VYUŽITIE GEOTERMÁLNEJ ENERGIE V KOŠICKEJ KOTLINE

--

GEOTERMÁLNE STREDISKO SVINICA - ĎURKOV

VYHODNOTENIE VPLYVU NAVRHOVANÉHO ZÁMERU VO VZŤAHU KU ÚTVARU PODZEMNÝCH GEOTERMÁLNYCH VÔD SK300170FK KOŠICKÁ KOTLINA

(Hydrogeologický posudok pre potreby EIA)

máj 2024

evidenčné číslo úlohy:

Hydrogeologický posudok

Názov geologickej úlohy:	Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline: geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného Zámeru vo vzťahu ku útvaru geotermálnych vôd SK300170FK Košická kotlina.
Objednávateľ:	GEOTERM KOŠICE a.s. Moldavská č. 12 040 01 Košice SR
Garant posudku:	RNDr. Radovan Černák, PhD.
Vypracoval:	Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD.
Vypracované v:	Bratislave
Vypracované ku:	Máj 2024
Schvaľujúci štatutárny orgán objednávateľa:	

.....

(podpis / pečiatka objednávateľa)

Rozdeľovník:

1) 3 exempláre GEOTERM KOŠICE a.s.

2) Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (Geofond ŠGÚDŠ)

3) RNDr. Radovan Černák, PhD.

Obsah

1 Vymedzenie posudkovej činnosti 1
2 Vymedzenie záujmového územia 3
2.1 Charakteristika navrhovanej činnosti 3
2.2 Miestopisné vymedzenie geotermálneho strediska 4
2.3 Miestopisné vymedzenie hydrogeotermálnej štruktúry 4
2.4 Geologické a geomorfologické vymedzenie štruktúry 5
3 Hydrogeotermálna charakteristika štruktúry ďurkovská depresia 7
3.1 Geologická stavba 7
3.1.1 Všeobecná geologická charakteristika 7
3.1.2 Vrtná preskúmanosť územia 9
3.1.3 Štruktúrno-tektonická stavba a geometria ďurkovskej depresie 9
3.2 Hydrogeologická charakteristika 10
3.2.1 Všeobecné hydrogeologické pomery ďurkovskej depresie 10
3.2.2 Hydraulické parametre rezervoárového prostredia 13
3.2.3 Tlakové pomery 13
3.2.4 Bod evázie plynov 16
3.3 Hydrogeotermálna charakteristika 16
3.3.1 Priestorová distribúcia tepelného toku 16
3.3.2 Geotermické pole 17
3.3.3 Analýza lineárnej a fázovej stability 17
3.3.4 Koncepčná klasifikácia ďurkovskej depresie a jej implikácie z pohľadu rezervoárového manažmentu 19
3.4 Hydrogeochemická charakteristika 21
4 Koncept rezervoárovej odozvy v rezervoárovom manažmente zdrojov geotermálnej energie 24
5 Posúdenie produkčnej schémy vo vzťahu k zásade DNSH 26
5.1 Charakteristika produkčnej schémy 27
5.1.1 Konfigurácia tripletu č. 1 27
5.1.2 Konfigurácia tripletu č. 2 29
5.1.3 Poznámky ku produkčnej schéme 30
5.1.4 Neistoty spojené s produkčnou schémou 32
5.2 Preskúmanie realizácie a činnosti produkčnej schémy podľa nariadenia DNSH 32
5.2.1 Prínos k zmierneniu zmien klímy 33
5.2.2 Adaptácia na zmeny klímy 34
5.2.3 Udržateľné využívanie a ochrana vodných a morských zdrojov 34
5.2.4 Prechod na obehové hospodárstvo 36
5.2.5 Prevencia a kontrola znečisťovania 36
5.2.6 Ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémov 36
5.3 Hodnotenie produkčnej schémy geotermálneho strediska z pohľadu DNSH 37
6 Posúdenie vplyvu dlhodobej produkcie na kvantitatívny stav rezervoárového systému a zdrojov geotermálnej energie 38
6.1 Termická odozva rezervoárového prostredia 40
6.1.1 Špecifikácia modelu 40
6.1.2 Špecifikácia produkcie a produkčnej schémy 43
6.1.3 Model postupu termického (studeného) frontu 43
6.1.4 Model rezervoárovej odozvy 45

6.1.5 Model teplotnej odozvy na ústí produkčného vrtu 50
6.2 Limity modelu rezervoárovej odozvy 51
7 Posúdenie vplyvu dlhodobej produkcie na kvalitatívny stav rezervoárového systému a zdrojov geotermálnej energie 53
7.1 Energetická kapacita rezervoárového prostredia 53
7.1.1 Prehľad modelov energetickej bilancie rezervoárového prostredia 53
7.1.2 Parametre udržateľnosti produkcie na geotermálnom stredisku 54
7.1.3 Vplyv produkčnej stratégie na energetický stav a energetickú kapacitu rezervoárového prostredia 57
7.2 Vyjadrenie k termochemickej odozve rezervoárového prostredia 58
7.2.1 Environmentálna ochrana povrchových a podzemných vôd 58
7.2.2 Útvar geotermálnych vôd Košická kotlina 58
8 Nezáväzné odporúčania pre rezervoárový manažment geotermálneho strediska Svinica - Ďurkov 62
9 Vyjadrenie 66
10 Záver 69
11 Zoznam použitej literatúry 72

1 VYMEDZENIE POSUDKOVEJ ČINNOSTI

1. Spracovanie posudku:

Garant posudku: RNDr. Radovan Černák, PhD.

Spracovateľ posudku: Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD.

2. Číslo osvedčenia: 17/2006 MŽP SR

Garant posudku je odborne spôsobilou osobou na vykonávanie geologických prác v oblasti geologického výskumu, hydrogeologického prieskumu a geologického prieskumu životného prostredia.

Spracovateľ posudku je odborník so špecializáciou na rezervoárové inžinierstvo v oblasti geotermálnych vôd.

3. Účasť ďalších subjektov na posudzovaní:

Nie

4. Dôvod vypracovania odborného posudku:

Hydrogeologický posudok je vypracovávaný za účelom definovania relevantných podkladov pre posudzovanie predmetného zámeru vybudovania geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov vo vzťahu k Zákonu č. 24/2006 Z.z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov; k Zákonu č. 364/2004 o vodách a o zmene zákona Slovenskej národnej rady č. 372/1990 Zb. o priestupkoch v znení neskorších predpisov (vodný zákon), k Zákonu č. 569/2007 Z.z. o geologických prácach v znení neskorších predpisov; k Smernici 2000/60/ES Európskeho parlamentu a Rady z 23. októbra 2000, ktorou sa stanovuje rámec pôsobnosti pre opatrenia spoločenstva v oblasti vodného hospodárstva (Rámcová smernica o vodách, RSV), ktorou sa, okrem iného, vymedzujú kvalitatívne a kvantitatívne požiadavky na vymedzené útvary podzemných geotermálnych vôd – v zmysle Nariadenia vlády Slovenskej republiky č. 452/2019 Z.z. zo 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; ako aj vo

vzťahu ku Nariadeniu Európskeho parlamentu a Rady č. 2020/852 z 18. júna 2020 o vytvorení rámca na uľahčenie udržateľných investícií a o zmene nariadenia Európskeho parlamentu a Rady č. 2019/2088, ktorá definuje princíp „výrazne nenarušiť“ (DNSH = do not significant harm) pri posudzovaní vplyvov na životné prostredie.

