_2 = +1$); pričom tento efekt sa postupne zosilňuje ($b_1 = 2$) a je závislý na ekonomickej prosperite a trvaní projektu ($b_2 = 2$; $b_4 = 2$), čo vplýva pozitívne na konkurencieschopnosť v okolí ($b_3 = 2$)
- **rekreácia a psychohygiena (SC3)** = projekt využívania geotermálnej energie je skôr oddychovo, rekreačne orientovaný ($a_1 = 3$) s viacerými službami podporujúcimi relaxáciu, aj keď vďaka popularite typicky masovo orientovaný s príslušným hlukovým a svetelným zaťažením ($a_2 = +1$); projekt sa s ohľadom možností stále rozvíja ($b_1 = 3$), pričom možnosti lokálnej rekreácie a psychohygieny sú závislé od jeho prosperity ($b_2 = 2$); pritom stále existuje potenciál rozvoja, ktorého businessplán ale nie je zrejmý, rovnako, ako budúce zameranie – okrem proklamovanej výstavby – ($b_3 = 1$; $b_4 = 1$)
- **verejné zdravie (SC4)** = využívanie geotermálnej energie nie je zamerané na striktné terapeutické účely, a verejné zdravie s výnimkou psychohygieny nijako neovplyvňuje; neaplikovateľné

- **klimatická adaptácia (SC5)** = z pohľadu podielu na produkcii tepla zo zdrojov geotermálnej energie projekt v Bešeňovej predstavuje približne 8 – 10 % podiel v posledných 10 rokoch, čo je extrémne vysoké číslo ($a_1 = 4$; $b_3 = 4$; $b_4 = 4$), ktoré ostáva dlhodobo stabilné a prispieva klimatickej adaptácii ($a_2 = +3$; $b_1 = 3$); pričom trvanie pozitívneho vplyvu je závislé od manažmentu produkcie dosahujúceho nižšie pásmo udržateľnosti ($b_2 = 2$)
- **turizmus (SC6)** = celý región je turisticky atraktívny ($a_1 = 4$), pričom možnosti ubytovania aj v rámci areálu termalparku rozvoj turizmu podporujú ($a_2 = +2$) dlhodobo ($b_1 = 4$), hoci nevyhnutne so zaťažením krajiny spoločenskými aktivitami človeka ($b_2 = 2$; $b_3 = 2$), pričom turizmus zasahuje aj do celkov územnej ochrany krajiny ($b_4 = 2$)
- **poľnohospodárstvo (SC7)** = bezprostredný areál neovplyvňuje aktuálne poľnohospodárske aktivity; neaplikovateľné
- **akvakultúra (SC8)** = produkcia geotermálnej energie nie je zameraná na akvakultúrne účely, vzhľadom na podnikateľský plán modelu a vhodnosť zdrojov geotermálnej energie; neaplikovateľné
- **priemysel (SC9)** = produkcia geotermálnej energie nie je zameraná na priemysel, a vzhľadom na aktuálne termické a termodynamické aspekty ani nie je možné predpokladať zaradenie priemyselného segmentu do schémy; neaplikovateľné
- **verejné služby (SC10)** = úroveň verejných služieb a ich dostupnosti v oblasti je možné považovať za priemernú ($a_1 = 2$), pričom s výnimkou ubytovania a rekreácie projekt sám o sebe neovplyvňuje dostupnosť všeobecných služieb ($a_2 = +1$); ale pozitívny vplyv zaznamenáva postupný progres naviazaný na rozvoj areálu ($b_1 = 2$; $b_2 = 2$; $b_3 = 3$; $b_4 = 2$)
- **spoločenská akceptácia (SC11)** = vo všeobecnosti je geotermálna energia akceptovaný alternatívny zdroj energie na Slovensku, z čoho je možné predpokladať, že aj akceptácia v lokálnom regióne je skôr podobná spoločenskému pohľadu, aj napriek pochopiteľným výhradám vzhľadom na svetelný alebo hlukový smog ($a_1 = 2$, $a_2 = +1$); hoci s priemerným skóre, čo sa týka vplyvov na obyvateľstvo a jeho spokojnosť, pretože spomenuté negatívne vplyvy sú vnímané ako vyvážené viac individuálne ($b_1 = 2$; $b_2 = 2$; $b_3 = 3$; $b_4 = 2$)
- **spoločenská adaptácia (SC12)** = projekt vo všeobecnosti vychádza z komerčného plánu, pričom miera adaptácie a zohľadnenia stavu a potrieb lokálnych komunít bola pomerne nízka ($a_1 = 3$, $a_2 = -1$); a nie sú známe aktivity projektu a jeho vlastníkov, ktoré by zohľadňovali požiadavky miestnej komunity ($b_1 = 2$; $b_2 = 2$; $b_3 = 3$; $b_4 = 2$)

- **archeológia (SC13)** = archeologické náleziská nie sú v mieste realizácie projektu dokumentované; neaplikovateľné
- **výchova / vzdelávanie (SC13)** = využívanie zdrojov geotermálnej energie a energetická dôležitosť projektu s ohľadom na podiel produkcie na celoslovenskej úrovni je z pohľadu výchovy a vzdelávania hodnotené ako nedostatočné ($a_1 = 4$, $a_2 = -3$); pričom tento stav s ojedinelými výnimkami v rámci školských exkurzií pretrváva, vrátane deficitu medzinárodnej spolupráce, pri všeobecne nedostatočnom povedomí spoločnosti o princípoch geotermálnej energie a jej využívania ($b_1 = 2$; $b_2 = 2$; $b_3 = 3$; $b_4 = 3$)
- **veda a výskum (SC15)** = pri stave úrovne vedy a výskumu v rámci zdrojov geotermálnej energie, ich využitia, využívania, alebo výskumu a prieskumu je rovnako veľmi negatívne hodnotené opomínanie spolupráce vedeckého, akademického, a komerčného sektora na projekte, s výnimkou ojedinelých vedeckých výstupov v rámci optimalizácie tepelných procesov alebo hydrogeotermálneho hodnotenia ($a_1 = 4$, $a_2 = -1$, $b_1 = 2$, $b_2 = 2$, $b_3 = 4$, $b_4 = 4$)
- **historické dedičstvo (SC16)** = v objekte, a jeho bezprostrednom okolí, nie sú ovplyvnené objekty historického dedičstva; neaplikovateľné
- **kultúrne dedičstvo (SC17)** = v spojitosti s termalparkom nie sú evidované žiadne nepriaznivé vplyvy na kultúrne dedičstvo regiónu a lokálnych komunít; neaplikovateľné
- **kultúrne zvyklosti (SC18)** = termalpark je otvorený celoročne, hoci sa na jeho okolie nevzťahujú žiadne špecifické kultúrne zvyklosti, ale umožňuje celoročné pobyty aj v rámci najvýznamnejších spoločenských alebo náboženských sviatkov a udalostí ($a_1 = 1$, $a_2 = +2$); pričom z religiózneho hľadiska tieto aspekty nie sú vždy prijímané pozitívne ($b_1 = 4$, $b_2 = 4$, $b_3 = 2$, $b_4 = 2$)

8.3.1.6 Ekonomicko-technické aspekty (EO) - zdôvodnenia

- **kvalita bývania (EO1)** = projekt je situovaný v rámci zastavanej zóny s výraznejším svetelným a hlukovým smogom vzhľadom na jeho rozlohu a návštevnosť, čo môže negatívne ovplyvňovať miestne obyvateľstvo, na druhej strane návštevnosť projektu čiastočne podporuje rozvoj miestnych služieb a domáci príjem ($a_1 = 2$; $a_2 = -1$; $b_1 = 4$; $b_2 = 2$; $b_3 = 4$; $b_4 = 1$)
- **cena bývania (EO2)** = z pohľadu udržateľnosti a dostupnosti projekt mierky termalparku Bešeňová automaticky dvíha cenu pozemkov a nehnuteľností, a vzhľadom na

blízkosť aj podporuje cenotvorbu (zvyšuje) pre relevantné skupiny obyvateľstva so záujmom o vlastníctvo nehnuteľností v tejto lokalite ($a_1 = 2$; $a_2 = -1$; $b_1 = 2$; $b_2 = 2$; $b_3 = 2$; $b_4 = 2$); avšak projekt aj negatívne zasahuje širšie okolie regiónu vzhľadom na dostupnosť rekreačného bývania

- **lokálna cenotvorba (EO3)** = dostupnosť služieb, alebo tovarov, je nevyhnutne ovplyvnená prítomnosťou významného dovolenkového rezortu, ktoré s jeho rozvojom a rozširovaním možností, a turizmu, respektíve návštevnosti, naďalej rastú, pričom je viazaná práve na stabilitu a prítomnosť rezortu, čo spôsobuje aj preliv návštevníkov do vzdialenejších, menej zasiahnutých oblastí, a ich dochádzanie na rekreácie ($a_1 = 4$; $a_2 = -2$; $b_1 = 3$; $b_2 = 3$; $b_3 = 2$; $b_4 = 3$)
- **ekonomika projektu (EO4)** = energeticky dôležitý projekt z pohľadu výroby tepla z geotermálnej energie je celý zriaďovaný a momentálne vlastnený súkromným sektorom, pričom práve súkromný sektor je prevažným investorom do rozvoja projektu, s výnimkou úvodného prieskumu pre zdroje geotermálnej energie realizované štátom, čo je najrizikovejšia časť rozvoja využívania zdrojov ($a_1 = 4$; $a_2 = +2$; $b_1 = 4$; $b_2 = 4$; $b_3 = 4$; $b_4 = 4$)
- **cena zdravia (EO5)** = projekt nemá dopady a vplyv na lokálnu cenu zdravia, nakoľko priamo nepôsobí na liečebno-terapeutické možnosti, ani nepôsobí negatívne, alebo ako významný stresový jav na obyvateľstvo; neaplikovateľné
- **finančná podpora (EO6)** = projekt je realizovaný a spravovaný prevažne zo súkromných investícií, s minimálnou dotáciou štátu na jeho prevádzku, čo je výrazný rozdiel oproti podobným projektom s menším energetickým dosahom závislým na finančnej podpore zo štátneho rozpočtu alebo štrukturálnych prostriedkov ($a_1 = 4$; $a_2 = +2$; $b_1 = 4$; $b_2 = 4$; $b_3 = 4$; $b_4 = 4$)
- **zamestnanosť (EO7)** = postupné rozširovanie projektu a na projekt naviazaných služieb, vrátane subdodávok pre jeho časti ubytovania, alebo stravovania, prípadne miestnej bezpečnosti, pozitívnym vplyvom a progresívne podporuje lokálnu mieru nezamestnanosti a znižuje mieru ekonomickej emigrácie z regiónu, aj keď vzhľadom na absolútne množstvo pracovných miest ide o menšie absolútne počty, ako v iných segmentoch hospodárstva ($a_1 = 4$; $a_2 = +2$; $b_1 = 4$; $b_2 = 3$; $b_3 = 2$; $b_4 = 3$)
- **transport, doprava (EO8)** = projekt nemá priame, ani nepriame dopady (pozitívne, negatívne) na možnosti stav transportu, alebo dopravy v regióne; neaplikovateľné

- **aktuálny stav projektu (EO9)** = momentálne je projekt, predovšetkým jeho infraštruktúra a možnosti ubytovania, vo fáze zlepšovania a modernizácie, vychádzajúc zo snahy zvyšovania komfortu, bez vplyvu na prírodné prostredie, ale s prirodzeným obmedzením komfortu ubytovaných počas rekonštrukčných prác – náklady sú hradené zo strany súkromného investora ($a1 = 4$; $a2 = +1$; $b1 = 4$; $b2 = 4$; $b3 = 4$; $b4 = 3$)
- **stav technológií (EO10)** = v súčasnosti nie sú známe negatívne, nie prirodzené vplyvy produkcie zdrojov geotermálnej energie, ktoré by mali podmieňovať neplánované, alebo nadštandardné výmeny technológií; neaplikovateľné
- **technický stav objektov (EO11)** = technický stav objektov v rámci areálu je vzhľadom na ich rozdielny vek zodpovedajúci, s primeranou mierou údržby podporujúcej celkovú aj ekonomickú udržateľnosť projektu, najmä ak je postavený na súkromnom financovaní ($a1 = 4$; $a2 = +2$; $b1 = 3$; $b2 = 3$; $b3 = 4$; $b4 = 3$)
- **účinnosť využitia plochy (EO12)** = projekt je charakteristický nízkym zámerom plochy vzhľadom na množstvo produkovanej energie; pričom efektívnosť stúpa postupne; plocha je využívaná efektívne a všetky aktivity sú koncentrované v rámci areálu, čo prispieva k znižovaniu plošného dopadu projektu na okolie ($a1 = 4$; $a2 = +3$; $b1 = 4$; $b2 = 4$; $b3 = 4$; $b4 = 4$)
- **prevádzkové náklady (EO13)** = nie sú k dispozícii; neaplikovateľné
- **údržbové náklady (EO14)** = nie sú k dispozícii; neaplikovateľné
- **energetická náročnosť (EO15)** = projekt spojený kaskádovými systémami v sektore individuálneho vykurovania a vyhrievania priestorov pre ubytovanie a administratívu, vyhrievania bazénov a skleníkové hospodárstvo výrazne prispieva k diverzifikácii využitia zdrojov geotermálnej energie, avšak nelimituje úplne spotrebu konvenčných energetických surovín ($a1 = 4$; $a2 = +2$; $b1 = 3$; $b2 = 2$; $b3 = 4$; $b4 = 3$)
- **energetická efektívnosť (EO16)** = údaje k energetickej efektívnosti nie sú dostupné (chýbajú reálne dáta zo skutočnej produkcie tepelnej energie výmenníkmi tepla v termalparku); neaplikovateľné
- **energetická účinnosť (EO17)** = údaje k energetickej účinnosti nie sú dostupné (chýbajú reálne dáta zo skutočnej produkcie tepelnej energie výmenníkmi tepla v termalparku); neaplikovateľné
- **prevádzkové parametre (EO18)** = prevádzkové náklady projektu nie sú k dispozícii, preto ich nie je možné hodnotiť vo vzťahu k selektívnym ukazovateľom; neaplikovateľné

8.3.1.7 Celkové skóre udržateľnosti - S_E

Hodnotenie aspektov jednotlivých komponentov (PC, BE, SC, EO) sú v tabuľkách 8.9 a 8.10 rozdelené na potenciál a potreby spoločnosti. **Fyzikálno-chemické komponenty** (Tab. 8.9 a Obr. 8.3) sú hodnotené podľa 15-tich relevantných kritérií, z čoho 4 (kvalita ovzdušia, svetelný smog, termominerálne pramene a depletácia podzemnej vody) sú hodnotené s negatívnym vplyvom na celkovú udržateľnosť, ktoré sa vzťahujú najmä na dlhodobý pozorovaný problém s tvorbou travertínových kôp národnej prírodnej pamiatky Bešeňovské travertíny, a neistotami, ktoré vyplývajú z vzťahu produkovaných geotermálnych vôd a hydrogeologických pomerov plytkých, studených podzemných vôd k mechanizmom ich vzniku a udržiavaniu. Naopak, najviac pozitívnych vplyvov má všeobecne sub-komponent rezervoárového prostredia a jeho manažmentu, v tomto zmysle pomerne nízke amplitúdy vplyvu (aT) sú viac-menej jednoduchou fázovou povahou rezervoárov – geotermálnej vody, ktorej udržateľný manažment je jednoduchší ako v prípade prítomnosti parnej frakcie. Celkové skóre $\sum PC = 3370$ b, pričom dosiahnutý priemer $PC_{avg} = 224$ b, čo podľa tabuľky 8.3 zodpovedá skóre +B (+2) = veľmi pozitívny vplyv. Pomer $\sum PC / PC_{max} = 0,59$. Celkovo je ale PC komponent možné považovať za v primeranej kondícii, pričom k jednoznačnému nárastu môže prispieť vysvetlenie vzťahu geotermálnych a podzemných vôd (a ich nevyhnutného zmiešavania) ku spomínaným travertínovým kopám. **Biologicko-ekologické komponenty** (Tab. 8.9 a Obr. 8.3) vstupujú do hodnotenia na strane zdrojov podľa 10-tich aplikovateľných aspektov, z čoho 6 má negatívny vplyv, predovšetkým vo vzťahu k prvotnému obmedzeniu poľnohospodárskych aktivít vyplývajúcich z výstavby celého areálu termalparku, a ovplyvneniu pôvodných rastlinných spoločenstiev bez toho, aby došlo skôr k zlepšeniu ich ochrany, alebo spoločenskej hodnoty aspoň v širšom okolí projektu, hoci s výnimkou geodiverzity (t.j. travertíny) ide o najmenšie negatívne skóre na úrovni -A (-1).

Tabuľka 8.9 Hodnotenie a skóre PC a BE komponentov

komponenty		a1	a2	b1	b2	b3	b4	aT	bT	ES	ES-rel	RB	segment
PC1	efektivita využitia krajiny	1	3	4	4	4	4	3	16	48	240	2	L
PC2	technický stav projektu	1	3	4	4	4	4	3	16	48	240	2	L
PC3	hlukový smog	1	1	3	3	3	3	1	12	12	204	1	A
PC6	kvalita ovzdušia	1	-1	4	2	1	1	-1	8	-8	184	-1	A
PC9	svetelný smog	2	-2	4	1	1	1	-4	7	-28	164	-1	A
PC11	termominerálne pramene	4	-2	3	2	2	4	-8	11	-88	104	-3	H
PC16	krajinná štruktúra	4	2	4	3	3	3	8	13	104	296	3	L
PC18	depletácia podzemnej vody	2	-2	3	2	2	4	-4	11	-44	148	-2	H
PC20	rezervoárový tlak	2	3	4	4	4	3	6	15	90	282	3	H
PC21	energetická udržateľnosť	2	2	4	4	3	2	4	13	52	244	2	H
PC22	prienik studeného frontu	4	3	4	1	4	1	12	10	120	312	4	H
PC23	rezervoárový chemizmus	2	3	4	1	4	1	6	10	60	252	3	H
PC24	rezervoárová dynamika	2	1	2	2	2	2	2	8	16	208	1	H
PC26	tepelná účinnosť	2	1	4	3	4	1	2	12	24	216	1	H
PC27	korózia a inkrustácia	2	3	4	4	4	2	6	14	84	276	3	H
BE1	terestriálna fauna	2	1	4	1	2	2	2	9	18	210	1	B
BE2	terestriálna flóra	1	-1	4	4	1	2	-1	11	-11	181	-1	B
BE4	poľnohospodárska krajina	1	-3	4	4	3	1	-3	12	-36	156	-2	L
BE5	druhovú spoločnosť	2	-1	4	4	2	2	-2	12	-24	168	-1	B
BE8	biodiverzita	1	-1	4	3	3	2	-1	12	-12	180	-1	B
BE9	geodiverzita	2	-1	3	4	1	4	-2	12	-24	168	-1	L
BE12	poľnohospodárske využitie	1	-3	4	4	1	1	-3	10	-30	162	-1	L
BE13	ekologická stabilita	2	1	4	3	4	2	2	13	26	218	1	B
BE14	krajinná estetika	1	1	4	3	4	2	1	13	13	205	1	L
BE15	prirodzený pokryv	1	3	4	4	4	1	3	13	39	231	2	B

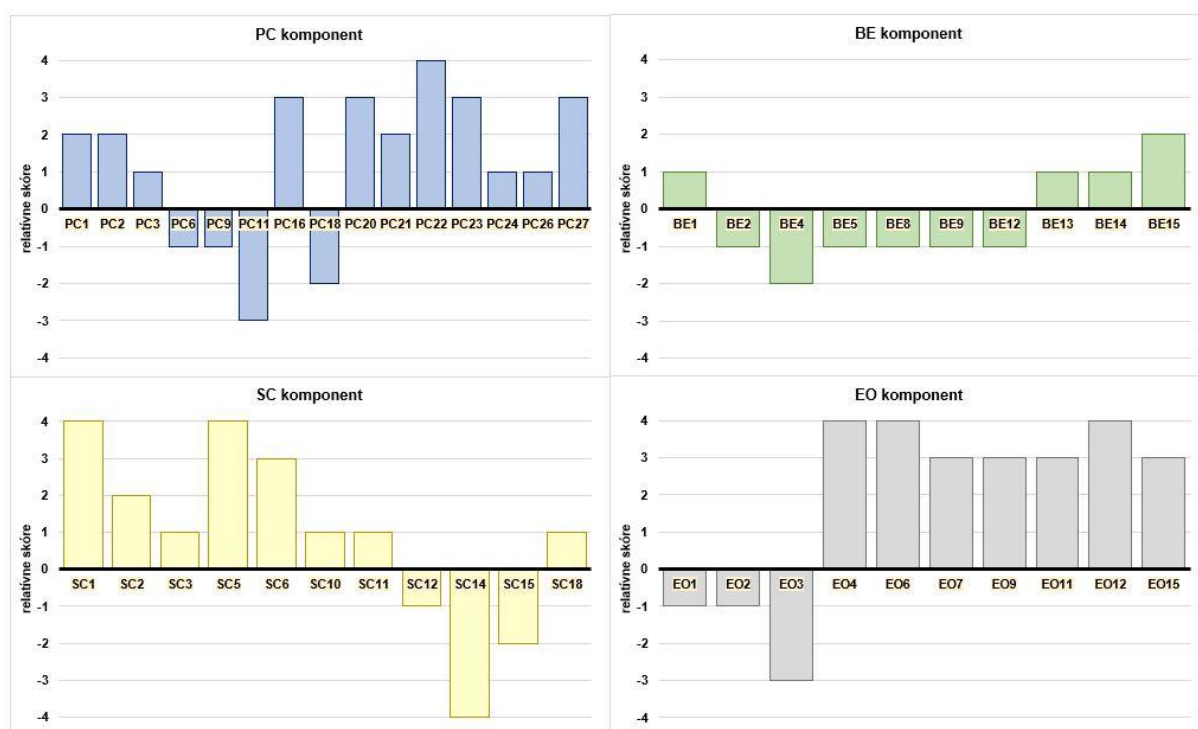
Tabuľka 8.10 Hodnotenie a skóre SC a EO komponentov

komponenty		a1	a2	b1	b2	b3	b4	aT	bT	ES	ES-rel	RB
SC1	propagácia regiónu	4	3	4	4	4	1	12	13	156	348	4
SC2	migrácia obyvateľstva	4	1	2	2	2	2	4	8	32	224	2
SC3	rekreácia a psychohygiena	3	1	3	2	2	1	3	8	24	216	1
SC5	klimatická adaptácia	4	3	3	2	4	4	12	13	156	348	4
SC6	turizmus	4	2	4	2	2	2	8	10	80	272	3
SC10	verejné služby	2	1	2	2	3	2	2	9	18	210	1
SC11	spoločenská akceptácia	2	1	2	2	2	2	2	8	16	208	1
SC12	spoločenská adaptácia	3	-1	2	2	2	2	-3	8	-24	168	-1
SC14	výchova a vzdelávanie	4	-3	2	2	3	3	-12	10	-120	72	-4
SC15	veda a výskum	4	-1	2	2	4	4	-4	12	-48	144	-2
SC18	kultúrne zvyklosti	1	2	4	4	2	2	2	12	24	216	1
EO1	kvalita bývania	2	-1	4	2	4	1	-2	11	-22	170	-1
EO2	hodnota bývania	2	-1	2	2	2	2	-2	8	-16	176	-1
EO3	lokálna cenotvorba	4	-2	3	3	2	3	-8	11	-88	104	-3
EO4	ekonomika projektu	4	2	4	4	4	4	8	16	128	320	4
EO6	finančná podpora	4	2	4	4	4	4	8	16	128	320	4
EO7	zamestnanosť	4	2	4	3	2	3	8	12	96	288	3
EO9	aktuálny stav projektu	4	1	4	4	4	3	4	15	60	252	3
EO11	technický stav objektov	4	2	3	3	4	3	8	13	104	296	3
EO12	účinnosť využitia plochy	4	3	4	4	4	4	12	16	192	384	4
EO15	energetická náročnosť	4	2	3	2	4	3	8	12	96	288	3

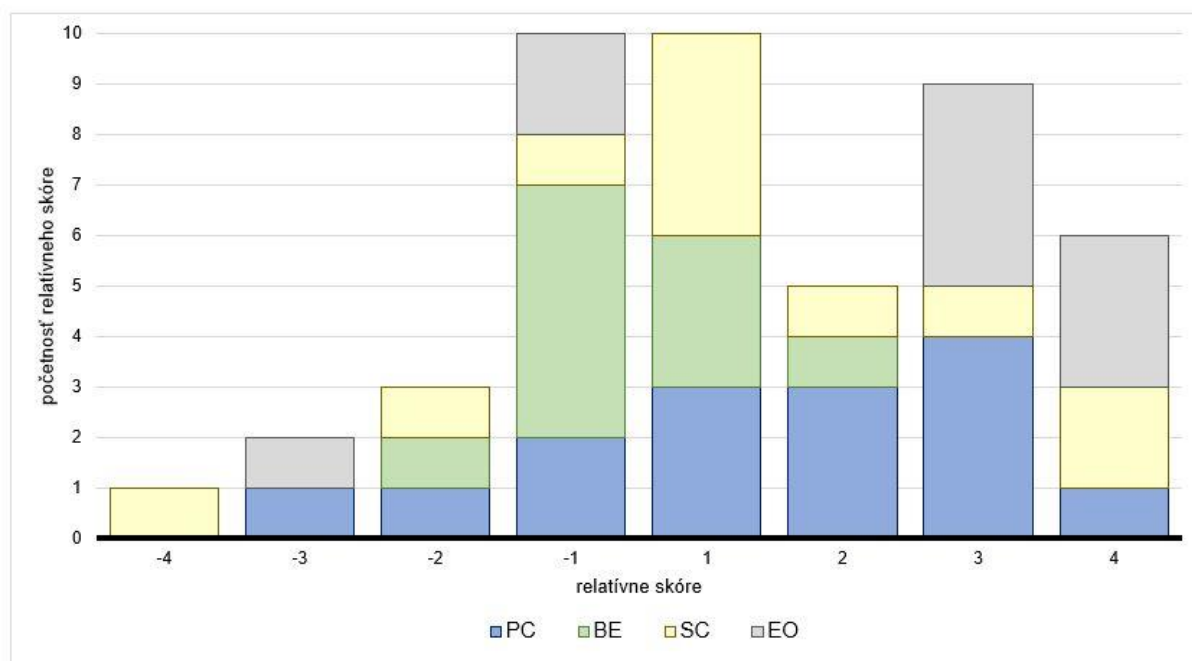
BE komponent, či v pozitívnom, alebo negatívnom zmysle, sú ovplyvnené predovšetkým dlhodobou permanenciou (Tabuľka 8.9), a pomerne nízkou zvratnosťou, keďže zabranie poľnohospodárskej pôdy, alebo vplyv najmä na rastlinné spoločenstvá, je všeobecne dlhodobý a nie je ho možné odstrániť – a ani predpokladať, počas trvania projektu. Celkové skóre $\sum BE = 1879$ b, pričom dosiahnutý priemer $BE_{avg} = 188$ b, čo podľa tabuľky 8.3 zodpovedá hornému intervalu skóre -A (-1) = negatívny vplyv. Pomer $\sum BE / BE_{max} = 0,49$. Z uvedeného vyplýva, že BE komponent predstavuje negatívnu zložku environmentálneho potenciálu prostredia a pomerne citlivý, nedostatočný „rezervoár“ pre ľudské potreby a aktivity. Priestor pre výraznejšie zlepšenie stavu BE komponentu môže priniesť priestorová ochrana, alebo aktivity areálu, ktoré by podporili ochranu okolia, prípadne zmena legislatívy, ktorá by prispela ku zavedeniu ochranných pásiem aj pre geotermálne vody a ich priemet na povrchu najmä v oblastiach mimoriadneho energetického, ekonomického, alebo environmentálneho významu.

Kultúrno-spoločenské aspekty (Tabuľka 8.10; Obrázok 8.3 až 8.4) sú distribuované v celom spektre hodnotiaceho skóre, pričom len 3 z 11 aspektov sú hodnotené ako negatívne, a to vo vzťahu najmä k nevyužitému potenciálu významného termalparku a projektu pre rozvoj vzdelávania, školstva, vedy a výskumu, a pre nízku úroveň adaptácie projektu voči spoločenstvu, ktorá je ale všeobecne nízka na Slovensku. Negatívny impakt má vo všeobecnosti ale v prípade spomínaných aspektov krátku permanenciu a môže byť pomerne rýchlo zvratný. Naopak, silné SC aspekty sa viažu na spoločenský význam termalparku, ktorý výrazne podporuje lokálny turizmus a propagáciu regiónu, na ktoré sú naviazané aj zamestnanosť, zväčšovanie životných štandardov miestnej komunity (s výnimkou cien a dostupnosti bývania) a podobne. Keďže celkový vplyv SC aspektov je viazaný na prosperitu a funkciu termalparku, aj pozitívne efekty sú často hodnotené ako citlivé, čo sa následne odráža aj na niektorých nízkych pozitívnych skóre. Celkové skóre $\sum SC = 2426$ b, pričom dosiahnutý priemer $SC_{avg} = 221$ b, čo podľa tabuľky 8.3 zodpovedá hornému intervalu skóre +A (+1) = pozitívny vplyv. Pomer $\sum SC / SC_{max} = 0,57$ znamená pomerne nízke kultúrno-spoločenské požiadavky spoločnosti na ďalšie zlepšovanie, čo zároveň znamená znižovanie spotreby PC a BE komponentu.

Ekonomicko-technické aspekty (Tabuľka 8.10; Obrázok 8.3 až 8.4) boli aplikovateľné na 10-tich ukazovateľoch, nakoľko napríklad údaje o priamej produkcii energie nevyhnutné pre výpočet tepelnej a termodynamickkej účinnosti nie sú dostupné. Tri aspekty, viažuce sa na kvalitu, dostupnosť bývania a cenotvorbu, boli vyhodnotené s negatívnym aspektom. Ide o prirodzený vzťah medzi populárnym, známym relaxačno-turistickým rezortom a prirodzeným nárastom cien v jeho okolí, ktorý ale obmedzuje štandardy a „blahobyť“



Obrázok 8.3 Distribúcia relatívneho skóre medzi jednotlivými komponentmi



Obrázok 8.4 Distribúcia početností relatívneho skóre medzi jednotlivými komponentmi

lokálnej komunity, ktorá nemá žiaden ekonomický vzťah ku projektu. Typické pozitíva rozbehnutých a existujúcich projektov vyplývajú z rozvoja zamestnanosti a potlačenia ekonomickej emigrácie obyvateľov, ktorá súvisí s postupným vytváraním pracovných miest s tým, ako sa projekt vyvíja. Miera pozitívneho vplyvu je daná predovšetkým energetickým významom termalparku. Celkové skóre $\sum EO = 2598$ b, pričom dosiahnutý priemer $EO_{avg} = 260$ b, čo podľa tabuľky 8.3 zodpovedá hornému intervalu skóre +C (+3) = výrazne pozitívny vplyv. Pomer $\sum EO / EO_{max} = 0,68$. Podľa dostupných ekonomicko-technických údajov je teda možné rovnako konštatovať, že stav „blahobytu“ alebo úroveň technicko-ekonomickej vyspelosti spoločnosti, alebo regiónu, je pomerne vysoká, čo následne vplýva na nízke nároky na rezervoár prírodných zdrojov vyjadrených cez PC alebo BE komponent.

Podľa vzťahu jednotlivých komponentov, ich reálneho skóre a dosiahnuteľného maxima /8.6/ je možné vyjadriť celkové environmentálne skóre termalparku na úrovni $S_E = 0,17$:

$$S_E = E - H_{NI} = \left[\frac{3370 + 1879}{(5760 + 3840)} \right] - \left[\frac{(4224 - 2426) + (3840 - 2598)}{(4224 + 3840)} \right] = 0,546 - 0,376 = 0,17$$

čo znamená, že podľa klasifikácie je možné projekt termalparku hodnotiť ako **veľmi slabo** / **veľmi nízko udržateľný** (PHILLIPS, 2010A,B). Najvýznamnejšie dôvody sú:

- nízka bilogicko-ekologická kapacita okolia vyplývajúca z dlhodobého obmedzenia do poľnohospodárskej pôdy, rastlinného pokryvu, výskytu druhov so spoločenskou ochranou a nezlepšovania ich stavu ochrany alebo rozsahu
- doteraz neobjasnený vzťah ku národnej prírodnej pamiatke Bešeňovské travertíny, ale s celkom zrejmou súvislosťou voči ich insuficientnej dotácii podzemnými vodami s požadovaným chemizmom vznikajúcim aj výstupom geotermálnych vôd do plytkých polôh
- zanedbaná interakcia medzi projektom a spoločnosťou na úrovni vedy, výskumu, vzdelávania
- nárast ceny bývania a jeho dostupnosti, ktorý je štandardný pri rekreačných rezortov mimoriadneho významu, aký predstavuje aj termalpark Bešeňová
- naviazaním pozitívnych spoločensko-kultúrnych aspektov na priamu aktivitu a existenciu termalparku, ktorá zvyšuje ich zraniteľnosť voči vonkajším vplyvom.

8.3.1.8 Ekologické skóre udržateľnosti - S_{EB}

Ekologické skóre počíta s aspektmi, ktoré sa vzťahujú na atmosféru (A), biosféru (B), hydrosféru (H) a litosféru (L) /8.6/, pričom zásadný rozdiel v počítaní environmentálneho skóre je v tom, že komponent biosféry je daný, a jeho maximálna nie je možné vyjadriť.

Dosadením do vzťahu /8.6/ je následné ekologické skóre $S_{EB} = 0,24$ vyššie, ako celkové, environmentálne skóre:

$$S_{EB} = E_{EB} - H_{NI} = \left[\frac{(552 + 1188 + 2042 + 1467)}{(1152 + 3456 + 2688 + 1188)} \right] - \left[\frac{(4224 - 2426) + (3840 - 2598)}{(4224 + 3840)} \right] \quad /8.6/$$
$$= 0,61 - 0,376 = 0,24$$

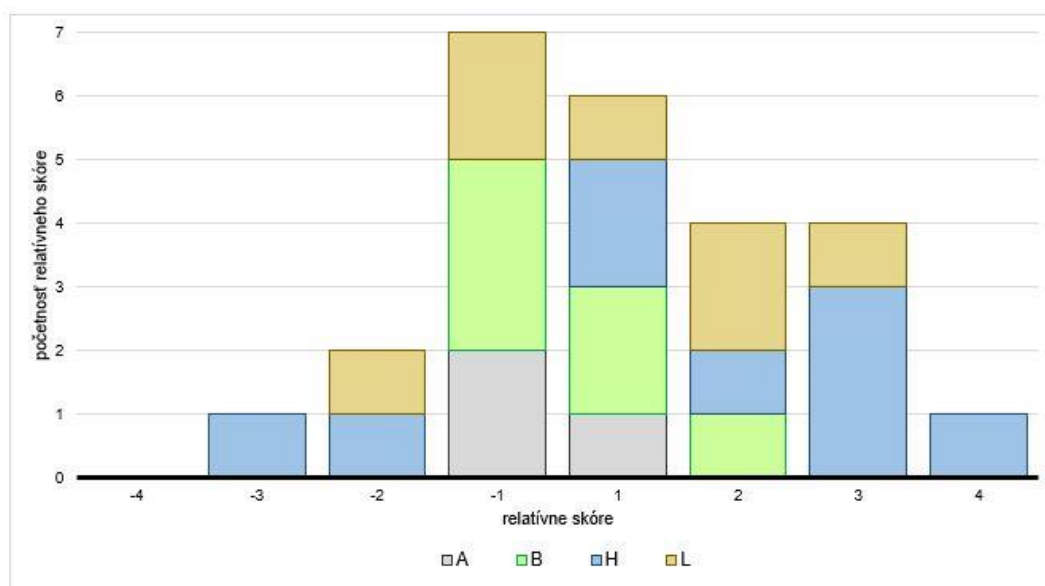
Podľa klasifikačného kritéria (Tabuľka 8.4) hodnota $S_{EB} = 0,24$ znamená veľmi nízku udržateľnosť z pohľadu dopadu na prírodné aspekty prostredia. Výkon subkomponentov A, B, H a L sa pohybuje v rozpätí $X / X_{max} = 0,49$ (A) až $0,57$ (H), čo sa následne odráža aj na hodnotách environmentálneho skóre. Z pohľadu celkového dopadu jednotlivých subkomponentov životného prostredia (Obr. 8.5) je aj napriek problémom s Bešeňovskými travertínmi v najlepšom stave hydrosféra, ktorá získava pozitívna najmä z pohľadu rezervoárového manažmentu, pričom litosféra je ovplyvnená najmä zásahom do pôvodnej poľnohospodárskej krajiny.

8.3.1.9 Možnosti zlepšenia udržateľnosti termalparku Bešeňová

Na základe analýzy komponentov a subkomponentov, je niekoľko kľúčových riešení, ktoré môžu prispieť k úprave, alebo zmenám negatívneho, či málo pozitívneho skóre jednotlivých aspektov v súvislosti s produkciou geotermálnej energie na lokalite Bešeňová (Tab. 8.9 a 8.10):

- investície do výskumu a monitorovania produkovaných geotermálnych vôd – náklady spojené s nepriamym úžitkom do rozšíreného monitorovania zdrojov geotermálnej energie (chemický, termochemický, termický, tlakový monitoring a dôsledné kontinuálne sledovanie produkovaných množstiev geotermálnych vôd), pričom spolupráca s nestrannými firmami zaoberajúcimi sa monitoringom, alebo vedecko-výskumnými inštitúciami by mohla priniesť informácie o vzťahu medzi produkciou geotermálnych vôd a režimom dotovania bešeňovských travertínov ako národnej prírodnej pamiatky, a následne:

- ak sa preukáže súvis produkcie geotermálnych vôd (hydraulický, termochemický) s Bešeňovskými travertínmi, navrhnúť riešenie regulovania produkcie geotermálnych vôd alebo technických riešení pre zvýšenie termickej a termodynamickej účinnosti pri zachovaní, alebo obmedzení produkovaných množstiev
 - mierny dopad na relevantné komponenty PC11, PC18, BE9 v prípade, ak aj nedôjde k zmene aktuálneho status-quo
 - značný pozitívny dopad na komponenty PC11, PC18, BE9 v prípade, ak dôjde k obnoveniu hydrogeologického a chemického režimu travertínových kôp
- ak sa nepreukáže súvis produkcie geotermálnych vôd s travertínovými kopami, a definitívne sa vylúči ovplyvnenie rezervoárovej dynamiky, potom pre komponenty PC11, PC18 a BE9 platí status-quo, t.j. vyradenie zo zoznamu relevantných komponentov, čo príslušne upraví celkové a ekologické skóre
- za uváženie stojí redukcia svetelného smogu, hoci práve svetelné efekty a osvetľovanie atrakcií (priamy pozitívny vplyv na PC komponenty), ako aj areálu a jemu prislúchajúcich budov je jedným z hlavných reklamných prvkov; v kombinácii s redukciou hlukového smogu, respektíve jeho kompenzáciou, je možné docieľiť zvýšenie akceptácie a adaptability projektu (SC11, SC12) a environmentálne, respektíve ekologické skóre zvýšiť nepriamo redukciou na strane deficitných potrieb



Obrázok 8.5 Distribúcia početností relatívneho skóre medzi ekologickými komponentmi

- negatívne skóre ohľadom biodiverzity a redukcie pôvodnej poľnohospodárskej pôdy nie je možné priamo odstrániť (BE4, BE12) – za úvahu stojí nepriama kompenzácia podporením poľnohospodárstva a pestovania poľnohospodárskych plodín v rámci kaskádových stupňov odpadového tepla v prípade, ak to termodynamická a termická účinnosť dovoľia (dáta nie sú dostupné), čo by udržateľnosť projektu podporilo z pohľadu pozitívnej redukcie potrieb
- podporenie interakcie s lokálnymi komunitami, ktoré je typické pre významné rekreačné projekty, eventuálne energetické projekty vo svete, vie posilniť stránku adaptácie a akceptácie projektu aj v pokročilom štádiu jeho existencie (SC11, SC12)
- aj keď to nie je v rámci Slovenska štandardné, významným deficitom projektu voči spoločnosti je minimálna interakcia so vzdelávacou a akademickou obcou – energetická dôležitosť projektu v rámci celkovej produkcie geotermálnej energie na Slovensku, dlhodobý význam, aj jeho komplexnosť, pritom vytvárajú podmienky pre realizáciu základného aj aplikovaného výskumu, alebo výchovy a vzdelávania, čo by malo extrémne pozitívny vplyv na napĺňanie potrieb spoločnosti aj z dlhodobého hľadiska (SC14, SC15)
- diverzifikácia produkcie geotermálnej energie v rámci energetickej sústavy a schémy na lokalite, respektíve, nakoľko to energetická a udržateľná bilancia dovoľuje pri zachovaní status-quo produkcie termalparku môže výrazne prispieť k dlhodobosti a redukcii rizikovosti a citlivosti jednotlivých aspektov (SC, EO predovšetkým), ktoré sú viazané práve na existenciu termalparku a v rámci neho zapojené kaskády

9 SCHÉMA PREDBEŽNÉHO POSÚDENIA ZMYSLUPLNOSTI ENERGETICKÉHO VYUŽITIA GEOTERMÁLNEJ ENERGIE PRE POTREBY RCUE

Navrhovaná schéma posudzovania zmysluplnosti energetického využitia geotermálnej energie v kompetencii RCUE je postavená na princípe prechádzania jednotlivých kľúčových okruhov pri posudzovaní projektov, pričom okruhy môžu byť chápané ako:

- a) kontrolné medzníky (schéma „áno“ / „nie“) s posúdením prevažujúcich faktorov pre predbežné posudzovanie
- b) hodnotiace kritériá pre posudzovanie viacerých projektov v rámci rovnakej, alebo blízkej lokality.

9.1 Posudzovanie projektov prieskumu a produkcie

Jednou zo základných kategórií projektov sú projekty vo fáze prieskumu, kedy sa predpokladá podávanie žiadostí o finančnú podporu pre realizáciu – alebo spätné vykrytie – najrizikovejších etáp produkcie zdrojov geotermálnej energie – vŕtanie. Vzhľadom na aktuálnu situáciu a jej predpokladaný vývoj na Slovensku, ktorý súvisí aj so silnejúcou ekonomickou podporou výskumu, prieskumu a využívania zdrojov geotermálnej energie, je opodstatnené predpokladať, že tieto žiadosti budú tvoriť podstatnú časť a vzhľadom na energetický, respektíve udržateľný potenciál rezervoárového prostredia, budú zohrávať kľúčovú úlohu pre budúce, trvalo udržateľné využívanie zdrojov geotermálnej energie.

Z pohľadu perspektivity, a reálnosti žiadostí o finančné schémy a granty, sú v rámci prieskumu / realizácie vrtných prác kľúčové:

- projektová príprava a dokumentácia
- úroveň geologického a geotermického poznania
- geotermické a energetické podmienky rezervoárového prostredia
- perspektivita produkcie zdrojov geotermálnej energie.

9.1.1 Kritéria posudzovania projektovej prípravy a dokumentácie

Kritériá posudzovania projektovej prípravy umožňujú rýchle a prehľadné hodnotenie stavu projektovej dokumentácie a všetkých náležitostí spojených s prieskumom zdrojov geotermálnej energie a realizáciou vrtných prác pre prieskum a produkciu zdrojov geotermálnej energie, pričom **kľúčové dokumenty sú presne definované v príslušnej legislatíve**. Takto nedochádza ku konfliktu medzi požiadavkami legislatívnych noriem na Slovensku, a požiadavkami z pohľadu Koncepcie trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu, respektíve globálnej / úspešnej praxe (best-practice).

9.1.1.1 Vlastníctvo prieskumného územia

V zmysle Geologického zákona je prieskumné územie základom pre realizáciu akéhokoľvek vyhládavacieho, podrobného, alebo doplnkového hydrogeologického prieskumu, medzi ktorý sa radí aj prieskum zdrojov geotermálnej energie (viac o prieskumnom území v Kapitole 10), a bez ktorého nie je možné realizovať akékoľvek geofyzikálne, alebo vrtné práce. V prípade, ak žiadateľ nie je držiteľom prieskumného územia ^{9.1}, jeho príprava a vydanie môže prispieť k výraznému predĺženiu realizácie prác a ich časovú rizikovosť aj v situácii, ak sú projektové výzvy viazané na konkrétne časové obdobie. Z tohto dôvodu je možné existenciu prieskumného územia považovať za **vylučovacie kritérium**

- ÁNO (žiadateľ je právoplatným držiteľom prieskumného územia za účelom realizovania hydrogeologického prieskumu pre vyhládavanie zdrojov geotermálnej energie)
- NIE (žiadateľ nie je právoplatným držiteľom prieskumného územia)

alebo **mimoriadne významné bodové kritérium**, kde môže do úvahy prísť aj stav, kedy žiadateľ je v procese pridelenia prieskumného územia:

- ÁNO
- V PROCESE (žiadateľ dostatočne preukázal, že posudzovanie jeho žiadosti o pridelenie prieskumného územia je v štádiu posudzovania / prideľovania)
- NIE

^{9.1} právoplatného rozhodnutia o určení prieskumného územia v zmysle § 23 ods. 13 zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v platnom znení

Existenciu prieskumného územia je možné skontrolovať na:

- webe Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra^{9.2}
- štandardne býva súčasťou žiadostí o nenávratný finančný príspevok
- informatívne / operatívne na Sekcii geológie a prírodných zdrojov MŽP SR

9.1.1.2 Záverečné stanovisko posudzovania vplyvu na životné prostredie

Posudzovanie vplyvov na životné prostredie je v zmysle platnej legislatívy^{9.3} je neoddeliteľnou súčasťou, a v zmysle relevantnej právnej úpravy podmieňuje začatie samotných prieskumných prác v prípade, ak je ich súčasťou vrtanie, t.j. zásah do zemskej kôry. Problematika posudzovania vplyvu na životné prostredie (EIA) je v zmysle prieskumných projektov relevantná, nakoľko:

- nesúhlasné stanovisko je legislatívne schopné zastaviť akékoľvek práce, pokiaľ nedôjde k vysvetleniu sporných momentov, respektíve k náprave, čo môže znamenať neúmerne a rizikové predlžovanie prípravných fáz projektu ešte pred spustením samotnej realizácie vrtných prác
- samotné konanie EIA je častokrát aj v geotermálnej komunite považované za zdĺhavé, čo v prípade krátkych časových úsekov medzi žiadosťou o projekt a termínovaním finančnej podpornej schémy vyvoláva riziko prepadnutia príspevku;

preto podobne ako v predchádzajúcom prípade je najvhodnejšie posúdenie držania právoplatného stanoviska vo forme **vylučovacieho kritéria**:

- ÁNO (žiadateľ je držiteľom súhlasného záverečného stanoviska EIA pre navrhované geologické práce)
- NIE (žiadateľ nie je držiteľom súhlasného záverečného stanoviska EIA pre navrhované geologické práce; respektíve je držiteľom zamietavého stanoviska);

alebo je štatút EIA možné použiť ako **mimoriadne bodovacie kritérium**, kde:

- ÁNO (žiadateľ je držiteľom súhlasného záverečného stanoviska EIA pre navrhované geologické práce)

^{9.2} <https://apl.geology.sk/geofond/pu/>

^{9.3} Zákon č. 24/2006 Z. z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie a o zmene a doplnení niektorých zákonov v platnom znení

- V PROCESE (proces posudzovania vplyvov na životné prostredie trvá, a žiadateľ / projekt nemá zamietajúce záverečné stanovisko)
- NIE (žiadateľ je držiteľom zamietavého záverečného stanoviska)

Kontrola a zisťovanie stavu EIA je možná operatívne, informatívne, alebo na vyžiadanie na:

- Sekcia geológie a prírodných zdrojov MŽP SR
- Sekcia posudzovania vplyvov na životné prostredie MŽP SR.

9.1.1.3 Súlad projektu geologickej úlohy a požadovaných prác

V prípade posudzovania žiadosti o finančnú podporu v rámci vyhľadávania, prieskumu a produkcie zdrojov geotermálnej energie, je nevyhnutná kontrola súladu medzi žiadosťou (o nenávratný finančný príspevok, grant, a.i.) a projektovou dokumentáciou. V zmysle spomínaného Geologického zákona, respektíve príslušnej Vyhlášky MŽP SR ^{9.4} (Kapitola 10) je možné realizovať v rámci prieskumného územia len tie geologické práce, ktoré sú definované v projekte geologickej úlohy, ktorý je súčasťou žiadosti o samotné prieskumné územie, ak nedošlo (vplyvom objektívnych príčin) k zmene, alebo zámene geologických prác vykonávaných v prieskumnom území.

Z tohto dôvodu pri posudzovaní žiadosti / projektu, zohráva úlohu logický súlad medzi predmetom žiadosti (cieľ finančného príspevku z konkrétneho podporného mechanizmu) a povolenými geologickými prácami v zmysle schváleného projektu geologickej úlohy a prieskumného územia. Súlad je preto rovnako možné brať ako **vylučovacie kritérium**:

- ÁNO (cieľ žiadosti o finančnú podporu je uvedený v projekte geologickej úlohy žiadateľa)
- NIE (cieľ žiadosti o finančnú podporu nie je uvedený v projekte geologickej úlohy žiadateľa, a vznikajú právne nároky na strane žiadateľa na zmenu, alebo zámenu geologických prác).

Pri posudzovaní zmysluplnosti finančnej podpory projektov pre prieskum a produkciu zdrojov geotermálnej energie je možné využiť súlad / nesúlad aj ako bodovacie kritérium:

- ÁNO (cieľ žiadosti o finančnú podporu je uvedený v projekte geologickej úlohy žiadateľa)

^{9.4} Vyhláška MŽP SR č. 51/2008 Z. z., ktorou sa vykonáva geologický zákon v znení neskorších predpisov

- V PROCESE (jeden, alebo viac cieľov finančnej podpory nie je špecifikovaný v projekte geologickej úlohy, ale žiadateľ je schopný relevantne preukázať, že žiadosť o zmenu / zámenu geologických prác bola odovzdaná, respektíve je posudzovaná v rámci príslušnej sekcie MŽP SR ^{9.5})
- NIE (jeden, alebo viacero cieľov finančnej podpory nie je špecifikovaný v projekte geologickej úlohy a žiadateľ, napriek legislatívnej povinnosti, nepodal žiadosť o zmenu / zámenu geologických prác)

Možnosti kontroly súladu vyplývajú z praxe, kedy projekt geologickej úlohy, prípadne vlastníctvo prieskumného územia by mali byť neoddeliteľnou súčasťou žiadosti o finančnú podporu.

S cieľom minimalizovať riziká spojené s poskytnutím finančnej podpory prípadným žiadateľom bez aplikačnej praxe, respektíve pre projekty, ktorých realizácia je vzhľadom na vyplývajúce neistoty otázna, je nevyhnutné zamerať sa nielen na súlad medzi realizovanými prácami a žiadosťou o podporu zo strany RCUE, ale zároveň aj na samotnú organizáciu projektu geologickej úlohy, ktorý má v zmysle zákona vyjadrovať zreteľný zámer, metodiku, časovú súslednosť krokov a očakávané finančné náklady. Z tohto pohľadu je dôležité posúdiť:

- súladnosť projektu (zameriava sa na súlad medzi projektom stanovenými termínmi, potrebou realizácie geologických prác a získania príslušných vyjadrení a povolení zo strany národných autorít)
- etapizácia projektu (zameriava sa na posúdenie logickej časovej nadväznosti jednotlivých krokov v rámci realizácie projektu v prípade získania podpory zo strany RCUE)
- reálnosť projektu (zameriava sa na posúdenie praktických aspektov realizácie projektu a posúdenie externalít, ktoré by realizáciu projektu mohli ovplyvniť)

9.1.1.4 Súladnosť projektu

Súladnosť projektu vyjadruje jednoduchý súhlas medzi procesmi uvedenými v žiadosti o finančnú podporu zo strany RCUE a termínmi, ktoré je žiadateľ povinný napĺňať v zmysle povoľovacích a schvaľovacích procesov pri realizácii geologických prác tak, aby nedošlo ku

^{9.5} Sekcia geológie a prírodných zdrojov MŽP SR

kolízii medzi požiadavkami podpornej schémy (napríklad termínmi jej merných ukazovateľov) a projektom geologickej úlohy. Súladnosť je možné využiť ako **bodovacie kritérium**, kde:

- **SÚLADNÝ** je projekt, ktorého termíny sú logicky definované, sú vzájomne súladné medzi projektom geologickej úlohy a žiadosťou o finančnú podporu a riziko ohrozenia úspešnej realizácie projektu je minimalizované
- **NESÚLADNÝ** je projekt, ktorého termíny nekorešpondujú medzi projektom geologickej úlohy a žiadosťou o finančnú podporu, alebo sa vzájomne nelogicky prekrývajú a jednotlivé termíny nie je možné dodržať vzhľadom na externality, ako sú zákonom stanovené lehoty v schvaľovacích alebo povoľovacích konaniach, respektíve realizácia jednotlivých výstupov môže byť týmto ohrozená

Kontrola súladnosti projektu je možná priamo posúdením žiadosti o finančnú podporu a projektu geologickej úlohy.