5. Predmet posudzovania:

Predmetom posudzovania je návrh rozšírenia produkcie zdrojov geotermálnej energie v Košickej kotline v rámci plánovaného geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov realizáciou troch nových hydrogeotermálnych vrtov GTD-4, GTD-5 a GTD-6, ktorých využívanie by podporilo produkciu geotermálnej energie na aktuálne existujúcich vrtoch GTD-1, GTD-2 a GTD-3 v rámci toho istého strediska. Projekt „Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline bol dňa 12. 07 2023 na 3. zasadnutí Komisie pri monitorovacom výbore pre Program Slovensko 2021 – 2027 pre Fond na spravodlivú transformáciu schválený ako „Národný projekt“. Pre investičný projekt „Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline“ bolo v súlade s bodom A.1. Uznesenia vlády Slovenskej republiky č. 426/2023 z 23. augusta 2023 vydané Ministerstvom hospodárstva SR Osvedčenie o významnej investícii č. 121127/2023-4270-401742, na základe ktorého je projekt považovaný za významnú investíciu a jeho uskutočnenie je vo verejnom záujme.

6. Cieľ posudzovania:

Cieľom predkladaného hydrogeologického posudku je, vychádzajúc z dostupných a relevantných údajov, posúdiť krátkodobú, respektíve dlhodobú produkciu zdrojov geotermálnej energie z rezervoárového prostredia hydrogeotermálnej štruktúry ďurkovská depresia ako časti útvaru geotermálnych vôd SK300170FK Košická kotlina na kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia (strednotriasové karbonáty s mobilnou fázou v rezervoárovom prostredí – geotermálnou vodou) a rezervoárového média (geotermálna voda s parnou frakciou vo forme termodynamicky viazanej, vlhkej pary), predovšetkým vo vzťahu ku geotermickým a teplotným pomerom v rezervoárovom prostredí a chemickému zloženiu ako v okolí produkčných, tak aj reinjektážnych vrtov. Pri zostavení posudku je posudzovaný aktuálny a plánovaný stav, ktorý predpokladá produkciu zdrojov geotermálnej energie v uzavretých produkčných systémoch, pravdepodobne v schéme PI = 2 : 4.

2 VYMEDZENIE ZÁUJMOVÉHO ÚZEMIA

2.1 Charakteristika navrhovanej činnosti

Podľa prílohy č. 8 Zákona č. 24/2006 Z.z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov, je územie a predmetnú činnosť možné zaradiť do nasledovných kategórií:

- 1. Ťažobný priemysel
  - položka č. 16. Vrty (okrem vrtov na skúmanie stability pôdy súvisiacich s ťažobnou činnosťou) najmä: vrty na využívanie geotermálnej energie od 500 m
- 9. Energetický priemysel
  - položka č. 12. Geotermálne elektrárne a výhrevne od 5 MW to 50 MW
- 10. Vodné hospodárstvo
  - položka č. 9. Odber geotermálnych vôd – bez limitu.

Navrhovaná činnosť je zameraná na rozvoj produkčnej a reinjektážnej infraštruktúry na zabezpečenie celoročnej dodávky tepla do Teplárne a SCZT Košice z geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov, s celkovým uvažovaným tepelným výkonom 30 MWt. Infraštruktúra je členená na 2 triplety (GTD-1 až GTD-3 a GTD-4 až GTD-6), každý v konfigurácii P:I = 1:2, respektíve sumárne P:I = 2:4. Podľa predpokladov bude prvý triplet v prevádzke celoročne (odhad 7 200 hodín), druhý triplet operatívne pre energetickú podporu (odhad 4 800 hodín). Aj v rámci zámeru, respektíve účelu využívania zdrojov geotermálnej energie je dôvod predpokladať (v zmysle dobrej globálnej praxe a aplikačných prístupov, respektíve podľa vývojov produkčných kriviek geotermálnych vrtov podporujúcich geotermálne systémy centralizovaného zásobovania teplom), že produkcia zdrojov geotermálnej energie, a na ňu napojená reinjektáž nebudú v rámci roka konštantné, ale produkcia / reinjektáž bude oscilovať v závislosti na energetických požiadavkách odberného miesta (Teplárne a SCZT Košice).

2.2 Miestopisné vymedzenie geotermálneho strediska

Posudzované geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov (Obrázok 2.1), je v rámci územia Slovenskej republiky vymedzené nasledovne:

- kraj: Košický (800)
- okres: Košice-okolie (806)
- obec: Ďurkov (521361)
- obec: Bidovce (521183)
- katastrálne územie: Svinica, Bidovce
- relevantné parcely: KN-C č. 1108/6, 1108/17 v k. ú. Svinica



Obrázok 2.1 Priestorový vzťah existujúcich vrtov GTD-1 až GTD-3 a plánovaných vrtov GTD-4 až GTD-6 v rámci geotermálneho strediska Svinica - Ďurkov

2.3 Miestopisné vymedzenie hydrogeotermálnej štruktúry

Pre účely hydrogeologického posudku je nevyhnutné posudzovať **interakciu geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov** s relevantným rezervoárovým prostredím, ktoré predstavuje v zmysle regionálneho hydrogeotermálneho hodnotenia Košickej kotliny

hydrogeotermálna štruktúra ďurkovská depresia (viď Kapitola 3). Hydrogeotermálna štruktúra predstavuje čiastkový prevažne-akumulačný subsystém perspektívnej geotermálnej oblasti / útvaru geotermálnych vôd Košická kotlina, na jej juhovýchodnom okraji, s približnou rozlohou 34 km^2. Štruktúra je katastrálne vymedzená územiami Ďurkov (521361), Ruskov (521957), Blažice (521191), Vyšný Čaj (521201), Olšovany (521825), Ďurďošík (521353), Trsťany (522091), Rozhanovce (521931), Bidovce (521983), Svinica (522040), a Košické Olšany- Nižný Olčvár (521591).

V zmysle zobrazenia na mapovacích listoch, v mierke : 200 000 je územie ďurkovskej represie, a relevantné okolie, zobrazené na mapových listoch Michalovce (38) a Košice (37); v mierke 1: 50 000 na mapových listoch Košice (37-24), Soľ (38-11), Michalovce (38-14) a Slanec (38-31); v mierke 1: 25 000 na mapových listoch 38-13-1, 38-13-2, 38-13-3, 38-13-4, 38-31-2, 38-31-3, 37-24-2, 37-24-4, 38-11-3 a 38-11-4 (Obrázok 2.2).

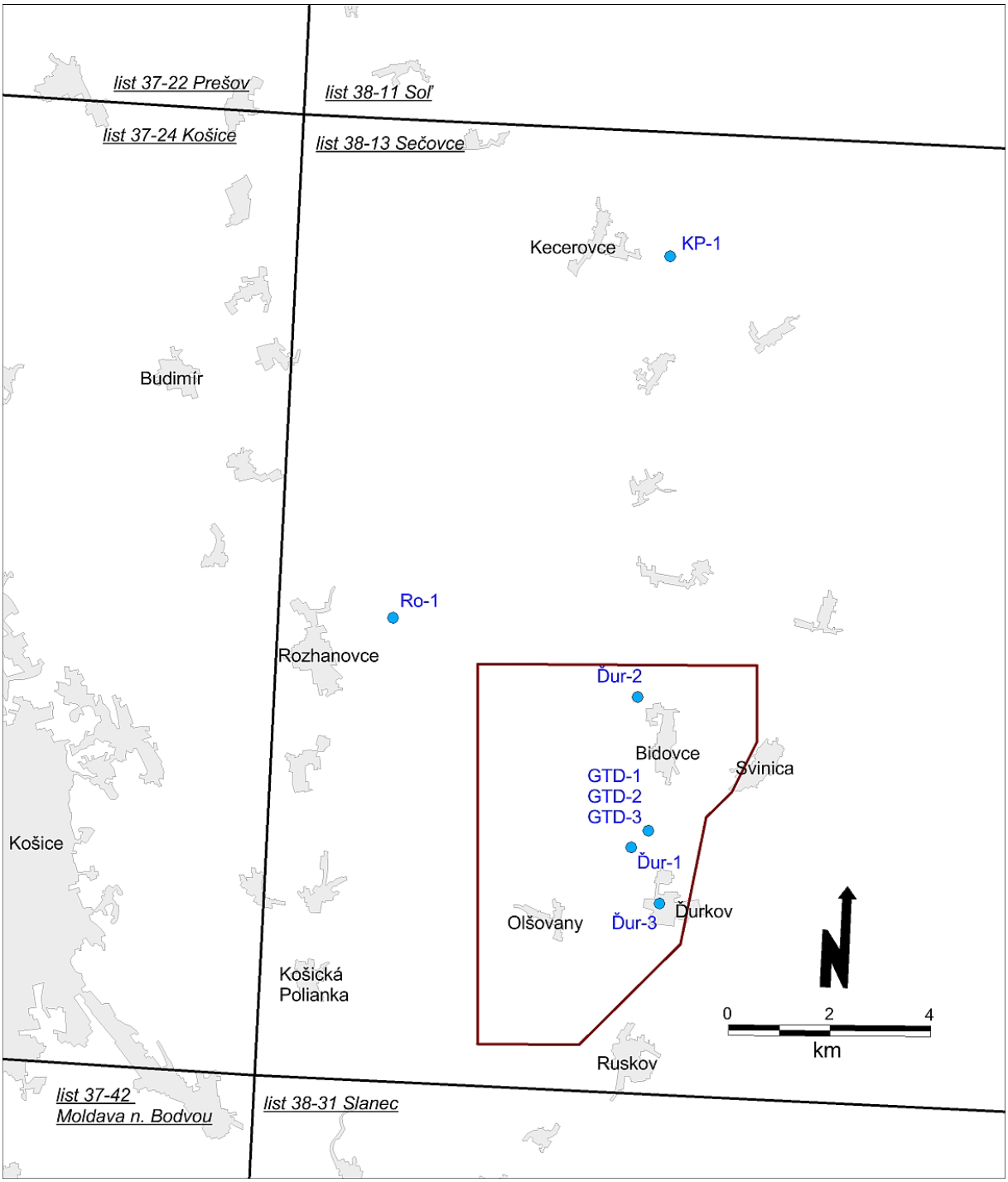
2.4 Geologické a geomorfologické vymedzenie štruktúry

V zmysle regionálneho geologického členenia je hydrogeotermálna štruktúra ďurkovská depresia vymedzená nasledovne:

- jednotky I. rádu (oblasť, pásmo): vnútrohorské panvy a kotliny
- jednotky II. rádu (podoblasť, zóna): východoslovenská panva
- jednotky III. rádu: prešovská kotlina

Z geomorfologického hľadiska je hydrogeotermálna štruktúra ďurkovskej depresie vymedzená nasledovne:

- sústava: Alpsko-himalájska
- podsústava: Karpaty
- provincia: Západné Karpaty
- subprovincia: Vnútorné Západné Karpaty
- celok: Juhoslovenská nížina
- podcelok: Košická kotlina
- časť: Toryská pahorkatina
- oblasť: Lučenecko-košická zníženina



Obrázok 2.2 Pozícia hydrogeotermálnej štruktúry ďurkovská depresia na mapových listoch v mierke 1: 50 000.

V rámci vymedzenia útvarov geotermálnych vôd na Slovensku (MARCIN ET AL., 2016, 2020) je hydrogeotermálna štruktúra ďurkovská depresia súčasťou útvaru **SK300170FK Košická kotlina**. Vymedzenie nadobúda účinnosť aj Nariadením vlády SR č. 452/2019 Z.z. zo 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.