9.1.1.5 Etapizácia projektu

Prirodzenou vlastnosťou projektov zameraných na výskum a prieskum zdrojov geotermálnej energie, respektíve ich vyhľadávanie, alebo overenie, je extrémne vysoká miera neistoty, alebo extrémne vysoká miera neúspechu. Neúspech ako kategória je v rezervoárovom inžinierstve a rezervoárovom manažmente chápaný ako situácia, keď:

- geologickými prácami neboli overené prítokové horizonty zdrojov geotermálnej energie v predpokladanom rezervoárovom prostredí; alebo (t.j. slepé vrtý)
- geologickými prácami neboli overené dostatočné energetické výkony zdrojov geotermálnej energie pre plánovaný energetický účel (napríklad ak kombinácia prítokových teplôt a produkovaných množstiev nie je dostačujúca energeticky a termodynamicky na realizáciu vykurovania s predpokladanými tepelnými výkonmi).

Limitovanie neistoty (Kapitola 7) je v aplikačnej praxi pri vyhľadávaní, alebo produkcii zdrojov geotermálnej energie vecou etapizácie projektu, ktorej jednotlivé kroky musia byť navrhované tak, aby po ukončení daného kroku mohlo byť rozhodnuté o ukončení prác (riziko neúspechu je extrémne vysoké), doplnení prác k predošlej etape (neistota je akceptovateľná) alebo pokračovaní s ďalšou etapou prieskumu / vyhľadávania (indície poukazujú na nízku mieru rizika). Zjednodušená, ale štandardizovaná schéma vyhľadávania zdrojov geotermálnej energie je zameraná na realizáciu niekoľkých krokov s nasledovným poradím:

- archívna excerpčia (vyhľadávanie a analýza dát predošlých realizovaných prieskumov a vyhľadávaní na danom území alebo v jeho relevantnom okolí v minulosti)
- prvotný prieskum (v prípade, ak existujú na danom území geologické objekty predchádzajúcich etáp prieskumu, prípadne termominerálne pramene, a iné povrchové prejavy zdrojov geotermálnej energie) zameraný predovšetkým na geofyzikálne vrtné merania a odbery vzoriek zdrojov geotermálnej energie na geochemické modelovanie, geotermometriu, termochémiu, multikomponentovú geotermometriu atp s cieľom prehodnotiť, alebo definovať hydrogeologický režim a posúdiť prítomnosť zdroja geotermálnej energie a jeho tepelno-energetickú a termodynamickú kapacitu
- povrchový geofyzikálny prieskum (využitie vhodných metód povrchového geofyzikálneho prieskumu územia s cieľom definovať geometriu rezervoárového prostredia, jeho nadložia, podložia, okolia, štruktúrno-tektonické podmienky, prítomnosť zdroja geotermálnej energie a jeho fázovú povahu atp.)
- vrtné práce (realizácia samotných hydrogeologických alebo hydrogeotermálnych vrtov)
- sprievodné prieskumné práce (geofyzikálne, alebo geochemické práce realizované súbežne s vrtnými prácami; globálne štandardné, na Slovensku skôr výnimočne)
- doplňujúce prieskumné práce (štandardne geochemické, menej geofyzikálne práce po realizácii prvých vrtných etáp, alebo ako súčasť sprievodných prác, zvyčajne režimového charakteru; globálne štandardné, na Slovensku v špecifických prípadoch, respektíve podľa možností zhotoviteľa geologických prác).

Podľa tohto kritéria je potom možné projekty / žiadosti o posúdenie možné hodnotiť cez **bodovacie kritérium**, ktoré by vyjadrovalo mieru etapizácie navrhovaných geologických prác:

- **VHODNÁ ETAPIZÁCIA** znamená logické členenie jednotlivých vykonávaných prác v rámci projektu, respektíve aj v rámci tej časti projektu, ktorá nemusí nevyhnutne byť súčasťou žiadosti o finančný príspevok, ale ktorých časová súslednosť v projekte geologickej úlohy vhodne minimalizujú riziká neúspechu
- **OTÁZNA ETAPIZÁCIA** znamená zvýšené riziko neúspechu, alebo nie vhodne sa prekrývajúce jednotlivé etapy realizácie vyhľadávania, prieskumu, alebo samotného projektu využívania zdrojov geotermálnej energie, pričom etapizácia projektu neposkytuje dostatočný priestor a čas na vyhodnotenie výsledkov predchádzajúcich etáp, prípadne voľbu a doplnenie potrebných geologických prác, respektíve posudzovacích a schvaľovacích činností zo strany príslušných autorít

- NEVHODNÁ ETAPIZÁCIA znamená, že predkladaný projekt je skladaný neúčelne, nelogicky, a jeho členenie nijakým spôsobom neprispieva k zníženiu rizika neúspechu pri vyhľadávaní alebo produkcii zdrojov geotermálnej energie, jednotlivé kroky sa vzájomne nelogicky, alebo nevhodne prekrývajú, a projekt nevytvára možností pre aplikáciu doplňujúcich prác v prípade nedostatočného znižovania neistôt.

V skutočnosti je kontrola etapizácie projektov / žiadostí vecou odborného zhodnotenia, preto je daný bod dôrazne odporúčaný ako bodovacie kritérium. V zmysle Geologického zákona by mala byť etapizácia projektu vo forme textovej, ako aj vo forme časového harmonogramu, súčasťou projektu geologickej úlohy. Pre posúdenie etapizácie, v prípade potreby, pripadajú do úvahy ako možné riešenia:

- konzultácie v rámci Sekcie geológie a prírodných zdrojov MŽP SR
- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.1.6 Reálnosť projektu

Reálnosť projektu posudzuje jeho celkový obraz a jeho vnútorné členenie, stavbu, vrátane časových milníkov a cieľov, ktoré si projekt určil. Základom pre hodnotenie reálnosti projektu je najmä posúdenie časových okien jednotlivých krokov a časovej rezervy podľa priloženého časového harmonogramu, ktorý je súčasťou projektu geologickej úlohy. V princípe je teda možné reálnosť projektu posúdiť podľa dostatočnej časovej rezervy pre jednotlivé jeho etapy alebo plánované práce, či procesy schvaľovania a posudzovania legislatívne daných náležitostí v spojitosti s realizáciou geologických prác. Z tohto dôvodu je aj reálnosť projektu možné hodnotiť ako bodové kritérium, kde:

- VYSOKÁ REÁLNOŠŤ znamená, že projekt vo všetkých etapách a čiastkových krokoch počíta s časovou rezervou a v prípade nepredvídateľných okolností jeho časový harmonogram umožňuje doplnenie prác, prípadne prieskumy v povoleniach a schvaľovacích procesoch, projekt je logicky časovo členený, a procesy, ktoré sú si z princípu následné, sa časovo neprekrývajú

- OTÁZNA REÁLNOŠŤ znamená, že jeden, alebo viaceré etapy, nie však viac ako polovica, alebo čiastkové kroky je možné vyhodnotiť ako optimisticky nastavené, t.j. s časovými horizontmi realizácie / uskutočnenia / schválenia hraničiacimi s minimálnymi rezervami
- NEVHODNÁ REÁLNOŠŤ znamená, že viac ako polovica posudzovaných etáp, alebo potrebných krokov, je v projekte geologickej úlohy, respektíve v žiadosti o finančnú dotáciu, nastavená s minimálnymi rezervami, respektíve sa vzájomne súsledné kroky prekrývajú, čo zvyšuje rizikovosť projektu a pravdepodobnosť jeho neúspechu, ak dôjde k nečakaným udalostiam.

Posudzovanie reálnosti projektu je možné kombinovaním žiadosti o finančný príspevok, respektíve dotáciu, kde neoddeliteľnou súčasťou by mal byť aj harmonogram jednotlivých prác a etáp vykonávaných pri vyhľadávaní alebo prieskume zdrojov geotermálnej energie, a rovnako ktorý by mal byť súčasťou projektu geologickej úlohy, ktorý pre zmenu špecifikuje harmonogram, a jednotlivé geologické práce realizované na prieskumnom území. Problémom posúdenia môže byť skutočnosť, že kým niektoré aktivity (napríklad vydanie prieskumného územia, odovzdanie záverečnej správy z geologických prác) má svoje legislatívne dané trvania, predpokladaný a skutočný čas realizácie pri iných (napríklad geoelektrický prieskum, analytické vyhodnotenia vzoriek geotermálnych vôd, alebo celkovo ich početnosť) sa môžu odvíjať od lokálnych geologických podmienok, prípadne vyťažnosti subdodávateľov, a musia byť posudzované skôr na základe praktických skúseností.

Posudzovanie reálnosti projektu musí byť sústredené predovšetkým na realizáciu **geologických vrtov** a ich realistický časový harmonogram, keďže ide o najrizikovejšiu fázu celého projektu, s množstvom neistôt vyplývajúcich z technického zásahu do zemskej kôry a neočakávateľných udalostí (napríklad neočakávaný vertikálny geologický profil, prítokové zóny, potreba stimulácie horninového prostredia, výrony plynov, technické problémy vrtnéj súpravy atp.).

Z tohto dôvodu je vhodné pri posudzovaní reálnosti konzultovať sporné, alebo neisté členenie cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.2 Úroveň geologického a geotermického poznania

Pre minimalizáciu rizík vyhľadávania a prieskumu zdrojov geotermálnej energie je základným princípom využívanie všetkých relevantných dostupných dát hydrogeologického, geologického a geotermického prieskumu, ktorý na relevantnom území prebiehal v minulosti, respektíve dostupných a vhodných geologických prác, ktoré by mali byť realizované ako neoddeliteľná súčasť úvodných etáp aktuálneho projektu. Je zároveň potrebné mať na zreteli, že ani aplikovanie precíznej archívnej excerptie, ani realizácia povrchového geofyzikálneho prieskumu a – v prípade existencie – monitoring existujúcich termominerálnych prameňov, respektíve vrtov v danej oblasti, nemusí automaticky znamenať úspešnosť pri overení cieleného (požadovaného) zdroja geotermálnej energie.

Súčasťou prípravných etáp prieskumu a vyhľadávania je v zmysle globálnej praxe realizácia opakovaného takzvaného stacionárneho a/alebo dynamického modelovania. Cieľom modelovania, ktoré je v prípravných fázach v 2D alebo 3D rozlíšení postavené na lokálnych dátach „archívneho“ prieskumu, prípadne na dátach prvotných etáp geochemického a geofyzikálneho prieskumu, je prispieť k redukcii neistoty ohľadom umiestnenia produkčných a reinjektážnych vrtov, hydrogeologického režimu zdrojov geotermálnej energie, odhadu tepelno-energetického a termodynamického potenciálu atp.

Základnými sledovanými vlastnosťami žiadostí / projektov pre vyhľadávanie a produkciu zdrojov geotermálnej energie teda sú:

- komplexnosť prípravnej etapy (archívnej excerptie)
- adresnosť geofyzikálneho prieskumu
- adresnosť geochemického prieskumu
- využitie primárnych modelov
- analýza neistôt

9.1.2.1 Komplexnosť prípravnej etapy

Archívna excerptia založená na dátach predchádzajúcich etáp geologického, hydrogeologického, geotermického, geochemického alebo geofyzikálneho prieskumu na lokalite alebo v jej relevantnom okolí má dostatočný potenciál na aplikovanie princípov analógie a predbežné posúdenie ako geologických, tak aj rezervoárových parametrov, s ktorými je možné počítať pri realizácii vrtných prác, respektíve pri dlhodobej produkcii zdrojov geotermálnej energie. Relevantné excerptčné práce vychádzajú ako z odborných vedeckých prác

(ich nevýhodou je častokrát generalizácia, alebo, naopak, fokusovanie na extrémne malý región), tak aj z dostupných prác – tzv. záverečných správ z geologického výskumu a prieskumu, ktoré sú aj širokej verejnosti dostupné na webe Geofondu v správe ŠGÚDŠ^{9.6}, respektíve s dostupnými informáciami v rámci mapových portálov geofyzikálnych údajov^{9.7}, geologických máp^{9.8}, databázových a mapových registrov Geofondu^{9.9}, alebo digitalizovaných atlasových diel^{9.10}.

Kritériom pre hodnotenie, či prípravná fáza v štádiu exercepcie bola realizovaná dostatočne komplexne na to, aby v rámci možností redukovala rizika neúspechu projektu, pritom nie je početnosť využitých vstupov, ale ich **relevancia**. Príkladom môže byť rozsiahla analýza hydrologických a klimatických pomerov (irelevantné) voči precíznej a početnosťou limitovanej interpretácii vybraných karotážnych profilov (relevantné) pri hodnotení uzavretého rezervoárového prostredia; alebo kombinácia dát gravimetrie a magnetometrie (irelevantné) v prostredí vrstvových rezervoároch v pieskovcoch (metódy nie sú schopné spoľahlivo definovať ani geometriu, ani prítomnosť rezervoárového prostredia) v porovnaní s využitím magnetotelurického, alebo odporového geoelektrického prieskumu.

Komplexnosť archívnej exercepcie je možné využiť ako **bodovacie kritérium**, kde:

- **DOSTATOČNE KOMPLEXNÁ** je exercepcia a prípravné práce, ktoré zhromaždili všetky relevantné dostupné informácie v rámci projektu geologickej úlohy, a/alebo žiadosti o finančný príspevok, o ktorý sa projekt / žiadateľ / žiadosť uchádzajú, pričom v závislosti na komplexnosti geologického, hydrogeologického a geotermického prostredia úroveň spracovania zodpovedá úrovni geologického poznania, a je predpoklad, že archívna exercepcia je schopná – v rámci možností – prispieť k výraznej redukcii rizika neúspechu, prípadne nákladov spojených s realizáciou projektu, prípadne nákladov nad rámec predpokladaných výdavkov do prieskumu; prípadne ak exercepčné práce prispeli k analýze citlivosti, analýze rizika, alebo odhadom kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov zdrojov geotermálnej energie
- **OTÁZNE KOMPLEXNÁ** je exercepcia a prípravné práce, ktoré nevyužívajú dostupné relevantné a dôležité údaje o predchádzajúcej geologickej, hydrogeologickej

^{9.6} <https://www.geology.sk/sluzby/digitalny-archiv/>

^{9.7} <https://www.geology.sk/geoinfoportal/mapovy-portal/geofyzikalne-mapy/>

^{9.8} <https://www.geology.sk/geoinfoportal/mapovy-portal/geologicke-mapy/>

^{9.9} <https://www.geology.sk/geoinfoportal/mapovy-portal/registre-geofondu/>

^{9.10} <https://www.geology.sk/geoinfoportal/mapovy-portal/atlas/>

a geotermickej situácii na sledovanom území a v rámci prípravných etáp nedošlo k ich komplexnému posúdeniu, alebo využitiu, pričom viaceré neistoty vyplývajúce z požadovaných prác by mohli byť ich analýzou odstránené

- NEKOMPLEXNÁ znamená, že archívna excerpčia a zhromaždenie dát predchádzajúcich etáp prieskumov v danej oblasti je nekomplexná, nedostatočná, prakticky zanedbaná, a v rámci projektu geologickej úlohy, alebo žiadosti o finančnú podporu, projekt nepracuje s už existujúcimi údajmi, nie sú spoľahlivo vyhodnotené, interpretované, alebo využité pre návrh geologických prác, realizáciu prieskumu, vrtania, alebo odhady kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového média

Úroveň komplexnosti realizovanej prípravnej etapy (archívnej excerpcie) je možné posudzovať na základe vyššie uvedených zdrojových podkladov pre danú oblasť. Zároveň je možné úroveň excerpcie (prípravnej etapy) konzultovať cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.2.2 Adresnosť geofyzikálneho prieskumu

Princípom adresnosti geofyzikálneho prieskumu je pri **optimálnych nákladoch spojených s jeho realizáciou dosiahnuť čo najväčšiu úroveň poznania geologického prostredia** (geologická stavba v nadloží rezervoáru, geologická stavba rezervoáru, štruktúrno-tektonická stavba, vertikálne a priestorové členenie rezervoáru, geometria = hrúbka a hĺbka stropu a bázy rezervoáru, smer a sklon rezervoárového prostredia, segmentácia, členitosť atp.) **jeho hydraulických parametrov** (sledovanie priepustných zón, prípadne migračných zón) **alebo rezervoárového média** (prítomnosť rezervoárového média, smery prúdenia, fázová povaha).

V globálnej praxi sú najčastejšie využívané:

- reflexná alebo refrakčná seizmika (sledovanie geometrie nadložia, podložia, odhad geologickej stavby vo vertikálnom seizmickom profile, distribúcia hlavných tektonických zón a línii, sledovanie intrúzií magmatických prejavov v sedimentárnom prostredí, prítomnosť rezervoárového média v prípade jeho hustotných extrémov)

- gravimetrický prieskum (sledovanie zmien v geologickom prostredí vplyvom rozdielnej hustoty, a následne tiažových anomálií, jednotlivých litotypov, alebo v dôsledku prítomnosti rezervoárového média, pri výrazných hustotných zmenách a teplotných rozdieloch aj sledovanie pohybu rezervoárového média v dôsledku zmien jeho teploty a teda aj hustoty; štandardne realizovaná v prostredí magmatitov, vulkanitov, respektíve v prostredí karbonátov)
- magnetometria (využívaná predovšetkým vo vulkanických prostrediach pre sledovanie hlavných vulkanických štruktúr alebo mladých vulkanických zón ktoré môžu pôsobiť ako bariéry prúdenia ale zároveň dodatkové zdroje tepla pre vývoj konvektívnych systémov; prípadne sledovanie prítomnosti rezervoárového média vo vulkanickom prostredí)
- termometria (najčastejšie realizovaná v podobe leteckého termického prieskumu, menej priamo on-ground alebo ground-based profilovaním, ktorá má za účel identifikovať zóny zvýšeného tepelného toku a geotermických anomálií, ktoré môžu súvisieť so skrytými podzemnými výstupmi geotermálnych vôd do plytkých rezervoárových pozícií – využívaná skôr pri stredno- až vysoko- entalpických / teplotných prostrediach, kde množstvo prenášaného tepla k povrchu konvektívne / advektívne je výrazne nad rámec stacionárnej / konduktívnej hustoty tepelného toku; zároveň požaduje hydraulickú otvorenosť obehových systémov)
- geoelektrika – odporová alebo magnetotelurika (využívaná predovšetkým pre mapovanie zmien odporových alebo vodivostných parametrov geologického prostredia v súvislosti so zmenou jeho hustoty alebo prítomnosti rezervoárového média, praktické využitie v každom geologickom prostredí)

V princípe platí, že rozsiahly povrchový geofyzikálny prieskum musí byť realizovaný vždy, keď predchádzajúcimi etapami geofyzikálneho prieskumu neboli dosiahnuté / získané relevantné informácie, alebo vždy, keď v rámci predchádzajúcich prieskumných alebo výskumných prác geofyzikálny prieskum realizovaný nebol. Zároveň ale platí, že geofyzikálny prieskum je možné obmedziť, alebo vylúčiť z geofyzikálnych prác, akonáhle sú dostupné dostatočné údaje z predchádzajúcich etáp, a realizácia nového geofyzikálneho prieskumu by nepriniesla ekonomicky, a vedomostne, významné zmeny.

V súvislosti s geofyzikálnym prieskumom je potrebné chápať, že vývoj geofyzikálnych metód, alebo ich presnosť, nie sú kľúčovým faktorom pri budovaní znalostnej bázy o danej lokalite. Hlavným ukazovateľom výhodnosti, účinnosti, a adekvátnosti prieskumu je kombinácia jeho

typu – účelnosti / adresnosti – kolektívu, ktorý dáta geofyzikálneho prieskumu interpretoval – a možnosti korelácie s tzv. hmotnou dokumentáciou, t.j. existujúcimi vrtmi, alebo vrtmi, ktoré sú plánované v rámci predkladaných projektov, alebo žiadostí. Posudzovanie adresnosti geofyzikálneho prieskumu je preto možné založiť na odpovediach na nasledovné otázky:

- sú na území dostupné geofyzikálne práce predchádzajúcich etáp prieskumu, a boli tieto práce adekvátne brané do úvahy, interpretované, alebo re-interpretované ?
- prispeli predchádzajúce etapy geofyzikálneho prieskumu k dostatočnému posúdeniu možností rozšírenia rezervoárového prostredia alebo možnej prítomnosti zdrojov geotermálnej energie ?
- je navrhovaný geofyzikálny prieskum v rámci žiadosti adresný – t.j. zodpovedá zvolená geofyzikálna metóda účelu jej využitia, čiže sledovaným parametrom geologického prostredia alebo rezervoárového média ?
- sú navrhované geofyzikálne metódy komplexné, vzájomne korelovateľné, a zodpovedá účel ich využitia, vrátane ekonomických nákladov, predpokladaným výstupom, vzhľadom na znalosť geologického prostredia, rezervoárového prostredia, alebo rezervoárového média ?

Podľa toho je možné brať do úvahy komplexnosť geofyzikálneho prieskumu ako **bodovacie kritérium**, kde:

- **RELEVANTNÝ**, pri ktorom úroveň geofyzikálneho poznania geologického prostredia, rezervoárového prostredia, alebo rezervoárového média je – vzhľadom na možnosti – komplexná, a realizované aktivity nad rámec archívnych údajov alebo aktuálne realizovaného prieskumu by nepriniesli významné informácie s ohľadom na ekonomickú stránku prieskumu, a aj napriek prirodzeným neistotám, nakoľko ide o nepriame prieskumné metódy, je možné konštatovať, že získané informácie majú dostatočnú kvalitu, kvantitu, aplikované sú všetky dostupné a vhodné metódy
- **DOSTATOČNÝ**, pri ktorom je úroveň geofyzikálneho poznania geologického prostredia, rezervoárového prostredia, alebo rezervoárového média indikovaná jednou, alebo viacerými metódami s výpovednou hodnotou, pričom však pretrvávajú informatívne a dátové rezervy vzhľadom na možnosti vyhodnocovania ďalších archívnych geofyzikálnych zdrojov; alebo vzhľadom na informačný a dátový deficit by bolo vhodné realizovať aspoň v obmedzenej miere doplňujúci geofyzikálny prieskum

- NEADRESNÝ, pri ktorom využité a spracované archívne, alebo aktuálne metódy geofyzikálneho prieskumu nie sú relevantné vo vzťahu ku geologickému prostrediu, rezervoárovému prostrediu, alebo rezervoárovému médiu, a úroveň poznania všetkých troch aspektov nie je dostatočná pre adekvátnu redukciu rizika neúspechu v ďalších vyhľadávacích a prieskumných prácach

Miera posúdenia adresnosti geofyzikálneho prieskumu vyplýva zo samotného projektu geologickej úlohy a jeho priložených častí, najmä čo sa týka archívnej excerptie (preskúmanosť) a charakteristiky predmetného územia, ako aj z opisu a plánovaných výstupov realizovaných prieskumných prác. Vzhľadom na multidisciplinárnu geofyzikálneho prieskumu v spojení s vyhľadávaním zdrojov geotermálnej energie alebo ich produkciou je zároveň odporúčané konzultovať adresnosť geofyzikálneho prieskumu cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Ústav vied o Zemi SAV
- Katedra hydrogeológie PríFUK
- Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky PríFUK
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.2.3 Adresnosť geochemického prieskumu

Geochemický prieskum je na území Slovenska realizovaný v porovnaní s globálnou praxou v minimálnom rozsahu. Účelom geochemického prieskumu je predovšetkým na prírodných výveroch termominerálnych prameňov respektíve prejavov geotermálnej energie (gejzíry, fumaroly, solfatáry, vriace bahná atp.), alebo existujúcich vrtoch, či realizovaných vrtoch dokumentovať:

- výskyt rezervoárového média
- pôvod rezervoárového média vzhľadom na vek aj spôsob formovania (napríklad pôvodné atmosférické vody alebo morské vody presakujúce do rezervoáru)
- koncepčnú históriu rezervoárového média - RE
- priestorovú pozíciu vzorky voči rezervoárovému médiu (zonalita obehových štruktúr)

- rezervoárové procesy prebiehajúce v geologickom prostredí, ktoré ovplyvnili chemické zloženie vzorky (konvekcia, adiabatický var, advektívne pohyby) - RE
- dynamické procesy prebiehajúce v geologickom prostredí, ktoré ovplyvnili chemické zloženie vzorky (naried'ovanie, zmiešavanie, vertikálne prestupy, laterálne prestupy) - RE
- rezervoárovú povahu a fázovú stabilitu (odparovanie pred alebo po vzorkovaní, kondenzácia, konduktívne ochladzovanie) - RE
- charakter rezervoárovej odozvy v prípade, ak je nový projekt súčasťou už využívaného rezervoárového prostredia - RE
- rezervoárovú teplotu, rezervoárovú entalpiu s využitím konvenčnej a multikomponentovej geotermometrie - RE
- chemický typ rezervoárového média
- chemické zloženie rezervoárového média (podmienenie, alebo vylúčenie reinjektáže vzhľadom na rezervoárový chemizmus)
- chemicko-technologické parametre rezervoárového média, ktoré by ovplyvňovali voľbu materiálov pri produkčnej sústave alebo podmienili využívanie chemických inhibítorov
- izotopové zloženie rezervoárového média.

Vo všeobecnosti je možné konštatovať, že hydrogeochemické rozborý aktuálne, alebo excerpčné, sú využívané na základné hydrogeochemické charakteristiky pre zdroje geotermálnej energie, a účely využitia pre potreby rezervoárového inžinierstva, t.j. so zameraním na interpretáciu rezervoárovej dynamiky, alebo rovnovážneho termického stavu, sú skôr výnimkou (v zozname označené ako RE). Podľa platnej technickej normy^{9.11} je pri tom potrebné prihliadať na minimálne požiadavky, ktoré vyplývajú z realizácie hydrodynamických skúšok, t.j. aspoň 3 vzorky pre (štandardizované) chemické rozborý geotermálnych vôd počas skúšky s konštantnou výdatnosťou, respektíve aspoň 1 vzorka pri vyvolaní každého stupňa tlakovej depresie.

V kombinácii s možnosťami využitia archívnej excerptie je možné adresnosť geochemického prieskumu, ako mimoriadne efektívneho nástroja poznania podmienok formovania, prúdenia, stability, rovnovážnosti a teploty / entalpie a fázovej rovnováhy v rezervoári, možné tento typ prieskumu využiť ako **bodovacie kritérium**, kde:

^{9.11} STN 73 6614 Skúšky zdrojov podzemnej vody

- **RELEVANTNÝ** označuje prieskum, ktorý využije aktuálne získané, alebo archívne chemické rozborý geotermálnych vôd, parnej frakcie, alebo rozpustných plynov z monitorovacích objektov (vrty, pramene) v rámci štandardného využívania a rovnako v rámci rezervoárovo-inžinierskych indícií rezervoárovej kvality a kvantity, pričom využíva všetky údaje dostupné z predchádzajúcich etáp prieskumu, a zároveň plánované odbery vzoriek v rámci aktuálneho prieskumu počítajú s odbermi nad rámec technickej normy
- **DOSTATOČNÝ** označuje prieskum, ktorý využije aktuálne získané, alebo archívne chemické rozborý v rámci konvencionalizovaných štandardov pri výskume, prieskume a vyhľadávaní zdrojov geotermálnej energie, pričom projekt a plán využitia aktuálnych vzoriek podľa projektu geologickej úlohy je doplnený komplexnou archívnu excerpciou v rámci lokálnych aplikačných štandardov
- **NEDOSTATOČNÝ** označuje prieskum, ktorý je koncipovaný nedostatočne vzhľadom na relevantné technické normy pre realizáciu hydrodynamických skúšok, a nedostatočne, selektívne, respektíve vôbec, nevyužíva možnosti predchádzajúcich etáp geochemického prieskumu v rámci projektu geologickej úlohy a excerpčnej analýzy rezervoárového prostredia, alebo rezervoárových podmienok.

Podobne, ako v prípade geofyzikálneho prieskumu, je posúdenie adresnosti prieskumu na zvážení odborného hľadiska. Tieto kapacity za účelom konzultácie, sú schopné zabezpečiť:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra hydrogeológie PríFUK
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.2.4 Adresnosť prieskumnej a monitorovacej siete

Posudzovanie adresnosti prieskumnej a monitorovacej siete je viazané v projektovej fáze na výber a využívanie objektov predchádzajúcich etáp hydrogeotermálneho alebo hydrogeologického prieskumu, prípadne prírodných objektov. Cieľom využívania prieskumnej a monitorovacej siete je pritom s využitím už existujúcich bodov minimalizovať dodatočné požiadavky na konštrukciu vlastnej monitorovacej siete za predpokladu, že už existujúce

objekty sú v technicky dostatočnom stave, a prípadne v relevantnej priestorovej pozícii. Za predpokladu, že už existujúce objekty je možné adekvátne využiť v budúcom monitorovaní rezervoárového prostredia, ich využitie, prípadne aj rekonštrukcia, výrazne prispievajú k zníženiu nákladov aktuálneho projektu.

Monitorovacie, alebo prieskumné objekty pritom musia spĺňať základné požiadavky:

- technický stav umožňuje realizáciu monitorovacích alebo prieskumných prác, ako sú odbery vzoriek pevného materiálu, vzoriek geotermálnej vody, plynov, parnej frakcie, alebo realizáciu dokumentačných meraní na záhlaví (ústí) vrtu, prípadne v jeho vertikálnom profile
- objekty sú v relevantnej pozícii vo vzťahu k efektívnej produkčnej zóne, plánovaným vrtným prácam, alebo v relevantnej pozícii vzhľadom na hydrogeologický, alebo dynamický rezervoárový režim prúdenia alebo tvorby parnej fázy; prípadne sú v pozícii umožňujúcej budúce hodnotenie prieniku hydraulického, teplotného, alebo chemického frontu rezervoárovej odozvy medzi reinjektážnou a produkčnou zónou
- využívaná monitorovacia sieť je priestorovo reprezentatívna.

Vzhľadom na možnosti monitorovacej siete – jej konštrukciu, alebo využitie objektov predchádzajúcich etáp prieskumu v relevantnom okolí – je možné adresnosť prieskumnej / monitorovacej siete využiť ako **bodovacie kritérium**, kde:

- **RELEVANTNÁ** znamená, že projekt účelne využíva existujúce objekty v relevantnom okolí projektu, a to prírodné, alebo technické, respektíve v rámci projektu geologickej úlohy je uvažované o technickej úprave a rekonštrukcii objektov monitorovacej siete, prípadne jej vytvorenie nad rámec produkčného vrtu
- **OTÁZNA** znamená, že projekt využíva existujúce objekty v obmedzenej miere napriek ich vhodnej priestorovej pozícii alebo ich vhodného technického stavu; eventuálne projekt nepočíta so zriadením vlastnej monitorovacej siete; alebo konštrukcia monitorovacej siete nie je relevantná vzhľadom na hydrogeologický a rezervoárový dynamický režim a/alebo priestorové usporiadanie produkčnej a reinjektážnej schémy
- **NEDOSTATOČNÁ** znamená, že v relevantnom okolí nie sú dostupné relevantné monitorovacie body predchádzajúcich etáp hydrogeotermálneho alebo hydrogeologického prieskumu, a zároveň projekt nepočíta nad rámec realizovaných vrtov s pôvodne produkčným a/alebo reinjektážnym účelom, s konštrukciou nových monitorovacích objektov.

Kontrola dostupnosti monitorovacích objektov v rámci vyhľadávania a prieskumu zdrojov geotermálnej energie, pokiaľ ide o skutočnosť, či objekty sú, alebo nie sú k dispozícii z predchádzajúcich etáp geologického, hydrogeologického, alebo hydrogeotermálneho prieskumu môže byť založená na analýze archívnych údajov z webovej stránky Geofondu respektíve digitálneho archívu vrtných prác^{9.12} a jej porovnaní s projektom geologickej úlohy, ktorý by mal byť súčasťou žiadosti o prieskumné územie, respektíve o finančnú podporu. Priestorovú relevanciu prieskumnej siete je možné zároveň konzultovať cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.2.5 Využitie primárnych modelov v príprave projektu

Využitie takzvaných primárnych modelov v prípravných fázach projektov vyhľadávania, prieskumu, alebo produkcie zdrojov geotermálnej energie je opätovne základnou fázou prípravy pred realizáciou vlastných geofyzikálnych alebo vrtných prác. Vo všeobecnosti v konštrukcii primárnych modelov platí:

- primárne modely v prípravnej fáze sú postavené na údajoch predchádzajúcich „archívnych“ etáp geologického, hydrogeologického, geotermického, geofyzikálneho alebo geochemického prieskumu, prípadne s využitím globálnych modelovacích schém a regionalizovaných aproximatívnych modelovacích postupov pred realizáciou vlastnej vyhľadávacej / prieskumnej etapy, predovšetkým za účelom:
 - priestorového umiestnenia geofyzikálneho prieskumu
 - situovanie vrtnej sústavy
 - odhad rezervoárového prostredia a rezervoárového média (kvalitatívne a kvantitatívne parametre, najmä geologické, geotermické, hydraulické)
- primárne modely prípravnej fázy sú následne pred spustením vrtnej práce aktualizované údajmi geofyzikálneho a geochemického prieskumu pred spustením vrtných prác,

^{9.12} <https://apl.geology.sk/geofond/vrty/>

predovšetkým za účelom upresnenia vrtnej sústavy najmä v prípade, ak ide o takzvané produkčné dublety (sústavy produkčných a reinjektážnych vrtov).

Pod pojmom modely pre účely posudzovania ich využitia v príprave projektu a plánovaní realizácii vrtných prác je možné rozumieť predovšetkým:

- 2D alebo 3D geologické modely zachytávajúce predpokladanú geometriu rezerovárového prostredia, jeho nadložia, podložia, alebo relevantného okolia
- 2D alebo 3D geotermické modely predpokladanej distribúcie tepla, teploty, termodynamických parametrov, respektíve modely analyzujúce predpokladané rezervoárové procesy, rezervoárovú dynamiku, alebo fázovú stabilitu
- 2D alebo 3D primárne modely distribúcie tlakov v rezerovárovom prostredí alebo režimu prúdenia podzemných, prípadne geotermálnych vôd alebo rezervoárového média
- 1D, 2D alebo 3D dynamické modely predpokladanej rezervoárovej odozvy pre jednotlivé scenáre produkcie zdrojov geotermálnej energie
- pravdepodobnostné modely odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie v rámci relevantnej obehovej štruktúry alebo útvaru geotermálnych vôd
- modely citlivosti (analýza citlivosti) možných energetických výkonov plánovaných vrtov, prípadne vrtných sústav na základe analýzy možných intervalov produkčných množstiev rezervoárového média a rezervoárovej teploty

Vyhodnocovanie a interpretácia modelov pritom vo významnej miere, najmä pri ich aktualizácii / kalibrácii z výsledkov aktuálneho geofyzikálneho prieskumu má významný potenciál redukcie nákladov a neúspechu pri situovaní produkčných, alebo reinjektážnych vrtov a ďalších monitorovacích objektov. Podľa uvedeného je možné primárne modelovanie využiť ako **bodovacie kritérium**, kde:

- DOSTATOČNÉ je využitie vhodných kombinácií diskrétnych, alebo pravdepodobnostných modelov v prípravnej fáze, ich konštrukcia, a využitie pri plánovaní prieskumnej siete a prieskumných / vrtných prác, t.j. využitie aspoň geologických modelov v kombinácii s pravdepodobnostnými modelmi alebo modelmi citlivosti možných energetických výkonov; alebo projekt geologickej úlohy počíta s konštrukciou relevantných modelov na základe získaných výsledkov analýz pevných alebo tuhých vzoriek a výsledkov geochemického, alebo geofyzikálneho prieskumu, respektíve pred-produkčného a produkčného monitoringu

- NEDOSTATOČNÉ využitie znamená, že pri konštrukcii projektu geologickej úlohy, alebo v rámci plánovanej náplne vyhľadávacích a prieskumných prác, nie je s využitím modelovacích postupov počítané.

Kontrola, či projekt využíva, alebo nevyužíva modelovacie práce pre redukciiu rizika neúspechu, je založená na jednoduchej kontrole projektu geologickej úlohy, ktorá by mala byť súčasťou prieskumného územia a zároveň žiadosti o finančnú podporu.

9.1.2.6 Analýza citlivosti a neistoty

Pod pojmom analýza citlivosti a neistoty je pre účely posudzovania projektov vyhľadávania, prieskumu a produkcie zdrojov geotermálnej energie možné rozumieť analýzu alebo hodnotenie možných neistôt a rizík v súvislosti s:

- očakávaným geologickým prostredím
- očakávaným rezervoárovým prostredím (kvalitatívne, kvantitatívne podmienky)
- očakávanými výsledkami vrtných prác, alebo ich priebehom
- očakávanými tepelnými alebo energetickými výkonmi.

Práve analýza citlivosti, alebo neistoty, v súvislosti s prieskumom a vyhľadávaním zdrojov geotermálnej energie, ktoré patria medzi najrizikovejšie etapy všetkých projektov využívania geotermálnej energie, respektíve aj v rámci optimalizácie, inštalácie, a využívania obnoviteľných / alternatívnych zdrojov geotermálnej energie je charakteristická pre projekty, ktoré sú postavené na realistických základoch. Samotná analýza citlivosti pritom môže byť postavená na modelovom, alebo slovnom hodnotení vyššie uvedených problémov.

Analýzu citlivosti je možné využiť ako významné **bodovacie kritérium**, kde:

- REALIZOVANÁ znamená, že projekt geologickej úlohy v prípravnej fáze vychádza, alebo konkrétne pomenúva jednotlivé riziká a neistoty pred spustením realizácie vrtných prác, alebo uvádza možnosti využitia analýzy citlivosti / analýzy neistoty s využitím dosiahnutých výsledkov realizovaných vrtných prác vo vzťahu k budúcej produkcii zdrojov geotermálnej energie
- NEREALIZOVANÁ znamená, že projekt geologickej úlohy v prípravnej fáze nevyužíva, alebo neudáva relevantnú analýzu neistôt, s ktorými je možné pri realizácii projektu počítať, a zároveň neuvažuje o jej konštrukcii po realizovaní vrtných prác vo vzťahu k budúcej produkcii zdrojov geotermálnej energie.

9.1.3 Geotermické a energetické podmienky rezervoárového prostredia

Hodnotenie, alebo posudzovanie geotermických a energetických podmienok rezervoárového prostredia je možné priradiť k posudzovaniu založenému na predpokladaných prácach (konkretizované v projekte geologickej úlohy) alebo prácach, ktoré boli na vrtoch, ktorých konštrukcia je súčasťou posudzovania, už realizované.

Kým predchádzajúce fázy hodnotenia boli zamerané na projektovú a technickú dokumentáciu a prípravu (9.1.1) respektíve potom mieru komplexnosti prípravnej fázy (9.1.2), v časti posudzovania geotermického a energetického hodnotenia ide o hodnotenie plánovaných (projektovaných) alebo realizovaných prác s cieľom identifikovať aspoň kľúčové kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia, rezervoárového média, a jeho hydrogeologický režim, fázovú stabilitu, a rezervoárovú dynamiku.

K poznaniu spomínaných kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového média a rezervoárového prostredia štandardne v zmysle globálnej praxe prispievajú predovšetkým:

- karotážne merania vo vrtoch
- vzorky a analýzy pevného materiálu
- tlakové profilovania
- teplotné profilovania
- hydrodynamické skúšky
- stopovacie skúšky
- reinjektáž
- hydrogeotermálne zhodnotenie
- geotermometria
- modelovanie rezervoárovej odozvy

Cieľom tejto časti posudzovania je zhodnotiť, v akej miere je realizácia vrtných prác a sprievodných meraní zmysluplná, keďže princípom etapovitosti je každým krokom, vrátane vrtného prieskumu, prispieť k poznaniu zdroja geotermálnej energie a prejavov rezervoárového prostredia, a zároveň adekvátne prispieť k zníženiu rizika kolapsu projektu pri jeho dlhodobej produkcii. V priemete na ekonomiku projektu, je účel hodnotenia zároveň posúdenie efektívnosti vynaložených finančných prostriedkov na vrtné práce, keďže aj samotná realizácia vrtov – odhliadnuc od ich funkčnej náplne v rámci dlhodobej produkcie – je ďalšou z vyhl'adávacích a prieskumných metód.

Realizované práce sú pritom predmetom projektu geologickej úlohy, eventuálne sú v pokračujúcich fázach projektu ľahko kontrolovateľné podľa projektovej dokumentácie, a zároveň musia byť vyhodnocované aj počas tvorby záverečnej správy z realizovaného prieskumu. Niektoré výsledky (teplotné a tlakové profilovania, hydrodynamické skúšky, režimové merania, stopovacie skúšky) sú pritom nevyhnutné pre prípravu podkladov pre schvaľovacie konanie na určenie povolených množstiev geotermálnych vôd pred Komisiou pre klasifikáciu zdrojov a zásob, bez ktorej vyjadrenia nie je možné vydať vodoprávne rozhodnutie na odber zdrojov geotermálnej energie.

9.1.3.1 Karotážne merania

Úlohou karotážnych meraní je kontinuálny záznam fyzikálnych (geofyzikálnych, hydraulických) indikácií rezervoárových parametrov počas realizácie vrtných prác, alebo po ich ukončení vo fáze takzvanej stabilizácie vrtu, čo v korelácii s litologickým záznamom (jadrovnice, úlomková analýza výplachu) umožňuje posúdenie vertikálneho profilu jednotlivých vlastností geologického prostredia nadložia, rezervoáru, alebo jeho podložia.

V tejto skupine meraní sú najmä:

- neutrónová karotáž (litologické členenie vrtu a prítomnosť rezervoárového média)
- neutrónová-gama karotáž (litologické členenie, pórovitosť)
- gama-gama karotáž (pórovitosť, priepustnosť, prítomnosť rezervoárového média)
- spontánna karotáž (litológia, prítomnosť rezervoárového média)
- akustická karotáž (priepustnosť, pórovitosť, tektonika, rezervoárové médium)
- videokarotáž (technický stav vybavenia vrtu, litológia, tektonika)
- kaliperové záznamy (priepustnosť, kavernometria, technický stav vnútorného vybavenia vrtu, tektonika)
- prítokometria (prítomnosť rezervoárového média, prítokové zóny, tektonika)
- penetračná rýchlosť (priepustnosť, pórovitosť, tektonika)
- výplachové záznamy (produktívne horizonty, prítokové zóny); a iné.

Nespornou výhodou karotážných záznamov je možnosť ich kontinuálneho realizovania v celom profile vrtu, čo pri korelácii s metodicky odoberanými pevnými vzorkami, výrazne šetrí finančné náklady samotného vzorkovania, aj geofyzikálnych analýz, ktoré by inak bolo nevyhnutné odoberať každých 50 – 100 m, respektíve vždy pri zmene litologickej stavby vo vertikálnom profile vrtu. Vyhodnocovanie a interpretácia karotážnych meraní teda vo

významnej miere prispieva ku tvorbe ako sekundárnych modelov hydrogeotermálneho systému, tak aj ku poznaniu geológie a kvalitatívnych, alebo kvantitatívnych parametrov rezervoáru a rezervoárového média.

Princípom využitia karotážnych meraní je ich vzájomná korelácia (aspoň 2) a spojenie s litologickým záznamom. Z tohto dôvodu je potom možné definovať realizáciu karotážnych meraní ako bodovacie kritérium, kde:

- **KOMPLEXNÁ** znamená, že v rámci projektu sú navrhované, alebo boli využité všetky relevantné metódy karotážneho profilovania, a počíta sa s ich vyhodnotením vo vzťahu ku kvalitatívnym a kvantitatívnym parametrom rezervoáru, alebo rezervoárového média
- **REALIZOVANÁ** znamená, že projekt počíta s realizáciou aspoň jedného nepriameho merania (spontánna, neutrónová, gama-gama, neutrónová-gama, kaliperový záznam, videokarotáž, akustika) a aspoň jedného priameho merania (prítokometria, výplachový záznam, penetračná rýchlosť)
- **NEDOSTATOČNÁ** znamená, že bola projektovaná / plánovaná / realizovaná len jedna priama, alebo jedna nepriama karotážna metóda, čo vo všeobecnosti nie je možné považovať za reprezentatívny záznam a reprezentatívne výsledky, keďže neponúka možnosť korelácie medzi dvoma a viacerými priamymi a nepriamymi metódami

Vyhodnotenie realizovanej karotáže, respektíve posúdenie jej komplexnosti a adresnosti, je možné na základe projektu geologickej úlohy, alebo výsledkov záverečnej správy z realizovaného vyhľadávania / prieskumu, kde karotážne metódy musia byť uvedené ako realizovaná práce v metodologickej časti, rovnako, ako v záverečnej správe vo výsledkovej časti. Štandardne bývajú geofyzikálne merania, ich záznamy (logy) a interpretácie, samostatnou súčasťou záverečných správ – v prílohách. Konzultácie o vhodnosti zvolených karotážných metód je možné realizovať cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra hydrogeológie PríFUK
- Katedra aplikovanej a environmentálnej geofyziky PríFUK
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.3.2 Vzorky a analýzy pevného materiálu

Vzorkovanie a analýza pevného materiálu, predovšetkým pre stanovenie hydraulických (pórovitosť, typ pórovitosti), geofyzikálnych (objemová hustota, mineralogická hustota) a termofyzikálnych (tepelná kapacita, tepelná vodivosť, tepelná difuzivita a.i.) respektíve geologických (mineralógia, petrológia, stratigrafia, geochemia) vlastností okolia rezervoáru alebo rezervoárového prostredia, sú jedným z kľúčových parametrov pre konštrukciu a kalibráciu ako rezervoárových modelov, tak aj modelov rezervoárovej odozvy, prúdenia, koncepčných modelov atp. Vzorky z predchádzajúcich etáp prieskumu nenahrádzajú aktuálne vzorkovacie cykly. Podľa globálnej praxe je nevyhnutné odoberať vzorky:

- každých 50 respektíve 100 m v nadloží prípadne podloží rezervoáru (detail)
- ... respektíve pri zmene litológie nadložia alebo podložia rezervoáru (minimum)
- v rezervoárovom prostredí každých 25 / 50 / 100 m (detail)
- ... respektíve na strope rezervoáru, v prítokových horizontoch a/alebo v stredovej časti rezervoáru, pod prítokovými zónami a/alebo v zachytenej bazálnej časti rezervoáru (minimum)

Z ekonomického hľadiska predstavuje odber pevného materiálu nákladnú časť v rámci vrtania, nakoľko, ak ide o odber priamo z vrtu v systémoch jadrového vrtania, spôsobuje dlhé prestoje spojené s vyberaním a zapúšťaním vzorkovnic vo vrtnej kolóne, a zároveň ide aj technicky o náročnú operáciu. Hodnotenie reprezentatívnosti získaných výsledkov by preto malo byť založené s prihliadnutím na lokálne podmienky a aj lokálnu prax, a využité ako bodovacie kritérium, kde:

- **KOMPLEXNÉ** znamená, že vzorky boli odoberané podľa detailných kritérií vzhľadom na početnosť vzoriek, a boli podrobené / budú podrobené komplexnej (litologická, termofyzikálna, geotermická, hydraulická) analýze; a zároveň boli v rovnakom, alebo podobnom rozsahu odoberané a analyzované na všetkých realizovaných vrtoch v rámci projektu
- **DOSTATOČNÉ** znamená, že vzorky boli odoberané podľa minimálnych kritérií vzhľadom na početnosť vzoriek, ale získané / projektované analýzy sú dostatočne reprezentatívne vzhľadom na účel odberu; a zároveň boli v rovnakom, alebo podobnom rozsahu odoberané a analyzované na väčšine realizovaných vrtoch v rámci projektu
- **NEDOSTATOČNÉ** znamená, že vzorky boli odoberané s frekvenciou menšou, ako minimálne kritériá vzhľadom na početnosť, a projektované / získané analýzy

nezodpovedajú údajovej komplexnosti, čiže analýzy boli redukované na vybrané ukazovatele, respektíve parametre; a zároveň boli realizované len na jednom, alebo v menšine realizovaných vrtov; čo neumožňuje získať dostatočné údajové záznamy a priniesť významné spresnenie modelov pre redukciiu budúcich neistôt

Vzorkovacie a analytické práce je nevyhnutné v zmysle globálnej praxe a za účelom minimalizácie rizika neúspechu, realizovať na všetkých konštruovaných vrtoch bez rozdielu vzhľadom na ich účel využitia, t.j. pri budúcich produkčných vrtoch, reinjektážnych, eventuálne monitorovacích, stand-by, vytyčovacích, atď.

Vzorkovacie práce, čo sa počtu týka, a rovnako, čo sa týka účelu ich využitia sú súčasťou projektu geologickej úlohy (metodická časť) a štandardne bývajú uvedené aj v nákladových / rozpočtových položkách. Zároveň sú tieto údaje kontrolovateľné v rámci záverečných správ z vyhľadávacích / prieskumných prác, a to vo výsledkovej časti, prípadne v samostatných prílohách, čo uľahčuje vyhodnotenie tohto kritéria, predovšetkým, keď je k dispozícii aj vertikálny (realizovaný, plánovaný) profil vrtu. Konzultáciu je možné realizovať cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.3.3 Tlakové profilovania a tlakové merania

Tlakové profilovania a tlakové merania sú štandardnou súčasťou dokumentácie produkčných, respektíve reinjektážnych vrtov počas ich konštrukcie (neustálený profil), kompletácie (ustálený profil), monitorovania stabilného prostredia (ustálený profil), hydrodynamických skúšok (neustálený profil) a následnej produkcie a jej monitorovania (neustálený profil).

Vertikálne profilovanie tlaku vo vrtoch slúži predovšetkým na interpretáciu vývoja rozloženia rezervoárových tlakov a teda hustotných rozdielov v rezervoárovom médiu, určenie bodu evázie plynov (odplyňovanie) od ktorého sa následne odvíja hĺbka zapustenia čerpadla, fázovej stability, prítokov geotermálnej vody, saturovanej vlhkej pary, dvojitej fázy, parnej fázy, ale aj na stanovenie vývoja množstva voľných (non-condensable gases) plynov v rezervoárovom prostredí alebo médiu. Všetky údaje sú potrebné pre pochopenie iniciálneho

rezervoárového štádia (pred produkciou) a následne pre dôsledné monitorovanie rezervoárovej odozvy.

Tlakové merania sa realizujú zvyčajne priamo v rezervoárovej pozícii – t.j. pri otvorených úsekoch prítokových zón vo vrtoch, alebo na ústí produkčných a reinjektážnych vrtov. Pri produkčných vrtoch slúžia na sledovanie zmien vývoja vodného stĺpca a tlaku na ústí, ktorý sa odvíja ako od prítokových množstiev (produktivity), tak aj od obsahu voľných plynov alebo parnej frakcie.

Všetky údaje sú potrebné pre konštrukciu koncepčného modelu predmetnej hydrogeotermálnej štruktúry a obehového systému, a nevyhnutné pre kalibráciu statických, alebo dynamických modelov prúdenia v ustálenom režime, ako aj pre predikcie vývoja rezervoárovej odozvy v súvislosti s budúcou – a dlhodobou – produkciou. Základný monitorovací režim vývoja tlakov, respektíve minimálne a optimálne požiadavky, sú uvedené v príslušnej časti 4.3.2. Je však potrebné zdôrazniť, že globálna prax, založená na princípoch rezervoárového inžinierstva, je výrazne odlišná od legislatívnych rámcov, ktoré stanovujú pravidlá prieskumu a monitorovania produkcie zdrojov geotermálnej energie na Slovensku, prípadne počas realizovania hydrodynamických skúšok.