3 HYDROGEOTERMÁLNA CHARAKTERISTIKA ŠTRUKTÚRY ĎURKOVSKÁ DEPRESIA

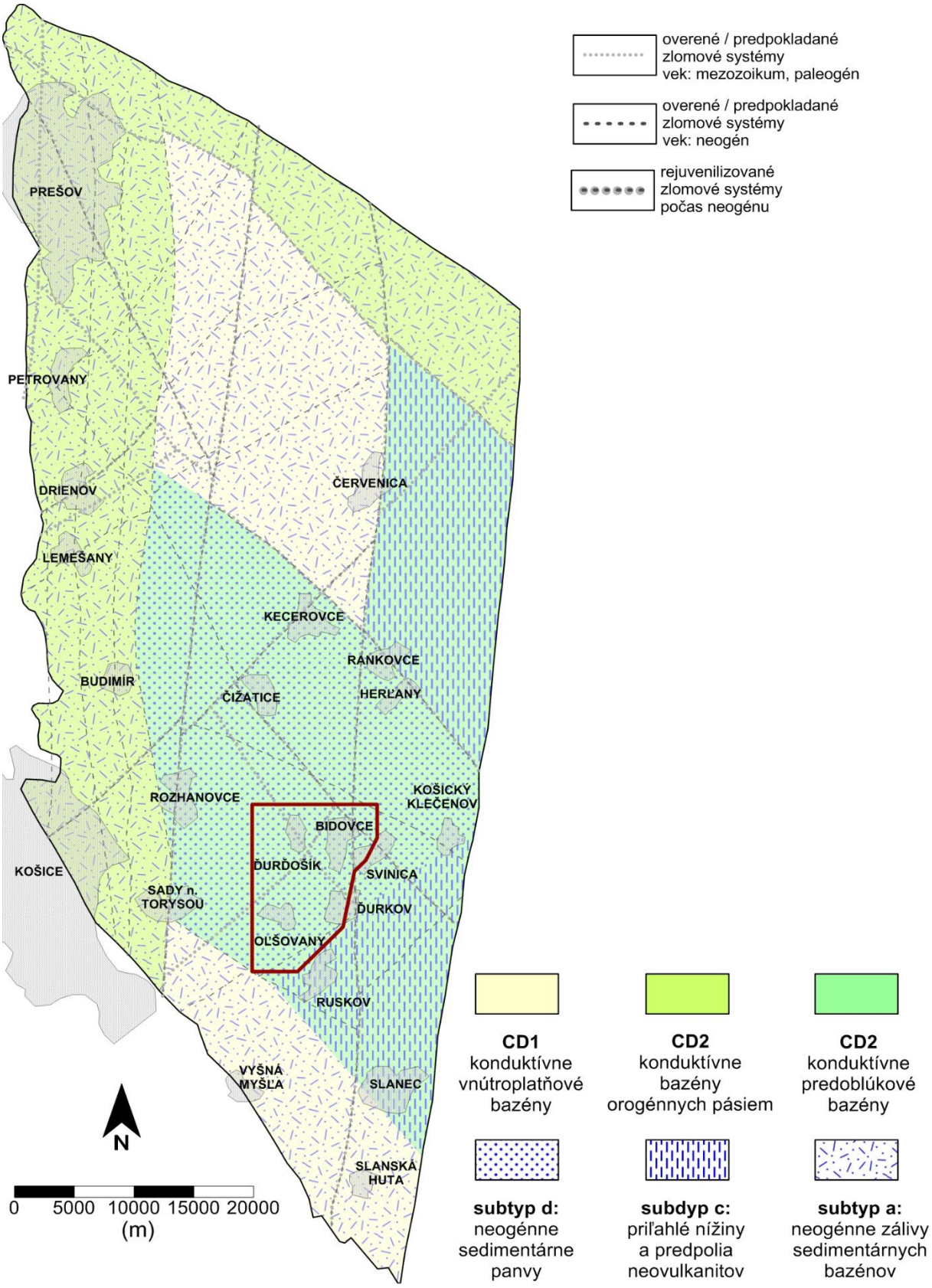
3.1 Geologická stavba

3.1.1 Všeobecná geologická charakteristika

Pod pojmom ďurkovská hydrogeotermálna štruktúra (Obr. 3.1) je definované súvislé pásmo depresnej morfoštruktúry predterciérneho podložia v podloží sedimentárnej, respektíve vulkanosedimentárnej výplne Košickej kotliny (PERESZLENYI ET AL., 1999), na tektonickom styku s parciálnymi štruktúrami predkenozoického podložia; rozhanovskou elevációu na východe, slaneckým depresným blokom na západe, čižatickým blokom a herliansko-sečovským blokom s čiastkovou bidovskou depresiou na severe (FRIČOVSKÝ ET AL., 2022).

Vertikálny geologický profil **kenozoika** je tvorený v pripovrchovej vrstve **kvartérnymi sedimentmi** v siliciklastickom vývoji, kde dominujú fluviálne (štrky a hlinito-piesčité štrky) a proluviálne (íly, piesčité íly až ílovité štrky) fácie nad deluviálnymi až polygenetickými ílmi a piesčitými ílmi (KALIČIAK ET AL., 1991). V ich podloží vystupujú vrstvové sledy sedimentárneho respektíve vulkanosedimentárneho neogénu. Na báze je sled tvorený lemešianskymi zlepencami teriakovského súvrstvia, ktoré prechádzajú do ílovcov, ktoré pokračujú do soľnobanského (ílovce a pieskovce s vrstvami evaporitov) a kladzianskeho (ílovce a pieskovce) súvrstvia; v rámci profilu ***karpatu***. Profil ***bádenu*** je charakteristický rôznym zastúpením detriticko-pelitických až pelitických fácií v spodnom bádene, a striedaním pelitického a vulkanoklastického vývoja v strednom bádene, respektíve laterálnym zastupovaním štrkov a pelitov s tufitmi vo vrchnom bádene (KALIČIAK ET AL., 1996). Profil ***sarmatu*** charakterizujú ryolitické vulkanoklastiká s prechodom do karbonatických pelitov s tufitickými prímesami (VRANOVSKÁ ET AL., 1999).

Mezozoikum vo forme s***trednotriasových karbonátov*** (dolomity až silne brekciované dolomitické vápence, dolomitické brekcie) s výrazným sekundárnym vyhojením kalcitom, vystupuje v priestore ďurkovskej štruktúry a jej relevantnom okolí priamo v podloží neogénu. Identifikované bolo ako *obalová sekvencia veporika Čiernej hory* (ČVERČKO, 1973; ČVERČKO



Obrázok 3.1: Vymedzenie ďurkovskej depresie v priestore útvaru geotermálnych vôd SK300170FK Košická kotlina

ET AL., 1977; PERESZLENYI ET AL., 1999), respektíve ako *analógia krížňanského príkrovu* (VRANOVSKÁ – BODIŠ, 1999; VRANOVSKÁ ET AL., 1999). Báza karbonatického komplexu nebola vrtmi overená. Strednotriasové karbonáty pritom predstavujú, pravdepodobne v hydraulickej spojitosti s bazálnymi klastikami karpatu, primárny produktívny horizont zdrojov geotermálnej energie (viď. 3.2). V podloží komplexu karbonátov vystupuje pravdepodobne ***permsko-spodnotriasový vývoj*** obalovej sekvencie, respektíve krížňanského príkrovu. Analogicky s vrtom KP-1 Kecerovské Pekľany (ČVERČKO, 1974) je pravdepodobne tvorený permskými kremencami a pieskovcami s brekciovitými bridlicami, respektíve spodnotriasovými kremencami až bridlicami; prípadne absentuje spodnotriasový vývoj úplne podobne, ako vo vrte Rozhanovce-1 (ČVERČKO, 1971), a v podloží vystupuje priamo **kryštalinikum obalovej jednotky veporika**, tvorené prevažne fylitmi a bridlicami.

3.1.2 Vrtná preskúmanosť územia

Vrtný prieskum ďurkovskej depresie bol realizovaný doteraz v dvoch základných etapách. Hlboké štruktúrne – prieskumné vrty pre vyhľadávanie uhľovodíkov Ďurkov-1 (Ď-1) až Ďurkov-3 (Ď-3) z obdobia 1970 – 1975 (ČVERČKO – RUDINEC, 1971; SMETANA, 1972; ČVERČKO, 1973) ako prvé overili potenciálne rezervoárové prostredie zdrojov geotermálnej energie v strednotriasových karbonátoch, vrátane ich hydraulického prepojenia s bazálnymi klastikami karpatu; bez overovacích skúšok. Cielený hydrogeotermálny prieskum a regionálne hydrogeotermálne hodnotenie ďurkovskej depresie (VRANOVSKÁ ET AL., 1999) bolo založené na geofyzikálnom prieskume a predpokladoch priestorovej segmentácie predkenozoického reliéfu na systémy a subsystémy elevovaných a depresných štruktúr, respektíve ich vnútorných blokov (ŠEFARA ET AL., 1987). Vrty GTD-1 až GTD-3 následne overili rezervoárové prostredie viazané na strednotriasové karbonáty, vrátane potenciálneho zdroja geotermálnej energie. Sumarizáciu litostratigrafických profilov v priestore ďurkovskej depresie udáva Tabuľka 3.1.

3.1.3 Štruktúrno-tektonická stavba a geometria ďurkovskej depresie

Hydrogeotermálna štruktúra ďurkovskej depresie ako prevažne-akumulačný subsystém je spájaná s depresnou morfoštruktúrou predkenozoického podložia prvého radu (ďurkovská depresia), členenou na systémoch zlomov JZ – SV a JV – SZ čiastkové tektonické bloky

druhého radu s rozdielnymi tendenciami vertikálneho pohybu (Obr. 3.2), ktoré vo výraznej miere ovplyvňujú hrúbky (vulkano)sedimentárneho neogénu, respektíve strednotriasových karbonátov. Kým hrúbka sarmatského komplexu sa pohybuje v intervale 113 – 687 (lokálne extrémy na SV okraji súvisia s tektonickým stykom s bidovskou depresiou a na V hranici s nárastom podielu siliciklastík), vrstvový sled bádenských sedimentov dosahuje hrúbku 682 – 1585 m s trendom nárastu v smere východ – západ. Profil karpatu, uložený transgresívne na podložnom mezozoiku dosahuje hrúbky 295 – 850 m, pričom narastá v SZ smere. Celková hrúbka neogénu ďurkovskej depresie tak dosahuje 1 660 – 2 605 m. Podľa výsledkov 3D geologického modelu ďurkovskej depresie (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020), založeného na batymetrických mapách a mapách izopách strednotriasových karbonátov (PERESZLENYI ET AL., 1999), respektíve globálnom geologickom modeli Košickej kotliny (PACHOCKÁ ET AL., 2010; JACKO ET AL., 2014, 2021) je simulovaná hrúbka rezervoárového prostredia 250 – 2 000 m; s bázou v hĺbke 1 960 – 4 035 m; a ktorá pravdepodobne klesá axiálne na východ a západ približne od spojnice Ďurkov – Bidovce (Obr. 3.3).

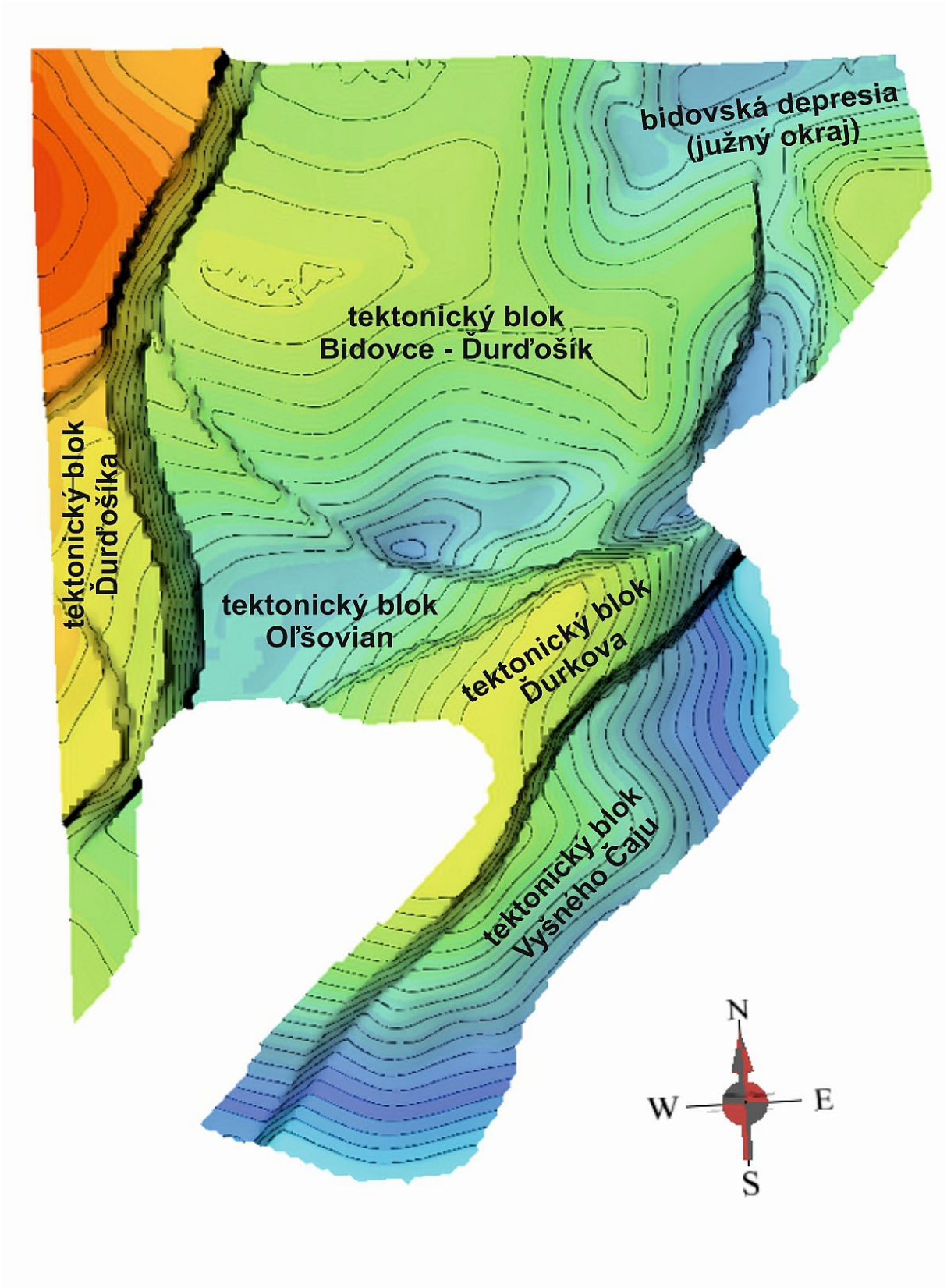
Tabuľka 3.1. Litologické profily vrtov na bázu stratigrafického horizontu v TVD (m).