Sledovanie tlakových záznamov alebo tlakových profilov je možné použiť ako bodovacie kritérium, kde:

- **KOMPLEXNÉ** znamená, že projekt počíta s realizáciou, alebo realizuje tlakové profilovania a tlakové merania opakovane, periodicky, počas vrtania, počas ustáľovania, počas hydrodynamickej skúšky, a počíta aj s monitorovaním tlakov po jej realizácii, s cieľom budovať komplexnú, výpovednú a relevantnú databázu údajov pre ďalšie vyhodnocovanie, interpretovanie, a využitie v modelovacích postupoch; pričom technickým prevedením a realizáciou ide nad rámec požiadaviek príslušnej technickej normy pre realizáciu hydrodynamických skúšok; a zároveň tlakové merania sú realizované alebo projektované na všetkých konštruovaných vrtoch v rámci projektu, ktorý sa uchádza o dotačné schémy
- **DOSTATOČNÉ** znamená zároveň súladné s legislatívnymi postupmi, pričom nejde nad rámec minimálnych požiadaviek na merania tlaku, ale spĺňa podmienku aspoň 1 ustáleného a 1 neustáleného profilu počas vrtania a počas stabilizácie vrtu, a aspoň 1 profilu pred realizáciou hydrodynamickej skúšky, a 1 počas nej, respektíve v prípade rozhodnutia zodpovedného riešiteľa po nej; a zároveň projekt počíta s kontinuálnym

meraním vývoja tlaku aspoň na ústí produkčných, či reinjektážnych vrtov počas hydrodynamickej skúšky

- NEDOSTATOČNÉ znamená, že navrhovaný, alebo realizovaný monitoring a profilovanie tlakových pomerov nespĺňa základné požiadavky na reprezentatívnosť sledovania tlakových podmienok a tlakového režimu; a zároveň merania a monitoring nie sú realizované na všetkých konštruovaných vrtoch.

Posúdenie, či je monitorovanie tlakových profilov a tlakové merania na ústí vrtov dostatočnej výpovednej hodnoty pre minimalizáciu budúceho rizika, je možné porovnaním vyššie uvedených požiadaviek s projektom geologickej úlohy, alebo záverečnou správou z hydrogeotermálneho prieskumu, pričom projektované práce sú v metodickej časti, výsledkové práce alebo súčasťou záverečnej správy, prípadne tlakové profily, záznamy, alebo čiastkové interpretácie predstavujú (štandardne) aj vlastné prílohové časti. V prípade potreby je možné konzultovanie cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.3.4 Teplotné profilovania a teplotné merania

Teplotný výskum v rámci geotermálnych vrtov, či monitorovacích objektov, sa vykonáva v rovnakom režime, ako sledovanie tlakových podmienok, čiže v režime:

- ustáleného stavu: ustaľovanie vrtu z výplachu a vrtania, stabilizácia a kompletácia vrtu, pred-skúškový režimový monitoring
- neustáleného stavu: vrtanie, hydrodynamická skúška, produkčný monitoring.

Sledovanie vývoja teploty sa realizuje podobne vo forme vertikálnych teplotných profilov, alebo kontinuálneho / režimového merania v prítokových zónach, nad nimi, respektíve na ústí produkčných alebo reinjektážnych vrtov.

Vertikálne teplotné profilovanie sa vo vrtoch realizuje predovšetkým pre mapovanie vertikálnej distribúcie teploty vo vrtoch. V ustálenom, alebo dynamickom (neustálenom) režime ide predovšetkým o sledovanie zmeny v teplotnom profile v súvislosti s prítokovými zónami (ochladzovanie alebo prehrievanie konduktívneho profilu), konduktívne ochladzovanie

vo vrtoch, prípadne adiabatický var a konvektívne ochladzovanie po separácii parnej frakcie. Vertikálne profily realizované počas hydrodynamickej skúšky zároveň vedia indikovať aktivácie hlavných alebo sekundárnych prítokových zón s rôznou teplotou. Profilovanie ustáleného prostredia a neustáleného prostredia je zároveň kľúčové pre kalibráciu stacionárnych, alebo dynamických rezervoárových modelov pri odhade rezervoárovej dynamiky a procesov, ktoré v rezervoári prebiehajú, vrátane formovania parnej frakcie, či vertikálnych pohybov v súvislosti s plošnou, alebo izolovanou konvekciou. V neposlednom rade sú záznamy teploty (meranej, vypočítanej) horninového prostredia a vodného profilu, a ich porovnávanie, nevyhnutné, pre konštrukciu geotermického modelu a interpretovanie regionálnych alebo lokálnych prúdení, aj ako dôležitá primárna báza údajov pre modely teplotnej odozvy rezervoáru.

Teplotné merania sa realizujú zvyčajne na ústí produkčných vrtov a slúžia na zostrojenie údajových rádov pre kalibráciu modelov vývoja teploty produkovaného rezervoárového média v čase (tzv. history-match), aj na monitorovanie rezervoárovej odozvy a sledovanie možného nástupu, alebo prieniku studeného frontu k produkčnej zóne. V prípade ekonomickej dostupnosti sa rovnaké merania realizujú počas hydrodynamickej skúšky, po-skúškového monitorovania alebo počas produkcie aj nad prítokovými zónami v otvorených vrtných úsekoch. Na reinjektážnych vrtoch sú monitorované teploty na ústí pre kontinuálny záznam teploty reinjektovaného média pred, respektíve po dodatočnom odparení viazanej parnej frakcie (napríklad v tlmiacich staniaciach), prípadne sú meracie sondy zapustené do reinjektážnych úsekov pre sledovanie vývoja teploty reinjektovanej vody na vstupe do horninového prostredia. Podobne, ako v prípade meraní a monitorovania, či zaznamenávania tlaku, aj tu je významný rozdiel medzi globálnou praxou a zabehnutými režimami v rámci výskumu, prieskumu, alebo vyhľadávania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku. Štandardné požiadavky v rámci lokálnej praxe sú:

- aspoň 1 teplotný profil v ustálenom režime
- aspoň 1 teplotný profil v neustálenom režime
- aspoň 1 teplotný profil pred hydrodynamickej skúškou
- aspoň 1 teplotný profil po hydrodynamickej skúške
- zaznamenávanie teploty na ústí produkčného vrtu počas ustáleného obdobia
- zaznamenávanie teploty na ústí produkčného vrtu počas hydrodynamickej skúšky.

Spôsoby monitorovania rezervoárovej teploty v rámci globálnej praxe, postavenej na princípoch rezervoárového inžinierstva, opisujeme v časti 4.3.2. Ich spojením je možné vytvoriť bodovacie kritérium, kde:

- **KOMPLEXNÉ** hodnotenie teplotných pomerov znamená, že projektované alebo realizované práce zodpovedajú nadštandardným výkonom prác, alebo sa približujú princípom monitorovania zdrojov geotermálnej energie podľa globálnej praxe; pričom rovnaké práce sú projektované, alebo realizované, na všetkých nových konštruovaných vrtoch; eventuálne plán pred-skúškového monitorovania a režimového pozorovania počíta s realizovaním meraní teploty aj na okolitých monitorovacích bodoch, ak existujú
- **DOSTATOČNÉ** hodnotenie teplotných pomerov znamená, že projektované, alebo realizované merania teploty a teplotného profilovania zodpovedajú aspoň štandardom uvedeným vyššie, ktoré sú bežne využívané v lokálnej, Slovenskej praxi pri prieskume a vyhľadávaní zdrojov geotermálnej energie
- **NEDOSTATOČNÉ** hodnotenie teplotných profilov znamená, že projektované, alebo realizované práce svojou početnosťou a prevedením nie sú dostatočné pre adekvátne zmenšenie rizika a neistôt dlhodobej produkcie geotermálnej energie, a neboli prevedené aspoň s minimálnymi požiadavkami; prípadne ak projektované práce merania a profilovania teploty sú platné len pre produkčný alebo len pre reinjektážny vrt.

Posudzovanie potrebnej frekvencie a potrebnej metodiky merania voči plánovaným alebo realizovaným prácam je možné založiť na jednoduchom porovnaní projektu geologickej úlohy (práce by mali byť uvedené v metodickej časti) alebo jeho záverečnej správy, s vyššie uvedenými kritériami. V záverečnej správe bývajú výsledky hodnotenia teplôt súčasťou výsledkovej časti, respektíve častokrát sú uvedené ako vlastná, samostatná príloha. V prípade potrieb sú možné konzultácie cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.3.5 Hydrodynamické skúšky

Hydrodynamické skúšky predstavujú základné práce testovania hydraulických parametrov rezervoáru a prítokových podmienok rezervoárového média. V rámci ich realizácie ide o kontinuálne, alebo režimové (pravidelné v zvolených intervaloch) zaznamenávanie rezervoárového tlaku, výdatnosti, hladiny geotermálnej vody vo vrte, prípadne teploty v režime udržiavanej produkcie, alebo pri ciele vyvolávaných tlakových depresiách navyšovaním odoberaných množstiev produkovaného rezervoárového média. Ide pri tom o jediný spôsob, ako testami priamo na základe vývoja zmien pozorovaných parametrov, prostredníctvom matematických funkcií vyjadriť základné hydraulické parametre rezervoáru (priepustnosť, prietočnosť, koeficient hydraulickej transmisivity, koeficient priepustnosti).

Na Slovensku zohrávajú hydrodynamické skúšky kľúčovú rolu v rámci vyhľadávania a prieskumu, respektíve overovania zdrojov geotermálnej energie, nakoľko interpretované výsledky sú podkladom pre stanovenie takzvaných povolených množstiev na odber geotermálnych vôd, ktoré pred vodoprávnym oprávnením odsúhlasuje – prípadne podmieňuje – Komisia pre klasifikáciu zdrojov a zásob podzemných vôd pri MŽP SR.

V globálnej praxi sú hydrodynamické skúšky síce neoddeliteľnou súčasťou vyhľadávania a testovania vrtov, ale väčšiu úlohu, významnejšiu, zohráva kontinuálny monitoring a dlhodobé merania. Výsledky hydrodynamických skúšok na vrtoch sú pritom overované, kalibrované, alebo modelované priestorovo štandardne s využitím viacerých vrtov, a viacerých kampaní skúšania. Minimálne požiadavky pre realizáciu hydrodynamickej skúšky v zmysle platnej legislatívy a technickej normy pre ich realizáciu sú 21 dní. S ohľadom na predpoklad dlhodobej produkcie je ale výsledok 21-dňovej čerpacej skúšky metodicky sporný, nakoľko tlakové okrajové podmienky, prípadne prieniky studeného frontu nemusia byť dosiahnuté v danom časovom intervale. Z miestnej praxe vyplýva požiadavka na prevádzkovanie dlhších hydrodynamických skúšok – niekoľko projektov už pristúpilo k predĺženiu doby skúšky na 60 dní, čo je určite pri testovaní rezervoárového prostredia výpovednejšia hodnota aj vzhľadom na tvorbu tlakovej depresie.

Realizáciu hydrodynamických skúšok je možné využiť ako ďalšie bodovacie kritérium, podľa ktorého:

- **REPREZENTATÍVNE** prevedenie hydrodynamických skúšok znamená, že projekt má plánované skúšky v dĺžke aspoň 60 dní na všetkých novovybudovaných objektoch, a v prípade koncepcnej potreby (ochranné pásma vodných a termominerálnych

a kúpeľných zdrojov, existencia dokumentačných objektov z predchádzajúcich etáp prieskumu vo výhodnej pozícii vzhľadom na rezervoárové prostredie) aj na relevantných objektoch v okolí

- DOSTATOČNÉ prevedenie znamená, že projekt má plánované, alebo realizované hydrodynamické skúšky v trvaní aspoň 21 dní; a to na všetkých novovybudovaných objektoch (vrty rôznej funkcie a určenia), pričom plán realizácie skúšok počíta s ich prevedením na relevantných objektoch existujúcich okolí v prípade ochranných pásiem termálnych a minerálnych liečivých vôd, či významných vodárenských zdrojov
- NEDOSTATOČNÉ prevedenie znamená, že projekt nepočíta s prevedením aspoň 21-dňových hydrodynamických skúšok na novovybudovaných objektoch, ktoré by tvorili základ pre vodoprávne konanie, alebo projekt spoľahlivo nepreukázal dostatočné prevedenie hydrodynamických skúšok na novovybudovaných objektoch; respektíve aj pri prevedení hydraulických skúšok v dobe aspoň 21 dní projekt neplánuje, alebo nerealizoval hydrodynamické skúšky aj na objektoch významnej spoločenskej hodnoty v priestore ochranných pásiem..

Kontrola hydrodynamickej skúšky a jej relevancie je možná cez projekt geologickej úlohy, kde musí byť metodika jej prevedenia presne špecifikovaná (spôsob čerpania, trvanie, prevedenie čerpaciej a stúpaciej skúšky, spôsob dokumentovania a zneškodňovania čerpaného rezervoárového média, metodika a periodicita vzorkovania), a zároveň je možné jej realizáciu efektívne kontrolovať v záverečnej správe, kde sa jej trvanie a výsledky uvádzajú vo výsledkovej časti, a zároveň prílohové časti sa venujú aj jej reálnym terénnym záznamom. Vzťah prieskumného územia a ochranných pásiem je pritom riešený aj v rámci projektu geologickej úlohy, predovšetkým priestorové súvislosti ochranného pásma, produkovaných zdrojov, a plánovaných objektov. Relevantné konzultácie sú možné cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Inšpektorát Kúpeľov a žriedel pri Ministerstve zdravotníctva SR
- Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva STU BA
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.3.6 Stopovacie skúšky

Stopovacie skúšky sú v globálnej praxi inherentnou súčasťou výskumu, vyhľadávania, a prieskumu zdrojov geotermálnej energie. Ich účelom je pomôcť pri interpretácii hydraulických parametrov rezervoárového prostredia a definovať možné systémy prúdenia, preferenčné cesty prúdenia, a rýchlosť prieniku ako chemického, tak najmä studeného frontu medzi infiltračnou / reinjektážnou oblasťou, a produkčnou zónou. Ide o dôsledok rýchlosti prienikov jednotlivých typov frontu, pričom čas prieniku studeného frontu je, v závislosti od geotermických parametrov rezervoárového prostredia, 2 – 8 násobne dlhší, ako čas prieniku chemického frontu, teda napríklad stopovača. Stopovacie skúšky bývajú realizované:

- systémom spätného čerpania v reinjektážnom vrte (do reinjektážneho vrtu je vsiaknuté množstvo stopovača, ktoré sa klasickou výmenou média medzi vrtom a okolím dostane do rezervoárového prostredia, a následne je čerpané v reinjektážnom vrte; to vedie k určeniu vlastností rezervoárového prostredia v okolí reinjektážneho vrtu)
- systémom produkčnej dvojčky (do reinjektážneho vrtu je vsiaknuté dané množstvo stopovača, čerpaním produkčného vrtu sa sleduje čas prieniku stopovača a jeho množstvo; čo umožňuje posúdenie komunikačných ciest medzi oboma vrtmi)
- systémom produkčného poľa (do sústavy reinjektážnych vrtov sú vsiaknuté dané množstvá rozdielnych stopovačov, čerpaním produkčných vrtov sa sleduje čas prieniku stopovača a jeho množstvo – v porovnaní s pôvodným – čo umožňuje posúdenie komunikačných ciest a preferenčných kanálov plošne v rezervoárovom prostredí, ako aj odhad hydraulických parametrov a vektor ich zmien).

Samotné stopovače sú dokumentované vo vrtoch pravidelným vzorkovaním na ústí produkovaných vrtov, respektíve hĺbkovými odbermi v neprodukovaných (monitorovacích, stand-by, záložných, nevyužívaných) vrtoch. Preto musia stopovače, ako chemické prvky, alebo zlúčeniny, spĺňať niekoľko základných charakteristík:

- nesmú byť prítomné v rezervoári
- nesmú byť chemicky reaktívne s rezervoárovým prostredím alebo rezervoárovým médium
- musia byť termicky / teplotne stabilné a nepodliehať rozpadu pri zmenách teploty
- vzorkovanie a analýza musí byť rýchla a cenovo nenákladná
- musia byť environmentálne prijateľné, netoxické, nekarcínogénne, predovšetkým pri prevádzkovom využití v priestore chránených vodárenských / kúpeľných zdrojov.

Z praktického hľadiska tak stopovacie skúšky predstavujú významný zdroj informácií o dynamike prúdenia v rezervoárovom prostredí a jeho hydraulických parametroch, napriek zdanlivému navýšeniu finančných prostriedkov.

Realizovanie skúšok a ich konfigurácia závisia od účelu prevedenej skúšky, preto je ich prevedenie možné využiť ako dvojstupňové bodovacie kritérium, podľa ktorého:

- REALIZOVANÉ znamená, že projekt / žiadosť má realizáciu stopovacích skúšok plánované v projekte geologickej úlohy, alebo priamo v nákladoch žiadosti o finančnú podporu, respektíve projekt, ktorý realizoval stopovacie skúšky, a účel / spôsob prevedenia stopovacích skúšok zodpovedá ich konfigurácii
- NEREALIZOVANÉ znamená, že projekt / žiadosť nemá realizáciu stopovacích skúšok v projekte, nepočíta s nimi, ani stopovacie skúšky neboli realizované; prípadne účel stopovacích skúšok nezodpovedá spôsobu ich prevedenia.

Posúdenie realizácie stopovacích skúšok môže byť založené na štúdiu projektu geologickej úlohy alebo jeho záverečnej správy, pričom spôsob a účel stopovacích skúšok musia byť uvedené aspoň v metodической časti a následne vo výsledkoch.

9.1.3.7 Reinjektáž

Účely, princípy, a metodiku aj význam reinjektáže rozoberá podkapitola 3.4. Z pohľadu vyhľadávania a prieskumu, respektíve charakteristiky rezervoárového prostredia a zdrojov geotermálnej energie je nevyhnutné posúdiť celkové prevedenie realizácie, a prípadne možnosti jej optimalizácie. Tá vyplýva nielen z rozdielnych typov reinjektážnych stratégií, ale aj z potreby očakávať, respektíve počítať s možnosťami neefektívnej reinjektáže a potreby zmien alebo reinjektážnej pozície, alebo zmien v účeloch jednotlivých vrtov.

Ak by malo hodnotenie vychádzať z globálnej praxe, reinjektáž by mala byť využitá ako vylučovacie kritérium bez rozdielu s ohľadom na hydrogeologický a hydraulický režim rezervoárového prostredia. Podmienky reinjektáže na Slovensku nateraz upravuje Geologický zákon a jeho vykonávajúca vyhláška (obmedzená podľa hydrogeologickej / hydraulickej uzavretosti rezervoárového prostredia, chemického zloženia, celkovej mineralizácie).

Preto je možné reinjektáž zvážiť ako **vylučovacie kritérium v zmysle zákona**, teda pre rezervoárové prostredia s uzavretým hydrogeologickým / hydraulickým režimom, alebo v prípade, ak je opodstatnený predpoklad celkovej vysokej mineralizácie rezervoárového média, alebo v zmysle analógie s podobnými geologickými, hydrogeologickými

a geotermickými podmienkami na Slovensku, aj predpoklad vysokých obsahov ťažkých kovov alebo toxických prvkov, kde:

- ÁNO = projekt má plánovanú reinjektáž, ktorá je súčasťou žiadosti o finančnú podporu v zmysle projektu geologickej úlohy alebo predloženej projektovej dokumentácie a žiadosti, prípadne projekt realizoval reinjektáž v podmienkach, ktoré určuje geologický zákon
- NIE = projekt nemá plánovanú reinjektáž ani v rámci finančnej žiadosti, ani v rámci projektovej dokumentácie, ktorá je súčasťou žiadosti, nepočíta s realizáciou reinjektáže, alebo reinjektáž podmieňuje realizáciou predchádzajúceho geologického prieskumu vrtnými prácami; prípadne projekt v podmienkach, ktoré podmieňuje zákon, uvažuje o realizácii hydrodynamických skúšok a vyhodnotenia produkčných vrtov aj bez realizovaného reinjektážneho vrtu.

V zmysle globálnej praxe je možné reinjektáž hodnotiť z pohľadu rezervoárového inžinierstva, a kontextu, ktorý reinjektáž do vyhľadávania a prieskumu, a stanoveniu podmienok rezervoárového prostredia, reinjektáž prináša, a teda ako **bodovacie kritérium**, kde:

- OPTIMALIZOVANÁ reinjektáž znamená, že projekt zohľadňuje možné neistoty a predpokladá realizáciu aspoň dvoch reinjektážnych vrtov v súčasnej žiadosti, alebo diskutuje možnosť realizácie reinjektážnych vrtov v prípade potreby v budúcnosti, ak by bola preukázaná sporná efektivita aktuálne plánovanej reinjektáže; čím projekt / žiadosť umožňuje prácu s rezervoárovými neistotami a pripravuje predpoklady pre vhodný rezervoárový manažment; pričom reinjektáž je súčasťou projektu aj v podmienkach nad rámec Geologického zákona a jeho vykonávajúcej vyhlášky; a zároveň voľba / situovanie reinjektážnych vrtov je geologicky, geotermicky, a hydraulicky / hydrogeologicky vhodne opodstatnené realizovaným geofyzikálnym a geochemickým prieskumom, alebo primárnym modelovaním
- PODMIENENÁ reinjektáž znamená, že projekt počíta s reinjektážnym vrtom v rámci legislatívnej normy, respektíve s jediným reinjektážnym vrtom; a v projekte geologickej úlohy nie je vyhradená diskusia pre prípadnú zmenu priestorovej pozície reinjektážneho vrtu alebo zmena funkčných vlastností plánovaného dubletu; pričom projekt geologickej úlohy počíta s reinjektážnym vrtom jedine v prípadoch, kde to geologický zákon vyžaduje; pričom aj plánovaná pozícia reinjektážneho vrtu, alebo skupiny presne definovaných vrtov nie je presvedčivo zdôvodnená podkladmi

- **NEDOSTATOČNÁ** optimalizácia reinjektáže znamená, že projekt nepredpokladá reinjektáž v zmysle globálnej praxe, ani podľa legislatívnej normy, respektíve, že projekt nepredpokladá realizáciu reinjektážnych systémov ani v podmienkach, kde podľa princípu analógie je dôvodný predpoklad jej nevyhnutnosti (aj legislatívne podmienenej) v budúcnosti, pričom súčasťou plánovaných prác môžu byť aj realizácie hydrodynamických skúšok (ktorých prevedenie je v tom prípade bez reinjektáže nemožné); čo metodicky vylučuje reprezentatívne, a presvedčivé ukončenie projektu.

Posúdenie jednoduchkej prítomnosti / neprítomnosti reinjektáže vyplýva z projektu geologickej úlohy, ktorý je súčasťou prideleného prieskumného územia, respektíve by mal byť inherentnou súčasťou projektovej dokumentácie k žiadosti o finančnú podporu. V oboch prípadoch by mala byť uvedená v metodickej, alebo technickej časti, ako súčasť realizovaných prác, spolu so spôsobom konštrukcie, alebo aj účelom realizácie.

Náročnejšie je posúdenie optimalizácie reinjektáže alebo miery jej nožnej budúcej funkčnosti. V tomto prípade je vhodné využiť konzultácie na odbornej úrovni, predovšetkým cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.3.8 Hydrogeotermálne zhodnotenie

Hydrogeotermálne zhodnotenie je v zmysle Geologického zákona a vykonávajúcej vyhlášky neoddeliteľnou súčasťou realizácie vyhľadávacieho prieskumu pre zdroje geotermálnej energie, ako súčasť záverečnej správy, a preto jeho realizácia by mala byť vopred plánovaná v rámci projektovej prípravy, a teda aj žiadosti o finančný príspevok. Hydrogeotermálne zhodnotenie z pohľadu množstiev, alebo zásob geotermálnej energie je vo svojej podstate totiž cieľom realizovaného prieskumu, ktorý má priniesť odpoveď aj na otázku energetickej distribúcie v rámci rezervoárového prostredia, alebo rezervoárového média.

Aplikačná prax v podmienkach Slovenska je opísaná v Kapitole 6. Hodnotiace kritérium je možné založiť na komplexnosti prevedenia hydrogeotermálneho hodnotenia, pričom nadpriemerné hodnotenie odráža princípy aplikované pri prieskume a vyhľadávaní zdrojov geotermálnej energie podľa globálnej praxe. Následne pre **bodovacie kritérium** platí:

- **REPREZENTATÍVNE** hydrogeotermálne zhodnotenie znamená, že projekt geologickej úlohy počíta ako s deterministickým, diskretným odhadom zdrojov a zásob geotermálnej energie a množstiev geotermálnej energie, vrátane tepelných výkonov produkčného systému v závislosti na variabilite výdatnosti a teploty produkovaného rezervoárového média; a zároveň projekt počíta s realizáciou pravdepodobnostného modelovania odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie pre praktické využívanie a posúdenie možností produkcie zdrojov geotermálnej energie
- **DOSTATOČNÉ** hydrogeotermálne zhodnotenie znamená, že projekt geologickej úlohy počíta aspoň s deterministickým, diskretným odhadom / výpočtom zdrojov a zásob geotermálnej energie a množstiev geotermálnej energie, vrátane deterministického vyjadrenia tepelných výkonov v závislosti na výsledku hydrodynamickej skúšky (produktivita a teplota produkovaného rezervoárového média), pričom súčasťou projektu, alebo jeho realizácie podľa záverečnej správy, je konštrukcia máp merného tepelno-energetického potenciálu; avšak projekt nepočíta so zapojením analýzy citlivosti, ani pravdepodobnostného modelovania pri hydrogeotermálnom hodnotení
- **NEDOSTATOČNÉ** hydrogeotermálne zhodnotenie znamená, že projekt geologickej úlohy nepočíta s vyjadrovaním zdrojov a zásob geotermálnej energie, množstiev geotermálnej energie, ani s pravdepodobnostným, citlivostným, alebo diskretným (deterministickým) vyjadrením tepelného výkonu geotermálnej sústavy.

Posúdenie realizovaného alebo plánovaného hydrogeotermálneho hodnotenia, ktoré by malo byť jedným zo základných výstupov vyhľadávania / prieskumu zdrojov geotermálnej energie, je možné štúdiom projektu geologickej úlohy, kde metóda jeho prevedenia a podklady, sú v aplikačnej praxi uvedené v metodickej časti. V prípade kontroly realizovaných prác je hydrogeotermálne hodnotenie súčasťou výsledkovej časti záverečnej správy. V odôvodnených prípadoch, kedy je vyhľadávanie zamerané na konkrétne obehové systémy (hydrogeotermálne štruktúry, perspektívne geotermálne oblasti, útvary geotermálnych vôd) súčasťou samostatných príloh, alebo samostatných (čiastkových) záverečných správ.

9.1.3.9 Geotermometria

Geotermometria predstavuje špecifický typ geochemickej analýzy rezervoárového média a rezervoárového prostredia. V princípe je analýza geotermometrov jedným zo základných nástrojov, ako pri pomerne nízkych ekonomických nákladoch (vzorkovanie, analýza,

interpretácia výsledkov) schopná identifikovať, a interpretovať kľúčové aspekty rezervoárového prostredia alebo rezervoárového média, predovšetkým:

- teplotu posledného vyváženia (poslednú rovnovážnu teplotu, ktorú vzorka v geologickom prostredí nadobudla pred vzorkovaním a pri ktorej prišla do chemickej a termodynamickkej rovnováhy s minerálnymi fázami)
- maximálnu teplotu vyváženia (maximálnu teplotu, ktorú vzorka v rezervoárovom prostredí dosiahla v rámci jej koncepcnej / obehovej histórie)
- stav jej chemického vyváženia ku konkrétnym geotermometrom, ktorý v kombináciách môže indikovať procesy rezervoárovej dynamiky, najmä však:
 - režim prúdenia (trendový zostupný, trendový vzostupný, cyklický vzostupný a zostupný, horizontálna evázia, vertikálna evázia, rezervoárová invázia)
 - dynamiku prúdenia a rezervoárové kontakty (zmiešavanie, nariedovanie, zahusťovanie, zahrievanie, ochladzovanie)
 - rezervoárové procesy (plošná konvekcia, izolovaná konvekcia, konduktívny var, adiabatický var, konduktívne ochladzovanie, konduktívne ohrievanie, odparovanie, kondenzovanie).

Z praktického hľadiska je tak geotermometria nevyhnutná pri zvažovaní reinjektážnych systémov aj modelovaní predikcií rezervoárovej odozvy. V rámci globálnej praxe sú využívané predovšetkým:

- silikátové geotermometre (v každom geologickom prostredí, nízkoteplotné aj vysokoteplotné zdroje)
- kationové geotermometre (predovšetkým v siliciklastickom a vulkanickom alebo magmatickom prostredí, najmä stredoteplotné a vysokoteplotné zdroje, respektíve v karbonátovom prostredí so zameraním len na rezervoárové procesy)
- multikomponentové geotermometre (v každom geologickom prostredí, nízkoteplotné až vysokoteplotné zdroje, najpresnejšie, časovo najnáročnejšie, vyžadujúce modelovanie saturačných stavov a vybranie takzvanej selektívnej reprezentatívnej skupiny minerálnych fáz)
- izotopové geotermometre (ekonomicky náročné pre potrebu vzorkovania, a analýzy izotopov, otázne je jej využitie v cyklicky vzostupných a zostupných systémoch kvôli takzvanému „prepisovaniu koncepcnej histórie vzorky“)
- plynové geotermometre (v prípade prítomnosti parnej frakcie).

Geotermometria nie je štandardnom pri analýze zdrojov geotermálnej energie v aplikačnej praxi na Slovensku, respektíve je využívaná len minimálne. Jej princípom je kombinovanie výsledkov geotermometrie s termochemickými metódami geochemického výskumu zdrojov geotermálnej energie, geofyzikálnym výskumom, geologickými modelmi, hydrogeologickými modelmi a výsledkami vrtania. Údaje, ktoré je schopná poskytnúť na základe exaktného interpretovania rovnovážneho, alebo nerovnovážneho stavu a podmienok, ktoré k nemu vedú voči jednotlivým minerálnym a chemickým fázam, sú však exaktné, a špecifické, a z pohľadu predovšetkým modelov predikcií rezervoárovej odozvy kritické.

Z tohto pohľadu je geotermometriu možné využiť ako **bodovacie kritérium**, podľa ktorého:

- **KOMPLEXNÁ** geotermometria znamená, že projekt počíta s realizáciou všetkých dostupných a relevantných metód geotermometrického výskumu rezervoárového média v jeho príprave, respektíve v rámci prebiehajúceho prieskumu bolo geotermometrické vyhodnotenie rezervoárového média realizované s cieľom upresnenia koncepčného modelu hydrogeotermálneho systému a podmienok formovania a dynamiky rezervoárového média
- **REALIZOVANÁ** geotermometria znamená, že projekt počíta s realizáciou vybraných, špecifických typov geotermometrie podľa znalostí a možností riešiteľského kolektívu, respektíve, že v rámci prebiehajúceho prieskumu boli čiastkové geotermometrické metódy už aplikované s cieľom upresnenia koncepčného modelu hydrogeotermálneho systému a podmienok formovania a dynamiky rezervoárového média
- **NEREALIZOVANÁ** geotermometria znamená, že projekt nepočíta s realizáciou geotermometrického výskumu zdrojov geotermálnej energie, metódy nie sú spomenuté v projektovej a metodickej časti, a prebiehajúci prieskum, respektíve ukončený prieskum v zmysle predloženej záverečnej správy nevyužil geotermometrické metódy pri štúdiu rezervoárového prostredia a rezervoárového média.

Kontrola prevedenia geotermometrického výskumu v zmysle realizovaná / nerealizovaná je priamočiara, na základe metodickej časti projektovej dokumentácie, kde by mal byť geotermometrický výskum uvedený samostatne, alebo ako súčasť hydrogeochemickej analýzy rezervoárového prostredia, respektíve rezervoárového média; rovnako ako vo výsledkovej časti záverečnej správy. Relevantnosť geotermometrie je možné konzultovať cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra hydrogeológie PrifUK.

9.1.3.10 Modelovanie rezervoárovej odozvy

Modelovanie rezervoárovej odozvy je v globálnej praxi výskumu a vyhľadávania (prieskumu) zdrojov geotermálnej energie ďalšou z inherentných častí, nakoľko jeho úlohou vo fáze prieskumu je realizovať prvotné modely rezervoárovej odozvy, podľa ktorých je v nasledovnej etape nastavená otváracia fáza produkcie, ktorá je ponechaná konštantne, alebo následne upravovaná v závislosti na produkčnej stratégii (časť 4.1.4), počas ktorej prebieha monitoring pre kalibráciu a tvorbu ďalších generácií predikčných modelov rezervoárovej odozvy, a vyhodnocovanie vývoja monitorovanej odozvy na základe reálnych údajov, s rozhodovaním o zmene, alebo ponechaní produkčnej stratégie. Tým sa vytvárajú ďalšie možnosti pre rozvoj produkcie geotermálneho poľa a/alebo minimalizovanie rizika rezervoárovej depletácie.

Modelovanie rezervoárovej odozvy môže byť realizované viacerými spôsobmi, pričom najvyužívanejšie sú:

- 1D lumpfitové modely, od jednoduchých tlakových cez kombinované teplotno-tlakové, nelineárne a pseudo-lumpfitové modelovania až po modely s preplynením (napríklad HOSGOR ET AL., 2013; TUREYEN ET AL., 2014; TONKIN ET AL., 2023)
- dynamické – numerické – 3D modelovania predikcie rezervoárovej odozvy (napríklad BUJAKOWSKI ET AL., 2016; CIRIACO ET AL., 2020; JALILINASRABADY ET AL., 2021; JIANG ET AL., 2022)

Modelovanie rezervoárovej odozvy vychádzajúce z dát prvotného vyhľadávania nie je na Slovensku zaužívaným štandardom. Z desiatok záverečných správ hydrogeotermálneho prieskumu boli doteraz podobné modely súčasťou len veľmi malej časti, napríklad v rámci prieskumu Ďurkovej depresie (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; GIESE, 1998, 1999; FRIČOVSKÝ ET AL., 2020B) alebo Komárňanskej kryhy (MARCIN ET AL., 2020B).

Z vyššie uvedeného je možné využiť plánované, alebo realizované modelovanie rezervoárovej odozvy ako **bodovacie kritérium**, kde:

- REALIZOVANÉ znamená, že projekt počíta s realizáciou modelovania rezervoárovej odozvy, respektíve predikcie, už počas prípravnej fázy, t.j. v rámci vyhľadávania a prieskumu, a modelovanie rezervoárovej odozvy bude využití, alebo realizovaným projektom bolo využité, pre nastavenie otváraciej etapy rezervoárovej produkcie; čím projekt geologickej úlohy vo výraznej miere prispel k zníženiu neistôt a rizík vyplývajúcich z odozvy rezervoáru na dlhodobú produkciu z pohľadu rezervoárovej dynamiky a odpovedí rezervoáru a rezervoárového média na produkciu

- NEREALIZOVANÉ znamená, že projekt nepočíta, respektíve pri hodnotení realizovaného projektu model nevyužil prostriedky numerického modelovania rezervoárovej odozvy na základe údajov hydrodynamických skúšok, respektíve odberov vzoriek rezervoárového média alebo režimových meraní pred otvorením produkcie, čím vytvára zvýšené riziko neočakávanej odozvy rezervoáru na otvorenie produkcie, alebo jej udržiavanie pri dlhodobej produkcii.

Jednoduché posudzovanie, či modelovanie rezervoárovej odozvy je súčasťou projektovej prípravy a plánovaných prác, respektíve, či bolo realizované, je založené na sledovaní jeho využívania v metodической časti projektu geologickej úlohy, alebo projektovej žiadosti. V prípade hodnotenia realizovaného vyhľadávania pri posudzovaní o finančnú podporu sú výsledky modelovania štandardne v samostatnej časti výsledkovej kapitoly, prípadne predstavujú zároveň aj samostatnú prílohovú časť zo záverečnej správy hydrogeotermálneho prieskumu.

Hodnotenie komplexnosti a adekvátnosti modelovacích postupov je subjektívne. Využívanie jednotlivých modelov je výrazne ovplyvnené dostupnými dátami a možnosťami riešiteľských kolektívov, preto kritérium je založené na realizácii / nerealizácii modelovacích postupov. Konzultácie ku modelovaniu sú možné cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra hydrogeológie PríFUK Bratislava
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie za podmienky, že sa nezúčastňujú hodnoteného projektu, respektíve nie sú v podnikateľskom ani právnom vzťahu k zhotoviteľovi geologických prác posudzovaného projektu.

9.1.4 Perspektivita produkcie zdrojov geotermálnej energie

Ak má byť cieľom produkcie zdrojov geotermálnej energie ich dlhodobu udržateľné využívanie pri výrobe tepelnej alebo elektrickej energie, potom ďalšou skupinou kritérií pri posudzovaní jednotlivých projektov pre finančnú podporu z verejných, alebo európskych zdrojov musí byť perspektivita samotnej produkcie. Pre účely tejto príručky sú pod perspektivitou uvedené kritériá reprezentujúce potenciál dlhodobej produkcie zdrojov

geotermálnej energie z pohľadu stability rezervoárového prostredia a jeho kapacity udržania dlhodobej produkcie pri súčasnej, ale aj budúcej intenzite.

Na rozdiel od predchádzajúcej skupiny hodnotiacich kritérií, tieto aspekty vyplývajú predovšetkým z porovnania pozície prieskumného územia vo vzťahu ku jednotlivým útvarom geotermálnych vôd a modelom ich energetického, alebo udržateľného potenciálu (kapacity), a ich hodnotenie je vo všeobecnosti možné po konzultáciách cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Sekciu geológie a prírodných zdrojov MŽP SR.

Do tejto skupiny kritérií patria:

- rizikovosť overenia
- udržateľnosť rezervoárovej produkcie
- rizikovosť rezervoárovej produkcie
- perspektivita dotknutého útvaru geotermálnych vôd
- obnoviteľnosť rezervoárového prostredia
- environmentálna udržateľnosť projektovej fázy

Poznámka: nasledujúce kritériá sú založené na výsledkoch najmä pravdepodobnostného modelovania pre rezervoárové prostredie útvarov geotermálnych vôd (podkapitola 6.2) riešených v rámci geologickej úlohy „**Analýza možností trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku – I. časť**“. Je nevyhnutné zdôrazniť, že predkladané modely sú založené na podmienenej simulácii, kalibrované, ale zároveň existuje významná možnosť, že s rozvojom poznania a geofyzikálneho prieskumu sa budú v rámci niektorých útvarov výrazne meniť. Znamená to, že nie je vylúčené, že útvary klasifikované v jednej kategórii, budú preklasifikované neskôr v kategórii nižšej kvality, alebo na opačnom konci hodnotiaceho spektra. Aj preto nasledujúce kritériá sú volené ako bodové tak, aby prípadné chyby odhadu (spravidla do 10 – 15 %) nediskvalifikovali automaticky projekty útvarov geotermálnych vôd, v ktorých bola aktuálne stanovená riziková udržateľnosť. Údaje, z ktorých posúdenie perspektivity produkcie vychádza, budú od Q2/2024 až Q4/2024 dostupné vo forme záverečnej správy v archíve Geofondu ŠGÚDŠ^{9.13} respektíve na príslušnom webe ŠGÚDŠ, ktorého konštrukcia je plánovaná v priebehu roka 2024 alebo 2025^{9.14}.

^{9.13} <https://www.geology.sk/sluzby/digitalny-archiv/>

^{9.14} <https://www.geology.sk/data/>

9.1.4.1 Rizikovosť overenia

Rizikovosť overenia je ako bodovacie kritérium postavené na vzťahu medzi zámerom overiť určité množstvá geotermálnych vôd, respektíve množstvá (zdroje a zásoby) geotermálnej energie vo vzťahu k celkovej energetickej kapacite rezervoárového prostredia. V zmysle koncepcie pravdepodobnostného modelovania je konštrukcia McKelveyovej schémy postavená na IDF distribučnej krivke energetickej bilancie, pričom s klesajúcim percentilom pravdepodobnosti narastá riziko, že rezervoár nebude z pohľadu akumulovanej a prechádzajúcej zložky geotermálnej energie schopný danú produkciu zabezpečiť, respektíve v rámci jeho energetickej bilancie sa budú jednotlivé produkované časti rezervoárového prostredia vzájomne ovplyvňovať, čo podporí negatívne prejavy rezervoárovej odozvy. Za rizikovú hranicu sa považuje štandardne 50-ty percentil IDF krivky energetickej bilancie, ktorý zároveň znamená odhad celkového tepelno-energetického potenciálu.

Postup, ktorým je možné definovať rizikovosť overenia aj na úrovni RCUE je podľa dostupných podkladov nasledovný:

- i) vyhľadať príslušný graf IDF distribučnej krivky energetickej bilancie pre daný útvar geotermálnych vôd
- ii) graf IDF distribučnej krivky zvoliť podľa krátkodobej, alebo dlhodobej bilančnej doby produkcie, ktorá bude pre daný projekt presadzovaná zo strany RCUE (podľa Koncepcie trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu by doba produkcie mala zodpovedať aspoň 100 rokov, v modelovom riešení je to defaultná krivka spolu s časom produkcie 40 rokov)
- iii) z príslušnej modelovej správy k útvaru geotermálnych vôd, respektíve z dostupných aktuálnych zdrojov (napríklad reportovania „country update-ov“ voči Medzinárodnej geotermálnej asociácii ^{9.15} odčítať presný údaj **overených množstiev geotermálnej energie** R_{pv}
- iv) z projektovej správy vyčítať zámer overenia / zachytenia množstiev geotermálnej energie, respektíve zo záverečnej správy vyhľadávania a prieskumu, ktorý bol realizovaný, vyčítať vrtnými prácami (a hydrodynamickými skúškami) overené zásoby geotermálnej energie tak (a v prípade potreby upraviť na referenčnú hladinu $T_{ref} = 15\text{ °C}$)
- v) spočítať publikované a aktuálne overené zásoby geotermálnej energie
- vi) súčet premietnuť na os X grafu IDF distribučnej krivky a vertikálnym predĺžením dosiahnuť priesečník s krivkou

^{9.15} <https://www.lovegeothermal.org/explore/our-databases/conference-paper-database/>

vii) z priesečníku viesť horizontálnu líniu k osy Y grafu IDF distribučnej krivky energetickej bilancie

viii) odčítať percentilovú hodnotu percentilového odhadu overených množstiev geotermálnej energie

ix) posúdiť rizikovosť overenia pri daných overených množstvách geotermálnej energie.

Pri zvážení možností chyby odhadu pri konštrukcii pravdepodobnostných modelov McKelveyovej schémy pre jednotlivé útvary geotermálnych vôd (modelovanie je vždy zaťažené neistotami a chybami odhadu), je možné rizikovosť overenia nastaviť ako **bodovacie kritérium** nasledovne:

- **MÁLO RIZIKOVÉ** overenie znamená, že súčet aktuálne, a historicky overených zásob geotermálnej energie sa pohybuje v intervale P100 – P76; čo znamená veľmi nízke, až mierne riziko celkového overenia, celkovej energetickej kapacity rezervoáru, a vzájomného ovplyvňovania sa projektu s okolitými lokalitami v rámci rezervoárového prostredia, čo následne znižuje riziká pre energetickú, aj udržateľnú bilanciu rezervoárového prostredia vo vzťahu k produkcii, nakoľko je možné (v zmysle globálnej praxe) predpokladať, že pri zachovaní tejto produkčnej schémy bude výsledné množstvo odoberanej energie z rezervoáru nižšie, ako overené množstvá (to znamená, že v princípe platí $R_{pv} > P_{th}$)
- **MIERNE RIZIKOVÉ** overenie znamená, že súčet aktuálne, a historicky overených zásob geotermálnej energie sa pohybuje v intervale P75 – P41, čo znamená mierne, až nízke-stredné až stredné-vysoké riziko celkového overenia, celkovej energetickej kapacity rezervoáru a vzájomného ovplyvňovania sa projektu s okolitými lokalitami v rámci rezervoárového prostredia – v tomto prípade, pre zohľadnenie miery chyby odhadu, je posunutá dolná hranica práve k hladine P41 z pôvodného limitu P50; a vzhľadom na rezervoárovú bilanciu je teda zrejmé, že produkcia geotermálnej energie na úrovni overených množstiev, predovšetkým na hladine P50 – P41 môže podmieniť predčasné, negatívne dôsledky rezervoárovej odozvy predovšetkým z pohľadu teplotnej a tepelnej odozvy; pričom ale stále platí, že budúca, reálna produkcia geotermálnej energie bude stále nižšia, ako celkové, overené zásoby geotermálnej energie
- **RIZIKOVÉ** overenie znamená, že súčet aktuálne a historicky overených zásob geotermálnej energie dosahuje hodnoty percentilu pod hladinou P41, a akékoľvek produkčné zámery predstavujú vysoké riziko z pohľadu celkovej energetickej kapacity

rezervoáru a vzájomného ovplyvňovania sa projektu s okolitými lokalitami v rámci rezervoárového prostredia. Z praktického hľadiska, ak by legislatíva a posudzovanie projektov zohľadňovali výsledky pravdepodobnostných modelov aj na úrovni MŽP SR, potom by tento trend musel viesť k vydaniu výrazných obmedzení a odporúčaní ako pre produkciu, tak aj pre dôkladný – a aj nákladný – monitoring v prípade povolenia jej otvorenia.

9.1.4.2 Udržateľnosť rezervoárovej produkcie

Udržateľnosť rezervoárovej produkcie je založená na pravdepodobnostnom modeli odhadu udržateľnej rezervoárovej kapacity. Preto pre posudzovanie platia podobné obmedzenia, a podobné kritériá, ako pri posudzovaní rizikovosti overenia, ak ide o prirodzené neistoty modelovania a prítomné chyby odhadu.

Hoci pri klasifikácii udržateľnosti rezervoárovej produkcie (časť 6.2.2) sú využívané ako inštalovaný, tak aj aktuálny tepelný výkon pre vyjadrenie koeficientov kapacity zásob $r_{cap(U)}$ a $r_{cap(U^*)}$, udržateľnosť rezervoárovej produkcie je možné pre potreby hodnotenia definovať na základe plánovaného alebo realizovaného overenia zásob geotermálnej energie a priemerného potenciálu udržateľného rozvoja aktuálnej produkcie $P_{th(D)}$ a potenciálu udržateľného rozvoja inštalovaného výkonu $P_{th(D^*)}$ (6.2.2.4 a 6.2.2.5), keďže oba indikátory definujú množstvo energie, ktoré je v rezervoári stále dostupné tak, aby nebola prekročená jeho udržateľná rezervoárová kapacita $P_{th(S)}$. Odporúčaná doba posudzovania je v tomto prípade v súlade s Koncepciou trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu, t.j. 100 rokov.

Indikátory $P_{th(D)}$ a $P_{th(D^*)}$ sú za obdobie rokov 2011 – 2022 súčasťou vyššie spomenutej záverečnej správy z geologickej úlohy „**Analýza možností trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku – I. časť**“, pričom pre ďalšie obdobia budú postupne dopĺňané na webe^{9.16} a reportované voči Medzinárodnej geotermálnej asociácii v pravidelných intervaloch.

Postup, ktorým je možné priamo hodnotiť udržateľnosť projektu z pohľadu udržateľnej rezervoárovej kapacity je nasledovný:

i) vyhľadať príslušné charakteristiky $P_{th(D)}$ a $P_{th(D^*)}$ pre konkrétny útvar geotermálnych vôd alebo na príslušnom projektovom webe, alebo v záverečnej správe a referenčných materiáloch

^{9.16} <https://www.geology.sk/data/>

- ii) podľa zváženia^{9.17} doby produkcie geotermálnej energie^{9.18} (bilančný čas produkcie) urobiť krátkodobý priemer $P_{th(D)}$ a $P_{th(D^*)}$ pre posudzovaný útvar geotermálnych vôd
- iii) z projektu geologickej úlohy, respektíve projektovej žiadosti, alebo záverečnej správy z realizovaného vyhľadávania / prieskumu zdrojov geotermálnej energie vyhľadať plánované, alebo reálne overené množstvá geotermálnej energie
- iv) porovnať vyhľadané overené množstvá geotermálnej energie s udržateľným potenciálom rozvoja aktuálnej produkcie a inštalovaného výkonu pre dané rezervoárové prostredie útvaru geotermálnych vôd a danú bilančnú dobu produkcie podľa nižšie uvedených hodnotiacich kritérií

Metóda hodnotenia vychádza z predpokladu, že overené množstvá geotermálnej energie sú stále väčšie, ako reálne výkony, a zároveň častokrát predstavujú inštalovaný tepelný výkon daného projektu, preto bodovacie kritérium je postavené na kombinácii a vzájomnom vzťahu overených zásob geotermálnej energie s oboma indikátormi udržateľného rozvoja produkcie:

- **UDRŽATEĽNÝ** vyznačuje projekt, ktorého overené zásoby geotermálnej energie spĺňajú podmienku $R_{pv} < P_{th(D^*)}$ a zároveň $R_{pv} < P_{th(D)}$, čo znamená, že aj pri (nepravdepodobnej) produkcii geotermálnej energie na úrovni overených zásob geotermálnej energie je významný predpoklad, že rezervoárové prostredie má dostatočnú kapacitu na rozšírenie nielen aktuálnej produkcie, ale aj v podmienkach, pri ktorých by už aj na existujúcich lokalitách došlo k navýšeniu produkcie nad hodnotu inštalovaného výkonu, z čoho vyplýva, že riziko energetickej depletácie rezervoárového prostredia sa výrazne znižuje
- **RELATÍVNE UDRŽATEĽNÝ** vyznačuje projekt, ktorého overené zásoby geotermálnej energie, alebo plán ich overenia, vyhovuje podmienke $R_{pv} > P_{th(D^*)}$ a zároveň $R_{pv} < P_{th(D)}$, čo znamená, že overené zásoby geotermálnej energie sú síce menšie, ako kapacita prostredia zabezpečiť podmienky energetickej udržateľnosti v prípade navýšenia produkcie na existujúcich lokalitách, avšak projekt, alebo

^{9.17} v aplikačnej praxi na Slovensku nie je nateraz legislatívne podmienené bilancovanie zdrojov a zásob geotermálnej energie pre dobu produkcie 100 rokov v zmysle koncepcie TURM / TURP, avšak pri posudzovaní projektov pre udržateľné využívanie zdrojov geotermálnej energie by malo byť v kompetencii RCUE prihladiť aj na tento aspekt

^{9.18} je nevyhnutné mať na pamäti, že udržateľný potenciál rozvoja inštalovaného výkonu, rovnako, ako udržateľný potenciál rozvoja aktuálnej produkcie narastajú so skracovaním bilančného času produkcie, preto je toto kritérium mimoriadne citlivé na zvolenú dobu produkcie – vo všeobecnosti by ale produkcia pod 40 rokov mala byť vopred vyškrtnutá ako nevyhovujúca – respektíve preferovaná by mala byť doba aspoň 100 rokov pre bilancovanie udržateľnosti tak, aby vyhovovala koncepciám TUR a zároveň aj TURM/TURP

plánované zásoby geotermálnej energie na overenie sú stále nižšie, ako kapacita prostredia zabezpečiť podmienky energetickej udržateľnosti v prípade dlhodobej, aktuálnej tepelnej produkcie na aktívnych lokalitách; zároveň však narastá riziko podpory energetickej depletácie rezervoárového prostredia zo strany neistôt, ako aj potreba intenzívneho monitorovania rezervoárovej odozvy, ktorá by mala byť podmienkou pre definovanie možnej finančnej podpory zo strany RCUE

- **SPORNÝ** vyznačuje projekt, ktorého overené zásoby geotermálnej energie, alebo plán ich overenia, vyhovuje podmienkam $R_{pv} > P_{th(D*)}$ a zároveň $R_{pv} < 1,2 \times P_{th(D)}$, čo znamená, že overené zásoby geotermálnej energie sú síce menšie, ako kapacita prostredia zabezpečiť podmienky energetickej udržateľnosti v prípade navýšenia produkcie na existujúcich lokalitách, avšak projekt, alebo plánované zásoby geotermálnej energie na overenie sú stále len do 20 % vyššie, ako udržateľný potenciál rozvoja aktuálnej produkcie, čo zohľadňuje možnú chybu odhadu v rámci pravdepodobnostných modelov a neistoty, ktoré sú zahrnuté v konštrukcii pravdepodobnostných modelov; avšak existuje zároveň výrazný predpoklad, že každé ďalšie navyšovanie produkcie na aktuálne produkujúcich lokalitách, v kombinácii s produkciou v rámci posudzovaného projektu, výrazne zvýši riziko energetickej depletácie rezervoáru, narušenia energetickej rovnováhy, a podporu negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy; z čoho vyplýva, že súčasťou schvaľovacieho procesu alebo podporného stanoviska by mali byť presne stanovené podmienky dlhodobého, a udržateľného monitoringu v rámci projektu, nad rámec lokálnej legislatívy, a naopak v zmysle opakovane uvádzanej globálnej praxe (časť 4.3.2 a 4.3.3) s cieľom minimalizovať tieto riziká
- **NEUDRŽATEĽNÝ** vyznačuje projekt, ktorého plánované overené zásoby geotermálnej energie presahujú $P_{th(D)}$ o viac ako 20 %; čo aj pri zachovaní aktuálnej produkcie geotermálnej energie predstavuje pre rezervoárové prostredie významné riziko narušenia energetickej rovnováhy a rezervoárovej depletácie, čím je projekt vysoko rizikový aj pre aktuálne fungujúce lokality v prípade otvorenia produkcie geotermálnej energie na úrovni približujúcej sa overeným zásobám / inštalovanému výkonu v prípade ich podobnosti; a teda projekt s takto nastaveným cieľom overenia zásob geotermálnej energie nespĺňa podmienky a princípy Koncepcie trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu.