lokalita	Ďurkov	Ďurkov	Ďurkov	Ďurkov	Ďurkov	Ďurkov
vrt	D-1	D-2	D-3	GTD-1	GTD-2	GTD-3
z_sarmat	60	120	820	560	947	500
z_báden	1670	1475	1758	1850	2313	2142
z_karpat	2140	2190	2475	2160	2467	2226
z_trias	3200	2230	2612	3210	3151	2264
z_pzk	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
hĺbka	3200	2230	2614	3210	3151	2264

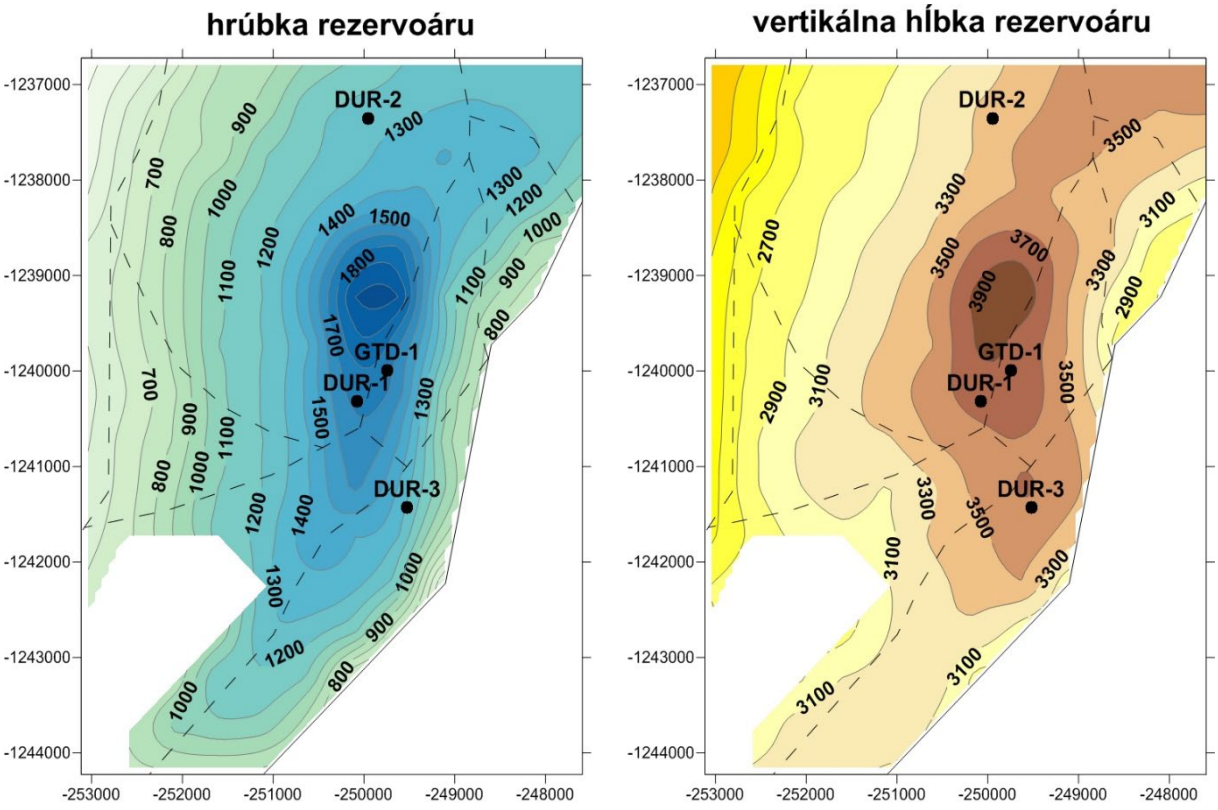
3.2 Hydrogeologická charakteristika

3.2.1 Všeobecné hydrogeologické pomery ďurkovskej depresie

Geologická stavba ďurkovskej depresie, a jej vzdialenosť od západných svahov Slanských vrchov nevytvára vhodné podmienky pre tvorbu rozsiahlych **hydrogeologických štruktúr plytkého obehu v kvartérnych sedimentoch** (FRIČOVSKÝ ET AL., 2022). Lokálne subsystémy prúdenia v kvartéri sa viažu najmä na fluviálne fácie (štrky, piesky), respektíve



Obrázok 3.2: Vnútorné tektonické členenie hydrogeotermálnej štruktúry ďurkovská depresia. Zdroj: Fričovský et al. (2020)



Obrázok 3.3: Geometria strednotriasových karbonátov ďurkovskej depresie. Zdroj: Fričovský et al. (2020)

menej produktívne ílovité piesky, prachovité piesky až jemnozrnné piesky na okrajoch deluviálnych akumulácií (HANZEL, 2012). Hydrogeologické štruktúry je možné považovať za otvorené až polo-otvorené (KALIČIAK ET AL., 1991). Produktivita je ovplyvňovaná prevažne mierou dotácie z povrchu, respektíve infiltrovaním povrchových tokov do dnových formácií alebo brehovou infiltráciou. Pre litologickú povahu (vulkano)sedimentárneho neogénu je možné skôr predpokladať, že ku priamej komunikácii medzi hydrogeologickými štruktúrami kvartéru a neogénu pravdepodobne v priestore depresie nedochádza, nie je to ale možné vylúčiť v infiltračnej oblasti v prípade, ak sa tá nachádza na svahoch Slanských vrchov (HANZEL, 2012). **Štruktúry intermediárneho obehu v neogéne**, majú, v prípade ich vývoja, infiltračné oblasti na západných svahoch Slanských vrchov, akumulačnú oblasť sporadicky v produktívnych fáciách neogénu. Typicky ide prevažne o polo-otvorené systémy prúdenia viazané na produktívne horizonty v hruboklastických tufoch, pieskoch, respektíve štrkoch a ich konsolidovaných formách. **Štruktúry hlbokého obehu v karpatskom profile a strednotriasových karbonátoch** sú uzavreté (KALIČIAK ET AL., 1991, 1996); s obmedzenou hydraulickou spojitosťou a komunikáciou medzi oboma horizontmi, pričom k definitívnemu uzavretiu štruktúr dochádzalo pravdepodobne od bádenu (VRANOVSKÁ ET AL., 2015;

FRIČOVSKÝ ET AL., 2022). Rezervoárové prostredie sa viaže priamo na karbonáty a karbonatické brekcie až brekciovité karbonáty, respektíve bazálne súvrstvie karpatu, t.j. pieskovce a zlepence až brekcie (KALIČIAK ET AL., 1991, 1996). Z vertikálneho rozdelenia hydrogeologických a hydrogeotermálnych štruktúr v priestore ďurkovskej depresie je zrejmé, že s výnimkou technicky nesprávne prevedených zásahov v rámci realizácie geotermálnych vrtov alebo kontamináciou z povrchu, produkcia zdrojov geotermálnej energie z hlbokých štruktúr nemôže ovplyvniť plytké obehové štruktúry neogénu a kvartéru.

3.2.2 Hydraulické parametre rezervoárového prostredia

Prehľad o hladinách odhadu hydraulických parametrov rezervoárového prostredia, ktoré vo výraznej miere ovplyvňujú – respektíve budú ovplyvňovať ako parametre produktivity tripletov, tak aj efektívnosť reinjektáže, je dostupný z už realizovaných hydrodynamických skúšok prvého tripletu (Tabuľka 3.2). Skúšky prebiehali na kompresne inicializovaných vrtoch pri prelive; vrt GTD-2 bol testovaný pri reinjektážnom dublete s GTD-1 (VRANOVSKÁ ET AL., 2001; HALÁS ET AL., 2016). V oboch prípadoch boli hydraulické parametre stanovené pre TVD = 2 000 m.

Tabuľka 3.2. Litologické profily vrtov na bázu stratigrafického horizontu v TVD (m).

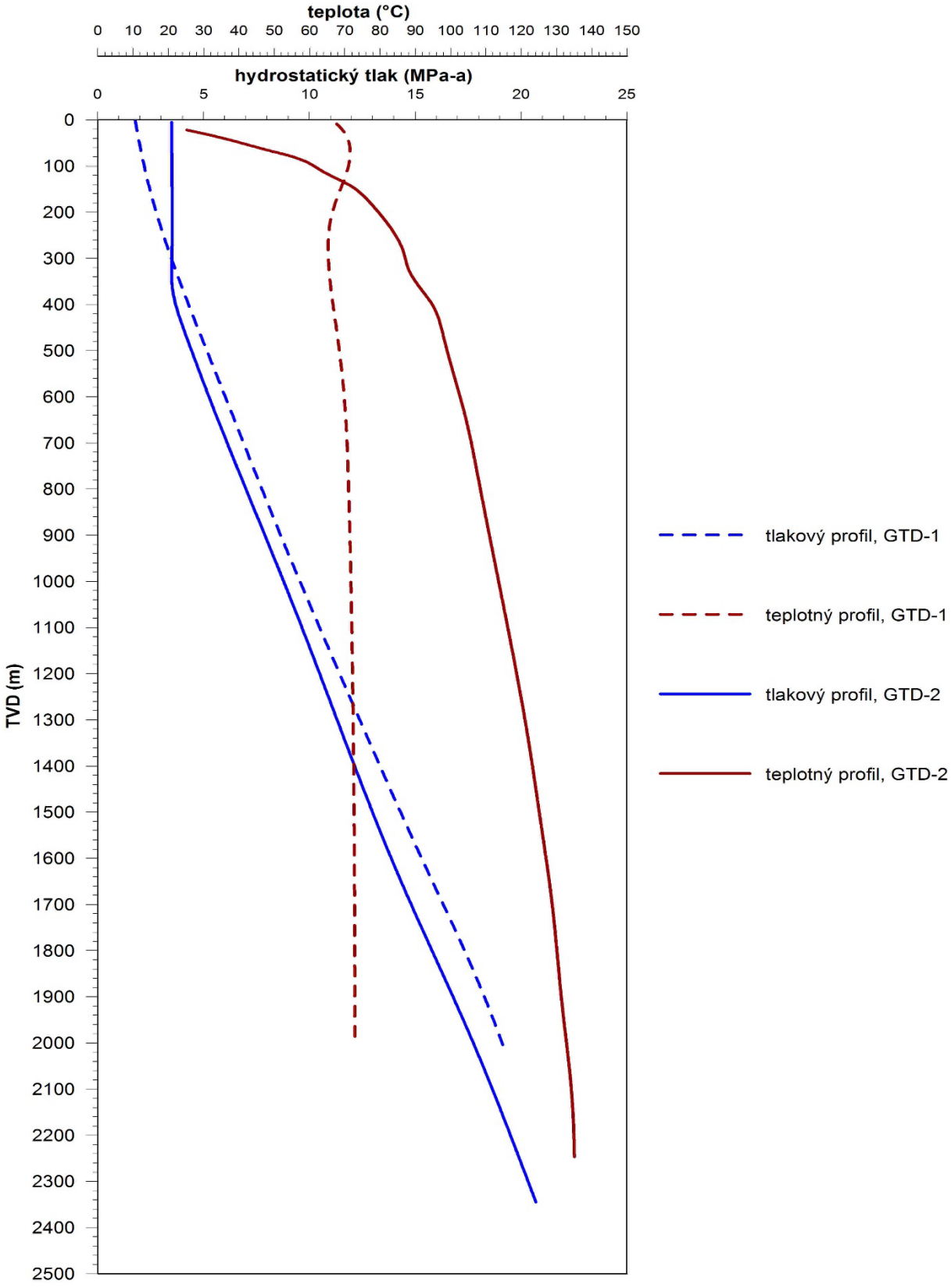
test	koeficient priepustnosti m^3	absolútna priepustnosť m^2	koeficient prietočnosti $m^2.s^{-1}$	koeficient filtrácie $m.s^{-1}$
		GTD-1		
čerpacia skúška	$4{,}63 .10^{-12}$	$9{,}91 .10^{-15}$	$2{,}09 .10^{-4}$	$4{,}47 .10^{-7}$
stúpacia skúška	$4{,}79 .10^{-12}$	$1{,}03 .10^{-14}$	$2{,}16 .10^{-4}$	$4{,}62 .10^{-7}$
		GTD-2		
čerpacia skúška D1	$4{,}92 .10^{-12}$	$8{,}25 .10^{-15}$	$2{,}22 – 2{,}33 .10^{-4}$	$3{,}9 .10^{-7}$
čerpacia skúška D2	$4{,}14 .10^{-12}$	$1{,}53 .10^{-14}$	$4{,}12 – 4{,}32 .10^{-4}$	$7{,}24 .10^{-7}$
stúpacia skúška	$3{,}29 .10^{-12}$	$5{,}52 .10^{-15}$	$1{,}49 – 1{,}56 .10^{-4}$	$2{,}49 – 2{,}61 .10^{-7}$
priemer	$5{,}79 .10^{-12}$	$9{,}70 .10^{-15}$	$2{,}67 .10^{-4}$	$4{,}48 .10^{-7}$