9.1.4.3 Rizikovosť rezervoárovej produkcie

Rizikovosť rezervoárovej produkcie je ďalším z kritérií vychádzajúcich z pravdepodobnostného modelu odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie na Slovensku, ktorého súčasťou je aj pravdepodobnostný model udržateľnej rezervoárovej kapacity. V tomto prípade ale vychádza hodnotiace kritérium z koncepcie mapovania rizikovosti rezervoárovej produkcie (časť 6.2.3). V koncepcnej podstate ide o posúdenie rizika pre rezervoárové prostredie v prípade rozšírenia produkcie geotermálnej energie.

Keďže je nevyhnutné zvážiť (opakovane) prirodzené neistoty a chyby odhadu v pravdepodobnostných modeloch, a zároveň aj fakt, že reálne tepelné výkony sú v skutočnosti nižšie, ako overené zásoby geotermálnej energie (v optimálnom prípade rovné inštalovanému tepelnému výkonu), je postup pri hodnotení kritéria nasledovný:

- i) z dostupných údajov na webovej stránke pravdepodobnostného modelu, respektíve zo záverečnej správy v rámci archívu Geofondu ŠGÚDŠ vybrať hodnoty aktuálnej produkcie geotermálnej energie v referenčných podmienkach $P_{th,ref}$ za obdobie posledných aspoň 5 rokov
- ii) priemerovanie získaných hodnôt
- iii) aproximovať hodnoty „aktuálnej rezervoárovej produkcie“ pre vyjadrenie $r_{cap(U,40)}$ a $r_{cap(U,100)}$ kombináciou cielených alebo potvrdených overených zásob geotermálnej energie (podľa projektovej dokumentácie alebo záverečnej správy) a skôr definovaného aspoň 5-ročného priemeru aktuálnej produkcie geotermálnej energie v referenčných podmienkach $P_{th,ref}$
- iv) z dostupných zdrojov získať hodnoty pravdepodobného tepelno-energetického potenciálu $TTP_{(p)}$ pre dané rezervoárové prostredie v rámci konkrétneho útvaru geotermálnych vôd a pre oba časové rady, t.j. krátkodobú (40 rokov) a dlhodobú (100 rokov) produkciu
- v) vypočítať podľa vzťahu /6.16/ (časť 6.2.2.2) $r_{cap(U,40)}$ a $r_{cap(U,100)}$
- vi) vyniesť hodnoty $r_{cap(U,40)}$ a $r_{cap(U,100)}$ do mapovacej schémy citlivosti udržateľnosti rezervoárovej produkcie (Obr. 6.2)
- viii) odčítať príslušný región pre využitie v rámci hodnotiaceho kritéria.

Vzhľadom na vyššie uvedené je rizikovosť rezervoárovej produkcie nevyhnutné vnímať v intenciách výraznej aproximácie, a preto je možné aplikovať jedine bodovacie kritérium, kde:

- MÁLO RIZIKOVÝ znamená projekt, ktorého priemiet v mape rizikovosti udržateľnej rezervoárovej produkcie zodpovedá regiónu Ia, a preto aj rozšírenie produkcie v intenciách teoreticky sa blížiacich overeným množstvám geotermálnej energie

predstavuje, pravdepodobne, prijateľné riziko pre trvalo udržateľnú rezervoárovú produkciu

- MIERNE RIZIKOVÝ znamená projekt, ktorého priemet v mape rizikovosti udržateľnej rezervoárovej produkcie zodpovedá regiónu Ib a IIa čiže predstavuje nárast rizika z pohľadu dlhodobej udržateľnosti, ale prejavy voči „krátkodobému“ horizontu produkcie môžu byť považované za prijateľné aj pri rozšírení produkcie
- RIZIKOVÝ znamená projekt, ktorého priemet v mape rizikovosti udržateľnej rezervoárovej produkcie zodpovedá regiónu IIb, čiže predstavuje už zvýšené riziko (s ohľadom na neistoty prieskumu a zároveň podkladových modelov) aj pre samotnú krátkodobú produkciu geotermálnej energie s časovým horizontom 40 rokov; a v prípade schválenia projektu je nevyhnutné jeho realizáciu a podporu podmieniť serióznym, komplexným a najmä dlhodobým monitoringom rezervoárových parametrov
- VELMI RIZIKOVÝ znamená projekt, ktorého priemet v mape rizikovosti udržateľnej rezervoárovej produkcie zodpovedá regiónu III, čiže pre rezervoár predstavuje zvýšené riziko až veľké riziko v závislosti na $r_{cap(U,40)}$ energetickej depletácie; čo je následne v rozpore s koncepciou TURM / TURP

9.1.4.4 Perspektivita dotknutého útvaru geotermálnych vôd

Perspektivita dotknutého útvaru geotermálnych vôd sa vzťahuje k prirodzenému záujmu krajiny podporovať predovšetkým rozvoj geotermálnej energie v rezervoárových prostrediach, ktoré sú doteraz nevyužívané, respektíve málo využívané, a kde je potenciál udržateľného rozvoja aktuálnej produkcie, ale predovšetkým inštalovaného výkonu najvyšší, a teda riziká depletácie sú najnižšie. Z tohto dôvodu perspektivita hodnotí pozíciu vybraného prieskumného územia bez uváženia jeho energetického zámeru.

Hodnotenie je založené na aplikovaní 3D mapovacej schémy perspektivity zdrojov geotermálnej energie na Slovensku (časť 6.2.4), pričom, v zmysle vyššie uvedeného, by prirodzenú bodovú výhodu mali získať projekty práve v kategóriách tried A, B a D, t.j. ktoré sú hodnotené ako udržateľné (dlhodobo) a perspektívne.

Klasifikácia útvarov geotermálnych vôd podľa perspektivity bude súčasťou ako webového rozhrania projektu, tak aj záverečnej správy spomínaného pravdepodobnostného modelu a analýzy trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na

Slovensku, pričom bude pravidelne aktualizovaná na základe vývoja produkcie v jednotlivých útvaroch geotermálnych vôd. Priradenie klasifikačnej triedy do stupnice bodovacieho kritéria je potom priamočiare, pričom zodpovedajúcu hodnotu predstavuje posledný záznam. Posúdenie perspektivity ako hodnotiaceho kritéria je potom možné nasledovne:

- **PERSPEKTÍVNE** znamená, že prieskumné územie a plánované práce, alebo realizovaný projekt, spadajú do útvarov geotermálnych vôd, ktoré sú klasifikované ako dlhodobu udržateľné (a teda aj krátkodobu udržateľné) a zároveň perspektívne, t.j. v ktorých inštalovaný výkon je nižší, ako ich trvalo udržateľná rezervoárová kapacita aj pre udržateľný horizont produkcie 100 rokov; t.j. útvar geotermálnych vôd je v klasifikačných triedach A, B a D
- **RIZIKOVÉ** znamená, že prieskumné územie a plánované práce, alebo realizovaný projekt, spadajú do útvarov geotermálnych vôd hodnotených ako dlhodobu udržateľné (z hľadiska aktuálnej produkcie geotermálnej energie), ale neperspektívne, čiže kde inštalovaný výkon aktuálne presahuje udržateľnú rezervoárovú kapacitu, a ďalší rozvoj produkcie musí byť podmienený komplexným monitoringom rezervoárovej odozvy v rámci schvaľovacieho procesu podpory zo strany RCUE; t.j. útvar geotermálnych vôd je v klasifikačných triedach C a E
- **NEPERSPEKTÍVNE** znamená, že prieskumné územie a plánované práce, alebo realizovaný projekt, spadajú do útvarov geotermálnych vôd hodnotených ako dlhodobu neudržateľné, a zároveň teda neperspektívne, hoci z hľadiska krátkodobej produkcie, by ich udržateľná rezervoárová kapacita mohla byť vyššia, ako inštalovaný výkon; napriek tomu akékoľvek rozširovanie produkcie geotermálnej energie by malo byť mimoriadne kontrolované, podmienené monitoringom, a uprednostnené by mali byť projekty v perspektívnych, alebo aspoň v dlhodobu udržateľne produkovaných útvaroch geotermálnych vôd; t.j. útvar geotermálnych vôd je v klasifikačných triedach F, G a H.

9.1.4.5 Obnoviteľnosť rezervoárového prostredia

Obnoviteľnosť rezervoárového prostredia je jedným z najťažšie vyjadrovaných kritérií v rámci hodnotenia projektov / žiadostí, alebo plánov pre prieskum, alebo rozvoj produkcie geotermálnej energie. Z praktického hľadiska ide o pokus hodnotiť, akým spôsobom sa projekt, jeho realizácia, ale aj následne celkové využitie rezervoárového prostredia bude blížiť princípom obnoviteľného využívania zdrojov geotermálnej energie.

Kritérium koncepčne vychádza z teoretických základov o obnovovacej (4.2.1) a regeneračnej (4.2.2) kapacite rezervoárového prostredia, respektíve z ich kombinácie. Ako je uvedené v predmetných kapitolách, spôsoby vyjadrenia odhadu obnovovacej alebo aj regeneračnej kapacity sa rôznia. Predbežné posúdenie je možné založiť na najjednoduchších modeloch, štandardne takzvaných aproximatívnych pomerových medzi energetickým príjmom a výdajom z rezervoáru, alebo následne medzi množstvom dopĺňanej energie v priestore a čase do rezervoárového prostredia ku vzťahu k jeho produkcii, z čoho potom vyplýva schopnosť rezervoárového prostredia obnoviť svoje kvázi-iniciálne podmienky za odhadovaný regeneračný čas.

Na vyjadrenie aspoň jednoduchých odhadov obnovovacej, a regeneračnej kapacity rezervoáru je nevyhnutná profesionálna konzultácia na úrovni odborníkov z aplikačnej praxe, t.j. súkromného sektora, ktorý v danom projekte nie je angažovaný, respektíve odborníkov z prostredia vedy a výskumu. Preto pri zvažovaní kritérií je možné predmetné kritérium vynechať v prípade časových limitov, alebo ekonomických požiadaviek, a v zmysle toho následne aj upraviť výslednú bodovaciu škálu pre posudzovanie projektov a žiadostí.

Napriek tomu, ak bude obnovovacia kapacita využitá ako bodovacie kritérium, potom:

- **OBNOVITELNÉ** využívanie je možné charakterizovať ako to, v ktorom celkový odber energie z rezervoárového prostredia neprekračuje v kumulatívnej miere energetický potenciál rezervoáru a jeho obnovovaciu kapacitu; čo v praxi znamená, že regeneračný čas produkcie je modelovaný / odhadovaný ako rovnaký, alebo kratší, ako bilancovaná doba produkcie zdrojov geotermálnej energie z daného rezervoárového prostredia
- **SPORNÉ** využívanie je možné charakterizovať ako to, v ktorom celkový odber energie z rezervoárového prostredia prekračuje v kumulatívnej miere energetický potenciál rezervoáru a jeho obnovovaciu kapacitu; čo v praxi znamená, že regeneračný čas produkcie je síce dlhší, ako čas bilancie / produkcie, ale zároveň nie je dlhšia, ako 300 rokov od času ukončenia produkcie
- **NEOBNOVITELNÉ** využívanie je možné charakterizovať ako to, v ktorom celkový odber energie z rezervoárového prostredia prekračuje v kumulatívnej miere energetický potenciál rezervoáru a jeho obnovovaciu kapacitu; a modelovanie / odhady regeneračnej kapacity predpokladajú potrebný čas na obnovenie kvázi-iniciálnych podmienok v rezervoári na viac ako 300 rokov, čo je v rozpore s pôvodnou definíciou obnoviteľnosti zdrojov geotermálnej energie podľa tzv. Švajčiarskej koncepcnej školy.

9.1.4.6 *Environmentálna udržateľnosť projektovej fázy*

Environmentálna udržateľnosť projektovej fázy môže byť založená na aplikovaní matice RIAM (kapitola 8) s jej definovanými (alebo upravenými) kritériami pre posúdenie vplyvu projektovej fázy (jej priebehu, prípravy, realizácie) nielen na ekosystém, ale aj na spoločnosť a jej potreby, respektíve jej stav. Výhodou využitia RIAM je jej pomerná jednoduchosť a zároveň komplexnosť, pri zohľadnení situácie, keď mnohé z aspektov môžu byť v projektovej fáze krátkodobé, vzhľadom na mnohé dlhodobé aspekty, ktoré sú v environmente, spoločnosti a jej potrebách prítomné – a zároveň jednoduchá matematická exaktnosť vyjadrenia celkového environmentálneho skóre. Matica hodnotiaca projektovú fázu, respektíve realizáciu vyhl'adávania / prieskumu môže zároveň, na základe postupného hodnotenia jednotlivých komponentov a ich aspektov definovať možné pripomienky na zohľadnenie, alebo odbornú diskusiu s investormi, respektíve vykonávateľmi daného projektu.

Samotné environmentálne skóre S_E je pritom jednoduchým a priamočiarym vodiacim prvkom pre nastavenie bodovacieho kritéria, kde:

- UDRŽATEĽNÝ projekt znamená, že realizované práce sú environmentálne prijateľné voči okoliu ako aj stavu spoločnosti a jej potrebám, a $S_E > 0,5$
- SPORNÝ projekt znamená, že realizovaná práce sú environmentálne prijateľné voči okoliu, ako aj stavu spoločnosti a jej potrebám, ale negatívne aspekty vo výraznej miere redukujú obmedzený „potenciál“ alebo „rezervoár“ ktorý okolie ponúka, alebo projekt vo výraznejšej miere zasahuje do potrieb spoločnosti bez náležitej kompenzácie, a teda $S_E = 0 - 0,49$; pričom je možné načrtnúť, alebo identifikovať možné, kľúčové aspekty, ktoré environmentálne skóre znižujú, spolu s možnosťami ich nápravy, ak sú uskutočniteľné
- NEUDRŽATEĽNÝ projekt znamená, že realizované práce prispievajú k výraznému poškodeniu aktuálneho stavu environmentu, ktorého „potenciál“ alebo „rezervoár“ sú výrazne limitované najmä z pohľadu vplyvu na jeho jednotlivé zložky, respektíve projekt vo výraznej miere, hoci aj krátkodobo, môže obmedziť už tak nízky stav spoločenského alebo ekonomického „blahobytu“ spoločnosti; a v tomto prípade je nevyhnutné definovať smery a spôsoby minimalizácie negatívnych vplyvov, ak sú uskutočniteľné.

Výhodou matice RIAM je, že v súlade s prezentovanou metodikou (kapitola 8) vie byť realizovaná s parciálnymi konzultáciami aj priamo na RCUE.

9.2 Posudzovanie projektov rozširovania produkcie zdrojov geotermálnej energie

Ďalšou významnou fázou posudzovania projektov zameraných na vyhľadávanie / prieskum, alebo využívanie zdrojov geotermálnej energie; respektíve na rozširovanie jej aktuálnej produkcie, je hodnotenie ako projektového zámeru, tak aj základných princípov efektívneho a trvalo udržateľného využitia a využívania.

Definícia trvalo udržateľného rozvoja, a následne trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu, jednoznačne stanovuje základné ciele, alebo míľniky udržateľnej rezervoárovej produkcie:

- udržateľnosť, v zmysle zabezpečenia energetickej udržateľnosti produkcie geotermálnej energie, a minimalizovania rizika rezervoárovej depletácie, predovšetkým predčasného
- obnoviteľnosť, v zmysle pochopenia a prístupu rezervoárovej produkcie a zabezpečenia možností pre rezervoár regenerovať svoje pôvodné, pred-produkčné podmienky v technicky a civilizačne rozumnom čase
- efektívnosť, v zmysle využívania zdrojov geotermálnej energie v zmysle zásad energetickej náročnosti a energetického – termodynamického potenciálu produkovaného rezervoárového média
- účinnosť, v zmysle využívania zdrojov geotermálnej energie podľa zásad približovaniu sa k nulovej zvyškovej exergii (podľa štandardného, respektíve pseudo-štandardného stavu) využívaním kaskádových systémov pre zvyšovanie faktorov produktivity a využitia zdrojov geotermálnej energie.

V zmysle tohto nastavenia by malo byť v záujme krajiny uprednostňovať projekty, ktoré predpokladajú, alebo smerujú k využívaniu zdrojov geotermálnej energie, ktoré by vychádzali, a najmä rešpektovali už v projektovej / prípravnej fáze, neskôr v realizačnej, tieto kľúčové míľniky, a zároveň, ktoré by boli situované v prostredí útvarov geotermálnych vôd, ktoré sú síce menej rizikové z pohľadu prekročenia udržateľnej rezervoárovej kapacity, ale zároveň ktoré sú nositeľom významného geologického rizika z pohľadu preskúmanosti, čo vie ale štát, po vzore mnohých krajín (Island, USA, Nový Zéland, Maďarsko, Poľsko) kompenzovať grantovými príspevkami na realizáciu geologických vrtov, a praktickou spoluprácou.

Projekty, ktoré sú očakávané, v súvislosti s produkciou geotermálnej energie však môžu byť zamerané na rôzne štádia štandardnej projektovej prípravy a realizácie, t.j.:

- prieskumné a vyhľadávacie práce (a následnú produkciu geotermálnej energie)
- rozširovanie produkcie geotermálnej energie.

Preto pri každom kritériu bude nasledovať charakteristika, pre ktoré fázy produkcie geotermálnej energie je aplikovateľné.

9.2.1 Účel produkcie geotermálnej energie

Pod touto skupinou kritérií sú umiestnené hodnotiace aspekty, ktoré vychádzajú predovšetkým zo vzťahu medzi očakávanými geotermickými podmienkami, rezervoárovými podmienkami, spôsobom produkcie, a účelom, pre ktorý je projekt realizovaný.

Koncepčným základom je preto vyjadrenie vzťahu medzi „potenciálom“ rezervoáru a „spôsobom“ využitia, ktoré je plánované. Spomedzi mnohých faktorov, ktoré by mohli byť využité ako bodovacie, alebo vylučovacie kritériá, najvýznamnejšiu úlohu zohrávajú:

- energetická náročnosť účelu
- súlad s Lindalovou schémou
- súlad s termodynamickým potenciálom
- využívanie kaskádových technických riešení
- využívanie by-passových technických riešení
- technické zabezpečenie projektu

9.2.1.1 Energetická náročnosť účelu

Energetická náročnosť účelu je aplikovateľná v ako kritérium pre prieskumné a vyhľadávacie práce, a zároveň aj na projekty vo vzťahu ku rozširovaniu produkcie geotermálnej energie.

V rámci hodnotenia celkovej kvality, prípravy, zámeru, a účelu projektu vychádza z obvyklého klasifikovania účelu využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie, ktoré je založené na energetickej náročnosti, a následne, vo vzťahu k energetickému mixu krajiny a prípadne redukcii skleníkových plynov, aj vo vzťahu k celkovej zmene uhlíkového záznamu krajiny, keďže zdroje geotermálnej energie sú považované za nízko-emisné. Podľa tohto

kritéria je možné zoradiť účely využívania nasledovne (zoradené podľa odvetvia chronologicky):

- a) účely vysokej energetickej náročnosti
 - a. produkcia elektrickej energie v tzv. priamych, expanzných a binárnych cykloch
 - b. produkcia elektrickej energie v tzv. hybridných cykloch (alternatívnych, fosílnych)
 - c. systémy centrálneho zásobovania teplom
 - d. získavanie drahých kovov alebo vzácnych prvkov z roztokov, alebo lúhovaním
- b) účely strednej energetickej náročnosti
 - a. spracovanie organických materiálov
 - b. priemyselné využívanie zdrojov geotermálnej energie (tepelná podpora priemyslu)
 - c. individuálne vykurovanie priestorov
 - d. potravinárstvo
 - e. priemyslovo-spracovateľské odvetvia poľnohospodárstva
 - f. pestovateľsky a chovateľsky orientované odvetvia poľnohospodárstva
- c) účely nízkej energetickej náročnosti
 - a. služby v rekreácii
 - b. služby v doprave a údržbe.

Tento princíp predstavuje zároveň aj princíp navrhovania, tvorby, a optimalizácie kaskádových systémov. Opätovne je v záujme optimalizácie využívania zdrojov geotermálnej energie, a ich efektívnosti, žiaduce zo strany krajiny podporovať primárne energeticky náročnejšie účely, čo je pri posudzovaní rôznych projektov možné realizovať prostredníctvom jednoduchého **bodovacieho kritéria**, kde:

- PERSPEKTÍVNE účely je možné zároveň definovať ako účely vysokej energetickej náročnosti, pričom existuje odôvodnená požiadavka (viď kritérium nižšie) na to, aby v zmysle ďalších zásad optimálneho a udržateľného využívania zdrojov geotermálnej energie tieto prechádzali v systémoch kaskádových stupňov na účely nižšej energetickej náročnosti; a zároveň do tejto skupiny je možné priradiť projekty so záujmom o rozširovanie produkcie geotermálnej energie z už existujúcich, alebo novo-vybudovaných vrtov ak ide o zvýšenie stupňa energetickej náročnosti oproti pôvodnému účelu, jeho doplnenie, respektíve, ak je predmetom projektu rozšírenie aktuálneho systému o kaskádové alebo by-pass systémy; respektíve ak ide

o rozširovanie produkcie a energetického výkonu v rámci skupiny účelov s najvyššou energetickou náročnosťou

- RELATÍVNE PERSPEKTÍVNE účely je možné zároveň definovať ako účely strednej energetickej náročnosti; pričom štandardne, v závislosti na energetických výkonoch vrtov a požiadavkách cieľového systému je naďalej možné očakávať, prípadne požadovať (vid' kritérium nižšie) využívanie kaskádových systémov; a zároveň do tejto skupiny je možné priradiť projekty so záujmom o rozširovanie produkcie geotermálnej energie z už existujúcich alebo novo-vybudovaných vrtov, ak ide o rozšírenie produkcie zdrojov geotermálnej energie v rámci rovnakého stupňa energetickej náročnosti, a zároveň, ak je predmetom projektu rozšírenie aktuálneho systému o kaskádové alebo by-pass systémy
- MÁLO PERSPEKTÍVNE účely sú totožné so skupinou účelov nízkej energetickej náročnosti, ale nie je možné ich vylúčiť z posudzovania – v každom prípade tieto účely by nemali byť primárne, ale predstavovať nižšie stupne kaskád s cieľom efektívnej a účinnej produkcie zdrojov geotermálnej energie; a zároveň do tejto skupiny je možné priradiť projekty so záujmom o rozširovanie energetickej produkcie rovnakého stupňa energetickej náročnosti pre stredný stupeň energetickej náročnosti; pričom projekt neuvažuje o rozširovaní produkčného systému o kaskádové systémy alebo by-pass systémy optimalizovanej produkcie
- NEPERSPEKTÍVNE účely – respektíve NEPERSPEKTÍVNE projekty je možné charakterizovať ako tie, ktoré nemajú presne definovaný účel prieskumu / vyhľadávania konkrétnej oblasti; a zároveň do tejto skupiny je možné priradiť projekty so záujmom o rozširovanie produkcie geotermálnej energie rovnakého stupňa energetickej náročnosti pre nízky stupeň energetickej náročnosti; pričom projekt neuvažuje o rozširovaní produkčného systému o kaskádové systémy, alebo by-pass systémy.

V prípade potreby konzultovania alebo vecných názorov do úvahy prichádzajú najmä:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra technických zariadení budov SvF STU BA
- Sekcia geológie a prírodných zdrojov MŽP SR
- Sekcia riadenia a investícií MIRRI SR
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie pre energetické účely.

9.2.1.2 Súlad s Lindalovou schémou

Súlad s Lindalovou schémou predstavuje kritérium hodnotiace skutočnosť, či predpokladaná rezervoárová teplota, respektíve predpokladaná teplota overenia – alebo už overená teplota zdroja geotermálnej energie zodpovedá jeho plánovanému účelu využitia; a zároveň, či je technicky, na základe posudzovania teploty, možné realizovať prípadne navrhované kaskádové systémy, v ktorých sa počíta s postupným znižovaním teploty zdroja geotermálnej energie s prechodom na nižšie kaskádové stupne. Toto kritérium je možné využiť pre prieskumné a vyhľadávacie práce, a zároveň aj na projekty vo vzťahu ku rozširovaniu produkcie geotermálnej energie. V podstate ide o jednoduchú selekciu projektov na základe ich reálnosti vo vzťahu k budúcemu využívaniu zdrojov geotermálnej energie.

Diskusia ku Lindalovej schéme je uvedená v Kapitole 3, vrátane spôsobov jej využitia. Tým, že vychádza z teploty, ako proxy-parametra energetického potenciálu, je globálne aplikovateľná predovšetkým na geotermálne vody, alebo geotermálne vody s vlhkou – saturevanou parnou fázou (ktoré zodpovedajú najperspektívnejším oblastiam v rámci Slovenska). Základom posudzovania teda je:

- ak sa predpokladaná / overená teplota nachádza naľavo od konkrétneho účelu využitia, tepelný potenciál zdroja geotermálnej energie je pravdepodobne nedostatočný pre zvolený energetický účel
- ak sa predpokladaná / overená teplota nachádza napravo od konkrétneho účelu využitia, je tento technicky možný, ale po odovzdávaní tepla existuje dôvodný predpoklad tzv. zvyškového tepla, ktoré je nevyhnutné využiť v kaskádových systémoch; respektíve posúdiť možnosti iných, energeticky náročnejších spôsobov, ak je to možné v lokálnych podmienkach
- ak sa predpokladaná / overená teplota nachádza v rámci vyznačeného teplotného intervalu, je účel využitia vyhľadávaného / overeného zdroja geotermálnej energie vyhovujúci.

Vzhľadom na jednoduchý spôsob posudzovania je súlad s Lindalovou schémou možné využiť aj ako **bodovacie kritérium**, kde:

- **SÚLADNÝ** projekt znamená, že predpokladaná teplota overenia je v požadovanom teplotnom intervale Lindalovej schémy pre predpokladaný, cieľový účel využívania zdrojov geotermálnej energie; respektíve je vyššia, ako cieľový účel využívania zdrojov geotermálnej energie a projekt má zároveň definované možnosti manažmentu

zvyškového tepla primárneho účelu v kaskádových systémoch energeticky zodpovedajúcich princípom Lindalovej schémy; a zároveň projekt rozširovania produkcie geotermálnej energie je z pohľadu účelu súladný s Lindalovou schémou, ak ide o rozširovanie primárneho účelu, respektíve budovanie kaskádových stupňov

- SPORNÝ projekt znamená, že predpokladaná teplota overenia je vyššia, ako predpokladaný, cieľový účel využívania zdroja geotermálnej energie, ale projekt nemá definovaný manažment zvyškového tepla primárneho účelu v kaskádových systémoch energeticky zodpovedajúcich princípom Lindalovej schémy; a zároveň projekt rozširovania produkcie geotermálnej energie počíta stále s energeticky menej náročnými a nedostatočne využitými kaskádovými systémami vo vzťahu k teplotným intervalom Lindalovej schémy – t.j. teplota rozšírenia kaskádových systémov je stále vyššia, ako energetická náročnosť účelu kaskádových systémov („na pravo“)
- NESÚLADNÝ projekt znamená, že predpokladaná teplota overenia je nižšia, ako predpokladaný, cieľový účel využívania zdroja geotermálnej energie; a zároveň pre projekt rozširovania produkcie geotermálnej energie platí, že teplota zvyškového tepla je nižšia, ako účel, pre ktorý má byť rozširovanie aplikované v prípade, ak nejde o rovnaký účel využitia, t.j. kaskádové systémy nižších stupňov majú teplotu „na vstupe“ nižšiu, ako minimálna požadovaná teplota pre daný účel.

Kritérium je možné vyhodnotiť na základe projektovej dokumentácie (projekt geologickej úlohy), v ktorej pri vyhľadávaní a otváraní produkcie sú predpokladané teploty overenia, alebo overené teploty na základe hydrodynamických skúšok známe, respektíve uvedené v záverečnej správe z projektu. Pri projektoch rozširovania produkcie geotermálnej energie sú overené teploty zdroja geotermálnej energie, alebo zvyškového tepla (t.j. teploty zdroja geotermálnej energie opúšťajúcej primárne výmenníkové stanice) uvedené v projektovej dokumentácii. Náročnejšie je posudzovanie konceptu kaskádových systémov, nakoľko energetická náročnosť a tepelné výkony nie sú lineárne, a teploty bývajú limitované takzvanou teplotou zneškodnenia. Pre konzultácie v prípade pochybností je možné využiť napríklad:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra technických zariadení budov SvF STU BA
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie pre energetické účely.

9.2.1.3 Súlad s termodynamickým potenciálom

Kritérium súladu s termodynamickým potenciálom je aplikovateľné pre prieskumné a vyhľadávacie práce, a zároveň aj na projekty vo vzťahu ku rozširovaniu produkcie geotermálnej energie.

Koncept klasifikácie zdrojov geotermálnej energie na základe termodynamického potenciálu nie je na Slovensku zavedený do praxe, hoci z princípu termodynamickej klasifikácie (časť 2.2.4.1) vyplýva jej jednoznačná výhodnosť oproti konvenčnej Lindalovej schéme najmä pri rezervoárových teplotách presahujúcich 80 °C, respektíve v prípade prítomnosti parnej frakcie, kde rovnaká teplota neznamena rovnaký termodynamický potenciál energeticky, a termodynamicky účinnej konverzie potenciálu na tepelný alebo elektrický výkon. V aplikačnej praxi, ktorá je založená predovšetkým na koncepte exergoekonomiky, platí pre:

- zdroje geotermálnej energie s veľmi nízkou termodynamickou kvalitou ($SE_{xI} < 0,005$) → jednoduché, 1-stupňové využívanie bez zapojenia kaskádových systémov, s možnosťou napojenia by-pass systémov pre zvyšovanie faktorov produktivity a energetickej výkonnosti projektov
- zdroje geotermálnej energie s nízkou termodynamickou kvalitou ($SE_{xI} = 0,005 - 0,05$) → primárne 1-stupňové využívanie bez zapojenia kaskádových systémov, respektíve zapojenie kaskádových systémov nižšej energetickej náročnosti, ako je primárny účel využitia; vrátane využívania by-pass systémov na nižších stupňoch kaskádového využívania, respektíve ako by-pass systémy pre primárny systém a nižší kaskádový stupeň
- zdroje geotermálnej energie s nízkou-strednou termodynamickou kvalitou ($SE_{xI} = 0,05 - 0,2$) → kaskádové systémy priameho využitia geotermálnej energie, respektíve binárna produkcia elektrickej energie s napojením na kaskádové systémy, alebo primárne kogeneračné binárne elektrárne s dodatočným napojením kaskádových systémov, respektíve by-pass systémy medzi kaskádou a kogeneračnou jednotkou
- zdroje geotermálnej energie so strednou-vysokou termodynamickou kvalitou ($SE_{xI} = 0,2 - 0,5$) → primárne binárne kogeneračné elektrárne s vyžadovaným napojením na kaskádové systémy, ak to podmienky zneškodnenia zdroja energeticky umožňujú, produkcia elektrickej energie v expanzných zariadeniach s napojením na kaskádové systémy alebo kogeneráciu, prípadne by-pass systémy medzi elektrickou a kogeneračnou jednotkou (napríklad prehrievanie pary), medzi kogeneračnou

jednotkou a kaskádovými stupňami, alebo medzi jednotlivými kaskádovými stupňami vzájomne

- zdroje geotermálnej energie vysokej termodynamickej kvality ($SE_{XI} > 0,5$) primárne priame, suchopárne elektrárne s variabilným napojením na manažment zvyškového tepla v závislosti na manažmente reinjektáže.

Základom pre zisťovanie koncepcie projektu otvorenia produkcie, alebo rozšírenia produkcie, je teda termodynamická kvalita, respektíve jej exaktný ukazovateľ, index termodynamickej kvality /výraz 2.1/. Pri známych teplotách a tlakoch je možné index vypočítať z termodynamických tabuliek s využitím špecifickej entalpie a entropie, respektíve online kalkulačiek a programov, ktoré sú dostupné aj ako freeware / open-source – napríklad prostredníctvom SW rozhrania REFPROP od spoločnosti NIIST. V opačnom prípade je možné hodnotenie založiť na výpočtoch partnera pre konzultácie, napríklad cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra technických zariadení budov SvF STU BA.

Z praktického hľadiska je súlad tentokrát možné využiť ako jednoduché bodovacie kritérium, podľa ktorého:

- SÚLADNÝ projekt znamená, že technický spôsob / účel využívania zdrojov predpokladaného zdroja geotermálnej energie zodpovedá vyjadrenému termodynamickému potenciálu cieľového zdroja; a zároveň projekt rozširovania produkcie geotermálnej energie je z pohľadu termodynamického potenciálu súladný s princípmi využitia zdrojov geotermálnej energie pre danú termodynamickú kategóriu
- NESÚLADNÝ projekt znamená, že technický spôsob / účel využívania predpokladaného zdroja je v nesúlade so spôsobmi využívania zdrojov geotermálnej energie s danou termodynamickou kvalitou; a zároveň projekt rozširovania produkcie geotermálnej energie nie je v súlade s využívaním zdrojov geotermálnej energie s danou termodynamickou kvalitou.

9.2.1.4 Využívanie kaskádových riešení

Kritérium kaskádových riešení je aplikovateľné pre prieskumné a vyhľadávacie práce, a zároveň aj na projekty vo vzťahu ku rozširovaniu produkcie geotermálnej energie.

Na rozdiel od globálnej praxe nie je využívanie kaskádových systémov v rámci využívania zdrojov geotermálnej energie legislatívne podmienené, preto je aj v súčasných podmienkach

viac-menej voľbou investora a prípadne jeho dohody s okolím, v opačnom prípade je bežnou praxou vynútené ochladzovanie geotermálnych vôd po opustení výmenníkových staníc pred povrchovým zneškodnením v zmysle príslušnej legislatívy. Tento spôsob manažmentu zvyškového tepla je pritom v absolútnom kontraste k princípom udržateľného využívania zdrojov geotermálnej energie, a umelým ochladzovaním je tak nielen plytvaný energetický potenciál zvyškového tepla, ale zároveň klesajú výrazne aj hodnotiace parametre produktivity a energetickej efektivity využívania zdrojov geotermálnej energie.

Projekty slúžiace na využívanie zdrojov geotermálnej energie by pritom mali rešpektovať základnú premisu o geotermálnej energii ako energetickej surovine, a pri podpore zo štátnych, alebo medzinárodných prostriedkov by mali byť uprednostňované, respektíve bodovo zvýhodnené tie, ktoré alebo počítajú so zavedením kaskádových systémov, alebo predstavujú skupinu projektov slúžiacu na vybudovanie kaskádových systémov, respektíve energetickú minimalizáciu zvyškového tepla.

Pri hodnotení projektov je zároveň potrebné prihliadať na objektívne príčiny, ktoré obmedzujú tvorbu kaskádových systémov napojených na primárny účel využívania (t.j. primárny stupeň), predovšetkým teplota reinjektáže, ktorá pri vhodnej optimalizácii primárneho účelu využitia vie limitovať ďalšie stupne, kedy energetický potenciál zvyškového tepla je zanedbateľný pre zmysluplné využitie (pre tieto prípady sú v globálnej praxi realizované doplnkové vrty v plytkých rezervoároch pre podporu kaskád), prípadne energetickú podporu aj kaskád, aj primárneho účelu – tzv. by-pass systémy).

Využitie kaskádových systémov je možné postaviť ako **bodovacie kritérium**, kde:

- **REALIZOVANÉ** znamená, že projekt počíta s optimalizovaným zriadením kaskádových systémov v podmienkach, ktoré realizovanie kaskádových systémov umožňujú, a zároveň, že posudzovaný projekt v podmienkach, ktoré umožňujú realizáciu kaskádových systémov zabezpečil ich zriadenie s cieľom minimalizácie plytvania energetického potenciálu; v oboch prípadoch teda ide o projekty, ktoré by z princípu mali byť prioritizované, nakoľko v rámci celkovej prípravy a realizácie prinášajú technicky náročnejšie riešenia, a častokrát širokospektrálne zapojenie odbornej verejnosti
- **LIMITOVANÉ** znamená, že existujú objektívne dôvody, prečo systém kaskád nemohol byť alebo plánovaný, alebo realizovaný v rámci už aktívnych projektov v procese ich rozširovania

- NEREALIZOVANÉ znamená, že napriek vyhovujúcim podmienkam projekt vyhľadávania a otvorenia produkcie, respektíve projekt rozšírenia produkcie, nepočíta s realizáciou kaskádových systémov.

Posudzovanie objektívnych (prírodných, technických) príčin realizácie, alebo nerealizácie kaskádových systémov je možné zabezpečiť konzultáciami, napríklad cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra technických zariadení budov SvF STU BA
- Katedra hydrogeológie PriF UK
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie pre energetické účely.

9.2.1.5 Využívanie by-pass riešení

Kritérium kaskádových riešení je aplikovateľné pre prieskumné a vyhľadávacie práce, a zároveň aj na projekty vo vzťahu ku rozširovaniu produkcie geotermálnej energie.

By-pass konfigurácie predstavujú rovnako vo svete rozšírený systém riešenia zvyšovania efektívnosti a účinnosti produkcie, a využívania zdrojov geotermálnej energie. Na rozdiel od kaskádových systémov vychádzajú z využitia rovnakého zdroja geotermálnej energie pri rovnakých teplotných, tepelných, a termodynamických parametroch pre dva rozdielne účely, pričom je technicky možné presmerovávať množstvá geotermálnych vôd medzi jednotlivými účelmi v závislosti na energetickej potrebe. Ide o výhodné riešenia predovšetkým pri projektoch s rozdielnou energetickou náročnosťou počas ročného obdobia – t.j. so sezónne variabilnými zaťaženiami, najmä v prípade, ak sa špičky zaťaženia a energetickej potreby neprekrývajú, ale časovo striedajú.

Z praktického hľadiska a rezervoárového manažmentu podmieňovanie by-pass systémov umožňuje maximalizovať energetickú produktivitu zdrojov geotermálnej energie. Vrt, ktorého vlastníkom je majiteľ A, a jeho projekt A1 nevyužíva (napriek vyhodnotenej udržateľnosti) energetický potenciál produkovaného zdroja geotermálnej energie prakticky blokuje ďalšiu, často nie nepodstatnú energetickú kapacitu produkovaného, alebo overeného zdroja. Preto by-pass systémy podporujú to, aby majiteľ A si ponechal projekt A1, ale bol zároveň nútený dohodnúť sa a nájsť si partnera B s projektom B1, respektíve aby majiteľ A bol motivovaný

technicky riešiť napojenie projektu A2. Zavedením by-pass systémov štandardne stúpajú všetky aspekty produkcie a produktivity.

Objektívnymi príčinami pre vynechanie by-pass systémov je predovšetkým limitovanie produkčnej stratégie, kedy v snahe minimalizovať prienik studeného frontu, alebo jeho korekciu, prípadne minimalizovať iné negatívne dopady rezervoárovej odozvy na kvalitatívne a kvantitatívne parametre produkovaného rezervoárového média, je projekt pre jeden technický účel mimo sezóny jeho využívania utlmený v cyklickej, alebo cyklickej-depletačnej stratégii krátkého účinku.

- **REALIZOVANÉ** znamená, že projekt v procese prípravy, alebo existujúci projekt, realizovali by-pass systémy pre manažment zvyškového tepla v prípade, ak to prírodné, ale aj chemicko-technologické parametre rezervoárového média umožňujú, respektíve vzhľadom na podmienku termodynamicky účinnej produkcie podmieňujú; respektíve v prípade, ak to umožňuje optimalizovaná produkčná stratégia a manažment rezervoárovej produkcie; do tejto skupiny je možné priradiť aj projekty, pri ktorých rezervoárový manažment, alebo chemicko-technologické, technologické, technické, alebo iné objektívne príčiny neumožňujú realizáciu by-pass riešení
- **NEREALIZOVANÉ** znamená, že projekt v procese prípravy, alebo existujúci projekt, nere realizovali by-pass systémy pre manažment zvyškového tepla ani v prípade, ak k tomu neboli objektívne príčiny, a plánovaná, alebo realizovaná produkcia neadekvátne pristupuje k manažmentu zvyškového tepla.

Posudzovanie objektívnych príčin je možné odbornými konzultáciami cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra technických zariadení budov SvF STU BA
- Katedra hydrogeológie PriF UK
- súkromné spoločnosti štandardne realizujúce vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie pre energetické účely.

9.2.1.6 Technické zabezpečenie projektu

Technické zabezpečenie projektu ako kritérium je aplikovateľné pre prieskumné a vyhľadávacie práce, a zároveň aj na projekty vo vzťahu ku rozširovaniu produkcie geotermálnej energie.

Prakticky je založené na posudzovaní pripravenosti projektu a komplexnosti riešenia vzhľadom na dodávateľov technických prác a komplexnosť riešiteľského kolektívu. Príčinou zavedenia tohto kritéria je jednoduchý časový rámec operačných programov a podporných schém, s ktorými je predpoklad, že budúce projekty budú v rámci financovania alebo spoluúčasti pracovať. Ak je verejné obstarávanie dodávateľov nevyhnutnou podmienkou v rámci európskych podporných schém, vrátane dodávateľov technických prác, potom práve proces verejného obstarávania (ak ostane status-quo) môže vo významnej miere alebo ohroziť priamu realizáciu projektu, alebo naopak viesť k technickým riešeniam, ktoré kvôli nízkej cene (preferenčne platí výber podľa najnižšej ceny) nemusia spĺňať požadované kvalitatívne, respektíve aj kvantitatívne parametre. To môže v konečnom dôsledku znamenať ohrozenie ako kvalitatívneho prevedenia projektu, tak aj samotnej udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie.

Je pritom globálne zaužívanou praxou, že projekty pre vyhľadávanie a otváranie produkcie, sú realizované konzorciami partnerov (bez ohľadu na to, či sú z verejnej alebo súkromnej sféry), pričom samotné konzorcium je schopné realizovať všetky druhy požadovaných prác s minimalizáciou subdodávok. To zvyšuje jednak kvalitatívnu prípravu projektu, a zároveň zjednodušuje systém dodávateľských reťazcov a urýchľuje procesy, čo zároveň redukuje celkový časový stres projektu a zreálnuje v konečnom dôsledku plánovaný harmonogram realizácie jednotlivých prác.

V podstate komplexnosť riešenia projektu je možné využiť ako **bodovacie kritérium**, kde:

- **KOMPLEXNÉ** znamená, že súčasťou projektu sú subjekty zabezpečujúce prevažnú časť realizovaných prác, čím sa minimalizujú subdodávky, ale predovšetkým subjekty zabezpečujúce najnáročnejšie úlohy technickej a prevádzkovej inštalácie, ako aj realizácie geologických vrtov a geofyzikálneho prieskumu; a to aj vrátane projektov na rozširovanie produkcie geotermálnej energie
- **NEZABEZPEČENÉ** znamená, že súčasťou projektu nie sú všetky subjekty, ktoré by pokrývali kritické práce, čo potenciálne predlžuje dobu riešenia projektu, prípadne ohrozuje časový harmonogram a časové možnosti realizácie, a predlžuje a zvyšuje riziko subdodávok; a to aj vrátane projektov rozširovania produkcie geotermálnej energie.

9.2.2 Realizácia produkcie geotermálnej energie

V poslednej skupine kritérií sú tie aspekty, ktoré môžu byť hodnotené prevažne len v rámci plánovania dlhodobej produkcie, t.j. ak projektové žiadosti na posudzovanie sú zamerané na realizáciu, alebo rozšírenie produkcie geotermálnej energie.

Návrh jednotlivých kritérií vychádza z princípov Trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu a globálnej praxe pri produkcii zdrojov geotermálnej energie, a v rámci aplikačnej praxe na Slovensku alebo nie je zohľadňovaná cielene, alebo nie je ani legislatívne podporená.

9.2.2.1 Rizikovosť historickej produkcie rezervoárového prostredia

Rizikovosť produkcie rezervoárového prostredia ako kritérium vychádza z posudzovania máp citlivosti (Obr. 6.1) a rizikovosti (Obr. 6.2) produkcie zdrojov geotermálnej energie (časť 6.2.3) pričom **parameter hodnotí historické vyjadrenia produkcie rezervoárového prostredia** – t.j. doterajšie časové záznamy, ktoré by predchádzali rozšíreniu produkcie.

Princíp, na ktorom je kritérium postavené, vychádza z kombinácie odoberaných množstiev geotermálnej energie a energetickej kapacity rezervoáru, respektíve jeho udržateľnej kapacity, pričom ich vzájomný vzťah za dané obdobie (minimálne 10 rokov) môže definovať riziká, ktoré pre rezervoárové prostredie predstavuje depletačný, alebo rizikový produkčný manažment.

Postup je veľmi podobný s kritériom posudzovania Rizikovosti rezervoárovej produkcie (časť 9.1.4.3):

- i) na základe dát historickej produkcie dostupných na vyžiadanie na SHMÚ respektíve ŠGÚDŠ vypísať vo zvolených časových radoch (najmenej 10 rokov) sumárnu produkciu rezervoárového prostredia v dotknutom útvare geotermálnych vôd
- ii) z webovej prezentácie projektu alebo záverečných správ, respektíve aktuálnych CU, alebo po konzultácii identifikovať pravdepodobný tepelno-energetický potenciál TTP pre dotknutý útvar geotermálnych vôd
- iii) vyjadriť podľa vzťahu /6.16/ koeficient udržateľnosti aktuálnej produkcie $r_{cap(U,40)}$ a $r_{cap(U,100)}$ pre zvolený časový, aspoň 10-ročný úsek
- iv) vykresliť časové rady do mapy citlivosti (Obr. 6.1) a mapy rizikovosti (Obr. 6.2) produkcie geotermálnej energie
- v) interpretovať časové rady a distribúciu ročných záznamov na mapách podľa trendov.

Posúdenie rizikovosti je možné založiť na skupinách trendovej organizácie záznamových radov ako **bodovacie kritérium** kde:

- **MÁLO RIZIKOVÁ** znamená, že produkcia rezervoárového prostredia v sledovanom časovom rade osciluje v regióne Ia a Ib, čo znamená, že v rezervoárovom prostredí je slabé (malé) riziko predčasných, negatívnych následkov rezervoárovej odozvy, respektíve, že produkcia zdrojov geotermálnej energie nezintenzívňuje, alebo nepodporuje predčasné (indukované) formy rezervoárovej odozvy, ktoré by predstavovali zvýšené riziko pre spustenie projektu a jeho dlhodobú produkciu
- **MIERNE RIZIKOVÁ** znamená, že produkcia rezervoárového prostredia v sledovanom časovom rade osciluje medzi regiónmi Ib a IIa, respektíve medzi Ib až IIb, alebo produkcia zaznamenáva trend poklesu, alebo nárastu medzi regiónmi Ia až IIb; čo znamená, že riziko negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy v dôsledku predchádzajúcej produkcie narastá, a je potrebné realizovať kroky nevyhnutné k zvýšenému monitorovaniu rezervoárového prostredia, čo zvyšuje ekonomické náklady projektu
- **RIZIKOVÁ** znamená, že produkcia rezervoárového prostredia v sledovanom časovom rade osciluje medzi regiónmi Ia až III, respektíve IIa až III, v rámci regiónu III, alebo produkcia zaznamenáva kontinuálny pokles z regiónov IIa k regiónu III; čiže v posledných aspoň 10-tich rokoch došlo k produkcii, ktorú je možné považovať za neudržateľnú, a budúce zvýšenie rezervoárovej produkcie energeticky zhorší bilanciu medzi udržateľnou rezervoárovou kapacitou a odoberanými množstvami geotermálnej energie, čo zvýši riziko negatívnych aspektov rezervoárovej odozvy, respektíve urýchli prirodzené odpovede rezervoárového prostredia a média na dlhodobú produkciu.

Posudzovanie kritéria na základe mapovania rizikovosti produkcie je pomerne jednoduchá metodika sledovania trendov. Na druhej strane možné konzultácie je možné zabezpečiť cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra.

9.2.2.2 Adekvátnosť produkčnej stratégie

Adekvátnosť produkčnej stratégie znamená posúdiť navrhovaný účel produkcie zdrojov geotermálnej energie vo vzťahu k predchádzajúcej produkcii rezervoáru a jej dôsledkom na rezervoár (kritérium 9.2.2.1). Vo všeobecnosti platí (časť 6.2.3.3), že so zvyšovaním rizika rezervoárovej produkcie by malo dochádzať súbežne k nárastu intenzity monitorovania a jeho

komplexnosti, a zároveň, do vyriešenia otázky „stavu“ alebo „kondície“ rezervoárového prostredia, k aplikácii ústupových alebo cyklických produkčných stratégií (časť 4.1.4). Zároveň platí, že:

- základom každého otvárania produkcie zdrojov geotermálnej energie je krokové zvyšovanie produkcie, v zmysle koncepcie TURM / TURP
- spôsoby produkcie geotermálnej energie ako systémy centrálného zásobovania teplom v napojení na kaskádové systémy sú z princípu stavané na konštantnú produkciu s cieľom zvyšovať energetickú účinnosť a efektívnosť produkcie
- produkcia elektrickej energie postavená na zdrojoch geotermálnej energie je postavená na konštantných dlhodobých výkonoch, nakoľko elektrárne pracujú v „base load“ režime.

Preto adekvátnosť produkčnej stratégie, ktorá vychádza z technických plánov projektu, alebo z jeho účelu produkcie, je možné použiť ako **bodovacie kritérium** ku aktuálnemu stavu rezervoáru, ktorý vychádza z jeho historických záznamov ,kde:

- ADEKVÁTNA stratégia znamená, že navrhovaný spôsob produkcie geotermálnej energie z rezervoárového prostredia nezvyšuje riziko predčasnej negatívnej odozvy rezervoáru na jeho produkciu; respektíve, že zvolená produkčná stratégia zodpovedá aktuálnemu stavu rezervoárového prostredia v súvislosti s jeho predchádzajúcou (historickou) produkciou; respektíve, že zvolená produkčná stratégia zodpovedá princípom TURM; a zároveň, že plánovaný účel produkcie geotermálnej energie zodpovedá plánovanej produkčnej stratégii
- NEADEKVÁTNA stratégia znamená, že navrhovaný spôsob produkcie geotermálnej energie z rezervoárového prostredia zvyšuje riziko predčasnej negatívnej odozvy rezervoáru na jeho produkcie, a teda zvyšuje riziko predčasného kolapsu, alebo obmedzenia projektov, respektíve skracuje čas dlhodobej produkcie oproti požadovanému, respektíve udržateľnému časovému horizontu; a teda, že navrhovaný spôsob produkcie nezodpovedá aktuálnemu stavu rezervoáru na základe jeho historickej, predchádzajúcej produkcie vzhľadom na koncepciu TURM / TURP; a zároveň, že plánovaný účel produkcie geotermálnej energie nezodpovedá plánovanej stratégii, a následne ani koncepcie TURM / TURP.

Posudzovanie adekvátnosti predpokladanej produkčnej stratégie ku účelu produkcie geotermálnej energie, je pomerne priamočiare, podľa vyššie uvedených pravidiel. Adekvátnosť

produkčnej stratégii voči rezervoárovému stavu na základe jeho predchádzajúcej produkcie, je možné vyriešiť konzultáciami cez:

Posudzovanie objektívnych príčin je možné odbornými konzultáciami cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra hydrogeológie PriF UK.

9.2.2.3 Komplexnosť produkčného monitoringu

Komplexnosť produkčného monitoringu znamená v prípade hodnotiacich kritérií mieru **využitia dostupných monitorovacích bodov v rámci existujúcej monitorovacej siete**, a zároveň **mieru využitia metód aplikovaného monitoringu**, ktorá by mala byť súčasťou projektovej dokumentácie.

Princípom hodnotiaceho kritéria je možnosť zaznamenávania čo najširšieho a najkomplexnejšieho množstva údajov pre ďalšie možnosti interpretácie predchádzajúcej odozvy rezervoáru na produkciu, aktuálne interpretácie možných rezervoárových procesov, predikciu rezervoárovej odozvy, a kalibrovanie modelov rezervoárovej odpovede smerom do budúcnosti.

Ďalším výrazným princípom je potreba vzájomnej korelácie a hodnotenia kauzality údajov z monitoringu, v čom je to veľmi podobné prieskumnej etape. V aplikačnej praxi na Slovensku sa v zmysle legislatívnych noriem ^{9.19} aplikuje pomerne jednoduchá schéma monitorovania chemických vlastností produkovaných geotermálnych alebo termominerálnych vôd v spojení so zaznamenávaním produkčných množstiev a parametrov na ústí (záhlaví) vrtov, rozšírená len v rámci legislatívne definovaných hydrodynamických skúšok a potrieb schvaľovacích procesov pre predĺženie povolení na odber. Princípy globálnej praxe sú uvedené v časti 4.3.2 až 4.3.4, pričom ale v prípade, ak to možnosti podmieňujú (napríklad nečakané aspekty rezervoárovej odozvy) tento monitoring je často doplnený aj geofyzikálnymi metódami, alebo prostredníctvom realizovania ďalších vrtov za účelom prieskumu, zisťovania, monitorovania (zvyčajne slim-hole pre zníženie nákladov na vrtanie). Rozširovanie vrtnej sústavy je ale v podmienkach Slovenska, najmä s ohľadom na financovanie projektov, veľmi sporné.

^{9.19} Vyhláška 51/2008 Z.z. ktorou sa vykonáva geologický zákon v znení vyhlášky 22/2015 Z.z.; Vyhláška č. 418/2010 Z. z. o vykonaní niektorých znení vodného zákona ; Zákon č. 538/2005 Z. z. Zákon o prírodných liečivých vodách, prírodných liečebných kúpeľoch, kúpeľných miestach a prírodných minerálnych vodách a o zmene a doplnení niektorých zákonov

Princíp posudzovania monitorovania je preto možné založiť najmä na kombinácii monitorovacích metód, pričom vrtný prieskum ako ich súčasť nemusí (ale môže) byť braná v úvahu pri zostavení **bodovacieho kritéria**, kde:

- **KOMPLEXNÝ** produkčný monitoring znamená, že zvolený manažment monitoringu sa približuje globálnej praxi nad rámec zákonom stanovených noriem, a svojim spôsobom sa približuje globálnej monitorovacej praxi z hľadiska zastúpenia aplikovaných metód a komplexnosti zbierania údajov; pričom v rámci produkčného monitoringu sú realizované, alebo plánované: chemický monitoring (rozbory vodnej frakcie, parnej frakcie*, voľných plynov*), monitoring produkčných parametrov na ústí vrtov (teplota, tlak, fázové pomery*), hĺbkový monitoring parametrov bodový a/alebo profilový (teplota, tlak, hĺbka separácie parnej frakcie*, variácia bodu evázie plynov*), produkované množstvá, analytický / interpretačný monitoring (metódy interpretovania primárnych údajov – základná geochemia, termochémia, geotermometria, izotopová chémia, teplotné profily, tlakové profily, typológia teplotných a tlakových profilov, časové rady teploty a tlaku) a geofyzikálny monitoring (najmä gravimetria, termometria a geoelektrika) v prípade, ak preukázateľne pri produkcii došlo k ovplyvňovaniu kvalitatívnych, alebo kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia a rezervoárového média; čo v konečnom dôsledku aj pri vyšších ekonomických nákladoch vedie k možnostiam kalibrácie predikčných modelov a poznaniu prebiehajúceho stavu rezervoárového média a rezervoárových procesov; a zároveň monitoring využíva všetky relevantné monitorovacie objekty v rámci produkovaného rezervoárového prostredia alebo produkovanej obehovej hydrogeotermálnej štruktúry; respektíve monitoring počíta s projektom rozšírenia monitorovacej siete
- **RELATÍVNY** produkčný monitoring znamená, že zvolený manažment monitoringu zachováva variabilitu sledovaných metód, ale v nekomplexnej miere, respektíve v rámci produkčného monitoringu chýbajú konkrétne:
 - v prípade prítomnosti parnej frakcie (dvojitá fáza, saturovaná vlhká para): rozbor parnej frakcie a rozbor voľných plynov, meranie produktivity parnej frakcie, výpočet entalpie parnej frakcie, hĺbková separácia parnej frakcie, vertikálne tlakové profilovania, interpretačný / analytický termochemický monitoring

* ak je aplikovateľné

- vo všeobecnosti: interpretačný chemický monitoring, vertikálne profilovanie teploty a tlaku, geofyzikálne metódy, typológia teplotných a tlakových profilov, rozbor voľných plynov ak sú prítomné),

ale zároveň monitoring zároveň využíva reprezentatívnu sieť existujúcich bodovacích miest, alebo súčasťou monitorovania je plán na jej rozšírenie

- NEDOSTATOČNÝ produkčný monitoring znamená, že zvolený manažment monitoringu nevyhovuje kritériám globálnej praxe, respektíve v analyzovaných metódach ani aplikačnej praxi na Slovensku nevyužíva kombinácie monitorovacích metód, a v rámci odberov, získavania dát, a analytiky sa riadi minimálnymi kritériami (sledovanie tlaku a teploty a produkčných množstiev na ústí produkčných vrtov, základné chemické rozboru geotermálnej vody, minimálny interpretačný a analytický monitoring); a zároveň nevyužíva reprezentatívne monitorovacie objekty, ktoré sú v rámci rezervoárového prostredia alebo produkovanej hydrogeotermálnej štruktúry, dostupné – čím sa v prípade situácie v ochranných pásmach dostáva projekt do kolízie so zákonnými normami.

Posudzovanie komplexnosti rezervoárového monitoringu je odbornou vecou a vecou posúdenia projektového zámeru, respektíve konfigurácie existujúceho projektu a realizovanej monitorovacej praxe na lokalite vo vzťahu ku špecifikám rezervoárového prostredia. Preto pri posudzovaní tohto kritéria je žiaduce konzultovať aktuálnu situáciu najmä cez:

- Štátny geologický ústav Dionýza Štúra
- Katedra hydrogeológie PriF UK.
- Inšpektorát kúpeľov a žriedel MŽP SR / Slovenská kúpeľná komisia
- Sekcia geológie a prírodných zdrojov MŽP SR.

9.2.2.4 Adekvátnosť – nastavenie produkčného monitoringu

Adekvátnosť produkčného monitoringu znamená, že kritérium posudzuje to, ako realizovaný, alebo projektovaný monitoring počas produkcie rezervoárového prostredia korešponduje z pohľadu frekvencie získavania údajov, s globálnou praxou udržateľného rezervoárového monitoringu, respektíve s aplikačnou praxou realizovanou na Slovensku, ktorá je (ako bolo opakovane opísané vyššie a v predchádzajúcich kapitolách) výrazne odlišná, a celkovo nie zodpovedajúca kvalitatívne a kvantitatívne globálnej praxi vo vzťahu ku Koncepcii trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie / manažmentu.

Z praktického hľadiska ide o porovnanie opisovaného funkčného, alebo plánovaného monitoringu s frekvenciou definovanou globálnou praxou alebo národnou legislatívou, čo v priemete do bodovacieho kritéria znamená, že:

- ADEKVÁTNY monitoring je ten, ktorý zohľadňuje princípy globálnej praxe a udržateľného rezervoárového monitoringu, čo významne znižuje riziká neočakávaných rezervoárových udalostí súvisiacich s produkciou zdrojov geotermálnej energie, alebo s rezervoárovou odozvou, a zároveň monitoring, ktorý napriek zvýšeným nákladom na realizáciu značne prekračuje lokálne, legislatívne dané štandardy
- PODMIENENÝ monitoring je ten, ktorý svojim nastavením nevyhovuje princípom udržateľného rezervoárového monitoringu, ale zodpovedá lokálnym aplikačným štandardom definovaným legislatívne, alebo ich frekvenčne rozširuje; čo je z pohľadu citlivosti rezervoárového prostredia na dlhodobú produkciu rizikovejšie nastavenie manažmentu, ako v prípade globálnej praxe
- NEDOSTATOČNÝ monitoring je ten, ktorý svojim nastavením nevyhovuje legislatívnym požiadavkám, respektíve z pohľadu frekvencie ich nedosahuje, alebo je vykonávaný nepravidelne, respektíve vykonávaný technicky pravidelne, ale na rozdielnych dokumentačných / monitorovacích objektoch, čo predstavuje z pohľadu udržateľnej rezervoárovej produkcie minimum relevantných kritérií pre vyhodnocovanie rezervoárovej odozvy na produkciu.

9.2.2.5 Perspektivita energetickej účinnosti

Perspektivita energetickej účinnosti je postavená pre hodnotiace kritérium na trende účinnosti, ktoré projekt rozšírenia alebo otvorenia produkcie zdrojov geotermálnej energie prinesie. Princípom hodnotenia je štúdium, alebo posúdenie projektu z pohľadu jeho prirodzenej povahy vzhľadom na produkčné respektíve energetické parametre, pričom:

- kaskádové a by-pass systémy zabezpečujú nárast energetickej účinnosti produkovaných zdrojov geotermálnej energie
- systémy centrálného zásobovania teplom napojené na kaskádové systémy a geotermálne elektrárne, kogeneračné, alebo s manažmentom odpadového tepla, majú spravidla vyššie energetické účinnosti v miere, v akej kaskády, a manažment zvyškového tepla dokážu svojim nastavením a účelom korigovať sezónne výkyvy vyplývajúce z potreby zásobovania teplom

- systémy celoročnej prevádzky v priemysle, poľnohospodárstve, hospodárstve, službách, alebo rekreácii, ak sú dizajnované samostatne, alebo ak sú prepojené kaskádami, majú tendenciu dosahovať výrazne lepšie energetické účinnosti ako sezónne kontrolované
- naopak systémy výrazne závislé na vonkajších faktoroch, ako sú klimatické podmienky, alebo časovo-sezónne variabilná ľudská návštevnosť majú v individuálnom dizajne spravidla veľmi nízke účinnosti, čo prakticky znamená depletácia zdroja, respektíve jeho neefektívne a neúčinné využívanie.

Plánované energetické výkony produkcie sú štandardne súčasťou projektovej a technickej prípravy, takže v zmysle využívaných vzťahov (časť 2.2.5) je možné jednotlivé parametre produkcie a produktivity vypočítať. Zároveň prostredníctvom odborných publikácií zameraných na stav využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie^{9,20 9.21} je možné odčítať základné parametre (faktor využitia, faktor špičkového využitia, faktor zaťaženia, tepelná účinnosť, termodynamická účinnosť), ktoré je možné s plánovaným projektom, realizovaným projektom, alebo projektom rozšírenia produkcie zdrojov geotermálnej energie porovnať.

Následne je možné perspektivitu energetickej účinnosti využiť ako dvojstupňové bodovacie kritérium, kde:

- PERSPEKTÍVNY projekt je ten, ktorý vedie k zvýšeniu energetickej účinnosti a produkčných parametrov zdroja geotermálnej energie, alebo jeho energetické parametre vyjadrené technickými aspektmi projektu alebo plánovania budú vyššie, ako globálne priemery v tom-ktorom energetickom segmente
- NEPERSPEKTÍVNY projekt je ten, ktorý nevedie k zvýšeniu energetickej účinnosti produkčných parametrov zdroja geotermálnej energie, alebo pri ktorom je opodstatnený, kvalifikovaný predpoklad, že reálne produkčné parametre opísané vyššie budú pod úrovňou globálnych priemerov v tom-ktorom energetickom segmente.

Nakoľko sa jedná o výhradne technické kritérium, je v prípade možností vhodné kontaktovať expertné skupiny, predovšetkým:

- Katedra technických zariadení budov SvF STU BA

^{9.20} <https://www.sciencedirect.com/journal/geothermics>

^{9.21} <https://www.lovegeothermal.org/explore/our-databases/conference-paper-database/>

- Ústav energetických strojov a zariadení SjF STU BA
- Katedra energetickej techniky SjF UNIZA

9.2.2.6 Environmentálna udržateľnosť

Vzťah hodnotiacich kritérií k aplikovanej RIAM analýze v prípravnej fáze projektu je širšie opisovaný v kritériu / časti 9.1.4.6. V princípe ide v kritériu environmentálnej udržateľnosti o rozšírenie matice RIAM na hodnotenie jeho dlhodobej produkcie a jeho vzťahu ako k prostrediu, v ktorom existuje, tak aj vo vzťahu ku spoločnosti a mieri saturácie jej potrieb. Výrazným rozdielom oproti predchádzajúcemu kritériu je hodnotenie dlhodobého vplyvu projektu a jeho existencie na svoje okolie vo vzťahu ku celkovému „rezervoáru“, ktorý ponúka environment, respektíve spoločnosť a jej sociálno-ekonomický status.

Prostredníctvom environmentálneho skóre S_E je možné projekty posudzovať cez **bodovacie kritérium**, kde:

- **UDRŽATEĽNÝ** projekt znamená, že projekt v rámci jeho pôsobenia alebo plánovaného rozšírenia je environmentálne prijateľný voči okoliu a spoločnosti, respektíve jej potrebám, alebo vedie k významnému zachovávaniu, respektíve zlepšovaniu statusu prostredia a spoločnosti, respektíve jej blahobytu, pričom $S_E > 0,5$
- **RELATÍVNE UDRŽATEĽNÝ** projekt znamená, že projekt v rámci jeho pôsobenia alebo plánovaného rozšírenia je naďalej environmentálne prijateľný voči okoliu, ako aj stavu spoločnosti, a jej potrebám, ale v jeho pôsobení na okolie alebo spoločnosť a jej potreby existujú negatívne aspekty, ktoré významnou mierou limitujú pozitíva projektu, a ktorých odstránenie, redukcia, alebo úprava vo vhodnom čase a pri vhodnej intenzite by viedli k výrazne lepším environmentálnym, respektíve udržateľným prejavom projektu vo vzťahu k jeho všeobecnému prostrediu a ľudským aktivitám, respektíve ľudskému blahobytu
- **NEUDRŽATEĽNÝ** projekt znamená, že projekt v rámci jeho pôsobenia, alebo rozšírenia, je na základe aplikovania matice RIAM hodnotený ako neudržateľný, to znamená, že negatívne vplyvy jeho existencie prevažujú nad jeho benefitmi voči okoliu, spoločnosti a jej potrebám, čo je v rozpore s koncepciou TUR a princípmi využívania obnoviteľných / alternatívnych zdrojov geotermálnej energie, a v rámci možností, respektíve projektového plánovania je nevyhnutné kľúčové nedostatky odstrániť, alebo požadovať relevantné záruky na limitovanie negatívnych dopadov.

Výhodou matice RIAM je, že v súlade s prezentovanou metodikou (kapitola 8) vie byť realizovaná s parciálnymi konzultáciami aj priamo na RCUE. Nakoľko ide o pomerne komplexnejšiu formu v porovnaní s hodnotením prípravných aktivít vyhľadávania alebo otvárania produkcie zdrojov geotermálnej energie, možnosti a potreby konzultácie, predovšetkým ak ide o posudzovanie reálnych možností odstránenia kľúčových negatív projektu, je nevyhnutné konzultovať s relevantnými inštitúciami vzhľadom na povahu negatívne vyhodnotených aspektov.

9.2.2.7 Odberové zabezpečenie

Odberové zabezpečenie znamená hodnotenie projektu z pohľadu prítomnosti cieľového odoberateľa produkovanej geotermálnej energie, t.j. v rámci komplexného kolektívu žiadateľov alebo zhotoviteľov projektu existuje subjekt, ktorý je koncovým odoberateľom geotermálnej energie, respektíve tento odoberateľ aktuálne existuje a je pripravený využitie geotermálnej energie reálne zúžitkovať.

Cieľom tohto kritéria je bodovo zvýhodniť v rámci hodnotiaceho procesu tie projekty, ktorých situácia a možnosti sú výrazne reálnejšie. V princípe, ak je cieľom spojiť princípy trvalo udržateľného využívania zdrojov geotermálnej energie v podmienkach Slovenska, kde väčšina ekonomickej hodnoty projektu vyplýva z grantových schém orientovaných predovšetkým na medzinárodné finančné schémy, potom prioritizácia projektov s vysokou reálnosťou uskutočnenia je nevyhnutná, vzhľadom na časové limity podporných schém. Zároveň sa tak minimalizuje riziko koncovej zmeny odoberateľa produkovaného zdroja geotermálnej energie, alebo plánovaného rozšírenia produkcie geotermálnej energie a prechod výsledného benefitu na účely, ktoré by boli výrazne menej podporované (napríklad s ohľadom na ich energetickú náročnosť, faktory účinnosti a podobne).

Odberové zabezpečenie je možné využiť ako jednoduché bodovacie kritérium, kde:

- **ZABEZPEČENÉ** projekty znamená, že finálny odoberateľ geotermálnej energie skutočne existuje, projekt rozšírenia produkcie geotermálnej energie je teda reálny, a vynaložená finančná podpora má nízke riziko straty
- **NEZABEZPEČENÉ** projekty znamená, že finálny odoberateľ geotermálnej energie je vzhľadom na rozširovanie produkcie geotermálnej energie alebo produkčnej infraštruktúry nateraz nie je zazmluvnený, dohodnutý, alebo reálne neexistuje koncový odoberateľ energetických benefitov.

9.2.2.8 Ekonomické portfólio a ekonomický stav

Ekonomické portfólio alebo ekonomický stav je kritériom, ktoré vychádza z posudzovania ekonomickej pripravenosti žiadateľa vzhľadom na celkovú ekonomickú náročnosť projektu. Produkcia zdrojov geotermálnej energie, a využívanie zdrojov geotermálnej energie patrí medzi extrémne rizikové aktivity predovšetkým v štádiu prvého prieskumu a vyhľadávacích, respektíve prieskumných a overovacích fáz, ale aj v období prvých rokov po otvorení produkcie. V závislosti na účele produkcie zdrojov geotermálnej energie, ale zároveň aj na termických, termodynamických, fázových, a chemicko-technologických parametroch zdrojov geotermálnej energie je ale aj v prvých rokoch, ktoré nemôžu byť finančne kryté návratnosťou, dôležité udržiavať fond na realizáciu takzvaných udržiavacích udržiavacích a technických prác (tzv. operation-and-maintenance costs), ktoré by nemali byť súčasťou projektových žiadostí.

Z tohto pohľadu hodnotenie ekonomického portfólia žiadateľa je zároveň indikátorom ekonomickej pripravenosti na skutočnú prevádzku otvoreného, alebo rozširovaného projektu, a nepriamo zároveň indikátorom rizikovosti kolapsu celého projektu, ktorá by bola v protiklade ako k vynaloženým ekonomickým prostriedkom, tak aj ku samotnému konceptu TURM / TURP. Ekonomické portfólio a ekonomický stav žiadateľa zároveň znamená jeho schopnosť realizovať práce a časovo neohroziť prípravu a realizáciu projektu v prípade omeškania finančnej dotácie, alebo jej segmentovania na základe realizovaných míľníkov.

Z tohto hľadiska je možné projekty / žiadosti z pohľadu RCUE hodnotiť cez **bodovacie kritérium** ako:

- **PRIPRAVENÉ** projekty znamenajú, že žiadateľ / projekt vie preukázať ekonomickú pripravenosť v prípade neočakávaných udalostí pre čiastkové realizačné práce a v prípade reálnej produkcie pre udržiavacie a technické práce na technologických zariadeniach projektu, čo výrazne znižuje riziko jeho kolapsu, respektíve predlžovania doby jeho realizácie
- **NEPRIPRAVENÉ** projekty znamenajú, že žiadateľ / projekt nevie preukázať, alebo nemá vybudovanú ekonomickú pripravenosť pre prípad neočakávaných udalostí pre čiastkové realizačné práce a v prípade reálnej produkcie pre zabezpečovanie technických a udržiavacích prác, čo zvyšuje riziko kolapsu projektu v prípade, ak daný žiadateľ / projekt bude v prvých rokoch produkcie, alebo rozšírenej produkcie, povinný splácať vynaložené finančné prostriedky v podobe výhodných grantov a podporných schém.

9.3 Systém vyhodnocovania

Navrhovaný systém vyhodnocovania projektov vo vzťahu ku trvalo udržateľnej produkcii zdrojov geotermálnej energie je stavaný ako dynamický, s možnosťami aplikácie bodovacích kritérií v celej posudzovanej škále, respektíve v kombinácii bodovacích a vylučovacích kritérií. Dynamickosť projektu znamená, že vymedzené kritériá je možné upravovať, respektíve vynechávať, alebo im pridelovať bodové atribúty podľa filozofie RCUE alebo regionálnych špecifik, ktoré musia RCUE pri posudzovaní zvažovať.

Z tohto dôvodu je možné pri vyhodnocovaní postupovať nasledovne:

1) v prípade aplikovania selektívnych / vylučovacích kritérií, je možné realizovať **prvotnú selekciu** na základe vyhodnotenia selektívnych kritérií, kde:

- **každý projekt, ktorý v rámci vylučovacieho kritéria zaznamená aspoň jednu odpoveď NIE je automaticky vyradený z hodnotenia** s prípadným návrhom zo strany RCUE ku subjektu, ktorý projekt pripravil, na patričné úpravy alebo spôsob nápravy podávania projektovej / podpornej žiadosti, pričom v budúcnosti nie je možné vyradeného žiadateľa vylúčiť, ak splní všetky vylučovacie kritériá
- **projekt, ktorý na všetky vylučovacie kritériá zaznamenal odpoveď ÁNO postupuje do druhého kola hodnotenia**, v ktorom prioritizácia projektov, alebo prioritizácia žiadostí, je zoradená podľa dosiahnutého bodového skóre

2) v prípade, ak kritériá uvedené v časti 9.1.1. – t.j. 9.1.1.1., 9.1.1.2 a 9.1.1.3 sú využité len ako bodovacie kritériá, tieto by mali mať výraznú bodovú výhodu tak, aby základné nedostatky projektovej prípravy nemohli byť kompenzované výraznými bodovými ziskami neskôr

3) pri **druhom kole** posudzovania projektov pre využitie a využívanie respektíve vyhľadávanie a prieskum zdrojov geotermálnej energie je možné posudzovať projekty hierarchickým systémom na základe **percentuálnych ziskov** z hodnotenia projektu, pričom percentuálne zisky namiesto bodových súčtov majú byť uprednostnené, nakoľko celkové bodové zisky sa môžu líšiť podľa množstva bodovacích kritérií, ktoré sú aplikovateľné pre jednotlivé fázy projektovej prípravy, respektíve projektového zamerania (napríklad pre posudzovanie projektov fázy vyhľadávania a otvorenia produkcie zdrojov geotermálnej energie sú bodovacie kritériá uvedené v časti 9.2.2 neaplikovateľné, čo by znamenalo nulový bodový zisk; čo však zároveň neznamená, že tieto projekty by mali byť alebo prioritizované, alebo by lepšie vyhovovali

princípom trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu a možnostiam dlhodobu udržateľnej rezervoárovej produkcie a produkcie geotermálnej energie)

4) systém hierarchizácie je možné založiť na niekoľkých skupinách, v rámci ktorých by jednotlivé projekty mohli byť v prípade rozhodovacieho procesu vnútorne hierarchizované na základe dosiahnutého percentuálneho zisku, pričom

- **projekty vysokej prioritizácie** znamená skupinu projektov, ktorých **percentuálne skóre dosahuje 86 – 100 %**, a teda projekty, ktoré majú veľmi vysokú úroveň projektovej prípravy a dokumentácie, znalostných základov, technickej a realizačnej pripravenosti, a zároveň z pohľadu produkcie zdrojov geotermálnej energie sa najviac približujú, respektíve zhodujú s koncepciou trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu a zároveň s princípmi trvalo udržateľného rozvoja, a ich realizácia nemá aktuálne predpoklady ohroziť trvalo udržateľné využívanie zdrojov geotermálnej energie, respektíve riziko ich neúspechu, alebo kolapsu je veľmi nízke – a z tohto dôvodu má byť výsledkom ich posudzovania schválenie, pričom nedostatky, ktoré boli v rámci hodnotenia identifikované, je možné exaktne pomenovať a odporučiť ich náprava, alebo zohľadnenie, v rámci budúcich realizovaných prác; v prípade hierarchizácie projektov má byť táto skupina významne uprednostnená
- **prioritizované projekty** znamená skupinu projektov, ktorých **percentuálne skóre dosahuje 71 – 85 %**, a teda projekty, ktoré majú stále nadštandardnú, alebo aspoň požadovanú úroveň projektovej prípravy a dokumentácie, znalostných základov, technickej a realizačnej pripravenosti, a z hľadiska dlhodobého využívania zdrojov geotermálnej energie, koncepciu TURM / TURP alebo koncepčné základy koncepcie TUR pravdepodobne zodpovedajú základným princípom; pričom ak je to možné, zistené nedostatky v procese hodnotenia je stále možné so žiadateľom konzultovať, prípadne vyzvať žiadateľa o zmeny v rámci jeho projektovej schémy tak, aby mohli byť prípadne stále presunuté do vyššej prioritizačnej skupiny; a realizácia týchto projektov je stále v rámci tolerovateľného rizika z pohľadu dlhodobu udržateľnej rezervoárovej produkcie a trvalo udržateľného využívania zdrojov geotermálnej energie
- **akceptovateľné projekty** znamená skupinu projektov, ktorých **percentuálne skóre dosahuje 55 – 70 %**, a teda projekty, ktoré stále môžu byť schválené pre potenciálnu finančnú podporu v rámci posudzovania alebo odporúčaní, avšak s nižším stupňom prioritizácie v porovnaní s projektmi s vyšším percentuálnym skóre; pričom však predmetom posudzovania a eventuálne konzultácií so zhotoviteľmi projektu by mali

byť vzájomne dohodnuté úpravy dotknutého projektu predovšetkým v oblasti praktického prieskumu a monitoringu rezervoárovej produkcie s cieľom znížiť riziká z pohľadu dlhodobu udržateľnej rezervoárovej produkcie

- **sporné projekty** znamená skupinu projektov, **ktorých percentuálne skóre dosahuje 40 – 54 %**, čiže projekty, ktoré prakticky nemuseli dosiahnuť ani 50 % prospechu v rámci bodovacích kritérií, a z pohľadu konceptu dlhodobu udržateľnej rezervoárovej produkcie znamenajú významné riziko nielen z hľadiska geologického poznania obehovej hydrogeotermálnej štruktúry alebo rezervoárového prostredia, ale predovšetkým z pohľadu dlhodobu udržateľnej rezervoárovej produkcie, vrátane základných, a koncepciou TURM / TURP nastavených základných princípov udržateľnej produkcie a udržateľného monitoringu, pričom stále však môžu byť zachované v hodnotiacej schéme, avšak za predpokladu, že na základe spoločných konzultácií medzi RCUE, prizvanými relevantnými inštitúciami, a zhotoviteľmi prác, dôjde k úprave projektu tak, aby jeho celkové skóre prekročilo hranicu aspoň 55 %, pričom dôraz v rámci zmien by mal byť orientovaný smerom k monitorovaniu, respektíve smerom k spôsobom a intenzite produkcie zdrojov geotermálnej energie vzhľadom na nárast rizika projektov pre dlhodobú a udržateľnú produkciu zdrojov geotermálnej energie
- **neakceptovateľné projekty** zlučujú skupinu projektov, **ktorých percentuálne skóre 0 – 39 %** znamená, že predkladané projekty alebo žiadosti v zmysle ich technickej alebo realizačnej náplne nespĺňajú ani niektoré národnou legislatívou stanovené kritériá v súvislosti s vyhľadávaním, prieskumom, produkciou a monitoringom produkcie zdrojov geotermálnej energie, a z pohľadu princípov trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu / produkcie predstavujú projekty výrazne rizikové pre rezervoárové prostredie a teda aj riziko samotného neúspechu, alebo kolapsu vlastného navrhovaného riešenia; a zároveň zo strany RCUE vyvstáva možnosť:
 - **konečného zamietnutia projektu** = definitívneho vyradenia žiadosti spolu so skupinou projektov, ktoré boli vyradené na základe analýzy vylučovacích kritérií
 - **vrátenia projektu na prepracovanie** = v prípade možnosti ponechania projektu v hodnotiacom systéme, alebo ich opätovné vrátenie, ak dôjde v projektovej príprave k výrazným zmenám približujúcim projekt ku koncepcii TURP / TURM.

10 VŠEOBECNÉ A DOPLŇUJÚCE INFORMÁCIE PRE POTREBY RCUE

10.1 Základné legislatívne rámce prieskumu a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku

10.1.1 Geologický zákon

§ 2 Geologické práce

- (1) Geologické práce sú geologický výskum a geologický prieskum.
- (2) Geologický výskum sa člení na
 - a) základný geologický výskum,
 - b) regionálny geologický výskum.
- (3) Geologický prieskum sa člení na
 - b) hydrogeologický prieskum, ktorý sa člení na etapy
 1. vyhľadávací hydrogeologický prieskum,
 2. podrobný hydrogeologický prieskum,
 3. doplnkový hydrogeologický prieskum,
- (4) Za geologické práce, ak súvisia s prácami uvedenými v odsekoch 2 a 3, sa podľa tohto zákona považujú tieto práce:
 - a) geofyzikálne práce a geochemické práce,
 - b) technologické práce, laboratórne práce, terénne meračské práce a technické práce, najmä vrtné práce, podzemné práce a zemné práce, výstavba a prevádzkovanie dočasných merných objektov, zatláčacích a pozorovacích staníc, skúšobných zariadení, zriaďovanie dočasných pracovísk a prístupových ciest k nim.

§ 3 Vymedzenie niektorých pojmov

Na účely tohto zákona

a) geologické dielo je povrchové alebo podzemné dielo v zemskej kôre, najmä horizontálne, zvislé a úklonné banské diela, ryhy, výkopy, odkopy, lomové steny a vrty potrebné na vykonávanie geologických prác,

b) geologický objekt je dočasný objekt stavebného charakteru potrebný na vykonávanie geologických prác,

c) geologické oprávnenie je oprávnenie na vykonávanie geologických prác,

e) hydrogeologický prieskum je prieskum, ktorým sa skúmajú podzemné vody vrátane termálnych vôd ^{10.1} a minerálne vody ^{10.2} zisťuje a overuje sa ich množstvo a kvalita a spracúvajú sa geologické podklady na ich využívanie a ochranu, zisťujú a overujú sa geologické podmienky na zriaďovanie a prevádzku zariadení na priemyselné využívanie geotermálnej energie,

j) odborná spôsobilosť je vzdelanie, odborná prax a súhrn teoretických vedomostí a znalostí všeobecne záväzných právnych predpisov upravujúcich geologické práce a ostatných súvisiacich všeobecne záväzných právnych predpisov a súvisiacich slovenských technických noriem,

k) projekt geologickej úlohy je návrh jej riešenia vybranými druhmi geologických prác, určenie rozsahu týchto prác a doba ich vykonávania, a ak ide o financovanie geologických úloh zo štátneho rozpočtu alebo z iných verejných prostriedkov aj ich rozpočet a ekonomické zdôvodnenie,

l) regionálny geologický výskum je výskum, ktorým sa skúmajú a spresňujú vo vybraných častiach územia štátu poznatky o zložení, vývoji a stavbe zemskej kôry a o zákonitostiach ich zmien a na základe týchto poznatkov sa zostavujú tematické a účelové geologické mapy,

n) termálna voda je prírodná podzemná voda, ktorá je zohriata pôsobením zemského tepla v horninovom prostredí s minimálnou teplotou vody v mieste výveru 20 °C,

p) základný geologický výskum je výskum, ktorým sa skúma, hodnotí a zobrazuje zloženie, vývoj a stavba zemskej kôry na území štátu a zákonitosti ich zmien.

^{10.1} § 3 ods. 5 zákona č. 364/2004 Z. z. o vodách a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov (vodný zákon).

^{10.2} § 2 ods. 2 zákona č. 538/2005 Z. z. o prírodných liečivých vodách, prírodných liečebných kúpeľoch, kúpeľných miestach a prírodných minerálnych vodách a o zmene a doplnení niektorých zákonov

§ 4 Vykonávanie geologických prác

(1) Geologické práce je oprávnená vykonávať

- a) fyzická osoba-podnikateľ a právnická osoba, ktorá má geologické oprávnenie,
- b) právnická osoba poverená Ministerstvom životného prostredia Slovenskej republiky (ďalej len „ministerstvo“) v súvislosti s geologickým výskumom,
- c) Slovenská akadémia vied, Správa slovenských jaskýň, vysoké školy, stredné odborné školy a múzeá, ak vykonávajú geologické práce pri plnení svojich vedeckých, výskumných alebo pedagogických úloh

§ 9 Odborná spôsobilosť

(1) Odbornú spôsobilosť na vykonávanie geologických prác (ďalej len „odborná spôsobilosť“) musí mať fyzická osoba, ktorá

- a) je zhotoviteľom geologických prác alebo jeho zástupcom,
- b) je zástupcom právnickej osoby, ktorá je zhotoviteľom geologických prác,
- c) riadi, koordinuje a rieši geologickú úlohu (ďalej len „zodpovedný riešiteľ geologickej úlohy“), (ďalej len „odborne spôsobilá osoba“).

(2) Odborná spôsobilosť sa priznáva na

- a) geologický výskum,
- c) hydrogeologický prieskum,
- f) geochemické práce,
- g) geofyzikálne práce.

(3) Odbornú spôsobilosť overuje ministerstvo skúškou.

(4) Odborná spôsobilosť sa osvedčuje vydaním preukazu o odbornej spôsobilosti a overuje sa každých päť rokov.

(5) Vydaním preukazu o odbornej spôsobilosti vzniká odborne spôsobilej osobe právo používať okrúhlu pečiatku so štátnym znakom.

(6) Za zodpovedného riešiteľa geologickej úlohy, za zástupcu fyzickej osoby-podnikateľa alebo za zástupcu právnickej osoby možno ustanoviť len osobu s vysokoškolským vzdelaním druhého stupňa v príslušnom odbore, ktorá má najmenej tri roky odbornej praxe v príslušnom odbore;

také vzdelanie a takú odbornú prax musí mať aj fyzická osoba-podnikateľ, ktorá je zhotoviteľom geologických prác a nemá ustanoveného zástupcu.

(10) Osvedčenie o odbornej spôsobilosti sa nevyžaduje od fyzickej osoby, ktorá má trvalý pobyt v členskom štáte a na území Slovenskej republiky bude dočasne alebo príležitostne vykonávať geologické práce a preukáže, že

a) je občanom členského štátu a

b) je oprávnená vykonávať geologické práce podľa právnych predpisov iného členského štátu, (ďalej len „cudzí žiadateľ“).

(12) Za dočasné alebo príležitostné vykonávanie geologických prác sa považuje vykonávanie týchto prác, ktoré trvajú maximálne šesť mesiacov v dvanásťmesačnom období alebo počet vykonaných geologických úloh nepresiahne tri geologické úlohy.

§ 10 Odborná spôsobilosť

(1) Odborná spôsobilosť podľa § 9 sa nevyžaduje na vykonávanie geologických prác podľa § 2 ods. 4 písm. b).

(2) Na vykonávanie geologických prác podľa § 2 ods. 4 písm. b) musí mať zhotoviteľ geologických prác najmenej tri roky odbornej praxe.

§ 11 Geologická úloha

(1) Geologická úloha je vecné, miestne a časové vymedzenie okruhu otázok vyjadrujúcich hospodársky, vedecký alebo technický cieľ úlohy, ktorá sa má projektovať a riešiť geologickými prácami a vyhodnotiť v záverečnej správe geologickej úlohy.

(2) Geologickú úlohu určuje ten, kto financuje geologické práce (ďalej len „objednávateľ“). Na určenie a realizáciu určitej geologickej úlohy sa môžu objednávateľa združiť

§ 12 Projektovanie geologických úloh

(1) Na geologickú úlohu vypracúva zhotoviteľ geologických prác projekt geologickej úlohy. Projekt geologickej úlohy vyjadruje cieľ geologickej úlohy, navrhuje a odôvodňuje vybrané druhy geologických prác na riešenie geologickej úlohy a určuje metodický a technický postup ich odborného a bezpečného vykonávania.

(3) Pri projektovaní geologickej úlohy sa zisťuje, či sa vykonávanie geologických prác bude týkať záujmov chránených osobitnými predpismi, a navrhujú sa opatrenia na ochranu týchto záujmov.

(4) Projekt geologickej úlohy schvaľuje objednávatel'.

§ 14 Riešenie geologických úloh

(1) Zhotoviteľ geologických prác začne riešiť geologickú úlohu po schválení projektu geologickej úlohy. Pred schválením projektu geologickej úlohy možno začať geologickú úlohu riešiť len výnimočne.

(2) Zhotoviteľ geologických prác rieši geologickú úlohu v súlade so schváleným projektom geologickej úlohy tak, aby sa čo najskôr a efektívne dosiahol jej cieľ. Riešenie geologickej úlohy riadi zodpovedný riešiteľ geologickej úlohy.

(3) Ak pri riešení geologickej úlohy zhotoviteľ geologických prác zistí, že je potrebné voliť zásadne iný metodický alebo technický postup alebo vykonať podstatne väčší rozsah geologických prác, ako obsahuje projekt geologickej úlohy, je povinný navrhnúť zmenu projektu geologickej úlohy. Do schválenia zmeny projektu geologickej úlohy môže v riešení pokračovať geologickými prácami, na ktoré sa vzťahuje navrhovaná zmena projektu geologickej úlohy, len v rozsahu a za podmienok určených objednávatel'om.

(4) Zhotoviteľ geologických prác navrhne zmenu projektu geologickej úlohy, prípadne zastavenie geologických prác aj vtedy, ak zistí, že cieľ geologickej úlohy nemožno dosiahnuť najmä z dôvodu, že geologické pomery sa podstatne líšia od predpokladov v schválenom projekte geologickej úlohy.

(5) Zmenu projektu geologickej úlohy schvaľuje objednávatel'.

§ 15 Geologická dokumentácia

(1) Zhotoviteľ geologických prác je povinný pri riešení geologickej úlohy viesť, dopĺňať a uchovávať geologickú dokumentáciu, a to písomnú, grafickú a hmotnú dokumentáciu o zistených skutočnostiach a javoch v geologických dielach a geologických objektoch a údaje o výsledkoch ich rozborov a skúšok vrátane vyhodnotenia.

(2) Geologickú dokumentáciu treba uchovávať spôsobom zabezpečujúcim jej ochranu pred poškodením, zničením alebo zneužitím. Písomnú a grafickú geologickú dokumentáciu treba

uchovávať tri roky od odovzdania záverečnej správy geologickej úlohy (ďalej len „záverečná správa“) objednávateľovi, ak v schválenom projekte geologickej úlohy nie je určená dlhšia lehota. Hmotnú geologickú dokumentáciu treba uchovávať do prevzatia záverečnej správy.

(3) Zhotoviteľ geologických prác je povinný odovzdať geologickú dokumentáciu objednávateľovi súčasne s odovzdaním záverečnej správy, ak sa nedohodol s objednávateľom inak.

§ 16 Vyhodnocovanie geologickej úlohy

(1) Zhotoviteľ geologických prác je povinný vyhodnotiť geologickú úlohu v záverečnej správe a odovzdať ju objednávateľovi.

(2) Záverečná správa obsahuje

- a) zhodnotenie použitých geologických prác v porovnaní s projektom geologickej úlohy,
 - b) dosiahnuté výsledky z hľadiska cieľa geologickej úlohy,
 - c) nové geologické poznatky vrátane tých, ktoré priamo nesúvisia s jej cieľom, najmä o geologickej stavbe zemskej kôry, o nerastoch, o výskyte podzemných vôd vrátane termálnych vôd a minerálnych vôd,
 - d) údaje o stave geologických diel a geologických objektov vrátane ich zabezpečenia, návrh na ich iné využitie alebo na likvidáciu a údaje o spôsobených škodách a ich náhrade,
 - e) údaje o vynaložených nákladoch na riešenie geologickej úlohy vrátane nákladov na projekt geologickej úlohy a záverečnú správu, ak ide o geologickú úlohu financovanú zo štátneho rozpočtu alebo z iných verejných prostriedkov.
- (4) Záverečná správa, pri ktorej riešení sa zistili a overili množstvá podzemných vôd vrátane termálnych vôd a minerálnych vôd, musí obsahovať ako samostatnú časť ich výpočet, prípadne kvalifikovaný odhad.

§ 17 Zásoby výhradného ložiska a množstvá vôd

(2) Množstvá vôd podľa § 16 ods. 4 sú zistené a overené množstvá vôd v priestore obsahujúcom podzemné vody v hydrogeologickom rajóne, v jeho časti alebo v hydrogeologickej štruktúre alebo v jej časti (ďalej len „hydrogeologický celok“) bez ohľadu na straty pri ich využívaní.

(3) Podmienky využiteľnosti množstiev vôd hydrogeologického celku určuje objednávateľ a sú súborom ukazovateľov, podľa ktorých sa posudzuje ich vhodnosť na predpokladané využitie.

Podmienky využiteľnosti sú podkladom na výpočet množstiev vôd hydrogeologického celku v záverečnej správe.

(4) Vo výpočte množstiev vôd hydrogeologického celku sa klasifikujú množstvá vôd na kategórie podľa stupňa ich preskúmanosti a znalosti o geologickom prostredí, v ktorom sa nachádzajú, o ich kvalite a rozmiestnení a o ich technologických vlastnostiach.

§ 18 Posudzovanie a schvaľovanie záverečných správ

(2) Záverečnú správu s výpočtom zásob výhradného ložiska a záverečnú správu s výpočtom množstiev vôd v hydrogeologickom celku posudzuje a schvaľuje ministerstvo bez ohľadu na zdroj financovania do šiestich mesiacov od jej predloženia. Objednávateľ odovzdá záverečnú správu na schválenie ministerstvu do jedného mesiaca od jej prevzatia od zhotoviteľa geologických prác.

(4) Schválené zásoby výhradných ložísk a výsledky hydrogeologického prieskumu sa evidujú súhrnne.

§ 19 Odovzdávanie a sprístupňovanie záverečných správ

(1) Zhotoviteľ geologických prác s písomným súhlasom objednávateľa je povinný bezodplatne odovzdať záverečnú správu a inú geologickú dokumentáciu právnickej osobe poverenej ministerstvom v určenom rozsahu a v úprave na trvalé uchovanie a ďalšie využitie, a to do jedného mesiaca od jej schválenia alebo od jej prevzatia podľa § 18 ods. 2 a 3.

(2) Objednávateľ pri odovzdaní záverečnej správy oznámi právnickej osobe poverenej ministerstvom podmienky na jej sprístupňovanie a poskytovanie informácií z nej vrátane požadovaných finančných úhrad; podmienky sú záväzné desať rokov od ich odovzdania právnickej osobe poverenej ministerstvom.

(3) Podmienky ustanovené v odseku 2 sa nevzťahujú na poskytovanie informácií ústredným orgánom štátnej správy, ktorým právnická osoba poverená ministerstvom poskytne bezplatne informácie, ktoré sú nevyhnutne potrebné z dôvodu verejného záujmu alebo na plnenie ich úloh.

(4) Právnická osoba poverená ministerstvom na výkon štátnej geologickej služby sprístupňuje hmotnú geologickú dokumentáciu len na účely jej vizuálneho opisu. Odber vzoriek z hmotnej geologickej dokumentácie na špeciálne geologické a laboratórne účely je možný len so súhlasom ministerstva za podmienok v ňom určených a za cenu podľa osobitného predpisu.

Kópie úplných záznamov z geofyzikálnych meraní na účel opätovného prehodnotenia aj v digitálnej forme poskytne právnická osoba poverená ministerstvom za cenu podľa osobitného predpisu.

(5) Záverečné správy sa považujú za informácie o životnom prostredí a na ich sprístupňovanie sa okrem prípadov podľa odsekov 2 a 3 vzťahuje osobitný predpis ^{10.3}

§ 21 Prieskumné územie pre vybrané geologické práce

(1) Vybrané geologické práce možno vykonávať len na prieskumnom území, ktoré určuje ministerstvo. Rozhodnutie o určení prieskumného územia nie je územným rozhodnutím podľa osobitných predpisov.

(2) Vybrané geologické práce sú

b) hydrogeologický prieskum

1. termálnych podzemných vôd,

2. minerálnych vôd,

3. podzemných vôd na účely zistenia a overenia geologických podmienok na zriaďovanie a prevádzku zariadení na priemyselné využívanie geotermálnej energie.

(3) Prieskumné územie je priestor vymedzený na povrchu uzavretým geometrickým obrazcom s priamymi stranami bez voľných plôch, ohraničený pod povrchom zvislými rovinami prechádzajúcimi stranami. Vrcholy hraníc prieskumného územia na povrchu sa určia súradnicami v platnom súradnicovom systéme. Prieskumné územie určuje ministerstvo na návrh objednávateľa.

(4) Prieskumné územia na ten istý účel sa nemôžu prekrývať ani čiastočne.

(5) Prieskumné územia na rôzne účely sa nemôžu čiastočne alebo úplne prekrývať, ak by sa tým podstatne sťažilo alebo znemožnilo vykonávanie geologických prác alebo využitie ich výsledkov, najmä ak ide o prieskum vývojovo alebo priestorovo súvisiacich ložísk vyhradených nerastov alebo prieskum rôznych druhov podzemných vôd.

^{10.3} Zákon č. 211/2000 Z. z. o slobodnom prístupe k informáciám a o zmene a doplnení niektorých zákonov (zákon o slobode informácií) v znení neskorších predpisov.

§ 22 Určenie, zmena, prevod a zrušenie prieskumného územia

(1) Prieskumné územie určí ministerstvo najviac na štyri roky; na návrh fyzickej osoby-podnikateľa alebo právnickej osoby ktorá je objednávatel'om (ďalej len „držiteľ prieskumného územia“), sa môže táto lehota predĺžiť o ďalšie štyri roky, opätovne o ďalšie dva roky, a ak určená lehota nepostačuje na dokončenie dotknutej činnosti, môže byť na návrh držiteľa prieskumného územia predĺžená o lehotu, ktorá je nevyhnutne potrebná na dokončenie geologických prác. O predĺženie je potrebné požiadať najmenej tri mesiace pred uplynutím lehoty.

(2) Rozloha prieskumného územia môže byť najviac 250 km². Prieskumné územie môže zahŕňať iba jedno výhradné ložisko s určeným chráneným ložiskovým územím na ten istý druh nerastu. Prieskumné územie nemôže zahŕňať výhradné ložisko s určeným dobývacím priestorom na ten istý druh nerastu.

(3) Držiteľ prieskumného územia môže so súhlasom ministerstva zmluvne previesť prieskumné územie na inú osobu (ďalej len „zmluvný prevod“) najskôr v druhom roku platnosti určenia prieskumného územia. Držiteľ prieskumného územia je povinný zmluvu o prevode prieskumného územia na inú osobu (ďalej len „zmluva o prevode“) predložiť ministerstvu v jednom vyhotovení do 15 dní od jej uzatvorenia. Ministerstvo rozhodnutím, ktorým sa udeľuje súhlas na zmluvný prevod, súhlas nevydá, ak držiteľ prieskumného územia v prvom roku platnosti určenia prieskumného územia nevykonával žiadne geologické práce podľa projektu geologickej úlohy. Zmluva o prevode je platná po nadobudnutí právoplatnosti rozhodnutia ministerstva, ktorým sa udeľuje súhlas na zmluvný prevod. Úhrada za prieskumné územie v danom roku právoplatnosti rozhodnutia o určení prieskumného územia musí byť uhradená pred jeho prevodom. Nový držiteľ prieskumného územia je povinný dodržiavať podmienky rozhodnutia o určení prieskumného územia určené podľa § 23 ods. 12.

(4) Ak sa geologické práce nezačnú vykonávať podľa projektu geologickej úlohy do jedného roka odo dňa, v ktorom rozhodnutie o určení prieskumného územia nadobudlo právoplatnosť, alebo odo dňa nadobudnutia platnosti zmluvy o prevode podľa odseku 3, môže ministerstvo prieskumné územie zrušiť. Ak sa geologické práce nezačnú vykonávať ani do konca druhého roka od nadobudnutia právoplatnosti rozhodnutia o určení prieskumného územia, ministerstvo prieskumné územie zruší.

(5) Geologické práce sa považujú za začaté, ak sa na ich vykonávanie vynaložilo v prvom roku právoplatnosti rozhodnutia o určení prieskumného územia najmenej 10 % z plánovaného

celkového finančného rozsahu geologických prác, pri ložiskovom geologickom prieskume na ropu a horľavý zemný plyn najmenej 5 %.

(6) Plochu prieskumného územia môže ministerstvo na návrh držiteľa prieskumného územia zmeniť, ak zmena prispeje k splneniu účelu, na ktorý bolo vydané.

(7) Ministerstvo na návrh držiteľa prieskumného územia alebo z vlastného podnetu rozhodne o zrušení prieskumného územia, ak sa geologické práce trvalo zastavili pred uplynutím lehoty určenej v odseku 1.

§ 23 Konanie o určení, zmene alebo zrušení prieskumného územia

(1) Konanie o určení prieskumného územia sa začína dňom podania návrhu ministerstvu. Konanie o zmene prieskumného územia alebo o zrušení prieskumného územia sa začína dňom podania návrhu držiteľa prieskumného územia; toto konanie môže v prípade verejného záujmu začať ministerstvo aj z vlastného podnetu.

(2) Ak na tie isté vybrané geologické práce podá návrh na určenie prieskumného územia viac objednávateľov, ministerstvo začne konanie o určení prieskumného územia na návrh toho objednávateľa, ktorý podal návrh ako prvý.

(3) Návrh na určenie prieskumného územia v etape vyhľadávacieho geologického prieskumu a podrobného geologického prieskumu obsahuje

- a) názov alebo obchodné meno a sídlo objednávateľa a originál výpisu z obchodného registra alebo jeho úradne osvedčenú kópiu,
- b) názov prieskumného územia,
- c) názov a kód katastrálneho územia, názov a číselný kód obce, okresu a kraja, v ktorom sa prieskumné územie nachádza,
- d) cieľ geologickej úlohy a označenie vybraných geologických prác a etapy geologického prieskumu,
- e) geologické práce, ktorých použitie sa predpokladá,
- f) dátum predpokladaného skončenia vyhodnotenia geologickej úlohy,
- g) návrh vymedzenia prieskumného územia podľa odseku 12 písm. f) a odseku 13,
- h) rozpočet geologickej úlohy,
- i) návrh pomerných podielov obcí podľa veľkosti časti prieskumného územia v katastrálnych územiach.

(4) K návrhu na určenie prieskumného územia v etape vyhľadávacieho geologického prieskumu a podrobného geologického prieskumu objednávateľ, a ak ide o osobitné prieskumné územie zhotoviteľ geologických prác, priloží

- a) projekt geologickej úlohy,
- b) údaje o zhotoviteľovi geologických prác, ktorými sú názov, sídlo, číslo a dátum vydania geologického oprávnenia,
- c) údaje o iných prieskumných územiach, chránených územiach, chránených ložiskových územiach, prípadne o dobývacích priestoroch zasahujúcich do prieskumného územia alebo bezprostredne s ním hraničiacich,
- d) stanovisko krajského úradu životného prostredia
- e) stanoviská orgánov, ktoré sa vyjadrujú k projektu geologickej úlohy z hľadiska ochrany záujmov chránených osobitnými predpismi

(12) Rozhodnutie o určení prieskumného územia obsahuje

- a) názov prieskumného územia,
- b) vybrané geologické práce a etapu geologického prieskumu,
- c) názov alebo obchodné meno a sídlo držiteľa prieskumného územia, identifikačné číslo organizácie,
- d) údaj o tom, či je držiteľ prieskumného územia držiteľom geologického oprávnenia,
- e) názov a kód katastrálneho územia, názov a číselný kód obce, okresu a kraja, v ktorom sa prieskumné územie nachádza,
- f) súradnice lomových bodov prieskumného územia v súradnicovom systéme Jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej,
- g) rozlohu prieskumného územia v km²,
- h) pomerné podiely obcí,
- i) dobu platnosti určenia prieskumného územia,
- j) sumu úhrady za prieskumné územie,
- k) ak ide o ložiskový geologický prieskum, určenie práva nakladania s nerastmi získanými vyhľadávaním a prieskumom,
- l) podmienky vykonávania geologických prác.

(13) Súčasťou rozhodnutia o určení prieskumného územia je vymedzenie prieskumného územia na povrchu uzavretým geometrickým obrazcom v Základnej mape Slovenskej republiky v mierke 1 : 50 000 alebo v mierke 1 : 25 000.

§ 27 Osobitné prieskumné územie

(1) Ak sú vybrané geologické práce uvedené v § 21 ods. 2 financované z prostriedkov štátneho rozpočtu alebo z iných verejných prostriedkov, určí sa prieskumné územie zhotoviteľovi geologických prác určenému podľa osobitného predpisu (ďalej len „osobitné prieskumné územie“). Osobitné prieskumné územie určí ministerstvo na návrh zhotoviteľa geologických prác.

(2) Zhotoviteľ geologických prác, ktorému bolo určené osobitné prieskumné územie, je oprávnený vykonávať v ňom geologické práce uvedené v rozhodnutí o určení osobitného prieskumného územia.

(3) Na určenie osobitného prieskumného územia a na činnosť zhotoviteľa geologických prác v ňom sa nevzťahuje § 22 ods. 1, 3, 4 a 5, § 25 a 26.

(4) Na konanie o návrhu na určenie osobitného prieskumného územia, na zmenu osobitného prieskumného územia, na predĺženie platnosti určenia osobitného prieskumného územia a na zrušenie osobitného prieskumného územia sa primerane vzťahuje § 23.

(5) Ministerstvo môže na návrh zhotoviteľa geologických prác alebo z vlastného podnetu zrušiť rozhodnutie o určení osobitného prieskumného územia, ak sa geologické práce trvale zastavili alebo ak zhotoviteľ geologických prác počas jedného roku opätovne porušil povinnosti ustanovené týmto zákonom alebo podmienky rozhodnutia o určení osobitného prieskumného územia a zistené nedostatky neodstránil podľa § 37 ods. 4.

10.1.2 *Vyhláška 51/2008 Z.z. ktorou sa vykonáva geologický zákon v znení vyhlášky 22/2015 Z.z.*

§ 3 Geologický prieskum

(1) Geologický prieskum zahŕňa súbor geologických metód, geologických činností, najmä projektovanie, archívnu excerpciu, geologické mapovanie, zostavovanie geologických máp, sledovanie a riadenie geologických prác, geologickú dokumentáciu, vyhodnocovanie

geologických údajov, záverečné spracovanie, a ďalších druhov prác, najmä technické práce, geofyzikálne práce, geochemické práce, technologické práce, laboratórne práce, terénne meračské práce, vzorkovacie práce a geodetické činnosti, ktorými sa skúmajú a hodnotia jednotlivé zložky, procesy a vlastnosti geologického prostredia.

(2) Geologický prieskum sa uskutočňuje po etapách. Ak je to účelné, možno etapy spojiť.

(3) Ak je potrebné v geologickej úlohe použiť niekoľko rôznych geologických prieskumov, zaradi sa geologická úloha do toho geologického prieskumu, ktorý prevažuje.

§ 5 Hydrogeologický prieskum

(1) Hydrogeologickým prieskumom sa

- a) skúmajú hydrogeologické pomery vybraného územia, najmä interakcia vody vo všetkých skupenstvách pod povrchom terénu, a geologického prostredia, povrchových vôd, klimatických podmienok,
- b) skúmajú vody v pásme nasýtenia, podmienky využívania podzemných vôd vrátane minerálnych vôd a geotermálnych vôd na rôzne účely, podmienky ochrany ich množstva a ich kvalita a vzťah k ostatným zložkám životného prostredia,
- c) zisťujú a overujú geologické podmienky na využívanie geotermálnej energie, ktorej zdrojom je teplo suchých hornín.

(5) Pri rozdelení hydrogeologického prieskumu na etapy sa

a) vo vyhľadávacom prieskume

- 1. skúmajú hydrogeologické pomery vybraného hydrogeologického regiónu, rajónu, subrajónu a štruktúry,
- 2. určujú množstvá podzemnej vody v kategórii C a sumarizujú sa aj skôr určené využiteľné množstvá vo vyšších kategóriách,
- 3. skúmajú hydrogeologické pomery na účely komplexného územného plánovania, na ochranu a rozvoj životného prostredia,
- 4. zisťujú a overujú vhodné horninové štruktúry na zriaďovanie zariadení na využívanie geotermálnej energie a určujú sa množstvá geotermálnej energie,

b) v podrobnom prieskume

- 1. skúmajú hydrogeologické pomery území perspektívnych na odber podzemnej vody,

2. určujú využiteľné množstvá podzemnej vody na úrovni požadovanej na povolenie na odber podzemnej vody v kategórii B,
3. skúma kvantitatívny a kvalitatívny stav útvaru podzemnej vody,
4. skúmajú hydrogeologické pomery na zakladanie stavieb a na iné účely,
5. overuje rozsah horninových štruktúr podľa písmena a) bodu 4, vypočítava sa množstvo geotermálnej energie a spracúvajú sa geologické podklady na zriaďovanie a prevádzku zariadení na využívanie geotermálnej energie a zneškodňovanie odpadových vôd,

c) v doplnkovom prieskume

1. spresňujú informácie o hydrogeologických pomeroch a využiteľných množstvách podzemnej vody na základe výsledkov dlhodobého režimového pozorovania a merania v priebehu využívania zdrojov,
2. získavajú nové hydrogeologické informácie počas uskutočňovania stavieb alebo ich prevádzkovania.“.

§ 13 Projektovanie geologickej úlohy

- (1) Pri projektovaní geologickej úlohy sa vypracúva projekt geologickej úlohy (ďalej len „projekt“), a ak to vyžaduje rozsah a zložitosť geologickej úlohy, jeho súčasťou je aj prípravná dokumentácia.
- (2) V projekte sa určuje postup a podmienky odborného, efektívneho a bezpečného riešenia geologickej úlohy.
- (3) Projekt sa obmedzuje na nevyhnutný rozsah zodpovedajúci povahe a zložitosti geologickej úlohy a geologických prác potrebných na jej riešenie.
- (4) Projekt sa uchováva u zhotoviteľa geologických prác počas riešenia geologickej úlohy a počas troch rokov po jej skončení.
- (5) Pri vypracúvaní projektu sa zohľadnia výsledky už vykonaných výskumov a prieskumov, ako aj geologické poznatky o území a o jeho prírodných pomeroch a vykonajú sa nevyhnutné zistenia v teréne. Ak bola vypracovaná prípravná dokumentácia, vychádza sa pri vypracúvaní projektu z jej záverov.

§ 15 Prípravná dokumentácia

(1) Prípravná dokumentácia sa vypracúva ako všeobecné riešenie alebo ako prípravná štúdia; jej obsah a skladbu vymedzí objednávateľ.

(2) Vo všeobecnom riešení sa

- a) vymedzuje geologický zámer v širších hospodárskych, technických a vedeckých súvislostiach,
- b) preukazuje účelnosť, realizovateľnosť a racionálnosť geologického zámeru,
- c) uvádza prehľad prác a odhad nákladov,
- d) uvádzajú podklady na koncepcie a návrhy dlhodobých výhľadov a plánov geologických prác.

(3) V prípravnej štúdii sa

- a) hodnotia alebo spresňujú prognózne zdroje nerastov a očakávané množstvá podzemných vôd a posudzuje sa očakávaný hospodársky prínos,
- b) navrhuje a odôvodňuje optimálna lokalita geologického prieskumu,
- c) analyzujú a navrhujú rôzne metodické a technické postupy riešenia geologickej úlohy,
- d) hodnotí hospodársky prínos uvažovaných riešení a pripravujú sa podklady na ich ekonomické odôvodnenie

§ 16 Projekt

(1) Projekt obsahuje spôsob riešenia geologickej úlohy, jej zabezpečenie, harmonogram a predpokladané výsledky geologických prác. Súčasťou projektu financovaného z prostriedkov štátneho rozpočtu alebo z iných verejných zdrojov je odôvodnenie geologickej úlohy a rozpočet geologickej úlohy.

(2) V projekte možno určiť postupné vyhodnocovanie výsledkov geologických prác čiastkovými záverečnými správami.

(3) Projekt na titulnom liste obsahuje

- a) názov geologickej úlohy,
- b) dátum vyhotovenia,
- c) druh geologických prác,
- d) etapu geologického prieskumu,

e) názov objednávateľa a zhotoviteľa geologických prác a podpis štatutárneho orgánu objednávateľa a zhotoviteľa geologických prác, zástupcu zhotoviteľa geologických prác, ak bol ustanovený, a zodpovedného riešiteľa geologickej úlohy.

§ 17 Spôsob riešenia a zabezpečenie geologickej úlohy v projekte

(1) Spôsob riešenia geologickej úlohy v geologickej časti projektu obsahuje

- a) miestopisné vymedzenie skúmaného územia alebo skúmaného objektu obsahujúce primerane k veľkosti územia číslo mapového listu v mierke 1 : 10 000 alebo 1 : 50 000, názov a číselný kód kraja, okresu a obce, názov katastrálneho územia a kód katastra,
- b) cieľ geologickej úlohy uvádzajúci okruh otázok, ktoré treba riešiť s prihliadnutím na budúce hospodárske, technické, prípadne vedecké využitie ich výsledkov,
- c) východiskové údaje o území, o geologických činiteľoch podmienujúcich jej riešenie a doterajšiu geologickú preskúmanosť územia,
- d) vzťah k tvorbe a ochrane životného prostredia,
- e) postup riešenia a jeho odôvodnenie,
- f) špecifikáciu, počet a rozsah projektovaných druhov prác vrátane technologických prác a špeciálnych prác a skúšok s časovou nadväznosťou na ich realizáciu,
- g) kvalitatívne požiadavky na vykonávanie geologických prác a špecifikáciu kontrolných prác počas riešenia,
- h) mapy, rezy, výkresy, ktoré vyjadrujú cieľ geologickej úlohy a spôsob jej riešenia,
- i) doklady o spôsobe riešenia stretu záujmov, ak ide o stret záujmov,
- j) zoznam použitej literatúry a iných zdrojov.

(2) Zabezpečenie riešenia geologickej úlohy v technickej časti projektu obsahuje

- a) určenie technologických postupov projektovaných geologických prác vrátane podmienok na vykonávanie geologických prác,
- b) určenie technických prostriedkov na riešenie geologickej úlohy,
- c) určenie miesta a spôsobu ukladania nerastnej suroviny, vzoriek, vrtnej drviny, použitého vrtného výplachu, vypúšťania podzemných vôd a iných látok získaných pri vykonávaní geologických prác,
- d) určenie spôsobu nakladania s odpadmi vzniknutými pri vykonávaní geologických prác,

- e) riešenie likvidačných, prípadne zabezpečovacích a rekultivačných prác,
- f) spôsob zabezpečenia vstupov na pozemky, opatrenia na zabezpečenie záujmov chránených osobitnými predpismi a opatrenia na zamedzenie vzniku škôd pri vykonávaní geologických prác, spôsob náhrady škôd a opatrenia na zaistenie bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci a bezpečnosti prevádzky, protipožiarne opatrenia, sociálne a hygienické vybavenie.

§ 18 Rozpočet geologickej úlohy

- (1) Rozpočet geologickej úlohy obsahuje vyčíslenie predpokladaných nákladov na geologické práce zahrnuté do projektu vrátane nákladov na projekt, vypracovanie a posudzovanie záverečnej správy, zabezpečenie, údržbu a likvidáciu geologických diel a geologických objektov a dohodnutej rezervy na krytie nákladov, ktoré nemožno v projekte predvídať.
- (2) Rozpočet geologickej úlohy obsahuje vyčíslenie predpokladaných nákladov na geologickú úlohu podľa druhu prác. Druhom prác sa rozumejú najmä geologické činnosti, technické práce, geofyzikálne práce, geochemické práce, technologické práce, laboratórne práce, terénne meračské práce, vzorkovacie práce a geodetické činnosti.

§ 20 Osobitné náležitosti projektu

Osobitnými náležitosťami projektu sú, ak ide o

- b) hydrogeologický prieskum,
 - 1. údaje o množstvách podzemných vôd v záujmovom území a údaje o súčasných odberoch alebo o množstvách geotermálnej energie,
 - 2. očakávané množstvá podzemných vôd a ich kvalita podľa kategórií, ak je cieľom geologickej úlohy overenie množstiev a kvality podzemných vôd alebo množstvá geotermálnej energie,

§ 24 Podmienky riešenia geologickej úlohy

- (1) Pri riešení geologickej úlohy sa
 - a) postupuje podľa harmonogramu geologickej úlohy, ale najskôr sa uskutočňujú geologické práce, ktorých výsledky môžu slúžiť na vykonanie následných geologických prác,

- b) postupuje podľa technických požiadaviek a technologických podmienok uvedených v projekte a právnych predpisov na zaistenie bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci,
 - c) zabezpečujú, prípadne vyhotovujú mapové podklady a zameriava sa na geologické práce podľa osobitných predpisov a slovenských technických noriem s presnosťou zodpovedajúcou účelu ich využitia.
- (2) Pri riešení geologickej úlohy sa postupuje tak, aby sa čo najmenej zasahovalo do práv a právom chránených záujmov vlastníka nehnuteľnosti, správcu alebo nájomcu a aby nevznikali škody, ktorým možno zabrániť.
- (3) Zhotoviteľ geologických prác môže vykonanie niektorých geologických prác alebo ucelených častí riešenia geologickej úlohy zadať inému zhotoviteľovi geologických prác len so súhlasom objednávateľa, čo ho nezbavuje zodpovednosti za ich odborné vykonanie.

§ 26 Zmena projektu

- (1) Zhotoviteľ geologických prác pri riešení geologickej úlohy navrhne zmenu projektu, ak zistí, že
- a) na riešenie geologickej úlohy treba zvoliť na základe čiastkových výsledkov riešenia zásadne iný metodický alebo technický postup, ako určil projekt, alebo vykonať podstatne väčší rozsah geologických prác, ako bol schválený,
 - b) nemožno dosiahnuť ciele geologickej úlohy sledované projektom, najmä ak sa geologické pomery a výsledky riešenia podstatne líšia od predpokladov uvažovaných v projekte.
- (2) Zmena projektu obsahuje primerane náležitosti uvedené v § 16 ods. 1 a 3 a dôvody vypracovania zmeny projektu.

§ 26a Záměna geologických prác

- (1) Zhotoviteľ geologických prác pri riešení geologickej úlohy navrhne záměnu geologických prác, ak zistí, že bez zmeny schváleného rozpočtu geologickej úlohy je potrebné vykonať projektované druhy prác v inom rozsahu.
- (2) Záměnou geologických prác možno zvýšiť alebo znížiť cenu druhu prác podľa § 18 ods. 2, okrem geologických činností, najviac o 20 %.
- (3) Na čerpanie rozpočtovej rezervy sa odsek 2 nevzťahuje.
- (4) Na záměnu geologických prác sa primerane vzťahujú § 16 ods. 1 a 3.

§ 29 Prvotná geologická dokumentácia

(2) Prvotná geologická dokumentácia zaznamenáva údaje, skutočnosti a javy získané na skúmanom území, prípadne v geologickom diele alebo geologickom objekte. Zahŕňa najmä písomné a grafické, prípadne fotografické záznamy dokumentujúce geologické práce, opis a vyznačenie odberov vzoriek, výsledky ich rozborov a skúšok, protokoly o zabezpečení, o údržbe a o likvidácii geologických diel a geologických objektov a o vyrad'ovaní geologickej dokumentácie a evidenčné knihy.

(3) Súčasťou prvotnej písomnej geologickej dokumentácie a prvotnej grafickej geologickej dokumentácie sú aj prevádzkové záznamy.

§ 31 Prevádzkové záznamy

(1) Na pracovisku technických prác sa zabezpečí vedenie prevádzkových záznamov formou denného hlásenia, vrtného denníka, banského denníka alebo stavebného denníka.

(2) Do prevádzkových záznamov sa zapisujú mená a priezviská osôb, ktoré vykonávajú geologické práce, ich vymedzenie, kvalita a čas vykonávania týchto prác, miesto odberu a druh geologických vzoriek odoberaných počas realizácie prác, čas, druh a výsledky technických skúšok a meraní, opis zvláštnych geologických a iných prejavov, ako sú napríklad výrony vody, plynu, tekutých pieskov, uhl'ovodíkov, strata vrtného výplachu a výskyt kaverny. Ďalej sa zapisujú alebo zakladajú príkazy a opatrenia riadiacich, dozorných a kontrolných orgánov týkajúce sa najmä usmerňovania prác na pracovisku a bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci.

(3) Prevádzkové záznamy sa vedú súbežne s vykonávaním technických prác na účely preukázania ich priebehu, dosahovaných výsledkov a pre potreby ich kontroly.

§ 37 Výsledky riešenia geologických prác

(1) Zhotoviteľ geologických prác spracuje výsledky riešenia geologickej úlohy v záverečnej správe, a to aj vtedy, ak sa nedosiahol cieľ alebo ak sa riešenie vykonalo len čiastočne.

(2) Výsledky riešenia geologickej úlohy možno vyhodnocovať aj čiastkovými záverečnými správami.

(3) Zhotoviteľ geologických prác vyhodnotí výsledky geologického výskumného projektu alebo grantu financovaného zo štátneho rozpočtu alebo iných verejných zdrojov (ďalej len

„výskumný projekt alebo grant“) v písomnej správe v jazyku, ktorý požaduje objednávatel' s abstraktom v štátnom jazyku.

(4) Osoba vykonávajúca odborný geologický dohľad podľa § 9b ods. 1 spracuje záverečnú správu o dosiahnutí cieľov geologickej úlohy uvedenej v § 9 a 9a.

§ 39 Osobitné náležitosti záverečnej správy

(3) Osobitné náležitosti záverečnej správy s výpočtom množstiev podzemnej vody sú

- a) návrh na schválenie množstiev podzemnej vody,
- b) podmienky a spôsob ochrany a využívania týchto vôd,
- c) stav množstiev podzemných vôd podľa kategórií.

(4) Osobitné náležitosti záverečnej správy s výpočtom množstva geotermálnej energie sú

- a) návrh na schválenie množstva geotermálnej energie,
- b) výpočet množstva geotermálnej energie podľa kategórií,
- c) podmienky a spôsob ochrany a využívania geotermálnej energie.

§ 40 Lehoty na vypracovanie záverečnej správy

(1) Lehota na vypracovanie záverečnej správy sa určí v projekte, alebo ak je rozsah prác na vyhodnotení a vypracovaní záverečnej správy väčší, ako sa predpokladalo, zhotoviteľ geologických prác dohodne s objednávatel'om lehotu na vypracovanie záverečnej správy samostatne.

(2) Lehota na vypracovanie záverečnej správy nesmie byť dlhšia ako jeden rok od skončenia riešenia geologickej úlohy. V lehote na vypracovanie záverečnej správy je zahrnuté aj jej odovzdanie objednávatel'ovi.

§ 42 Kategorizácia množstiev vôd

(1) Ak sa v hydrogeologickom celku zistia podzemné vody, ich množstvá sa zaradia do príslušnej kategórie v závislosti od stupňa ich overenia a poznania hydrogeologických pomerov.

(2) Prírodné množstvá podzemnej vody sa zaraďujú do kategórie C.

(3) Využiteľné množstvá podzemnej vody sa zaraďujú do kategórií A, B a C.

(4) Do kategórie C sa zaraďujú množstvá podzemnej vody regiónu, rajónu, subrajónu a štruktúry vypočítané na základe komplexného vyhodnotenia archívnych geologických materiálov, nových geologických prác, najmä hydrogeologických prác, na úrovni umožňujúcej navrhnúť optimálny účel využitia podzemnej vody v perspektívnych oblastiach na jej zachytenie.

(5) Do kategórie B sa zaraďujú využiteľné množstvá podzemnej vody vypočítané na základe komplexného vyhodnotenia archívnych geologických materiálov a nových geologických prác, najmä hydrogeologických prác, na úrovni potrebnej na povolenie odberu podzemnej vody v záchytnom území na rôzne ciele.

(6) Do kategórie A sa zaraďujú využiteľné množstvá podzemnej vody vypočítané v rámci doplnkového prieskumu na základe komplexného vyhodnotenia archívnych geologických materiálov a nových geologických prác, preverené dlhodobým meraním počas využívania zdrojov a monitorovaním kvantity a kvality zdroja najmenej počas troch rokov.

§ 43 Spôsob výpočtu množstiev vôd

(1) Výpočet množstiev podzemnej vody pri hydrogeologickom prieskume sa vyhotovuje ako súčasť záverečnej správy geologickej úlohy.

§ 44 Posudzovanie a schvaľovanie záverečnej správy

Záverečná správa s výpočtom zásob ložiska, s výpočtom množstiev vôd v hydrogeologickom celku, záverečná správa s analýzou rizika znečisteného územia, záverečná správa s výpočtom množstva geotermálnej energie a záverečná správa s výpočtom objemu prírodných horninových štruktúr a podzemných priestorov na účely ukladania sa posudzuje a schvaľuje do šiestich mesiacov od jej predloženia inak sa v tejto lehote vráti na doplnenie. Doplnená záverečná správa sa posudzuje a schvaľuje do troch mesiacov od jej doplnenia.

§ 45 Evidencia zásob výhradných ložísk a výsledkov hydrogeologického prieskumu

Evidenciu výsledkov geologického výskumu a prieskumu na spracovanie a aktualizáciu stavu preskúmanosti územia Slovenskej republiky vedie Štátny geologický ústav Dionýza Štúra

PRÍLOHA Č. 3 K VYHLÁŠKE Č. 51/2008 Z. Z.

Postup a spôsob výpočtu množstiev podzemnej vody v jednotlivých kategóriách

1. Pri množstvách podzemnej vody v kategórii C sa zisťuje

1.1 prírodné množstvo podzemnej vody, a to prírodné zdroje a prírodné zásoby podzemných vôd

1.1.1 v hydrogeologických štruktúrach s prevažne voľnou hladinou podzemných vôd prírodné zdroje prostredníctvom hydrologickej bilancie a následných separačných metód rozčlenenia odtoku. V odôvodnených prípadoch sa stanovujú aj prírodné zásoby, a to objemovými metódami. Vyžaduje sa režimové pozorovanie v dĺžke minimálne jeden rok vo väzbe na dlhodobé rady pozorovaní,

1.1.2 v hydrogeologických štruktúrach s napätými zvodňami sa prírodné množstvá hodnotia objemovými a ďalšími metódami. V odôvodnených prípadoch sa vykonávajú režimové pozorovania,

1.1.3 skryté (cezhraničné) prítoky a odtoky podzemných vôd do hodnotených a z hodnotených hydrogeologických štruktúr uvedených v bode 1.1.1,

1.2 využiteľné množstvo podzemnej vody v nadväznosti na prírodné množstvo na takej úrovni, ktorá by umožňovala rozhodnúť o perspektívnosti odberov a posúdiť ich zabezpečenosť,

1.3 perspektívne oblasti na vodohospodárske a iné využitie podzemnej vody s predpokladom využiteľného množstva vody určeného na základe potenciálnych, ekologicky prijateľných odberov z navrhovaných a existujúcich záchytných zariadení,

1.4 kvalita podzemnej vody v širších regionálnych súvislostiach, ako aj z hľadiska využitia, úpravy, a prípadne zneškodňovania vrátane vyhodnotenia relevantných informácií o kvalite povrchových vôd a zrážok,

1.5 charakteristika zdrojov znečistenia, hydrogeologické aspekty ochrany množstva a kvality podzemnej vody,

1.6 upozornenie na prípadné stretanie sa záujmov s orgánmi a organizáciami, ktorých činnosť ovplyvňuje množstvo a kvalitu podzemnej vody,

1.7 vzťah novozískaných poznatkov k platnej hydrogeologickej rajonizácii.

2. Pri množstvách podzemnej vody v kategórii B sa zisťuje

- 2.1 najvhodnejšie záchytné územie na odber podzemnej vody na základe realizovaných geologických prác,
- 2.2 využiteľné množstvo podzemnej vody určené na základe vyhodnotenia hydrogeologických pomerov, najmä priestorovej charakteristiky hydrogeologických kolektorov, hydraulických parametrov a okrajových podmienok určených na základe poloprevádzkových hydrodynamických skúšok, režimu podzemnej vody z minimálne dvojročného obdobia pozorovaní a vyhodnotenia vzťahu podzemných a povrchových vôd,
- 2.3 technické podmienky odberu podzemnej vody,
- 2.4 ovplyvnenie prírodných pomerov odbermi s ohľadom na ekologické podmienky,
- 2.5 kvalita podzemnej vody s takou presnosťou, aby bolo možné riešiť otázky zachytávania podzemnej vody vo vodárenských lokalitách, v geotermálnych lokalitách a zároveň riešiť zneškodňovanie odpadových vôd,
- 2.6 prognóza vývoja výdatnosti, hladiny a kvality podzemnej vody,
- 2.7 návrh kvantitatívnej a kvalitatívnej ochrany podzemnej vody a ochranných pásem záchytných zariadení,
- 2.8 návrh prevádzkového pozorovania výdatnosti, hladiny a kvality podzemnej vody v záchytnom území.

3. Pri množstvách podzemnej vody v kategórii A sa zisťuje

- 3.1 využiteľné množstvo podzemnej vody na základe vyhodnotenia realizovaných geologických prác a minimálne trojročného prevádzkového pozorovania výdatnosti, hladiny a kvality podzemnej vody v záchytnom území,
- 3.2 zdroje znečistenia a ich vplyv na kvalitu podzemnej vody,
- 3.3 ochrana podzemnej vody,
- 3.4 požiadavky na úpravu kvality podzemnej vody,
- 3.5 účinok trvalého odberu využiteľného množstva vody na kvantitu a kvalitu podzemných vôd, povrchových vôd, prípadne na ďalšie zložky životného prostredia,
- 3.6 návrh na spresnenie ochranných pásem záchytných zariadení vyplývajúci z výsledkov revízie ochranných opatrení určených v kategórii B,
- 3.7 spresnený návrh na prevádzkové pozorovanie využívania podzemnej vody, jeho vplyvu na životné prostredie a na zneškodňovanie odpadových vôd.

PRÍLOHA Č. 8 K VYHLÁŠKE Č. 51/2008 Z. Z.

Obsah a náležitosti záverečnej správy s výpočtom množstva geotermálnej energie

- Titulná strana
- Názov geologickej úlohy
- Číslo geologickej úlohy
- Druh geologických prác
- Etapa geologického prieskumu
- Objednávateľ
- Zhotoviteľ geologických prác (s menom a priezviskom štatutárneho orgánu a zástupcu, ak bol ustanovený, a ich podpismi)
- Zodpovedný riešiteľ geologickej úlohy (s podpisom)
- Riešiteľ geologickej úlohy (s podpisom)
- Dátum vyhotovenia záverečnej správy

TEXTOVÁ ČASŤ

1. Miestopisné vymedzenie územia obsahujúce číslo mapového listu v mierke 1 : 10 000 alebo 1 : 50 000, názov a číselný kód kraja, okresu a obce, názov katastrálneho územia a kód katastra
2. Cieľ geologickej úlohy
3. Údaje o projekte a jeho zmenách
4. Charakteristika prírodných pomerov skúmaného územia (najmä geomorfologická charakteristika, klimatická charakteristika, hydrologická charakteristika, geologická charakteristika, hydrogeologická charakteristika a charakteristika častí územia chránených osobitnými predpismi)
5. Doterajšia geologická preskúmanosť (údaje o vykonaných prácach a ich výsledkoch, najmä vo vzťahu k riešenej problematike)
6. Postup riešenia geologickej úlohy
 - 6.1. Metodika, postup a časová nadväznosť realizovaných prác
 - 6.2. Technické práce
 - 6.3. Geologické činnosti

- 6.4. Vzorkovacie práce, najmä druh a počet vzoriek, spôsob vzorkovania
- 6.5. Laboratórne práce, najmä druh a počet rozborov a skúšok, kontrolné analýzy
- 6.6. Geodetické činnosti
- 6.7. Iné práce
- 6.8. Spôsob nakladania s odpadmi
- 6.9. Spôsob zabezpečenia alebo likvidácie geologických diel a geologických objektov
- 6.10. Vykonané opatrenia na elimináciu alebo minimalizáciu vplyvu technických prác na životné prostredie
- 6.11. Spôsob digitálneho spracovania údajov
- 7. Výsledky riešenia geologickej úlohy
 - 7.1. Priestorové vymedzenie geotermálneho rezervoáru
 - 7.2. Termofyzikálne parametre hornín
 - 7.3. Kvalitatívne a kvantitatívne parametre prenosného média
- 8. Výpočet množstiev geotermálnej energie
 - 8.1. Metodika výpočtu množstiev geotermálnej energie
 - 8.2. Výpočet tepelno-energetického potenciálu
 - 8.3. Kategorizácia a využiteľnosť geotermálnej energie
- 9. Vplyv využívania zdroja geotermálnej energie na ložiskovú teplotu geologického prostredia
- 10. Návrh na optimálne využitie zdroja geotermálnej energie a jeho ochranu
 - 10.1. Spôsob exploatacie zdroja geotermálnej energie
 - 10.2. Monitoring zdroja geotermálnej energie
 - 10.3. Návrh ochranných opatrení
 - 10.4. Vplyv využívania zdroja geotermálnej energie na životné prostredie
- 11. Ekonomický prínos riešenia geologickej úlohy
- 12. Miesto a spôsob uloženia geologickej dokumentácie a osobitných správ, návrh na jej vyradenie
- 13. Závery a odporúčania
- 14. Zoznam použitej literatúry a iných zdrojov

GRAFICKÉ PRÍLOHY

1. Situačná mapa skúmaného územia v mierke umožňujúcej miestopisnú orientáciu
2. Geologická mapa skúmaného územia
3. Geologické rezy
4. Účelové a tematické mapy
5. Dokumentácia geologických diel a objektov
6. Grafy meraní a skúšok
7. Iná geologická dokumentácia
8. Fotodokumentácia

TEXTOVÉ PRÍLOHY

1. Právoplatné rozhodnutie o určení prieskumného územia alebo osobitného prieskumného územia
2. Záznamy údajov z terénnych skúšok a pozorovaní
3. Protokoly z rozborov vzoriek hornín, kvapalín a plynov
4. Tabuľky použitých analýz, rozborov a skúšok a kontrolných skúšok
5. Výsledky geodetických činností
6. Iné správy dokumentujúce výsledky výpočtu geotermálnej energie
7. Návrh na schválenie množstiev geotermálnej energie, ktorý obsahuje identifikačné údaje o geotermálnom rezervoári, názov katastrálneho územia, okresu a kraja, výpočet množstva geotermálnej energie podľa kategórií,
8. Protokoly o zabezpečení a udržiavaní geologických diel, ktoré obsahujú názov a lokalizáciu geologického diela, charakteristiku geologického diela, spôsob zabezpečenia a udržiavania, zaistenie bezpečnosti povrchu
9. Protokoly o likvidácii geologických diel, ktoré obsahujú názov a lokalizáciu geologického diela, charakteristiku geologického diela, spôsob likvidácie, zaistenie bezpečnosti povrchu, zamedzenie trvalému narušeniu pôvodných hydrogeologických pomerov, plynových pomerov a voľnému vytekaniu podzemných vôd, uvedenie použitých pozemkov do predošlého vzťahu

10.1.3 Vodný zákon

§ 2 Vymedzenie základných pojmov

Na účely tohto zákona

- f) útvarom podzemnej vody je vymedzené množstvo podzemnej vody hydrogeologického kolektora alebo hydrogeologických kolektorov

§ 3 Rozdelenie vôd

(1) Vody sa členia na povrchové vody a podzemné vody.

(3) Podzemnými vodami sú všetky vody nachádzajúce sa pod povrchom zeme v pásme nasýtenia a v bezprostrednom kontakte s pôdou alebo s pôdnym podložím vrátane podzemných vôd slúžiacich ako médium na akumuláciu, transport a exploatáciu zemského tepla z horninového prostredia (ďalej len „geotermálna voda“). Podzemnými vodami zostávajú podzemné vody aj po ich odkrytí prirodzeným prepadom ich nadložia, banskou činnosťou alebo činnosťou vykonávanou banským spôsobom alebo vykonaním inej obdobnej činnosti.

§ 6 Vodná bilancia

(5) Ten, kto odoberá povrchovú vodu alebo podzemnú vodu z jedného odberného miesta v množstve nad 15 000 m³ ročne alebo nad 1 250 m³ mesačne na uspokojovanie osobných potrieb domácnosti a ten, kto odoberá povrchovú vodu alebo podzemnú vodu na základe povolenia podľa § 21 ods. 1 písm. a) prvého bodu, písm. b) prvého bodu a písm. h) až j) alebo využíva osobitné vody, je povinný oznamovať údaje o týchto odberoch a údaje určené v povolení podľa § 21 ods. 2 písm. b) a c) raz ročne poverenej osobe, ktorá ich poskytne správcovi vodohospodársky významných vodných tokov

(6) Ten, kto vypúšťa odpadové vody alebo osobitné vody do povrchových vôd alebo podzemných vôd v množstve nad 10 000 m³ ročne alebo nad 1 000 m³ mesačne z domácnosti a ten, kto produkuje a vypúšťa odpadové vody, osobitné vody alebo geotermálne vody do povrchových vôd alebo podzemných vôd na základe povolenia podľa § 21 ods. 1 písm. c), je povinný oznamovať údaje o týchto vypúšťaných vodách a údaje určené v povolení podľa § 21 ods. 2 písm. d) raz ročne poverenej osobe, ktorá ich poskytne správcovi vodohospodársky významných vodných tokov.

§ 21 Povolenie na osobitné užívanie vôd

(1) Povolenie na osobitné užívanie vôd je potrebné, ak nejde o používanie vôd podľa § 18 až 20

b) pri podzemných vodách na

1. ich odber,
2. ich akumuláciu,
3. ich čerpanie na účel znižovania ich hladiny,
4. umelé zvyšovanie ich množstva povrchovou vodou,

c) na vypúšťanie odpadových vôd, osobitných vôd alebo geotermálnych vôd do povrchových vôd alebo do podzemných vôd,

(2) Povolenie na osobitné užívanie vôd, ktoré možno vykonávať len s užívaním vodnej stavby, je potrebné vydať pred vydaním stavebného povolenia na vodnú stavbu alebo súčasne so stavebným povolením v spoločnom konaní, ak nejde o existujúcu vodnú stavbu alebo povolenú vodnú stavbu. Povolenie na osobitné užívanie vôd vydáva orgán štátnej vodnej správy fyzickým osobám a právnickým osobám na určitý čas. Orgán štátnej vodnej správy určí účel, rozsah, čas povolenia na osobitné užívanie vôd, povinnosti a podmienky, za ktorých sa vydáva, pričom v povolení

d) na vypúšťanie odpadových vôd, osobitných vôd alebo geotermálnych vôd určí miesto a spôsob ich vypúšťania, množstvo vypúšťaných odpadových vôd, osobitných vôd alebo geotermálnych vôd a prípustné hodnoty znečistenia podľa jednotlivých ukazovateľov (ďalej len „prípustná hodnota znečistenia“) s výnimkou vypúšťania odpadových vôd z odľahčovacích objektov podľa § 36 ods. 13 a vypúšťania vôd do toho istého hydrogeologického kolektora podľa § 37 ods. 7; pri vypúšťaní odpadových vôd aj povinnosť sledovať kvalitatívne a kvantitatívne hodnoty a oznamovať výsledky tohto sledovania orgánu štátnej vodnej správy.

(3) Povolenie na osobitné užívanie vôd nie je potrebné na

a) odbery povrchových vôd a podzemných vôd pri zisťovaní a hodnotení stavu týchto vôd,

(4) Orgán štátnej vodnej správy vydá povolenie na

b) vypúšťanie odpadových vôd, osobitných vôd alebo geotermálnych vôd do povrchových vôd najviac na desať rokov,

- d) vypúšťanie odpadových vôd, osobitných vôd alebo geotermálnych vôd do podzemných vôd najviac na šesť rokov
- (5) Orgán štátnej vodnej správy môže platnosť povolenia predĺžiť, ak sa nezmenia podmienky, za ktorých bolo povolenie vydané.
- (6) Povolenie na odber povrchových vôd alebo podzemných vôd a na využívanie hydroenergetického potenciálu povrchových vôd a na využívanie energetického potenciálu podzemných vôd nezaručuje odber týchto vôd v povolenom množstve ani v potrebnej kvalite.
- (7) Orgán štátnej vodnej správy je viazaný pri povoľovaní odberu
- b) podzemných vôd hladinou podzemnej vody, ktorá ešte umožňuje trvalo udržateľné využívanie vodných zdrojov a riadnu funkciu vodných útvarov s nimi súvisiacich (ďalej len „minimálna hladina podzemných vôd“) a ministerstvom schválenou záverečnou správou^{31a} s výpočtom množstiev podzemnej vody,
 - c) povrchovej vody a podzemnej vody stanoviskom správcu vodného toku a stanoviskom správcu vodohospodársky významného vodného toku.

§ 27 Súhlas

(1) Súhlas orgánu štátnej vodnej správy sa vydáva na uskutočnenie, zmenu alebo odstránenie stavieb a zariadení alebo na činnosti, na ktoré nie je potrebné povolenie podľa tohto zákona, ktoré však môžu ovplyvniť stav povrchových vôd a podzemných vôd. Súhlas je potrebný, ak ide o

- g) vrty na využívanie energetického potenciálu podzemných vôd, ktorými sa neodoberá alebo nečerpá podzemná voda.

§ 28 Vyjadrenie

(1) Pred zhotovením projektovej dokumentácie stavby alebo zmeny stavby je stavebník povinný požiadať orgán štátnej vodnej správy o vyjadrenie k zámeru stavby, či je predpokladaná stavba alebo zmena stavby možná z hľadiska ochrany vodných pomerov a za akých podmienok ju možno uskutočniť a užívať.

(2) Vyjadrenie je potrebné aj na

- e) určenie prieskumného územia, zväčšenie prieskumného územia alebo predĺženie doby platnosti prieskumného územia

§ 29 Evidencia o vodách

(1) Evidencia o vodách je základnou evidenciou o stave vôd, o právach a povinnostiach právnických osôb a fyzických osôb pri nakladaní s vodami a ich ochrane. Evidujú sa v nej rozhodnutia orgánov štátnej vodnej správy a ich zmeny, údaje o zisťovaní výskytu a hodnotení stavu povrchových vôd a podzemných vôd a ďalšie údaje potrebné na výkon štátnej vodnej správy.

(2) Evidencia o vodách sa člení na evidenciu

- a) vodných útvarov povrchových vôd a podzemných vôd,
- b) množstiev a kvality vody vo vodných útvaroch vrátane ich ovplyvňovania ľudskou činnosťou,
- c) práv a povinností vyplývajúcich z rozhodnutí orgánov štátnej vodnej správy,
- d) chránených území a ostatných území chránených podľa tohto zákona.

(3) Orgány štátnej vodnej správy vedú evidenciu nimi vydaných povolení, súhlasov a iných rozhodnutí a poverená osoba vedie súhrnnú evidenciu o vodách podľa členenia v odseku 2.

(5) Evidencia o vodách je prístupná verejnosti. Každý má právo robiť si z nej výpisy u poverenej osoby a na príslušnom orgáne štátnej vodnej správy.

§ 32 Ochranné pásma vodárenských zdrojov

(1) Na ochranu výdatnosti kvality a zdravotnej bezchybnosti vody vodárenských zdrojov, ktoré sa využívajú, orgán štátnej vodnej správy určí ochranné pásma na základe posudku orgánu na ochranu zdravia. Ak to vyžadujú závažné okolnosti, môže orgán štátnej vodnej správy určiť ochranné pásma aj pre využiteľné vodárenské zdroje a pre vodné zdroje určené na odber pre pitnú vodu s kapacitou nižšou, ako sú definované vodárenské zdroje. Určené ochranné pásma sú súčasne pásmami hygienickej ochrany.

(2) Ochranné pásma vodárenských zdrojov sa členia na ochranné pásmo I. stupňa, ktoré slúži na jeho ochranu v bezprostrednej blízkosti miesta odberu vôd alebo záchytného zariadenia, a na ochranné pásmo II. stupňa, ktoré slúži na ochranu vodárenského zdroja pred ohrozením zo vzdialenejších miest. Na zvýšenie ochrany vodárenského zdroja môže orgán štátnej vodnej správy určiť aj ochranné pásmo III. stupňa.

(3) Ak podmienky na území ochranného pásma I. stupňa zabezpečujú v dostatočnej miere ochranu výdatnosti, kvality a zdravotnej bezchybnosti vodárenského zdroja, ďalšie stupne ochranných pásiem sa neurčujú.

(4) Návrh na určenie ochranných pásiem vodárenského zdroja je povinný podať ten, kto má povolenie na odber vody, alebo ten, kto žiada o povolenie na odber vody z vodárenského zdroja. Pri odberoch vody z vodárenských nádrží návrh na určenie ochranných pásiem je povinný podať správca vodohospodársky významných vodných tokov alebo stavebník vodnej stavby slúžiacej na vzdúvanie vody v tejto vodárenskej nádrži. Súčasťou návrhu na určenie ochranných pásiem vodárenského zdroja sú záverečná správa z podrobného hydrogeologického prieskumu a geometrický plán, ak sa pozemky tvoriace ochranné pásmo vodárenského zdroja I. stupňa rozdeľujú alebo zlučujú.

(5) Rozhodnutím o určení ochranných pásiem vodárenského zdroja sa určia ich hranice a spôsob ochrany, najmä zákazy alebo obmedzenia činností, ktoré poškodzujú alebo ohrozujú množstvo a kvalitu vody alebo zdravotnú bezchybnosť vody vodárenského zdroja, ako aj technické úpravy na ochranu vodárenského zdroja a iné opatrenia, ktoré sa majú v ochrannom pásme vykonať. Práva a povinnosti vyplývajúce z rozhodnutí o určení ochranných pásiem vodárenského zdroja prechádzajú na ďalšieho nadobúdateľa alebo užívateľa majetku, s ktorým sú tieto práva a povinnosti spojené.

§ 52 Vodné stavby

(1) Vodnými stavbami sú stavby, ich súčasti alebo ich časti, ktoré umožňujú osobitné užívanie vôd alebo iné nakladanie s vodami. Súčasťou vodnej stavby sa rozumie ďalší objekt, ktorý súvisí s prevádzkovým, výrobným alebo technologickým zariadením pri prevádzke vodnej stavby vrátane obslužných komunikácií a inžinierskych sietí, ktoré slúžia k jej činnosti.

Vodnými stavbami sú najmä

d) studne, stavby vodovodných potrubí, vodovodov a ďalšie vodárenské objekty samostatne slúžiace na účely zásobovania vodou

e) stavby stôk, stokové siete vrátane objektov na nich, čistiarne odpadových vôd a iné stavby určené na zneškodňovanie odpadových vôd a osobitných vôd a na ich vypúšťanie do povrchových vôd, podzemných vôd alebo do banských vôd a stavby určené na predchádzajúce čistenie odpadových vôd pred ich vypúšťaním do verejnej kanalizácie,

h) stavby umožňujúce využívanie vôd najmä na hromadnú rekreáciu a vodné športy,

j) vodovodné prípojky, ak

1. slúžia na dodávku vody do priemyselných stavieb a poľnohospodárskych stavieb,
2. slúžia na zásobovanie skupiny stavieb, ak to vyžaduje vlastný systém rozvodných potrubí,
3. sú zriadené k stavbe, pre ktorú je zhotovené zariadenie na zvýšenie tlaku vody,

l) stavby umožňujúce využívanie energetického potenciálu podzemných vôd

§ 60 Okresný úrad v sídle kraja

(1) Okresný úrad v sídle kraja vo veciach štátnej vodnej správy

a) rozhoduje v správnom konaní v prvom stupni štátnej vodnej správy podľa tohto zákona, ak ide o

1. medzinárodné vody alebo hraničné vody,
3. vodnú stavbu a s ňou spojené osobitné užívanie geotermálnych vôd,
4. vodnú stavbu s energetickým zariadením s inštalovaným výkonom nad 100 kW a s ňou spojené osobitné užívanie vôd

d) vedie evidenciu o vodách (§ 29),

§ 78 Platby za užívanie vôd

(1) Platbou za užívanie vôd na účely tohto zákona je finančná náhrada nákladov za poskytnuté výrobky a ostatné vodohospodárske služby, za využívanie hydroenergetického potenciálu a za využívanie energetickej vody.

§ 79 Poplatky za užívanie vôd

(1) Poplatkom za užívanie vôd na účely tohto zákona je finančná náhrada za

- a) odber podzemných vôd,
- d) vypúšťanie geotermálnych vôd do povrchových vôd.

(4) Poplatky za vypúšťanie odpadových vôd platí ten, kto vypúšťa odpadové vody alebo osobitné vody do povrchových vôd alebo podzemných vôd v množstve nad 10 000 m³ za kalendárny rok alebo nad 1 000 m³ za mesiac a prekročí ustanovené limitné hodnoty znečistenia v príslušnom ukazovateli znečistenia ustanovené vo vykonávacom predpise vydanom podľa §

81 ods. 1 písm. e) a ten, kto vypúšťa geotermálne vody do povrchových vôd v množstve nad 10 000 m³ za kalendárny rok alebo nad 1 000 m³ za mesiac .

(8) Návrh na výšku poplatkov podáva na základe vlastného výpočtu ten, kto tieto vody užíva v lehote určenej v osobitnom predpise;^{72a)} ak nepredložia návrh na určenie výšky poplatkov v určenej lehote, správca vodohospodársky významných vodných tokov vypočíta výšku poplatkov na základe povolenia podľa § 21 ods. 1 písm. b) prvého bodu alebo § 21 ods. 1 písm. c). Správca vodohospodársky významných vodných tokov určuje skutočnú výšku poplatkov za kalendárny rok a výšku preddavkov, sleduje platenie preddavkov a vydáva výkaz o výške nedoplatkov alebo o výške preplatiek podľa osobitného predpisu.⁷³⁾ Správca vodohospodársky významných vodných tokov je oprávnený vykonávať kontrolu skutočného odoberania podzemných vôd alebo vypúšťania odpadových vôd alebo osobitných vôd alebo geotermálnych vôd do povrchových vôd alebo vypúšťania odpadových vôd do podzemných vôd v priebehu kalendárneho roka.

10.1.4 *Vyhláška č. 418/2010 Z. z. o vykonaní niektorých znení vodného zákona*

§ 3 Identifikácia útvaru podzemnej vody

(1) Identifikáciou útvaru podzemnej vody je vymedzenie objemu podzemnej vody v hydrogeologickom kolektore, ktorý umožní jeho ohraničenie. Súčasťou identifikácie útvaru podzemnej vody je popis stavu so zhodnotením dosiahnutia environmentálnych cieľov. Hodnotenie vplyvov a dôsledkov ľudskej činnosti na útvary podzemnej vody a na určenie rizika nesplnenia environmentálnych cieľov sa vykonáva analýzou ich stavu.

§ 4 Monitorovanie vôd

(1) Monitorovanie vôd sa vykonáva v monitorovacích miestach podľa programov monitorovania vôd.

3) Základné údaje o množstve, kvalite a o režime podzemných vôd sú najmä

- a) výdatnosť prameňa podzemnej vody,
- b) úroveň hladiny podzemnej vody,
- c) tlak na záhlaví vrtu pri artézskej vode,

- d) tepelno-energetický potenciál pri geotermálnej vode,
 - e) prírodné a využiteľné množstvo podzemnej vody,
 - f) fyzikálne, chemické a mikrobiologické vlastnosti podzemnej vody.
- 5) Faktory, ktoré sú súčasťou hodnotenia vplyvov na kvalitu povrchovej vody a podzemnej vody, sú najmä údaje o
- a) využívaní vôd a o režime ich využívania,
 - d) zaobchádzaní s nebezpečnými látkami

§ 20 Oznamovanie údajov o odbere povrchovej vody a podzemnej vody

(1) Oznámenia o začatí odberu vody a využívaní vody podľa § 6 ods. 5 zákona okrem prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov sa zasielajú do 30 dní odo dňa nadobudnutia právoplatnosti rozhodnutia orgánu štátnej vodnej správy Slovenskému hydrometeorologickému ústavu (ďalej len „ústav“) na predpísanom tlačive uverejnenom na webovom sídle ústavu

(2) Údaje o množstve odoberanej povrchovej vody, podzemnej vody a osobitnej vody okrem prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov sa oznamujú v členení na kalendárne mesiace raz ročne do 31. januára nasledujúceho roka na predpísanom tlačive. Súčasťou oznamovaných údajov sú aj údaje o kvalite, ak sú k dispozícii. Údaje o množstve odoberanej povrchovej vody, podzemnej vody a osobitnej vody sa získavajú určenými meradlami.

(3) Okrem údajov podľa odseku 2 sa súčasne oznamuje aj

- a) údaj o výdatnosti prameňa pri odberoch podzemnej vody z prameňov okrem prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov,
- b) hladina podzemnej vody v čase čerpania pri odbere podzemnej vody čerpaním,
- c) tlak na záhlaví odberného objektu pri artézskych vrtoch,
- d) údaj o teplote vody pri geotermálnej vode a osobitnej vode.

(4) Údaje o kvalite podzemnej vody a osobitnej vody podľa § 39 ods. 4 zákona okrem údajov o prírodných liečivých zdrojoch a prírodných minerálnych zdrojoch sa zasielajú ústavu do 30 dní od požiadania a následne do 30 dní po skončení monitorovacieho obdobia.

§ 21 Oznamovanie údajov o zistených zdrojoch podzemnej vody

(1) Údaje o zistených zdrojoch podzemnej vody a o odlišných množstvách ich výskytu podľa § 6 ods. 7 zákona okrem zdrojov podzemných vôd⁷⁾ sa oznamujú ústavu do 30 dní od vzniku oznamovacej povinnosti.

(2) Pri zistení zdroja podzemnej vody sa v oznámení uvedie

- a) meno, priezvisko a adresa fyzickej osoby alebo názov a sídlo právnickej osoby, ktorej oznamovacia povinnosť vznikla,
- b) presná lokalizácia výskytu zdroja podzemnej vody spolu s koordinátmi a prehľadnou situáciou v mierke 1 : 25 000 alebo po dohode s ústavom v mierke 1 : 50 000,
- c) dátum zistenia zdroja podzemnej vody a okolnosť, pri ktorej bol zdroj podzemnej vody zistený,
- d) druh zdroja podzemnej vody, najmä prameň a vrt,
- e) údaje o množstve, teplote, stave hladiny podzemnej vody a o kvalite zisteného zdroja podzemnej vody, ak sú známe.

(3) Záverečnú správu⁸⁾ z hydrogeologického prieskumu odovzdáva zhotoviteľ geologických prác osobe podľa osobitného predpisu.⁹⁾

(4) Ak ten, kto má oznamovaciu povinnosť, zistí pri odbere podzemnej vody odlišné množstvo jej výskytu, ako predpokladal prieskum alebo projekt podľa § 6 ods. 7 zákona, oznámi ústavu do 30 dní tieto údaje:

- a) meno, priezvisko a adresu fyzickej osoby alebo názov a sídlo právnickej osoby, ktorá odlišné množstvo výskytu podzemnej vody zistila,
- b) presnú lokalizáciu miesta odberu podzemnej vody, najmä obec, okres a kraj, spolu s koordinátmi a prehľadnou situáciou v mierke 1 : 25 000 alebo po dohode s ústavom v mierke 1 : 50 000,
- c) pôvodné množstvo výskytu podzemnej vody a informácie o tomto údaji,
- d) dátum zistenia výskytu odlišného množstva podzemnej vody,
- e) zistené odlišné množstvo výskytu podzemnej vody,
- f) kópiu právoplatného povolenia na odber podzemnej vody, ak bolo vydané.

10.1.5 Kúpeľný zákon

§ 2 Základné pojmy

(1) Minerálna voda je podzemná voda s originálnym pôvodom akumulovaná v prírodnom prostredí, vyvierajúca na zemský povrch z jednej alebo viacerých prirodzených alebo umelých výstupných ciest, ktorá sa odlišuje od inej podzemnej vody najmä

- a) svojím pôvodom,
- b) obsahom stopových prvkov,
- c) obsahom a charakterom celkových rozpustených tuhých látok presahujúcich 1 000 mg.l⁻¹ alebo obsahom rozpustených plyných látok presahujúcich 1 000 mg.l⁻¹ oxidu uhličitého, alebo najmenej 1 mg.l⁻¹ sulfánu, alebo
- d) minimálnou teplotou vody v mieste výveru 20 °C.

(2) Prírodná liečivá voda je minerálna voda, ktorá pre svoje zloženie vhodné na liečenie bola uznaná podľa tohto zákona.

(3) Prírodný liečivý zdroj na účely tohto zákona je zdroj minerálnej vody, z ktorého voda bola uznaná za prírodnú liečivú vodu podľa tohto zákona.

(14) Monitorovací systém prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov je systém, prostredníctvom ktorého sa vykonáva režimové sledovanie hydrogeologických, chemických, fyzikálnych, mikrobiologických a biologických ukazovateľov prírodných liečivých zdrojov, prírodných minerálnych zdrojov, pozorovacích vrtov, pozorovacích objektov a meteorologických ukazovateľov príslušného územia (ďalej len „režimové sledovanie“) v rozsahu určenom v povolení využívať prírodný liečivý zdroj alebo prírodný minerálny zdroj (ďalej len „povolenie využívať zdroj“). Monitorovací systém prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov je samostatnou časťou monitorovacieho systému životného prostredia

§ 5 Uznatie prírodných liečivých vôd a uznanie prírodných minerálnych vôd

(2) Minerálnu vodu možno uznať za prírodnú liečivú vodu, ak sú počas najmenej piatich rokov preukázané jej liečivé účinky v balneologickej praxi a spĺňa požiadavky ustanovené všeobecne záväzným právnym predpisom, ktorý vydá ministerstvo zdravotníctva. Liečivé účinky možno považovať za preukázané aj vtedy, ak boli takéto účinky overené dlhodobou balneologickou

praxou pri využívaní vôd s podobnými fyzikálnymi, chemickými a fyzikálno-chemickými vlastnosťami.

(4) Za prírodnú minerálnu vodu možno uznať len vodu zo zdroja, ktorá bola najmenej tri roky sledovaná, počas tohto obdobia sa preukázala stálosť všetkých jej rozhodujúcich ukazovateľov a nedošlo k zmene jej výživových vlastností a spĺňa požiadavky ustanovené všeobecne záväzným právnym predpisom, ktorý vydá ministerstvo zdravotníctva. Ak užívateľ zdroja nemôže z technických dôvodov využívať prírodnú minerálnu vodu zo zdroja, na ktorý bolo vydané povolenie využívať zdroj, a požiada o uznanie prírodnej minerálnej vody s rovnakým chemickým zložením z nového zdroja z rovnakého hydrogeologického kolektora,⁸⁾ podmienka podľa predchádzajúcej vety sa považuje za splnenú. V tomto prípade stabilita vody zo zdroja musí byť preukázaná hydrodynamickou skúškou v dĺžke trvania 30 dní.

§ 6 Konanie o uznaní prírodných liečivých vôd a uznanie prírodných minerálnych vôd

(3) Návrh na uznanie prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody môže podať

- a) vlastník pozemku, na ktorom sa zdroj vody nachádza,
- b) vlastník záchytného zariadenia, ktoré slúži na odber prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody,
- c) fyzická osoba alebo právnická osoba, ktorá má záujem zdroj vody využívať,
- d) obec, na ktorej území sa zdroj vody nachádza.

(4) Štátna kúpeľná komisia môže začať konanie o uznanie prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody aj z vlastného podnetu, ak sa dozvie o možnom zdroji prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody.

(5) Návrh na uznanie prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody musí obsahovať

- a) údaje o navrhovateľovi s týmto obsahom:
 - 2. právnická osoba uvedie názov alebo obchodné meno, sídlo, identifikačné číslo, ak je pridelené,
 - 3. fyzická osoba-podnikateľ uvedie obchodné meno, sídlo a identifikačné číslo,
- b) názov alebo technické označenie zdroja,
- c) návrh na zachytenie a využitie zdroja.

(6) Navrhovateľ k návrhu na uznanie prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody doloží:

- a) výpis z obdobného registra, akým je obchodný register alebo živnostenský register vedený v členskom štáte Európskej únie alebo v nečlenskom štáte Európskej únie, nie starší ako tri mesiace, ak je žiadateľ zahraničná osoba,
- b) polohopisný a výškopisný plán zdroja v mierke 1 : 1000,
- c) záverečnú správu z hydrogeologického prieskumu; v prípade potreby Štátna kúpeľná komisia si môže vyžiadať ďalšie odborné stanovisko,
- d) doklad o využitel'nom množstve prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody z lokálneho zdroja alebo z celej hydrogeologickej štruktúry,
- e) návrh na určenie ochranných pásiem; návrh na určenie ochranných pásiem je súčasťou záverečnej správy z hydrogeologického prieskumu alebo ďalšieho odborného stanoviska podľa písmena e),
- f) rozšírenú fyzikálnu, chemickú, fyzikálno-chemickú, mikrobiologickú a biologickú analýzu vypracovanú akreditovaným laboratóriom nie staršiu ako šesť mesiacov,
- g) balneologický posudok pre prírodné liečivé vody s návrhom vhodných indikácií nie starší ako šesť mesiacov,
- h) balneologický posudok pre prírodné minerálne vody s návrhom na úpravu vody, ak je potrebná, nie starší ako šesť mesiacov,
- i) klinické a farmakologické testy podľa osobitného predpisu, ak to tento predpis ustanovuje,
- j) údaje podľa osobitného predpisu^{10a)} potrebné na účel overenia vlastníckeho práva k nehnuteľnosti, na ktorej sa zdroj nachádza alebo ktorá môže byť využívaním zdroja dotknutá, s uvedením identifikačných čísel nehnuteľnosti.

§ 9 Rozhodnutie o uznaní prírodných liečivých vôd a uznanie prírodných minerálnych vôd

(2) Rozhodnutie, ktorým sa uznáva voda za prírodnú liečivú vodu alebo prírodnú minerálnu vodu, obsahuje

- a) názov prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja,
- b) popis umiestnenia prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja,
- c) fyzikálno-chemické zloženie, úpravu vody, účinky vody a vhodné indikácie pri prírodnej liečivej vode,

- d) fyzikálno-chemické zloženie, úpravu vody, účinky vody pri prírodnej minerálnej vode,
- e) podmienky sledovania prírodnej liečivej vody a prírodnej minerálnej vody do času začatia ich využívania,
- f) údaj o množstve vody z prírodného liečivého zdroja alebo z prírodného minerálneho zdroja.

(3) Štátna kúpeľná komisia začne konanie o vydanie rozhodnutia, ktorým uznanie vody za prírodnú liečivú vodu alebo za prírodnú minerálnu vodu zruší,

- a) ak voda uznaná za prírodnú liečivú vodu prestala mať zloženie vhodné na liečenie alebo prestala spĺňať požiadavky ustanovené všeobecne záväzným právnym predpisom, ktorý vydá ministerstvo zdravotníctva,
- b) ak voda uznaná za prírodnú minerálnu vodu prestala spĺňať požiadavky ustanovené všeobecne záväzným právnym predpisom, ktorý vydá ministerstvo zdravotníctva,
- c) ak záchytné zariadenie je v takom technickom stave, ktorý neumožňuje odber prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody, alebo
- d) na návrh osoby, ktorej bolo vydané rozhodnutie o uznaní prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody; táto osoba môže podať návrh, len ak ešte nebolo vydané povolenie využívať zdroj tejto vody.

§ 21 Ďalší využívatel' prírodného liečivého zdroja

(1) Ak je využiteľné množstvo vody v prírodnom liečivom zdroji väčšie ako odberné množstvo prírodnej liečivej vody uvedené v povolení využívať zdroj vydanom využívatel'ovi zdroja alebo ak využívatel' zdroja dlhodobo nevyužíva odberné množstvo prírodnej liečivej vody uvedené v povolení využívať zdroj [§ 17 ods. 3 písm. d)], môže Štátna kúpeľná komisia povoliť využívanie voľného množstva prírodnej liečivej vody z prírodného liečivého zdroja ďalšiemu využívatel'ovi prírodného liečivého zdroja. Ustanovenia § 10 až 19 sa použijú primerane.

(2) Účastníkmi konania o povolenie využívať zdroj ďalším využívatel'om prírodného liečivého zdroja sú fyzické osoby a právnické osoby, ktorých vlastnícke alebo iné práva k nehnuteľnostiam, na ktorých sa prírodný liečivý zdroj nachádza, môžu byť využívaním prírodného liečivého zdroja dotknuté, osoby, ktoré k takýmto nehnuteľnostiam vykonávajú

správu podľa osobitných predpisov, doterajší využívatel' tohto zdroja a nový žiadateľ o vydanie povolenia využívať tento zdroj.

(3) Využívatel' prírodného liečivého zdroja zabezpečuje prevádzku a údržbu záchytného zariadenia a balneotechnického zariadenia prírodného liečivého zdroja.

§ 25 Úhrada za využívanie prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov

(1) Za výt'azok, objem prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody odobratý z prírodného liečivého zdroja alebo z prírodného minerálneho zdroja, platí využívatel' zdroja úhradu ministerstvu zdravotníctva.

(2) Využívatel' zdroja platí úhradu za skutočne odobraté množstvo prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody mesačne do 28. dňa kalendárneho mesiaca za prechádzajúci kalendárny mesiac.

(3) Využívatel' zdroja neplatí úhradu podľa § 15 ods. 1 až 3 do začiatku využívania prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja.

(4) Úhrada za odber prírodnej liečivej vody alebo úhrada za odber prírodnej minerálnej vody je príjmom štátneho rozpočtu.

(5) Spôsob platby úhrady a sadzby úhrad ustanoví všeobecne záväzný právny predpis, ktorý vydá ministerstvo zdravotníctva.

§ 26 Ochrana prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov

(1) Ochrana prírodného liečivého zdroja a prírodného minerálneho zdroja pred činnosťami, ktoré môžu nepriaznivo ovplyvniť chemické, fyzikálne, mikrobiologické a biologické vlastnosti vody, jej zdravotnú bezchybnosť, množstvo vody a výdatnosť prírodného liečivého zdroja a prírodného minerálneho zdroja, sa zabezpečuje ochrannými pásmami prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov.

(2) Ochrana prírodných liečivých zdrojov a prírodných minerálnych zdrojov a ochranné pásma sa určujú na základe podmienok vyplývajúcich z hydrogeologického kolektora podzemnej vody a ďalších prírodných faktorov.

(3) Ochranné pásma sa určujú v dvoch stupňoch na základe odborných podkladov a posudkov vypracovaných odborne spôsobilou osobou.

(4) Návrh na určenie ochranného pásma musí vychádzať z analýzy rizík ohrozenia stability fyzikálno-chemického zloženia vody, zdravotnej bezchybnosti vody a výdatnosti prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja.

(5) Ministerstvo zdravotníctva vydá všeobecne záväzný právny predpis, ktorý ustanoví ochranné pásma a druhy zakázaných činností. Ochranné pásma možno upravovať, meniť alebo rušiť, ak sa zmenili alebo zanikli dôvody na ich určenie.

(6) Návrh na určenie ochranných pásiem musí obsahovať

a) kópiu katastrálnej mapy so zakreslením navrhovanej hranice ochranného pásma I. stupňa; kópiu mapy M 1 : 5 000 alebo M 1 : 10 000,

b) kópiu základnej mapy M 1 : 50 000 so zakreslením hranice ochranného pásma II. stupňa.

(7) Štátna kúpeľná komisia prerokuje návrh na určenie ochranných pásiem s dotknutými správnymi orgánmi a s obcami, na ktorých území sa majú ochranné pásma určiť. Dotknuté správne orgány a obce sú povinné poslať Štátnej kúpeľnej komisii stanoviská do 60 dní odo dňa doručenia výzvy. Ak v tejto lehote stanoviská nepošlú, predpokladá sa, že k návrhu ochranných pásiem nemajú pripomienky.

(8) Ak v jednej hydrogeologickej štruktúre je minerálna voda využívaná okrem liečebných účelov aj na iné účely a táto voda je rovnakej genézy alebo hydrodynamicky spojená, Štátna kúpeľná komisia môže využívanie na iné účely obmedziť alebo zakázať.

§ 27 Ochranné pásmo I. stupňa

(1) Ochranné pásmo I. stupňa sa určuje

a) pre územie výverovej oblasti alebo

b) pre územie zabierajúce okolie prírodného liečivého zdroja a prírodného minerálneho zdroja.

(2) Ochranné pásmo pre výverovú oblasť sa určí, ak sú prírodné liečivé zdroje alebo prírodné minerálne zdroje zachytené plytko pod povrchom terénu alebo to vyžadujú geologické a hydrogeologické pomery.

(3) Pre prírodné liečivé zdroje alebo prírodné minerálne zdroje zachytené vrtmi vo väčšej hĺbke sa ochranné pásmo I. stupňa určí kruhom s polomerom 25 metrov od prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja, ak kolektor minerálnej vody je od povrchu terénu chránený dostatočnou hrúbkou nepriepustných hornín.

- (4) Každý prírodný liečivý zdroj a prírodný minerálny zdroj sa ochraňuje určením pásma fyzickej ochrany takého zdroja spravidla v rozsahu 10 x 10 metrov vo voľnom teréne. V tomto pásme sa môžu vykonávať len činnosti priamo súvisiace s využitím a ochranou prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja.
- (5) Z územia ochranného pásma I. stupňa sa musia odstrániť všetky možné zdroje znečistenia a musia sa vykonať potrebné úpravy územia.
- (6) V ochrannom pásme I. stupňa je zakázané vykonávať všetky činnosti, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť fyzikálne, chemické, mikrobiologické a biologické vlastnosti prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody, jej využiteľné množstvo, zdravotnú bezchybnosť alebo výdatnosť prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja.
- (7) Opatrenia uvedené v odseku 5 zabezpečí využívatel' zdroja na vlastné náklady. Vlastník nehnuteľností musí vykonanie týchto opatrení umožniť, inak zodpovedá využívatel'ovi zdroja za vzniknuté škody. Ak prírodný liečivý zdroj alebo prírodný minerálny zdroj nemá využívatel'a, náklady na vykonanie opatrení podľa odseku 5 uhradí ministerstvo zdravotníctva.
- (8) Ministerstvo zdravotníctva predloží grafické a písomné podklady týkajúce sa ochranných pásiem I. stupňa katastrálnemu úradu na zaevidovanie ochranných pásiem I. stupňa v katastri nehnuteľností.

§ 28 Ochranné pásmo II. stupňa

- (1) Ochranné pásmo II. stupňa chráni hydrogeologický kolektor minerálnej vody, jeho tranzitno-akumulačnú, prípadne infiltračnú oblasť alebo ich častí, prírodné liečivé zdroje a prírodné minerálne zdroje.
- (2) V ochrannom pásme II. stupňa sa môžu vymedziť čiastkové pásma s rôznou mierou ochrany.
- (3) V ochrannom pásme II. stupňa je zakázané vykonávať všetky činnosti, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť fyzikálne, chemické, mikrobiologické a biologické vlastnosti prírodnej liečivej vody alebo prírodnej minerálnej vody, jej využiteľné množstvo, zdravotnú bezchybnosť alebo výdatnosť prírodného liečivého zdroja alebo prírodného minerálneho zdroja.
- (4) Ochranné pásmo II. stupňa sa vyznačí v základnej mape v mierke 1 : 50 000, pričom lomové body sú definované súradnicami Jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej – JTSK.

§ 29 Hranice ochranných pásiem a ich označenie

(1) Pri určovaní hraníc ochranných pásiem sa prihliada na hranice jednotlivých pozemkov podľa katastra nehnuteľností, ako aj na prírodné a umelé hranice v teréne.

(2) Náklady spojené s určením a vyznačením hraníc ochranných pásiem v teréne na prístupových cestách uhradí užívateľ zdroja. Ak prírodný liečivý zdroj, prírodný minerálny zdroj, prírodné liečivé zdroje alebo prírodné minerálne zdroje využíva viac užívateľov, podieľajú sa na úhrade nákladov podľa pomeru využívania. Ak nemá prírodný liečivý zdroj alebo prírodný minerálny zdroj užívateľa, uhradí tieto náklady ministerstvo zdravotníctva. Náklady na zmenu už existujúcich ochranných pásiem uhradí ten, kto predložil návrh na úpravu.

10.2 Relevantné inštitúcie v procese posudzovania, hodnotenia, výskumu a prieskumu zdrojov geotermálnej energie na Slovensku

10.2.1 Inštitúcie v rámci štátnej služby a štátnej správy

1) Ministerstvo životného prostredia SR

- a. Sekcia geológie a prírodných zdrojov MŽP SR (legislatívne aspekty projektov, vymedzovanie prieskumných území, povoľovacie a schvaľovacie konania)
- b. Sekcia posudzovania vplyvov na životné prostredie (aspekty vyhodnocovania a posudzovania vplyvov na životné prostredie)

2) Ministerstvo zdravotníctva SR

- a. Inšpektorát kúpeľov a žriedel (problematika termominerálnych vôd, realizovanie prác v ochranných pásmach termominerálnych vôd a liečivých kúpeľov, monitoring)
- b. Štátna kúpeľná komisia (legislatívne a praktické aspekty v prípade zachytenia termominerálnych vôd)

3) Ministerstvo investícií, regionálneho rozvoja a informatizácie SR

- a. Sekcia inovácií a strategických investícií (finančné zdroje, podmienky financovania, rozvoj investícií, podporné finančné schémy)

4) Ministerstvo hospodárstva SR

- a. Hlavný banský úrad (vyjadrenia v súvislosti s Banským zákonom, aktivity v dobývacích priestoroch)
- b. Inštitút hospodárskych analýz (ekonomické aspekty projektov)
- c. Sekcia energetiky MH SR (energetické zámery, ekonomické aspekty projektov, vzťah projektov k národnému hospodárstvu)

5) Štátny geologický ústav Dionýza Štúra

- a. Oddelenie hydrogeológie a geotermálnej energie (hydrogeológia, hydrogeotermika, energetika, geotermika, termodynamika, termochémia, termofyzika, rezervoárový manažment, geotermometria, hydrogeologické, hydrogeotermálne, rezervoárové modelovanie, rezervoárové inžinierstvo, energetická bilancia, hydrogeologická bilancia, hydrogeotermická bilancia, hydraulika, hydrodynamické skúšky, stopovacie skúšky)
- b. Oddelenie geochémie životného prostredia (geochémia zdrojov geotermálnej energie, termochémia, geochemický prieskum)
- c. Oddelenie nerastných surovín a geofyziky (geofyzikálny prieskum)
- d. Oddelenie 3D/4D geologického modelovania (modelovanie, geologické modelovanie, hodnotenie modelovacích procesov, výstupov)
- e. Geoanalytické laboratória ŠGÚDŠ (analytické metódy v chemických rozboroch, vyhodnocovanie metódy)

6) Slovenský hydrometeorologický ústav

- a. Odbor 303: Podzemné vody (kvalita a kvantita podzemných vôd, monitoring, spracovanie odberných množstiev geotermálnych vôd)

10.2.2 *Akademické inštitúcie s relevantnou činnosťou a praxou*

1) Univerzita Komenského v Bratislave – Prírodovedecká fakulta – Geologická sekcia

- a. Katedra hydrogeológie (posudzovanie projektov, hydrogeologické modelovanie, hydrogeológia, hydraulika, geotermika, hydrogeologické modelovanie, hydrogeologický prieskum)
- b. Katedra environmentálnej a aplikovanej geofyziky (konzultácie aplikovaných geofyzikálnych metód, relevantnosť geofyzikálneho prieskumu)

2) Slovenská Akadémia Vied

- a. Ústav vied o Zemi (geológia, štruktúrna geológia, regionálna geológia, tektonika, posudzovanie geofyzikálneho prieskumu – relevancia, komplexnosť)
- b. Ústav geotechniky (posudzovanie vrtných prác, vrtných systémov, mechanických parametrov, výsledkov technického prieskumu)

3) Slovenská Technická Univerzita v Bratislave

- a. Ústav energetických strojov a zariadení SjF (energetické zariadenia, predovšetkým pre produkciu elektrickej energie a systémov vykurovania)
- b. Katedra technických zariadení budov SvF (energetické zariadenia pre systémy centrálného zásobovania teplom, manažment zvyškového tepla, kaskádové systémy, poľnohospodárstvo)
- c. Katedra zdravotného a environmentálneho inžinierstva SvF (hydrodynamické skúšky, stopovacie skúšky, geologické práce v chránených územiach vodárenských alebo kúpeľných zdrojov)

4) Žilinská Univerzita – Strojnícka fakulta

- a. Katedra energetickej techniky (tepelné zariadenia, tepelné čerpadlá, energetické zariadenia, technické posudzovanie)

10.2.3 *Vybrané súkromné spoločnosti*

- 1) SLOVGEOTERM a.s. (projektové spracovanie, projektová príprava, energetická efektívnosť, technická efektívnosť, technická účinnosť, technické zariadenia, komplexnosť prieskumu)
- 2) THERMEX s.r.o. (hydrogeologický prieskum, geofyzikálny prieskum, interpretácie geofyzikálneho prieskumu, interpretácie hydrodynamických skúšok)
- 3) EQUIS s.r.o. (geofyzikálny prieskum, hydrogeologický prieskum, konzultovanie hydrodynamických skúšok, monitoring, geologický prieskum, projektová príprava, formálna dokumentácia projektov, interpretácie geofyzikálneho prieskumu)

- 4) NAFTA a.s. (modelovanie, vyhodnocovanie zdrojov a zásob, hydraulické modelovanie, geologické modelovanie, vŕtanie, vrtná technika, hydrodynamické skúšky, interpretácie seizmického prieskumu)
- 5) KORAL s.r.o. (geofyzikálny prieskum, geofyzikálne modelovanie, povrchový prieskum, hydrogeologický prieskum, interpretácie geofyzikálneho prieskumu)
- 6) GEOFYZIKA SLOVAKIA s.r.o. (geofyzikálny prieskum, geofyzikálne modelovanie, interpretácie geofyzikálneho prieskumu)
- 7) HYDROFEN s.r.o. (hydrogeotermálne hodnotenie, hydrogeologický prieskum, hydrodynamické skúšky, komplexnosť prieskumu, adekvátnosť prieskumu)
- 8) AQUAMIN s.r.o. (komplexné hydrogeologické práce, hydrodynamické skúšky pre posúdenie množstiev zdrojov geotermálnej energie, revízie exploatačných podmienok geotermálnych vrtov)
- 9) GEOSPEKTRUM s.r.o. (komplexné hydrogeologické práce, hydrodynamické skúšky pre posúdenie množstiev zdrojov geotermálnej energie, revízie exploatačných podmienok geotermálnych vrtov)

11 ZHRNUTIE

Posudzovanie zdrojov geotermálnej energie z pohľadu ich výskumu, prieskumu, alebo hodnotenia, predstavuje multispektrálnu disciplínu, ktorej štúdiom sa zaoberá vedný odbor **rezervoárové inžinierstvo**. Ide pritom o kombináciu geologických, geotechnických, hydraulických, hydrogeologických, geochemických, energetických, termodynamických, geofyzikálnych a environmentálnych aspektov, ktoré vstupujú do vyhodnocovania ako možností získavania a produkcie zdrojov geotermálnej energie, tak aj do vyhodnocovania a posudzovania ich udržateľného využitia a využívania.

Zdroje geotermálnej energie sú dlhodobou označované ako udržateľné, alebo obnoviteľné. Táto premisa pritom platí len v určitej miere, ktorá je definovaná okrajovými, alebo kritickými podmienkami, v ktorých zdroje existujú v rezervoárovom prostredí; respektíve ktorá je platná len v prípade ich prirodzených výverov. Akékoľvek využívanie zdrojov geotermálnej energie ale predstavuje zásah do ich prirodzeného prostredia, ktorý nevyhnutne vyvolá jeho odozvu voči produkcii. Následná odozva nie je otázkou „či“, ale otázkou „kedy“, respektíve následne aj „v akej intenzite“.

Rozvoj produkcie zdrojov geotermálnej energie preto musí rešpektovať a vychádzať nielen z požiadaviek spoločnosti na energetické zabezpečovanie nárokov spojených s nárastom spotreby, ale predovšetkým energetickú povahu zdrojov geotermálnej energie, a energetickú povahu ich rezervoárového prostredia. Vo všeobecnosti je nevyhnutné pri realizácii projektov rozvoja produkcie geotermálnej energie, a ich posudzovaní, vychádzať z niekoľkých základných poznámok (aspoň najkľúčovejších):

- **riziko energetickej depletácie zdrojov geotermálnej energie klesá s mierou ich využívania** (je možné v danej oblasti produkovať ďalšie množstvá geotermálnej energie?) **a zároveň s mierou ich poznania** (je územie dostatočne preskúmané?, boli realizované všetky dostupné a komplexné práce povrchového, alebo karotážneho prieskumu? sú k dispozícii statické, alebo dynamické, predikčné modely toho, ako sa môže rezervoár správať?)
- **riziko kolapsu projektov klesá s mierou ich adekvátneho monitoringu** (je realizovaný monitoring adekvátny ? je realizovaná monitoring periodický ? je

realizovaný monitoring kontinuálny ? je realizovaný monitoring komplexný ?)
a vyhodnocovania údajov, ktoré pomáhajú predikovať možné spôsoby rezervoárovej odozvy (menia sa procesy prebiehajúce v rezervoári ? menia sa podmienky produkovaného zdroja geotermálnej energie – teplota, tlak, fázové zloženie, chemické zloženie ? dochádza k ovplyvňovaniu okolia vrtov na povrchu alebo pod povrchom ?)

- **zdroje geotermálnej energie sú v úzkej skupine energetických surovín, ktoré sú schopné zabezpečiť ako stabilný energetický výkon, tak aj špičkový energetický výkon**, predovšetkým pri priamom využívaní geotermálnej energie (je projekt zameraný na kontinuálnu ročnú prevádzku ? je projekt odkázaný na citlivé a dynamické vonkajšie podmienky ? je projekt napojený na sekundárne riešenia a riešenia nižších stupňov schopné zúžitkovať dostupný energetický potenciál ?) **v multispektrálnom využívaní**, t.j. ako v dodávke elektrickej a tepelnej energie, tak aj vo využívaní možného chemizmu zdrojov geotermálnej energie (je projekt zameraný na energeticky, termodynamicky účinný spôsob využívania ? je projekt zameraný na energeticky náročné segmenty národného hospodárstva alebo poľnohospodárstva s vysokou spotrebou fosílnych energií ? je možné projekt využiť aj z pohľadu jeho chemického zloženia v segmente služieb, poľnohospodárstve, priemysle ?).

Predkladaná metodická príručka v prvej časti vysvetľuje **vybrané aspekty** prieskumu, výskumu, hodnotenia, alebo využívania zdrojov geotermálnej energie. Cieľom úvodných kapitol je priniesť základné informácie o spôsoboch využívania a monitorovania, ako aj hodnotenia zdrojov geotermálnej energie, na ktoré plynulo nadväzuje časť o selekcii vybraných kritérií, podľa ktorých by projekty súvisiace s rozvojom produkcie geotermálnej energie mohli byť posudzované, aj so špecifikáciou jednotlivých bodových hodnotení. Je ale potrebné zdôrazniť, že samotné posudzovanie musí byť komplexné, a založené na odbornom posúdení, a preto je dôležité zvážiť kontaktovanie vybraných inštitúcií pre detailné, alebo dodatočné hodnotenie.

Zdroje geotermálnej energie stále majú potenciál rozvoja a podpory energetického mixu na Slovensku, predovšetkým v oblasti zásobovania tepelnou energiou v rôznych segmentoch. Je následne vecou ich ochrany (cez procesy posudzovania), či zdroje geotermálnej energie budú naďalej využívané energeticky efektívne, termodynamicky účinne, s udržateľnou produkčnou stratégiou, a následne v režime zabezpečujúcom ich obnovovanie.

12 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- Abdi, A.M., 2018: Environmental, health and safety assessment of geothermal drilling operation using the RIAM method: the case of Assal-Fiale geothermal development project. *Proceedings 7th African Rift Geothermal Conference*, Kigali, Rwanda, 1-12.
- Allis, R., 2000: Insights on the formation of vapor-dominated geotherma systems. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japonsko, 1-8.
- Agemar, T., Schellschmidt, R., Schulz, R., 2012: Subsurface temperature distribution in Germany. *Geothermics*, **44**, 65-77.
- Agemar, T., Weber, J., Schulz, R., 2014: Deep geothermal energy production in Germany. *Energies*, **7**, 4397-4416.
- Agemar, T., Alten, J.A., Kühne, K., Kuder, J., Suchi, E., Weber, S., Schulz, R., 2015: A new approach to estimating the geothermal potential of faults in Germany. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-8.
- Anderson, A., Rezaie, B., 2019: Geothermal technology: trends and potential role in a sustainable future. *Applied Energy*, **248**, 18–34.
- Antics, M., Papachristou, M., Ungemach, P., 2005: Sustainable heat mining. A reservoir engineering approach. In: *Proceedings 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, s. 1-14.
- Arévalo, A.S., 2003: Rapid environmental assessment tool for the extended Berlin geothermal field project. *Proceedings International Geothermal Conference*, Reykjavik, Iceland, 1-7.
- Axelsson, G., 2003: Essence of geothermal resource management. *Proceedings IGC2003 Short Course, UNU-GTP*, Reykjavik, Iceland, 1-23.
- Axelsson, G., 2008a: Management of geothermal resources. *Proceedings UNU GTP Workshop for Decision Makers on Direct Heating Use of Geothermal Resources in Asia*, Tianjin, China, 1-15.
- Axelsson, G., 2008b: Importance of geothermal cooling. *Proceedings UNU GTP Workshop for Decision Makers on Direct Heating Use of Geothermal Resources in Asia*, Tianjin, China, 1-16.
- Axelsson, G., 2009: *Capacity, response, management and monitoring of geothermal systems – Lecture notes*. RES The School for Renewable energy Science, Akureyri.
- Axelsson, G., 2010: Sustainable geothermal utilization – Case histories, definitions, research issues and modelling. *Geothermics*, **39**, 283–291.
- Axelsson, G., 2011: Using long case histories to study hydrothermal renewability and sustainable utilization. *Geothermal Resource Council Transactions*, **35**, 1393-1400.
- Axelsson, G., 2012a: Sustainable geothermal utilization. *Proceedings UNU GTP Short course on geothermal development and geothermal wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-18.
- Axelsson, G., 2012b: The physics of geothermal energy. In: Sayigh, A. (Ed.) 2012: *Comprehensive renewable energy*. Elsevier Ltd., s. 1-52.
- Axelsson, G., 2012c: Role and management of geothermal reinjection. *Proceedings UNU GTP Short course on geothermal development and geothermal wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-21.
- Axelsson, G., 2013: Geothermal well testing. *Proceedings UNU GTP Short Course V on Conceptual modelling of geothermal systems*, Santa Tecla, El Salvador, 1-30.
- Axelsson, G., 2018: Geothermal well testing. *Proceedings UNU GTP Short Course III on Geothermal reservoir characterization: well logging, well testing and chemical analysis*, Santa Tecla, El Salvador, 1-30.
- Axelsson, G., Gunnlaugsson, E., 2000: Background: geothermal utilization, management and monitoring. Long-term monitoring of high- and low- enthalpy fields under exploitation. *Proceedings World Geothermal Congress 2000 Short Course*, Kyushu-Tohoku, Japonsko, 1-8.
- Axelsson, G., Stefansson, V., 2003: Sustainable management of geothermal resources. *Proceedings International Geothermal Conference 2003*, Reykjavik, Iceland, 1-9.

- Axelsson, G., Kristmansdottir, H., 2009: *Geothermal reservoir monitoring and forecasting: GEO604 coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 153 s.
- Axelsson, G., and Thórhallsson, S., 2009: Review of well stimulation operations in Iceland. *Geothermal Resources Council Transactions*, **33**, 1-11.
- Axelsson, G., Franzson, H., 2012: Geothermal drilling targets and well sitting. *Proceedings UNU GTP Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-16.
- Axelsson, G., Steingrímsson, B., 2018: Logging, testing and monitoring geothermal wells. *Proceedings UNU GTP / SDG Short Course III on Geothermal Reservoir Characterization: well logging, well testing and chemical analysis*, Santa Tecla, El Salvador, 1-20.
- Axelsson, G., Gudmundsson, A., Steingrímsson, B., Palmason, G., Armannsson, H., Tulinius, H., Flovenz, O.G., Björnsson, S., Stefánsson, V., 2001a: Sustainable production of geothermal energy: suggested definition. *International Geothermal Association News Quarterly*, **43 (1)**, 1-2.
- Axelsson, G., Flóvenz, O.G., Hauksdóttir, S., Hjartarson, A., Liu, J., 2001: Analysis of tracer test data and injection-induced cooling, in the Laugaland geothermal field, N-Iceland. *Geothermics*, **30**, 697-725.
- Axelsson, G., Stefánsson, V., Xu, Y., 2002: Sustainable management of geothermal resources. *Proceedings Beijing International Geothermal Symposium*, Beijing, China, 277-283.
- Axelsson, G., Stefánsson, V., Björnsson, G., 2004: Sustainable utilization of geothermal resources. *Proceedings 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, 1-8.
- Axelsson, G., Stefánsson, V., Björnsson, G., Liu, J., 2005a: Sustainable management of geothermal resources and utilization for 100-300 years. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-8.
- Axelsson, G., Björnsson, G., Egilson, Th., Flóvenz, Ó.G., Gautason, B., Hauksdóttir, S., Ólafsson, M., Smáráson, Ó.B., Saemundsson, K., 2005b: Nature and properties of recently discovered hidden lowtemperature geothermal reservoirs in Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-10.
- Axelsson, G., Bromley, C., Mongillo, M., Rybach, L., 2010: The sustainability task of the International Energy Agency's Geothermal Implementing Agreement. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-8.
- Baba, A., 2005: Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM) method for the Tuzla geothermal and Can thermal power plant in Canakkale, Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin*, **14 (2)**, 1-7.
- Baba, A., Ozgener, L., Hepbasli, A., 2006: Environmental and Exergetic Aspects of Geothermal Energy. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **28 (7)**, 597-607.
- Badgett, A., Young, K., Dobson, P.F., 2016: Technical feasibility aspects of the geothermal resource reporting methodology (GRRM). *Proceedings 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1-21.
- Bajo, I., Franko, O., Král, M., Perselenyi M., Brychta, R., Szabová, A., 1998: *Skorušinská depresia – regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie*. [Manuskript – Záverečná správa]. GEOKONZULT a.s., Košice, 91 s.
- Bao, J., Zhao, L., 2013: A review of working fluid and expander selection for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **24**, 325-342.
- Beardmore, G.R., Rybach, L., Blackwell, D., Baron, Ch., 2010: A protocol for estimating and mapping global EGS potential. *Geothermal Resource Council Transactions*, **34**, 301-312.
- Benderitter, Y., Cormy, G., 1990: Possible approach to geothermal research and relative costs. In: Dickson, M.H. – Fanelli, M. (Eds.): *Small geothermal resources: A guide to development and utilization*, UNITAR, New York, 59-69.
- Beňovský, V., Drozd, V., Halas, O., Vrana, O., Vranovská, A., 1999: Investigation of the Ďurkov geothermal structure for utilization of geothermal energy. *Bulletin d'Hydrogeologie*, **17**, 1-11.
- Bezák, V., Broska, I., Elečko, M., Havrila, M., Ivanička, J., Janočko, J., Kaličiak, M., Konečný, V., Lexa, J., Mello, J., Plašienka, D., Polák, M., Potfaj, M., Vass, D., 2004a: Tektonická mapa Slovenskej republiky M 1 : 500 000. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- Bezák, V., Broska, I., Elečko, M., Havrila, M., Ivanička, J., Janočko, J., Kaličiak, M., Konečný, V., Lexa, J., Mello, J., Plašienka, D., Polák, M., Potfaj, M., Vass, D., 2004b: Vysvetlivky ku Tektonickej mape Slovenskej republiky M 1 : 500 000. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 72 s.
- Bielicki, J., Blackwell, D., Harp, D., Karra, S., Kelley, R., Kelley, S., Middleton, R., Person, M., Sutula, G., Witcher, J., 2016: Hydrogeologic windows and estimating the prospectivity of geothermal resources. *Proceedings 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-8.

Bjarnadottir, R., 2010: *Sustainability evaluation of geothermal systems in Iceland. Indicators for sustainable production* [manuskript – Master's Thesis], Reykjavik Energy Graduate School of Sustainable Systems, Reykjavik.

Bjornsson, A., 2009: Geophysical exploration and monitoring for geothermal resources: GEO302 coursebook. . RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 76 s.

Blanárová, V., 2017: *Chemické geotermometre geotermálnych vôd Západných Karpát*. Dizertačná práca. Katedra Hydrogeológie, Prírodovedecká fakulta UK, Bratislava, 163 s.

Boden, D.R., 2017: *Geologic fundamentals of geothermal energy*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 400 s.

Bodiš, D., Remšík, A., Černák, R., Marcin, D., Ženišová, Z., Fláková, R., 2018: Geothermal and hydrogeological conditions, geochemical properties and uses of geothermal waters in Slovakia. In: Bundschuh J. – Tomaszewska B. (Eds.), *Geothermal Water Management*, Taylor & Francis, NY, USA, 41-69.

Bogie, I., Lawless, J.V., Rychagov, S., Belousov, V., 2005: Magmatic-related hydrothermal systems: classification of the types of geothermal systems and their ore mineralization. In: Rychagov, S. (Ed.): *Geothermal and Mineral Resources of modern volcanic areas*, Moscow, Russian Federation.

Boynnton, K., Berkley, M., Perkins, S., Albert-Green, S., 2018: Geothermal energy in mining – a renewable and reliable energy solution. *Geothermal Resource Council Transactions*, **42**, 1-17.

Bruhn, D., Manzella, A., Vuataz, F., Faulds, J., Moeck, I., Erbas, K., 2010: Exploration methods. In: Huenges, E. – Ledru, P. (Eds): *Geothermal Energy Systems. Exploration, Development, Utilization*, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, GER, 37-113.

Bourcier, W.L., Lin, M., Nix, G., 2005: Recovery of minerals and metals from geothermal fluids. *Proceedings SME Annual Meeting*, Cincinnati, OH, USA, 1-19.

Breckenridge, R.M., Hickley, B.S., Terrell, T.T., 1978: Thermal springs of Wyoming. *The Geological Survey of Wyoming Bulletin*, **60**, 79-83.

Bromley, C.J., Mongillo, M., Rybach, L., 2006: Sustainable utilization strategies and promotion of beneficial environmental effects- having your cake and eat it too. *Proceedings the New Zealand Geothermal Workshop 2006*, Auckland, New Zealand, s. 1-6.

Brown, D.W., Duchane D.V., Heiken G., Hrisco, V.T., 2012: *Mining the Earth's heat: Hot dry rock geothermal energy*. Springer Ltd., New York, NY, USA, 669 s.

Bujakowski, W., Tomaszewska, B., Miecznik, M., 2016: The Podhale geothermal reservoir simulation for long-term sustainable production. *Renewable Energy*, **99**, 420-430.

Burnell, J., O'Sullivan, M., O'Sullivan, J., Kissling, W., Croucher, A., Pogacnik, J., Pearson, S., Caldwell, G., Ellis, S., Zarrouq, S., Climo, M., 2015: Geothermal Supermodels: The next generation of integrated geophysical, chemical and flow simulation modelling tools. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-7.

Chatenay, C., Gudmundsdóttir, H., Jóhannesson, T., 2014: Utilization of geothermal resources for district heating. *Proceedings UNU GTP Short Course VI on Utilization of low- and medium- enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization*, Santa Tecla, El Salvador, 1-20.

Coro, G., Trumpy, E., 2020: Predicting geographical suitability of geothermal power plants. *Journal of Cleaner Production*, **267**, p.: 121874, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121874

Chichilniski, G., 1997: What is sustainable development? *Land Economics*, **73 (4)**, 467-491.

Ciriaco, A.E., Zarrouk, J.J., Zakeri, G., 2020: Geothermal resource and reserve assessment methodology: overview, analysis and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **119**, 1-31.

Clotworthy, A.W., Ussher, G.N.H., Lawless, J. V., Randle, J.B., 2006: Towards an industry guideline for geothermal reserves determination. *Geothermal Resource Council Transactions*, **30**, 852-859.

Clotworthy, A.W., Lawless, J.V., Ussher, G.N.H., 2010: What is the End Point for Geothermal Developments: Modeling Depletion of Geothermal Fields. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-7.

Cumming, W., 2016: Geophysics and resource conceptual models in geothermal exploration and development. In: In: DiPippo, R. (Ed.): *Geothermal power generation: Developments and Innovation*. Elsevier Ltd., New York, USA, 33-75.

Daysh, S., Carey, B., Doorman, P., Luketina, K., White, B., Zarrou, J., 2020: New Zealand Country Update. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Island, 1-17.

De Almeida, C., 2018: Performative by-products: The emergence of waste reuse strategies at the Blue Lagoon. *Journal of Landscape Architecture*, **13 (3)**, 64-77.

- Deibert, L., Hjartarson, A., McDonald, I., McIlveen, J., Thompson, A., Toohey, B., Yang, D., 2010: *The Canadian geothermal code for public reporting – 2010 Edition*. The Canadian Geothermal Code Committee, 34 p.
- Dell, R., Petralia, M.T., Pokharel, A., Abes, D., Unnthorsson, R., 2019: Open-field heated agriculture for enhanced crop production using waste geothermal, municipal, and co-gen hot water and steam condensate. *Geothermal Resource Council Transactions*, **43**, 237-249.
- Diaz A.R., Kaya, E., Zarrouk, S.J., 2016: Reinjection in geothermal fields – a worldwide review update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **53**, 105-162.
- Dickson, M.H., Fanelli, M., 2004: Geothermal background. In: Dickson, M.H. – Fanelli, M. (Eds.): *Geothermal Energy, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, West Sussex, EN, s. 1-36.
- Dincer, I., Rosen, M.A., 2013. *Exergy, 2nd Edition*. Elsevier B.V., New York, 552 s.
- Dincer, I., Ozturk, M., 2021: *Geothermal energy systems*. Elsevier Ltd, Amsterdam, NL, 518 s.
- DiPippo, R., 1983: Geothermal power technology. In Meyers, R.A. (Ed): *Handbook of Energy Technology and Economics*. Wiley-Interscience, kap. 18.
- DiPippo, R., 1989: The effect of ambient temperature on geothermal binary-plant performance. *Geothermal Hot Line*, **19**, 68–70.
- DiPippo, R., 1999: Small Geothermal Power Plants: Design, Performance and Economics. *GeoHeat Centre Bulletin*, **2**, 1-8.
- DiPippo, R., 2004: Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. *Geothermics*, **33 (5)**, 565–586.
- DiPippo, R., 2005: *Geothermal power plants – principles, applications and case studies, 3rd Edition*. Butterworth – Heinemann, New York, 445.
- DiPippo, R., 2007: Ideal thermal efficiency for geothermal binary plants. *Geothermics*, **36 (3)**, 276-285.
- DiPippo, R., 2012: Geothermal power plants. In: Sayigh, A. (Ed.): *Comprehensive renewable energy*, Elsevier Ltd., 7.07 / 210-241
- DiPippo, R., 2015: Geothermal power plants: Evolution and performance assessment. *Geothermics*, **53**, 291-307
- DiPippo, R., 2016a: Elements of thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer applied to geothermal energy conversion systems. In: DiPippo, R. (Ed.): *Geothermal power generation: Developments and Innovation*. Elsevier Ltd., New York, USA, 217 -247.
- DiPippo, R., 2016b: Overview of geothermal energy conversion systems: reservoir – wells – piping – plant – reinjection. In: DiPippo, R. (Ed.): *Geothermal Power Generation. Developments and Innovation*. Woodhead Publishing, Oxford, MA, USA, s. 203-217.
- DiPippo, R., 2016c: *Geothermal power plants. Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, 4th Edition*. Butterworth-Heinemann, Waltham, MA, USA, 770 s.
- DiPippo, R., 2020: Geothermal energy in combined heat and power systems. In: Redko, A., Redko, O., DiPippo, R. (Eds.): *Low-temperature energy systems with applications of renewable energy*. Academic Press, Cambridge, MA, Spojené štáty, 225-260.
- Domanski, I., Cappadona, M., Fuller, O., Krix, Z., 2015: Geothermal power: factors affecting the performance of binary plants. *PAM Review Science & Technology*, **2**, 32-49.
- Edrisi, B.H., Michaelides, E.E., 2013: Effect of the working fluid on the optimum work of binary-flashing geothermal power plants. *Energy*, **50**, 389-394.
- Elders, W.A., Fridleifsson, G.Ó, Albertsson, A., 2014: Drilling into magma and the implications of the Iceland Deep Drilling Project (IDDP) for high-temperature geothermal systems worldwide. *Geothermics*, **49**, 111-118.
- Eliasson, E.T., Armansson, H., Fridleifsson, I.B., Gunnarsdottir, M.J., Bjornsson, O., Thorhallsson, S., Karlsson, T., 2004: Space and district heating. In: Dickson, M.H. – Fanelli, M. (Eds): *Geothermal Energy, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 73-105.
- Eliásson, E.T., Thorhallsson, S., Steingrímsson, B., 2014: Geothermal power plants. *Proceedings UNU-GTP and LaGeo Short Course IV on Utilization of Low- and Medium- Enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization*, Santa Tecla, El Salvador, 1-16.
- Eney, S.L., 2016: Update of augmented injection benefit model of The Geysers. *Geothermal Resource Council Transactions*, **40**, 893-900.

- Eppelbaum, L., Kutasov, I., Pilchin, A., 2014: *Applied Geothermics*. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, DE, 745 s.
- Erlingsson, T., Jóhannesson, T., 2008: Energy efficiency in space heating. *Proceedings Workshop for Decision Makers on Direct Heating use of geothermal resources in Asia*, Tianjin, China, 1-10.
- Ersoy, M., Blystad, P., Weatherstone, N., Camisano-Calzolari, F., Etherington, J., Kavun, K., Ross, J., Subelj, A., 2004: *United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Resources*, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, SUI, 97 s.
- Fadel, M., Reinecker, J., Bruss, D., Moeck, I., 2022: Causes of a premature thermal breakthrough of a hydrothermal project in Germany. *Geothermics*, **105**, p. 102523.
- Falcone, G., Beardsmore, G.R., 2015: Including geothermal energy within a consistent classification for renewable and non-renewable energy resources. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-6.
- Falcone, G., Gnoni, A., Harrison, B., Alimonti, C., 2013: Classification and reporting requirements for geothermal resources. *Proceedings European Geothermal Congress 2013*, Pisa, Italy, 1-8.
- Falcone, G., Antics, M., Baria, R., Bayrante, L., Conti, P., Grant, M., Hogarth, R., Juliusson, E., Mijnlief, H., Nádor, A., Ussher, G., Young, K., Beardsmore, G., 2016: *Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009 (UNFC-2009) to Geothermal Energy Resources*, UNECE / IGA, Geneva, SUI, 105 s.
- Fendek, M., Fendeková, M., 2015: Country update of the Slovak Republic. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-8.
- Fendek, M., Bodiš, D., Drozd, V., Král, M., Michalko, J., Remšík, A., Vika, K., 1999a: *Geotermálna energia*. Univerzita Komenského, Bratislava, 124 s.
- Fendek, M., Remšík, A., Král, M., 1999b: The nature of geothermal resources in Slovak Republic. *Slovak Geological Magazine*, **5 (1-2)**, 121-130.
- Fendek, M., Remšík, A., Fendeková, M., 2005: Metodika vyhľadávania, hodnotenia a bilancovania množstva geotermálnej vody a geotermálnej energie. *Mineralia Slovaca*, **37 (2)**, 117-123.
- Fendek, M., Bágeolová, A., Fendeková, M., 2011: Geotermálna energia vo svete a na Slovensku. *Podzemná voda*, **XVII (2)**, 74-83.
- Fendek, M., Fendeková, M., Daniel, S., Kultán, V., Friedrichs, B., Kaminsky, A., 2013: Bešeňová – využiteľné množstvo geotermálnej vody. [manuskript – Ciastková záverečná správa], archív Geofond, ŠGÚDŠ Bratislava, 91 s.
- Fendek, M., Grand, T., Daniel, S., Blanárová, V., Kultán, V., Bielik, M., 2017a: The pre-Cenozoic basement delineation by magnetotelluric methods in the western part of the Liptovská kotlina Depression (Western Carpathians, Slovakia). *Geologica Carpatica*, **68 (4)**, 318-328.
- Fendek, M., Blanárová, V., Fendeková, M., Božíková, J., Fričovský, B., 2017b: Vzťah prírodných liečivých zdrojov v Lúčkach a zdrojov geotermálnej vody v Bešeňovej. *Podzemná voda*, **23 (2)**, 91-112.
- Fiaschi, D., Manfrida, G., Rogail, E., Talluri, L., 2017: Exergoeconomic analysis and comparison between ORC and Kalina cycles to exploit low and medium-high temperature heat from two different geothermal sites. *Energy Conversion and Management*, **154**, 503-516.
- Finger, J., Blankenship, D., 2010: *Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling*. Sandia National Laboratories, Albuquerque, Nové Mexiko, USA, 184 s.
- Flóvenz, O.G., Hersir, G.P., Saemundsson, K., Ármannsson, H., Fridriksson, T., 2012: Geothermal energy exploration techniques. In: Sayigh, A. (Ed.): *Comprehensive renewable energy*, Elsevier Ltd., Oxford, 44 s.
- Focaccia, S., Tinti, F., Monti, F., Amidei, S., Bruno, R., 2016: Shallow geothermal energy for industrial applications: A case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **16**, 93-105.
- Fox, D.B., Sutter, D., Beckers, K.F., Lukawski, M.Z., Koch, D.L., Anderson, B.J., Tester, J.W., 2013: Sustainable heat farming: modelin extraction and recovery in discretely fractured geothermal reservoirs. *Geothermics*, **46**, 42-54.
- Franco, A., Donatini, F., 2016: Methods for the estimation of the energy stored in geothermal reservoirs. *Journal of Physics – Conference Series*, **796**, p.012025, doi:10.1088/1742-6596/796/1/012025
- Franko, O., Melioris, L., 1999: Conditions for formation and extension of mineral and thermal waters in the Western Carpathians. *Slovak Geological Magazine*, **5(1-2)**, 93-107.

Franko, O., Fusán, O., Franko, J., Král, M., 1994: Možnosti vyhľadávania ďalších zdrojov geotermálnej energie.: *Nízkotepelné vykurovanie 1994 - možnosti využitia geotermálnych vôd na Slovensku – zborník príspevkov*, 6. konferencia, Diakovce, SR, Bratislava, 18-29.

Franko O., Remšík, A., Fendek, M., 1995: *Atlas geotermálnej energie Slovenska*. ŠGÚDŠ, Bratislava.

Franko, O., Jetel, J., Hanzel, V., Bodiš, D., Böhm, V., Bujalka, P., Fides, J., Hyánková, K., 1998: Geologický slovník. Hydrogeológia. Geologická služba Slovenskej republiky, Bratislava, 301 s.

Frick, S., Kranz, S., Kupfermann, G., Saadat, A., Huenges, E., 2019: Making use of geothermal brine in Indonesia: binary demonstration power plant Lahedong/Pangolombian. *Geothermal Energy*, **71** (1), 1-19.

Fričovský, B., Jacko, S. Jr., Popovičová, M., Tometz, L., 2013: Substitution approach in carbon dioxide emission reduction evaluation: case study on geothermal power station project plan – Ďurkov (Košice Basin, Slovakia). *International Journal of Environmental Science and Development*, **4** (2), 124-129.

Fričovský, B., 2014: *Composite conceptual model and hydrogeothermal evaluation of the Bešeňová elevation hydrogeothermal structure, Liptov Basin, Slovakia*. Dizertačná práca. Fakulta BERG, Technická Univerzita v Košiciach, 301 s. [v angličtine]

Fričovský, B., Tometz, L., Fendek, M., Gumáňová, J., 2015: Update on composite geochemical conceptual model for the Bešeňová elevation geothermal structure, Liptov Basin, Slovakia. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-11.

Fričovský, B., Tometz, L., Fendek, M., 2016a: Geothermometry techniques in reservoir temperature estimation and conceptual site models construction: Principles, methods, and application for the Bešeňová elevation hydrogeothermal structure, Slovakia. *Mineralia Slovaca*, **48** (1), 1 – 60.

Fričovský, B., Černák, R., Marcin, D., Benková, K., 2016b: A first contribution on thermodynamic analysis and classification of geothermal resources of the Western Carpathians (an engineering approach). *Slovak Geological Magazine*, **16** (1), 94-117.

Fričovský, B., Černák, R., Marcin, D., Benková, K., Remšík, A., Fendek, M., 2016c: Engineering Approach in Classification of Geothermal Resources of the Slovak Republic (Western Carpathians). *Proceedings 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-10.

Fričovský, B., Bahnová, Benková, K., Bodiš, D., Černák, R., Kronome, B., Pažická, A., 2016d: *Trvalo udržateľný rezervoárový manažment. Princípy, význam, metodika a aplikovateľnosť*. [Manuskript – čiastková záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Stúra, Bratislava, 111 s.

Fričovský, B., Jagerčíková, E., Bodiš, D., 2016e: Rapid Impact Assessment Matrix: Case study for the Sliač Spa. *Slovak Geological Magazine*, **16** (2), 71-90.

Fričovský, B., Jagerčíková, E., Bodiš, D., 2017: Sustainable development and Rapid Impact Assessment model for the Sliač Spa, Slovakia. *Balneotechnické dni 2017 – zborník príspevkov*, Kúpele Nimnica, Slovensko, 1-11.

Fričovský B., Vizi, L., Surový, M., Mižák, J., 2018a: Indície numerických indikátorov rezervoárovej konvekcie v podmienkach hydrogeotermálnej štruktúry Ďurkovská depresia, Košická kotlina. *Geologické Práce, správy*, **132**, 3-30.

Fričovský, B., Vizi, L., Gregor, M., Zlocha, M., Surový, M., Černák, R., 2018b: Thermodynamic analysis and quality mapping of geothermal resource at the Ďurkov hydrogeothermal structure, Košice depression, Eastern Slovakia. *Proceedings 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1-9.

Fričovský, B., Černák, R., Marcin, D., Blanárová, V., Benková, K., Pelech, O., Fordinál, K., Bodiš, D., Fendek, M., 2020a: Geothermal energy use – Country update for Slovakia. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Iceland, 1-12.

Fričovský, B., Vizi, L., Surový, M., Fordinál, K., Zlocha, M., Gregor, M., Fričovská, J., 2020b: *Hydrogeotermálne hodnotenie Ďurkovskej depresie: Aplikácia princípov trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu*. [Manuskript – čiastková záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Stúra, Bratislava, 174 s.

Fričovský, B., Vizi, L., Marcin, D., Černák, R., Blanárová, V., Ujjobágyová, Z., Bodiš, D., Benková, K., Pelech, O., Fordinál, K., 2020c: Geothermal energy utilization in Slovakia: First insights from sustainability prospective. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Iceland, 1-12.

Fričovský, B., Vizi, L., Fordinál, K., Surový, M., Zlocha, M., 2020d: Analytical pseudo lumped-parameter model for reservoir response and recovery assessment: Case study for the Ďurkov depression hydrogeothermal structure, Košice Basin, Slovakia. *Slovak Geological Magazine*, **20** (1), 49-84.

- Fričovský, B., Marcin, D., Benková, K., Černák, R., Fordinál, K., Pelech, O., 2022: Geothermal energy use, Country update for Slovakia. *Proceedings European Geothermal Congress 2022*, Berlin, Germany, 1-14.
- Fričovský, B., Černák, R., Fordinál, K., Benková, K., Pelech, O., Marcin, D., 2023a: Geothermal energy use – Country update for Slovakia (2019 – 2022). *Proceedings World Geothermal Congress 2023*, Beijing, China, 1-14.
- Fričovský, B., Vizi, L., Fordinál, K., Černák, R., Benková, K., Marcin, D., 2023b: Probabilistic models of booking the geothermal reserves (McKelvey scheme) in construction of geothermal potential catalog for Slovakia – Case studies for the Levoča Basin, S and W part. *Proceedings 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, USA, 1-13.
- Fričovský, B., Marcin, D., Černák, R., Benková, K., Fordinál, K., Pelech, O., 2023c: Zdroje geotermálnej energie na Slovensku – udržateľný potenciál a prehľad stavu využitia a využívania za rok 2021-2022. *Zborník Obnoviteľné zdroje energie 2023*, Vysoké Tatry, Slovensko, 1-11.
- Fričovský, B., Vizi, L., Marcin, D., Benková, K., Černák, R., Fordinál, K., Bottlík, F., Bahnová, N., 2024: Analýza možností trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku – I. časť. [Manuskript - záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, nestr.
- Fričovský, B., Vizi, L., Fordinál, K., Pelech, O., Takács, J., Zummerová, Z. (2025?): Geotermálna energia v prirodzenom a technickom prostredí. Nepublikovaný, pripravovaný manuskript.
- Fridleifsson, G.Ó., Elders, W.A., 2017: Successful drilling for supercritical geothermal resources at Reykjanes in SW Iceland. *Geothermal Resources Council Transactions*, **41**, 1095-1107.
- Fridleifsson, I.B., Bertani, R., Huenges, E., Lund, J.W., Ragnarsson, A., Rybach, L., 2008: The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. In: Hohmeyer, O. – Trittin, T. (Eds.): *IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources Proceedings*, Loebeck, Germany, 59-80.
- Fusán, O., Plančár, J., Ibrmajer, J., 1987: Tektonická mapa podložia terciéru vnútorných Západných Karpát M 1 : 500 000. Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- Galloni, E., Fontana, G., Staccone, S., 2015: Design and experimental analysis of a mini ORC (organic Rankine cycle) power plant based on R245fa working fluid. *Energy*, **90**, 768-775.
- Garg, S.K., Combs, J., 2015: A reformulation of USGS volumetric „heat in place“ resource estimation method. *Geothermics*, **55**, 150-158.
- Gillou-Frottier, L., Carré, C., Bourguin, B., Bouchot, V., Genter, A., 2013: Structure of hydrothermal convection in the Upper Rhine Graben as inferred from corrected temperature data and basin-scale numerical models. *Journal of Volcanology and Geothermal research*, **256**, 29-49
- Glassley, W.E., 2015: *Geothermal Energy. Renewable energy and the environment, 2nd Edition*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 410 s.
- Goldstein, B. A., Hiriart, G., Tester, J., Bertani, R., Bromley, Ch., Gutierrez-Negrin, L.C.J., Huenges, E. H., Ragnarsson, A., Mongillo, M., Muraoka, a., Zui, V.I., 2011: Great expectations for geothermal energy to 2100. *Proceedings 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, s. 1-8.
- Gonzalez, A., Enríquez-de-Salamanca, Á., 2018: Spatial multi-criteria analysis in environmental assessment: A review and reflection on benefits and limitations. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, **20 (3)**, p.: 1840001
- González, Z., González, D., Kretzschmar, T., 2015: First Approach of Environmental Impact Assessment of Cerro Prieto Geothermal Power Plant, BC Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-9.
- González-García, H., Francke, H., Sass, I., Huenges, E., 2021: Production forecast and estimation of the recovery factor of the Los Humeros geothermal field, Mexico. *Geothermal Energy*, **9 (13)**, <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00194-z>
- Grant, M.A., 2000: Geothermal resource proving criteria. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan.
- Grant, M.A., 2014a: Stored-heat assessments: a review in the light of field experience. *Geothermal Energy Science*, **2**, 49-54.
- Grant, M.A., 2014b: *Lectures on Geothermal reservoir Engineering*. United Nations University Geothermal Training Programme course book, UNU GTP, Reykjavik, 79 s.
- Grant, M.A., 2018: Stored heat and recovery factor reviewed. In: *Proceedings 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-8.
- Grant, M.A., Bixley, P.F., 2011: *Geothermal Reservoir Engineering, 2nd Edition*. Elsevier – Academic Press, Amsterdam, NL, 359.

Grant, M.A., Donaldson, I.G., Bixley, P.F., 1982: *Geothermal reservoir engineering*. Academic Press, New York, 384 s.

Gudmundsdóttir, M., Brynjólfssdóttir, Á., Arbertsson, A., 2010: The history of the Blue Lagoon in Svartsengi. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonézia, 1-6.

Gudmundsdóttir, V., Steingrímsson, B., 2018: Geothermal well logs: the role of spinner, temperature and pressure logging during drilling in locating feed zones in wells. *Proceedings UNU GTP Short Course III on Geothermal Reservoir Characterization*, Santa Tecla, El Salvador, 1-8.

Gudmundsson, J.E., 2009: *Geothermal deliverability [Lecture Notes – GEO604a Geothermal deliverability]*. Manuscript. Norwegian Technical University in Trondheim / RES|The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 129s.

Guillaume, L., Legros, A., Desideri, A., Lemort, V., 2017: Performance of a radial-inflow turbine integrated in an ORC system and designed for a WHR on truck application: an experimental comparison between R245fa and R1233zd. *Applied Energy*, **186**, 408-422.

Gungor, A., Erbay, Z., Hepbasli, A., 2011: Exergetic analysis and evaluation of a new application of gas-engine heat pumps (GEHPs) for food drying processes. *Applied Energy*, **88**, 882-891.

Gunnarsson, G., Arasdóttir, F.S.P., 2014: The deep roots of geothermal systems in volcanic areas: boundary conditions and heat sources in reservoir modelling. *Transport in Porous Media*, **108**, 43-59.

Hajkowicz, S.A., 2007: A comparison of multiple criteria analysis and unaided approaches to environmental decision making. *Environmental Science Policy*, **10**, 177-84.

Halás Sr., O., 2015: Geothermal District Heating Systems in Slovakia – Current Status and Plans. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-5.

Halás Sr., O., Drozd, V., Vranovská, A., 1999: Investigation of Ďurkov geothermal structure in Košice Basin for geothermal energy utilization. *Proceedings XXIX IAH Congress: Hydrogeology and Land Use Management*, Bratislava, Slovensko, 689-695.

Halás Jr. O., Halás Jr. O., Drozd, V., Výboch, M., 2016: *Košická kotlina – geotermálna energia: Čiastková záverečná správa a výpočet množstiev vôd* [manuskript – Záverečná správa] SLOVGEOTERM a.s., Bratislava, 58 s.

Haslinger, E., Turewicz, V., Hammer, A., Götzl, G., 2022: Assessment of deep and shallow geothermal resources and measurement of waste heat potentials from industrial processes for supplying renewable heat for industry and urban quarters. *Processes*, **10**, p: 1125, 1-18.

Hersir, G.P., Björnsson, A., 1991: *Geophysical exploration for geothermal resources. Principles and application*. Textbook, UNU Geothermal Training Programme / Orkurstofnun – National Energy Authority, Reykjavik, Icelans, 95 s.

Heřmanská, M., Kleine, B.I., Stefánsson, A., 2020: Geochemical constraints on supercritical fluids in geothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **394**, p.: 106824.

Hill, G.B., Pring, E.J., Osborn, P.D., 1990: *Cooling towers: Principles and Practice, 3rd Edition*. Butterworth-Heinemann, Boston, MA, USA, 199 s.

Hiscock, K.M., 2005: *Hydrogeology. Principles and Practice*. Blackwell Science Ltd., Oxford, UK, 405 s.

Hochstein, M.P., 1990: Classification and assessment of geothermal resources, in: M.H. Dickson, M. Fanelli (Eds.): *Small Geothermal Resources: A Guide to Development and Utilization*, UNITAR, New York, 31-57.

Hók, J., Pelech, O., Teřák, F., Németh, Z., Nagy, A., 2019: Outline of the geology of Slovakia (W. Carpathians). *Mineralia Slovaca*, **51 (1)**, 31 – 60.

Hosgor, F.B., Cinar, M., Kaklıdir, F.T., Tureyen O.I., Satman, A., 2013: A new lumped parameter (tank) model for reservoirs containing carbon dioxide. *Proceedings 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, 1-7.

Huenges, E., 2016: Enhanced geothermal systems: review and status of research and development. In: DiPippo, R. (Ed.): *Geothermal Power Generation: Developments and Innovations*. Woodhead Publishing, Oxford, MA, USA, s. 743-761.

Ijäs, A., Kuitunen, M.T., Jalava, K., 2008: Developing the RIAM method (rapid impact assessment matrix) in the context of impact significance assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, **30**, 82-89.

Jacobo, P., Montalvo, F.E., 2013: Chemical response monitoring during production. *Proceedings UNU GTP Short Course V on Conceptual Modelling of Geothermal Systems*, Santa Tecla, El Salvador, 1-12.

Jalilinasrabad, S., Tanaka, T., Itoi, R., Goto, R., 2021: Numerical simulation and production prediction assessment of Takigami geothermal reservoir. *Energy*, **236**, p.: 121503.

- Jaupart, C., Mareschal, J.C., 2010: *Heat generation and transport in the Earth*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 462 s.
- Jiang, A., Qin, Z., Faulder, D., Cladouhos, T.T., Jafarpour, B., 2022: Recurrent neural networks for short-term and long-term prediction of geothermal reservoirs. *Geothermics*, 104, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102439>
- Jóhannesson, T., Chatenay, C., 2014a: Direct use of geothermal resources. *Proceedings UNU GTP Short Course VI on Utilization of low- and medium- enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization*, Santa Tecla, El Salvador, 1-9.
- Jóhannesson, T., Chatenay, C., 2014b: Industrial applications of geothermal resources. *Proceedings UNU GTP Short Course VI on Utilization of low- and medium- enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization*, Santa Tecla, El Salvador, 1-7.
- Jolie, E., Scott, S., Faulds, J., Chambefort, I., Axelsson, G., Gutiérrez-Negrín, L.C., Regensprug, S., Ziegler, M., Ayling, B., Richter, A., Zemedkun, M.T., 2021: Geological controls on geothermal resources for power generation. *Nature reviews: earth & environment*, 2, 324-339.
- Kalina, A., Kalina, M., Dickson, J., Moore, S., 2014: Evaluation and comparison of currently available binary cycle geothermal power systems. *Geothermal Resource Council Transactions*, 38, 777-788.
- Kamila, Z., Kaya, E., Zarrouk, S.J., 2021: Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020. *Geothermics*, 89, 1-88.
- Karlisdóttir, S.N., 2012: Corrosion, scaling and material selection in geothermal power production. In: Sayigh, A. (Ed.): *Comprehensive renewable energy*, Elsevier Ltd., 7.08 / 242-261.
- Karlisdóttir, M.R., Pálsson, Ó.P., Pálsson, H., Maya-Drysdale, L., 2015: Life cycle inventory of a flash geothermal combined heat and power plant located in Iceland. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20 (4), 503-519.
- Kaya, E., Zarrouk, S.J., 2017: Reinjection of greenhouse gases into geothermal reservoirs. *International Journal of Greenhouse gas Control*, 67, 111-129.
- Kaya, E., Zarrouk, S.J., O'Sullivan, M.J., 2011: Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 47-68.
- Kjaran, S.P., Eliasson, J., 2008: *Geothermal reservoir engineering*. United Nations University Geothermal Training Programme, Reykjavik, Iceland, 248 s.
- Kristmansdóttir, H., 2009: *Chemical monitoring in low- and high- geothermal fields: GEO604 coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 97 s.
- Kristmannsdóttir, H., Ármannsson, H., 2003: Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics*, 32 (4), 451-461.
- Kuitunen, M., Jalava, K., Hirvonen, K., 2008: Testing the usability of the rapid impact assessment matrix (RIAM) method for comparison of EIA and SEA results. *Environment Impact Assessment Reviews*, 28, 312-320.
- Kukurugyová, M., Akkurt, G.G., Nalevanková, J., Dzurňák, R., 2015a: Comparison of working fluid for ORC geothermal power plant Ďurkov. *Proceedings ISeC 2015*, Bratislava, Slovakia, 1-8.
- Kukurugyová, M., Holoubek, D., Nalevanková, J., Dzurňák, R., Jablonský, G., 2015b: Effect of changes in external conditions for geothermal kalina cycle operated in cogeneration. *Energetické premeny v priemysle, zborník príspevkov*, Košice, 91-97.
- Kullman Ml., E., Malík, P., Patschová, A., Bodiš, D., 2005: Delineation of groundwater bodies on Slovak territory according to EU Water Framework Directive 2000/60/EC. *Podzemná voda*, XI (1), 5-18.
- Lawless, J.V., Ward, M., Beardsmore, G., 2010: The Australian Code for Geothermal Reserves and Resources Reporting: Practical Experience. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-5.
- Lee, K.C., 1996: Classification of geothermal resources – an engineering approach. *Proceedings, 21st Workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-8.
- Lee, K.C., 2001: Classification of geothermal resources by exergy. *Geothermics*, 30, 431-442.
- Lee, I., Tester, J.W., You, F., 2019: System analysis, design and optimization of geothermal energy systems for power production and polygeneration: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 551-577.
- Lindal, B., 1973: Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H. (Ed.): *Geothermal Energy. Review of research and development*. UNESCO, Paris, France, s. 135-151.

Lindal, B., 1992: Review of industrial applications of geothermal energy and future considerations. *Geothermics*, **21** (5-6), 591-604.

Liu, X., Li, H.S., Bu, X.B., Wang, L.B., Xie, N., Zeng, J., 2018: Performance characteristics and working fluid selection for low-temperature binary flashing cycle. *Applied Thermal Energy*, **141**, 51-60.

Lomeri, C.P., Rotich, B., 2014: Livestock, herders and steam: geothermal energy technology and its application in sustainable pastoralism in the arid and semi-arid lands of Kenya. *Proceedings 5th African Rift Geothermal Conference*, Arusha, Tanzania, 1-9.

Lund, J.W., Toth, A.N., 2020: Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Iceland, 1-39

Lund, J.W., Freeston, D.H., Boyd, T.L., 2011: Direct utilization of geothermal energy 2010, worldwide review. *Geothermics*, **40**, 159-180.

Majcin, D., Král, M., Bilčík, D., Šujan, M., Vranovská, A., 2017: Deep geothermal sources for electricity production in Slovakia: thermal conditions. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, **47** (1), 1-22.

Malolepszy, Z., Demillin-Schneiders, E., Bowers, D., 2005: Potential use of geothermal mine waters in Europe. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-3.

Marcin, D., Remšík, A., Benková, K., 2014: Geothermal water utilization in Slovakia. *Slovak Geological Magazine*, **2/2014**, 69-79

Marcin, D., Benková, K., Fričovský, B., 2016: Hodnotenie útvarov geotermálnych vôd Slovenska – aktualizácia [Manuskript - záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Stúra, Bratislava, 56 s.

Marcin, D., Benková, K., Fričovský, B., Bodiš, D., Bottlík, F., Kordík, J., Stríček, I., 2020: Hodnotenie stavu geotermálnych útvarov podzemných vôd na území Slovenskej republiky. [Manuskript - záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Stúra, Bratislava, 312 s.

Marcin, D., Benková, K., Fričovský, B., Bottlík, F., Vizi, L., Michalko, J., Kronome, B., Dugovič, R., Zeman, I., Kordík, J., Gluch, A., Bodiš, D., Repková, R., Stríček, I., Bilohuščin, J., Kováčik, M., Čech, P., Fordinál, K., Filep, Z., 2020: *Regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie komárňanskej okrajovej kryhy, komárňanskej vysokej kryhy a Ďurkovej depresie*. [Manuskript. Čiastková záverečná správa]. ŠGÚDŠ Bratislava, 174 s.

Matas-Escamilla, A., Álvarez, R., García-Carro, F., Álvarez-Alonso, L., Cienfuegos, P., Menéndez, J., Ordóñez, A., 2023: Mine water as a source of energy: an application in a coalfield in Laciana Valley (León, NW Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-14, <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02526-y>

Mégel, T., Rybach, L., 2000: Production capacity and sustainability of geothermal doublets. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Antalya, Turkey, 1-6.

Michalík, J., Vass, D., Hudáčková, N., Kováčová, M., Lintnerová, O., Reháková, D., Soták, J., Schlögl, J., Aubrecht, R., Vozárová, A., Sliva, E., Lexa, J., Konečný, V., Túnyi, I., Potfaj, M., 2007: *Stratigrafická príručka. Slovenská stratigrafická terminológia, stratigrafická klasifikácia a postupy*. VEDA – Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 166 s.

Moock, I.S., 2014: Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Geothermics*, **37**, 867-882.

Moock, I.S., Beardmore, G., 2014: A new „Geothermal Play Type“ catalog: streamlining exploration decision making. *Proceedings 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-10.

Monaghan, A.A., Starcher, V., Barron, H.F., Shorter, K., Walker-Verkuil, K., Elsome, J., Kearsey, T., Arkley, S., Hannis, S., Callaghan, E., 2022: Drilling into mines for heat: geological synthesis of the UK Geoenery Observatory in Glasgow and implications for mine water heat resources. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, **55**, p:2021-033

Moran, M.J., Shapiro, H.N., 2004: *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5th Edition*. John Wiley & Sons, New York, USA, 205-212.

Mortensen, A.K., Axelsson, G., 2013: Developing a conceptual model of a geothermal system. *Proceedings UNU GTP Short course on geothermal development and geothermal wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-10.

Monterossa, M., Montalvo López, F.E., 2010: Sustainability analysis of the Ahuachapán geothermal field: management and modeling. *Geothermics*, **39**, 370-381.

Monterossa, M., Axelsson, G., 2013: Reservoir response monitoring during production. *Proceedings UNU GTP Short Course V on Conceptual Modelling of Geothermal Systems*, Santa Tecla, El Salvador, 1-12.

Mott, A., Baba, A., Mosleh, M.H., Okten, H.E., Babaei, M., Goren, A.Z., Feng, C., Recepoglu, Y.K., Uzelli, T., Uytun, H., Morata, D., Yuksel, A., Sedinghi, M., 2022: Boron in geothermal energy: sources, environmental impacts and management in geothermal fluid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **167**, p.: 112825, 1-17

- Mroczek, E., Climo, M., Li, Y., Evans, D., Carey, B., Gao, W., 2015: From waste to wealth: mineral extraction from geothermal brines. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-7
- Moya, P., Nietzen, F., 2010: Production-injection at the Miravalles geothermal field, Costa Rica. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-11.
- Muffler, L.P.J., Cataldi, R., 1978: Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, **7** (1), 53-89.
- Nel, W.P., Cooper, C.J., 2009: Implications of fossil fuel constraints on economic growth and global warming. *Energy Policy*, **37** (1), 166-180.
- Neupane, G., Wendt, D.S., 2017: Assessment of mineral resources in geothermal brines in the U.S. *Proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1-18.
- Nguyen, M.V., Arason, S., Gissurarson, M., Pálsson, P.G., 2015: *Uses of geothermal energy in food and agriculture. Opportunities for developing countries*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 62 s.
- Nicholson, K., 1993: *Geothermal Fluids. Chemistry and exploration techniques*. Springer-Verlag, Berlin, nemecko, 264 s.
- Nico, P., Cinar, A., Dobson, P., Doughty, Ch., Hu, J., Smith, T., Soga, K., Sonnenthal, E., Sun, X., Wetter, M., 2020: Community-scale geothermal energy systems. *Geothermal Resource Council Transactions*, **44**, 2332-1333.
- Nield, D.A., Bejan, A., 2006: *Convection in porous media. Third Edition*. Springer Science and Business Media, New York, NY, USA, 65 s.
- Nleonu, E.Ch., Omenikolo, I.A., Ibe, O., 2020: Application of geothermal energy in agriculture: a review. *International Journal of Engineering Applied Science and Technology*, **5** (1), 666-673.
- Onur, M., Palabiyik, Y., Tureyen, O.I., Cinar, M., 2016: Transient temperature behavior and analysis of single-phase liquid-water geothermal reservoirs during drawdown and buildup tests: Part II. Interpretation and analysis methodology with applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **146**, 657-669.
- O'Sullivan, M.J., Pruess, K., Lippmann, M.J., 2001: State of art of geothermal reservoir simulation. *Geothermics*, **30**, 395-429.4 s.
- Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., 2005: Energy and exergy analysis of geothermal district heating systems: an application. *Building and Environment*, **40**, 1309-1322.
- Ozgener, L., Hepbasli, A., Dincer, I., Rosen, M.A., 2007: A key review on performance improvement aspects of geothermal district heating systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **11**, 1675-1697.
- Pambudi, N.A., Itoi, R., Jalilinasrabadz, S., Jaelani, K., 2015: Performance improvement of a single-flash geothermal power plant in Dieng, Indonesia, upon conversion to a double-flash system using thermodynamic analysis. *Renewable Energy*, **80**, 424-431.
- Pastakia, C.M.R., 1998: The rapid impact assessment matrix (RIAM) – A new tool for environmental impact assessment. In: Jensen, K. (Ed.): *Environmental Impact Assessment Using the Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM)*, Olsen & Olsen, Fredensborg, Denmark, 200 s.
- Pastakia, C.M.R., Madsen, K.N., 1995: A Rapid Assessment Matrix for use in water related projects. *Proceedings the Stockholm Watter Conference*, Stockholm, Sweden, 1-10.
- Pastakia, C.M.R., Jensen, A., 1998: The Rapid Impact Assessment Matrix (RIAM) for EIA. *Environmental Impact Assessment Reviews*, **18**, 461-482.
- Patsa, E., van Zyl, D., Zarrouk, S.J., Arianpoo, N., 2015a: Geothermal energy in mining developments: Synergies, and opportunities throughout a mine's operational life cycle. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 1-14.
- Patsa, E., Zarrouk, S.J., van Zyl, D., 2015b: The Lindal diagram for mining engineering. *Geothermal Resource Council Transactions*, **39**, 151-156.
- Patterson, J.R., Cardiff, M., Feigl, K.L., 2020: Optimizing geothermal production in fractured rock reservoirs under uncertainty. *Geothermics*, **88**, p. 101906, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101906>
- Pelech, O., Michalík, J., Aubrecht, R., Fordinál, K., Hudáčková, N., Kohút, M., Kováčová, M., Levická, J., Lintnerová, O., Maglay, J., Moravcová, M., Ondrejka, M., Potfaj, M., Reháková, D., Sabol, M., Schlögl, J., Sliva, E., Soták, J., Šarinová, K., Šujan, M., Vančová, I., Vozárová, A., 2021: Slovenská verzia medzinárodnej chronostratigrafickej tabuľky. *Mineralia Slovaca*, **53** (2), 103-114.

- Person, M., Kelley, S., Kelley, R., Karra, S., Harp, D., Witcher, J., Bielicki, J., Sutula, G., Middleton, R., Pepin, J.D., 2015: Hydrogeologic windows: detection of blind and traditional geothermal play fairways in southwestern New Mexico using conservative element concentrations and advective-diffusive solute transport. *Geothermal Resource Council Transactions*, **39**, 751-760.
- Petránek, J., Březina, J., Břízová, E., Cháb, J., Loun, J., Zelenka, P., 2016: *Encyklopedie geologie*. Česká geologická služba, Praha, 349 s.
- Phillips, J., 2010a: Evaluating the level and nature of sustainable development for a geothermal power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 2414-2425.
- Phillips, J., 2010b: The advancement of a mathematical model of sustainable development. *Sustainability Science*, **5**, 127-142.
- Plančár, J., Ibrmajer, J., Fusán, O., 1985: Mapa reliéfu predterciérneho podložia Vnútrotných Západných Karpát, M 1 : 500 000. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava.
- Plašienka, D., 1999: *Tektonochronológia a paleotektonický model jursko-kriedového vývoja Centrálnych Západných Karpát*. VEDA – Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 125 s.
- Plašienka, D., Aubrecht, R., Kováč, M., Kronome, B., Pivko, D., Sliva, L., 2006: Geológia a geologický vývoj Západných Karpát. Univerzita Komenského v Bratislave, 171 s.
- Plummer, M.A., Palmer, C.D., Mattson, E.D., Hull, L.C., 2011: A reactive tracer analysis method for monitoring thermal drawdown in geothermal reservoirs. *Proceedings 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-6.
- Popovski, K., 2004: Greenhouse heating. In: Dickson, M.H. – Fanelli, M. (Eds): *Geothermal Energy, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 125-154.
- Porras, E., 2008: Twenty five years of production history at Momotombo geothermal field, Nicaragua. *Proceedings of the 30th Anniversary Workshop of the United Nations University Geothermal Training Programme*, Reykjavik, Iceland, 1-7.
- Poulsen, S.E., Balling, N., Nielsen, S.B., 2015: A parametric study of the thermal recharge of low enthalpy geothermal reservoirs. *Geothermics*, **53**, 464-478.
- Preene, M., Younger, P.L., 2014: Can you take the heat ? Geothermal energy in mining. *Mining Technology*, **123** (2), 107-118.
- Quinao, J.J., Zarrouk, S.J., 2014a: A review of the volumetric stored-heat resource assessment: One method, different results. In: *Proceedings 36th New Zealand Geothermal Workshop*, Auckland, NZ, 1-5.
- Rafferty, K., 2003: Industrial processes and the potential for geothermal applications. *GeoHeat Center Bulletin*, **2003**, 7-13.
- Rafferty, K., 2004: Aquaculture. In: Dickson, M.H. – Fanelli, M. (Eds): *Geothermal Energy, 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 155-168.
- Ragnarsson, Á., Ágústsson, M., 2014: Geothermal energy in horticulture. *Proceedings UNU GTP Short Course VI on Utilization of low- and medium- enthalpy geothermal resources and financial aspects of utilization*, Santa Tecla, El Salvador, 1-7.
- Ragnarsson, A., Steingrímsson, B., Thorhallsson, S., 2020: Geothermal development in Iceland 2015-2019. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Island, 1-15.
- Remšík, A., Franko, O., Bodiš, D., 1992: Geotermálne zdroje komárňanskej kryhy. *Západné Karpaty – séria hydrogeológia a inžinierska geológia*, **10**, ŠGÚDŠ, Bratislava, 159-199.
- Remšík, A., Fendek, M., Mello, J., Král, M., Bodiš, D., Michalko, J., Maďar, D., Vika, K., 1998: Liptovská kotlina – regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie. [Manuskript - záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 94 s.
- Remšík, A., Švasta, J., Marcin, D., Benková, K., Černák, R., Mikita, S., Bottlík, F., Kováčová, E., Bahnová, N., Jurčák, S., Pažická, A., Gregor, M., Fajčíková, K., Cvečková, V., Kováčík, M., Siráňová, Z., Buček, S., Bačová, N., Záhorová, L., Lenhardtová, E., Tóthová, K., 2011: *Hodnotenie útvarov geotermálnych vôd, regionálny geologický výskum* [Manuskript – záverečná správa]. ŠGÚDŠ, Bratislava, Archív Geofond, 107 s.
- Renner, J.L., White, D.E., Williams, D.L., 1975: Hydrothermal convection systems. In: White, D.E. – Williams, D.L. (Eds.): *Assessment of geothermal resources of the United States 1975*, US Geological Survey Circular 726, Arlington, VA, USA, 5-58.
- Rivas, J.A., Castellón, J.A., Maravilla, J.N., 2005: Seven years of reservoir seismic monitoring at Berlín geothermal field, Usulután, El Salvador. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-8.

- Robertson-Tait, A., Harvey, W., Hamm, S., Boyd, L., 2020: The United States of America Country Update 2020 – Power Generation. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Island, 1-13.
- Rogers, P.P., Jalal, K.F., Boyd, J.A., 2007: *An introduction to sustainable development*. Earthscan – Glen Education Foundation Inc., Sterling, VA, USA, 417 s.
- Rosen, M.A., Dincer, I., 2003: Exergy – cost – energy – mass analysis of thermal systems and processes. *Energy conversion and management*, **44** (10), 1633-1651.
- Rosen, M.A., Fayegh, S.K., 2017: *Geothermal Energy. Sustainable heating and cooling using the ground*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, 299 s.
- Rosen, M.A., Dincer, I., Kanoglu, M., 2008: Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy*, **36**, 128-137.
- Ross, J., Camisani-Calzolari, F., DiLuzio, D., Dixon, R., Bankes, P., Elliot, D., Klett, T., Knudsen, K.R., Lambert, I., Carson, L., Mieztis, Y., MacDonald, D., Podturkin, Y., Trotman, D., 2013: *United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009 incorporating Specifications for its Application*, United Nations Economic Commission for Europe, Geneva, SUI, 69 s.
- Rybach, L., 2003: Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, **32** (4-6), 463-470.
- Rybach, L., 2007: Geothermal sustainability. *Proceeding European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany, 1-5.
- Rybach, L., 2010a: The future of geothermal energy and its challenges. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-8.
- Rybach, L., 2010b: Status and prospects of geothermal energy. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-8.
- Rybach, L., 2015: Classification of geothermal resources by potential. *Geothermal Energy Science*, **3**, 13-17.
- Rybach, L., 2022: Geothermal sustainability or heat mining? *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*, **4** (1), 15-25
- Rybach, L., Mongillo, M., 2006: Geothermal sustainability – a review with identified research needs. *Geothermal Resource Council Transactions*, **30**, 1083-1090.
- Rybach, L., Eugster, W.J., 2010: Sustainability aspects of geothermal heat pump operation with experience from Switzerland. *Geothermics*, **39**, 365-369.
- Rybach, L., Mégel, T., Eugster, W.J., 1999: How renewable are geothermal resources? *Geothermal Resources Council Transactions*, **23**, 563-567.
- Saemundsson, K., 2009: Geothermal systems in global perspective. *UNU-GTP Short Course on Exploration of Geothermal Resources*, Naivasha, Keňa, 1-11.
- Saemundsson, K., 2010: Geology and gradient wells. *Proceedings UNU GTP Short Course V on Exploration for Geothermal Resources*, Lake Naivasha, Kenya, 1-9.
- Santos, P., 2011: Geothermal well target approaches in the exploration stage. *Proceedings UNU GTP Short Course on Geothermal drilling, resource development and power plants*, Santa Tecla, El Salvador, 1 – 7.
- Sanyal, S.K., 2005a: Classification of geothermal systems – a possible scheme. *Proceedings 30th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, 85-88.
- Sanyal, S.K., 2005b: Sustainability and renewability of geothermal power capacity. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-13.
- Sanyal, S.K., 2005c: Cost of geothermal power and factors that affect it. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-10.
- Sanyal, S.K., Butler, S.J., 2004: National assessment of U.S. enhanced geothermal resource base – a perspective. *Geothermal Resource Council Transactions*, **28**, 233-238.
- Sanyal, S.K., Butler, S.J., 2005: An analysis of power generation prospects from Enhanced Geothermal Systems. *Geothermal Resource Council Transactions*, **29**, 131-137.
- Sanyal, S.K., Sarmiento, Z.F., 2005: Booking geothermal energy reserves. *Geothermal Resource Council Transactions*, **29**, 467-474.
- Sanyal, S.K., Morrow, J.W., 2010: Quantification of geothermal resource risk – a practical perspective. *Geothermal Resource Council Transactions*, **34**, 125-130.
- Sanyal, S.K., Eneedy, S.L., 2011: Fifty years of power generation at The Geysers geothermal field, California – the lessons learned. *Proceedings 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-9.

Sanyal, S.K., Henneberger, R.C., Klein, C.W., Decker, R.W., 2002: A methodology for assessment of geothermal energy reserves associated with volcanic systems. *Geothermal Resources Council Transactions*, **26**, 59-64.

Sanyal, S.K., Klein, C.W., Lovekin, J.W., Henneberger, R.C., 2004: National assessment of US geothermal resources – a perspective. *Geothermal Resource Council Transactions*, **28**, 355-362.

Sarmiento, Z., Steingrímsson, B., Axelsson, G., 2018: Volumetric method assessment. *Proceedings UNU GTP Short Course III on Geothermal Reservoir Characterization: Well Logging, Well Testing and Chemical Analysis*, Santa Tecla, El Salvador, 1-16.

Schellnhuber, H.J., 1998: Part 1: earth system analysis—the concept. In: Schellnhuber H.J. & Wenzel, V. (Eds): *Earth system analysis: integrating science for sustainable development*. Springer, Berlin, 3–195.

Schellnhuber, H., J., 2001: Earth system analysis and management. In: Ehlers, E. & Kraft T (Eds.) *Understanding the Earth system: compartments, processes and interactions*. Springer, Berlin, 17-55.

Schulte, T., Zimmermann, G., Vuataz, F., Portier, S., Tischner, T., Junker, R., Jatho, R., Huenges, E., 2010: Enhancing geothermal reservoir. In: Huenges, E. (Ed.): *Geothermal Energy Systems. Exploration, Development and Utilization*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, DE, s. 173-245.

Shokati, N., Ranjbar, F., Yari, M., 2015: Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. *Renewable Energy*, **83**, 527-542.

Shortall, R., Davidsdottir, B., Axelsson, G., 2015a: Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **44**, 391-406.

Skrzypczak, R., Kepinska, B., Pajak, L., Bujakowski, W., 2021: Prospects for the application of geothermal resources in agriculture in Poland taking account of the natural functions of the countryside. *Geothermal Energy Science*, **9**, p:23.

Sing, R.K., Murty, H.R., Gupta, S.K., Dikshit, A.K., 2012: An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological Indicators*, **15**, 281-299.

Smith, R.L., Shaw, H.R., 1975: Igneous-related geothermal systems. In: White, D.E. et al. (Eds.): *Assessment of geothermal resources of the United States – 1975*. US Geological Survey Circular, 726, Arlington, VA, USA, 58-84.

Smith, Y.R., Kumar, P., McLennan, J.D., 2017: On the extraction of Rare Earth Elements from geothermal brines. *Resources*, **6** (3), p.: 39, 1-16.

Soltani, M., Kashkooli, F.M., Souri, M., Fariei, B., Jabarifar, M., Gharali, K., Nathwani, J.S., 2021: Environmental, economic, and social impacts of geothermal energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, p. 110750

Sorey, M.L., Nathenson, M., Smitch, Ch., 1982: Methods for assessing low-temperature geothermal resources. In: Reed, M.J. (Ed.): *Assessment of low-temperature geothermal resources of the United States - 1982*. United States Geological Survey, Arlington, VA, USA, 17-31.

Sowa-Watrak, A., Klosok-Bazan, I., Gono, M., Gono, R., 2017: The criteria for suitable location of geothermal power plant. *Proceedings 18th International scientific conference on electric power engineering*, Kouty nad Desnou, CR, 1-5.

Spycher, N., Peiffer, L., Sonnenthal, E.L., Saldi, G., Reed, M.H., Kennedy, B.M., 2014: Integrated multicomponent solute geothermometry. *Geothermics*, **51**, 113-123.

Stefansson, V., Axelsson, G., 2003: Sustainable utilization of geothermal energy resources. *Proceedings Icelandic Geothermal Conference Short Course*, Reykjavik, Iceland, s. 1-13.

Stefansson, V., 2000: The renewability of geothermal energy. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, 1-6.

Stefansson, V., 2002: Investment cost for geothermal power plants. *Geothermics*, **31** (2), 263-272.

Stefansson, V., Axelsson, G., 2005: Sustainable utilization of geothermal resources through stepwise development. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, s. 1-6.

Stefansson, V., Axelsson, G., 2006: The sustainable use of geothermal resources. *Geothermal Resources Council Transactions*, **35** (2), 68-72.

Stefansson, V., Axelsson, G., Sigurdsson, Ó., Kjarran, S.P., 1995: Geothermal reservoir management in Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, 1-6.

Stefánsson A., Keller N.S., Robin J.G., Kaasalainen H., Björnsdóttir S., Pétursdóttir S., Jóhannesson H., Hreggvidsson G.O., 2016: Quantifying mixing, boiling, degassing, oxidation and reactivity of thermal waters at Vonarskard, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **309**, 53-62.

Steingrímsson, B., Axelsson, G., Stefánsson, V., 2005: Sustainable use of geothermal energy. *Proceedings UNU-GTP Workshop on Decision Makers on Geothermal Projects*, Lake Naivasha, Kenya, s. 1-11.

Steingrímsson, B., Axelsson, G., Stéfansson, V., 2006: Reservoir management and sustainable use of geothermal energy. *Proceedings UNU-GTP Workshop on Decision Makers on Geothermal Projects*, San Salvador, El Salvador, s. 1-13.

Strpic, K., Barbaresi, A., Tinti, F., Bovo, M., Benni, S., Torreggiani, D., Macini, P., Tassinari, P., 2020: Application of ground heat exchangers in cow barns to enhance milk cooling and water heating and storage. *Energy and Buildings*, **224**, p: 110213.

Sutter, D., Fox, D.B., Anderson, B.J., Koch, D.L., von Rohr, P.R., Tester, J.W., 2011: Sustainable Heat Farming of Geothermal Systems: a Case Study of Heat Extraction and Thermal Recovery in a Model EGS Fractured Reservoir. In: *Proceedings 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-11.

Tester, J.W., Anderson, B.J., Batchelor, A.S., Blackwell, D.D., DiPippo, R., Drake, E.M., Garnish, J., Livesay, B., Moore, M.C., Nicchols, K., Petty, S., Toksoz, M.N., Veatch Jr., R.W., 2006: *The future of geothermal energy*. Massachusetts Institute of Technology, 372 s.

Thomas, H., Reinhardt, T.P., Segneri, B., 2015: Low temperature geothermal mineral recovery program. *Proceedings 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1-10.

Thorhallsson, S., 2009: *Geothermal Drilling Technology: GEO6034 coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 348 s.

Thórhallsson, S., 2012a: Cleaning and stimulation of geothermal wells. *Proceedings UNU GTP Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-6.

Thórhallsson, S., 2012b: Slim wells for geothermal exploration. *Proceedings UNU GTP Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-7.

Thórhallsson, S., Gunnlaugsson, E., 2012: Directional wells. *Proceedings UNU GTP Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-3.

Thorolfsson, G., 2010: Silencers for flashing geothermal brine: Thirty years of Experimenting. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonézia, 1-4.

Tomarov, G.V., Shipkov, A.A., 2017: Modern geothermal power: Binary cycle geothermal power plants. *Thermal Engineering*, **64**, 243–250.

Tomasini-Montenegro, C., Santoyo-Castelazo, E., Gujba, H., Romero, R.J., Santoyo, E., 2017: Life cycle assessment of geothermal power generation technologies: an updated review. *Applied Thermal Engineering*, **114**, 1119-1136.

Tomaszewska, B., Akkurt, G.G., Maczmarczyk, M., Bujakowski, W., Keles, N., Jarma, Y.A., Bryjak, M., Kabay, N., 2021: Utilization of renewable energy sources in desalination of geothermal water for agriculture. *Desalination*, **513**, p: 115151, 1-15

Tomaszewska, B., Mukti, M., Czubernat, M., Tyszer, M., Kepinska, B., Bujakowski, W., Kastelewicz, A., Kabay, N., Baba, A., Bryjak, M., Akkurt, G.G., Okten, H.E., Meric, M.K., 2022: Geothermal resources for agriculture: hydroponic and in soil lettuce cultivation using geothermal water and energy. *Proceedings European Geothermal Congress 2020*, Berlin, Germany, 1-6.

Tonkin, R., O'Sullivan, J., Gravatt, M., O'Sullivan, M., 2023: A transient geothermal wellbore simulator. *Geothermics*, **110**, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023>

Tsuchiya, N., Yamada, R., Uno, M., 2016: Supercritical geothermal reservoir revealed by a granite-porphyry system. *Geothermics*, **63**, 182-194.

Turchi, C., McTigue, J., Akar, S., Beckers, K., Tillman, T., 2018: Deep direct-use for industrial applications: producing chilled water for gas turbine inlet cooling. *Geothermal Resource Council Transactions*, **42**, 1-16.

Tureyen, O.I., Kirmaci, A., Onur, M., 2014: Assessment of uncertainty in future performance predictions by lumped-parameter models for single-phase liquid geothermal systems. *Geothermics*, **51**, 300-311.

Ungemach, P., Antics, M., Papachristou, M., 2005: Sustainable geothermal reservoir management. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-8.

Ungemach, P., Papachristou, M., Antics, M., 2007: Renewability versus Sustainability. A reservoir management approach. In: *Proceedings, European Geothermal Congress 2007*, Unterhaching, Germany.

Ungemach, P., Antics, M., Lalos, P., 2009: Sustainable geothermal reservoir management practice. *Geothermal Resources Council Transactions*, **33**, 885-891.

- Ussher, G., Parker, C., Urzua, L., Catane, J.P., Mills, T., 2014: Geothermal water for mining. *Geothermal Resource Council Transactions*, **38**, 599-605.
- Valdimarsson, P., 2009: Direct use of geothermal resources : *GEO605a coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 106 s.
- Vandrová, G., Štefanka, P., Červeňan, M., 2009: *Bešeňová - revízia exploatačných podmienok zdroja ZGL-1 a FBe-I, podrobný HGP*. [manuskript - Záverečná správa]. TerraTest Žilina, archív Geofond, ŠGÚDŠ Bratislava, 101 s.
- Vandrová, G., Štefanka, P., Hók, J., Sýkora, M., Vitáloš, R., 2011: *Bešeňová - geotermálny vrt FG TB-1, 1. a 2. etapa, podrobný HGP*. [manuskript - Záverečná správa]. TerraTest Žilina, archív Geofond, ŠGÚDŠ Bratislava, 161 s.
- vanWees, J-D., Boxem, T., Angelino, L., Dumas, P., 2013: *A prospective study on the geothermal potential in the EU*. GEOELEC, Amsterdam, NL, 97 s.
- Vizi, L., Fričovský, B., 2023: Geostatistical simulation of reservoir convection indicators in Ďurkov hydrogeothermal structure (Slovakia). *Proceedings 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, USA, 1-10.
- Vranovská, A., 2001: *Ďurkov - hydrogeologické a technologické poznatky z dlhodobej skúšky GTD-1, GTD-2 a GTD-3, podrobný HGP*. [Manuskript - záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Stúra, Bratislava / SLOVGEOTERM Bratislava, 19 s.
- Vranovská A., Bondarenková, Z., Král M., Drozd, V., 1999: *Košická kotlina - štruktúra Ďurkov - hydrogeotermálne zhodnotenie, vyhľadávací prieskum*. [Manuskript - záverečná správa]. Štátny geologický ústav Dionýza Stúra, Bratislava / SLOVGEOTERM Bratislava, 90 s.
- Vranovská, A., Beňovský, V., Drozd, V., Halás, O., Váňa, O., 2002: The results of pilot test in Ďurkov hydrogeothermal structure. *Geologica Carpathica*, **53 (2)**, 1-6.
- Vranovská, A., Bodiš, D., Šráček, O. and Ženišová, Z., 2015: Anomalous arsenic concentrations in the Ďurkov carbonate geothermal structure, eastern Slovakia. *Environmental Earth Science*, **73**, 7103-7114.
- Wall, A., 2019: Competitiveness of direct mineral extraction from geothermal brines. *Geothermal Resource Council Transactions*, **43**, 854-859.
- Wang, L., Bu, X., Li, H., 2019: Investigation on geothermal binary-flashing cycle employing zeotropic mixtures as working fluids. *Geotherm Energy*, **7 (36)**, doi.org/10.1186/s40517-019-0153-4
- Wijaya, B.A., Pratama, H.B., Ashat, A., Sutopo, Hidayaturrobi, A.D., 2022: Reservoir dynamics monitoring in a liquid dominated geothermal field based on surveillance data and tracer flow test. *Proceedings ITB International Geothermal Workshop 2021*, 1-9.
- Williams, C.F., 2004: Development of revised techniques for assessing geothermal resources. In: *Proceedings 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-6.
- Williams, C.F., 2010: Thermal energy recovery from enhanced geothermal systems- evaluating the potential from deep, high-temperature resources. *Proceedings 35th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, s. 1-7.
- Williams, C.F., Reed, M.J., Mariner, R.H., 2008: A review of method applied by the U.S. Geological Survey in the assessment of identified geothermal resources. *U.S. Geological Survey open file report, 2008-1296*, 1-30.
- Williams, C.F., Lawless, J.V., Ward, M.A., Holgate, F.L., Larking, A., 2010: A code for geothermal resources and reserves reporting. *Proceedings world geothermal congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-7.
- Williams, C.F., Reed, M.J., Anderson, A.F., 2011: Updating the classification of geothermal resources. *Proceedings, 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, 1-8.
- Wohletz, K., Heiken, G., 1992: *Volcanology and geothermal energy*. University of California Press, Berkeley, CA, USA, 415 s.
- Wood, Ch., 1999: Comparative evaluation of environmental impact assessment systems. Petts, J. (Ed.): *Handbook of Environmental Impact Assessment, Volume 2: Impact and Limitations*, Wiley – Blackwell, London, UK, 10-31.
- Wright, W.D., 2001: *Manual of applied field hydrogeology*. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 553 s.
- Yasukawa, K., Nishikawa, N., Sasada, M., Okumura, T., 2020: Country update of Japan. *Proceedings World Geothermal Congress 2020*, Reykjavik, Island, 1-7.
- Yoshioka, K., Pasikki, R., Stimac, J., 2019: A long term hydraulic stimulation study conducted at the Salak geothermal field. *Geothermics*, **82**, 168-181.

- Young, K.R., Wall, A., Badgett, A., Dobson, P.F., 2019a: *GeoRePORT Protocol Volume II: Geological assessment tool*. National Renewable Energy Laboratory - NREL, Golden, CO, USA
- Young, K.R., Wall, A., Badgett, A., Dobson, P.F., 2019b: *GeoRePORT Protocol Volume III: Technical Assessment Tool*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA
- Yousefi, H., Ehara, S., Yousefi, A., Seiedi, F., 2010: Rapid environmental impact assessment of Sabalan geothermal power plant, NW Iran, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-9.
- Zbořil, L., Boldiš, M., Husák, L., Obernauer, D., Puchnerová, M., Szalaiová, V., 1986: *Geofyzikálny prieskum Komárňanskej kryhy – Hydrotermálna štruktúra Marcelová*. Geofyzika Bratislava, 62 s.
- Zarrouk, S.J., Simiyu, F., 2013: A review of geothermal resource estimation methodology. In: *Proceedings 35th New Zealand Geothermal Workshop*, Rotorua, New Zealand, 1-8.
- Zhang, Y., Doughty, Ch., Pan, L., Kneafsey, T. and the EGC Collab. Team, 2018: What Could We See at The Production Well Before The Thermal Breakthrough? *Proceedings 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1-5.
- Zhao, Ch., Hobbs, B.E., Ord, A., 2008: *Convective and advective heat transfer in geological systems*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Nemecko, 234 s.
- Zinsalo, J.M., Lamarche, L., Raymond, J., 2022: Performance analysis and working fluid selection of an Organic Rankine Cycle power plant coupled to an enhanced geothermal system. *Energy*, **245**, p.: 123259
- Zlocha, M., Vizi, L., Kronome, B., Cibula, R., Nagy, A., Fričovská, J., Surový, M., 2020: 3D geologická mapa Slovenskej republiky v mierke 1 : 500 000. Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 103 s.