3.2.3 Tlakové pomery

Zameriavania vertikálnej distribúcie rezervoárového tlaku (VRANOVSKÁ ET AL., 1999, 2001) sa realizovali pri pseudo-ustálených podmienkach v hĺbkovej úrovni TVD = 1 500 m

a intervale tlaku 14,78 (GTD-1) – 14,85 MPa (GTD-3) až TVD = 3 000 m s rozpätím tlaku 29,08 MPa (GTD-1) až 29,92 MPa (GTD-2), z čoho je zrejmý tlakový trend v smere ku geotermálnemu vrtu GTD-1, potvrdený aj ustálenými meraniami pre hĺbku TVD = 2 000 m v 08/1998: 19,53 MPa (GTD-1) a 19,63 (GTD-3) alebo v 07/1999: 19,54 MPa (GTD-1) až 19,61 MPa (GTD-3). Pomerne stabilné tlakové prostredie bolo dokumentované aj počas pseudo-ustáleného zameriavania v TVD = 2 000 m na vrte GTD-2 z roku 2006, kedy medzi 12/02 – 26/02 bol pozorovaný rozdiel tlakov $\Delta p_{(2000)} = 0{,}1$ MPa sprevádzaný jeho asynchrónnou osciláciou, pri simultánnej variácii teploty v danej hĺbke o 6 °C (HALÁS ET AL., 2016). Všeobecný trend poklesu rezervoárového tlaku a teploty v monitorovanom období vysvetlený nebol. V rámci rezervoárových procesov môže ale ísť o prirodzenú fluktuáciu v dôsledku horizontálnej a vertikálnej dynamiky rezervoárového média (FRIČOVSKÝ ET AL., 2018, VIZI – FRIČOVSKÝ, 2023); vrátane vplyvu na voľné, respektíve termodynamicky viazané CO_2 a stabilitu jeho formovanej plynnej čiapky (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020).

Dynamické merania tlaku (VRANOVSKÁ ET AL., 2001) boli realizované v rezervoárovom prostredí opakovane. Spoločné skúšky v schéme P:I = 1:1 pre GTD-2 a GTD-3 (Obr. 3.4), s reinjektážnym vrtom GTD-1. Pri ustálenej výdatnosti Q = 44 $l.s^{-1}$ a teplote na ústí vrtu T_{wh} = 133,8 °C bola testovaná schéma pre GTD-2 s udržiavaným tlakom p_{wh} = 2,0 MPa. Spoločná skúška potvrdila vertikálny posun bodu evázie plynov, respektíve, pravdepodobne aj spontánnej separácie vlhkej termodynamicky viazanej parnej fázy nad hladinou TVD = 400 m pre GTD-2; čo vzhľadom na predpokladanú hĺbku oddeľovania je evidentný prejav jej termodynamickej formy; pričom zvýšenie tlaku vo vrte GTD-1 oproti statickému profilu je následne prejavom efektívnej reinjektáže v hĺbke. Pokles dynamického tlaku k ústiu vrtu súvisí pravdepodobne so spontánnou separáciou voľných nestlačiteľných plynov. V schéme pre GTD-3 dochádza k nulovému gradientu tlaku v hĺbke TVD = 200 m, čo môže byť dôsledkom intenzívnejšieho odparovania alebo odplyňovania, ale zároveň aj menej intenzívneho odplyňovania (Q = 47 $l.s^{-1}$, T_{wh} = 124 °C, p_{wh} = 1,22 MPa). Profily tlakov ale udávajú predpoklad menej úspešnej reinjektáže, nakoľko $p_{(GTD-1)} > p_{(GTD-3)}$ a zároveň $p_{(GTD-3)} > p_{(GTD-2)}$ alebo všeobecne väčšiemu rezervoárovému tlaku v okolí GTD-3 (menší podiel plynnej alebo parnej frakcie); čo z prevádzkového dlhodobého hľadiska môže znamenať, že preferenčným smerom postupu studeného frontu môže byť vektor ku GTD-2 (FRIČOVSKÝ ET AL., 2022). Dynamické merania počas hydrodynamickej skúšky vrtu GTD-2 z roku 2012 (HALÁS ET AL., 2016) nie je možné spoľahlivo vyhodnotiť kvôli technickým prevádzkovým problémom.



Obrázok 3.4: Príklad vývoja teplotných a tlakových podmienok medzi vrtom GTD-1 a GTD-2. Upravené podľa: Vranovská et al. (1999, 2001)

3.2.4 Bod evázie plynov

Vertikálna pozícia bodu evázie plynov, ktorá prakticky definuje polohu čerpadla pri dlhodobej produkcii, bola viackrát stanovovaná pri rôznych podmienkach. Pri minimálnej praxi s viaczložkovými zdrojmi geotermálnej energie na Slovensku pritom častokrát dochádza k zamieňaniu bodu evázie plynov (vertikálna pozícia, pri ktorej poklesom tlaku dôjde k uvoľneniu rozpustnej plynnej zložky z geotermálnej vody; bubble / bubbling point) s bodom adiabatického varu (bod pri ktorom dochádza, poklesom tlaku na kritickú úroveň, k spontánnej separácii parnej zložky; boiling point), keďže ich výsledné efekty na tlakový profil sú podobné. Vo vrte GTD-1 bola poloha bodu v pseudo-ustálenom stave odhadovaná na hĺbkovú úroveň TVD = 2 034 m (metóda regresných rezíduí) respektíve TVD = 1 450 m (metóda tlakového gradientu), s prirodzeným posunom pri testovaní produkcie na hladinu TVD = 700 m podľa dynamického vertikálneho záznamu tlaku (VRANOVSKÁ ET AL., 1999). Nakoľko efekty odplynenia a odparenia neboli hodnotené separátne, je zrejmé, že dynamická poloha bodu evázie bola ovplyvnená aj odparovaním; pričom v priemete na vertikálny geologický profil vrtu ide stále o pozíciu nad stropom rezervoáru, čo predstavuje ďalšiu indikáciu termodynamicky viazanej parnej frakcie ako formy viazanosti pary na vodnú zložku (FRIČOVSKÝ ET AL., 2022). Bod evázie plynov na vrte GTD-2 z testu v roku 2016 (HALÁS ET AL., 2016) bol podľa profilu tlakového gradientu stanovený pre TMD = 1 100 m; avšak s ohľadom na technické riešenia meraní je pravdepodobné, že jeho skutočná pozícia by bola nižšie.

3.3 Hydrogeotermálna charakteristika

3.3.1 Priestorová distribúcia tepelného toku

Z pohľadu geotermickej aktivity územia Západných Karpát, je na základe povrchovej hustoty tepelného toku q_0 = 95-115 mW.m^{-2} (FRANKO ET AL., 1995; VRANOVSKÁ ET AL., 1999) štruktúru ďurkovskej depresie považovať za geotermicky aktívnu; pričom trend hustoty povrchového tepelného toku je relatívne monotónny v smere západ – východ. Hustota tepelného toku na báze sarmatu dosahuje q = 94-115 mW.m^{-2}, na báze bádenu q = 93-114

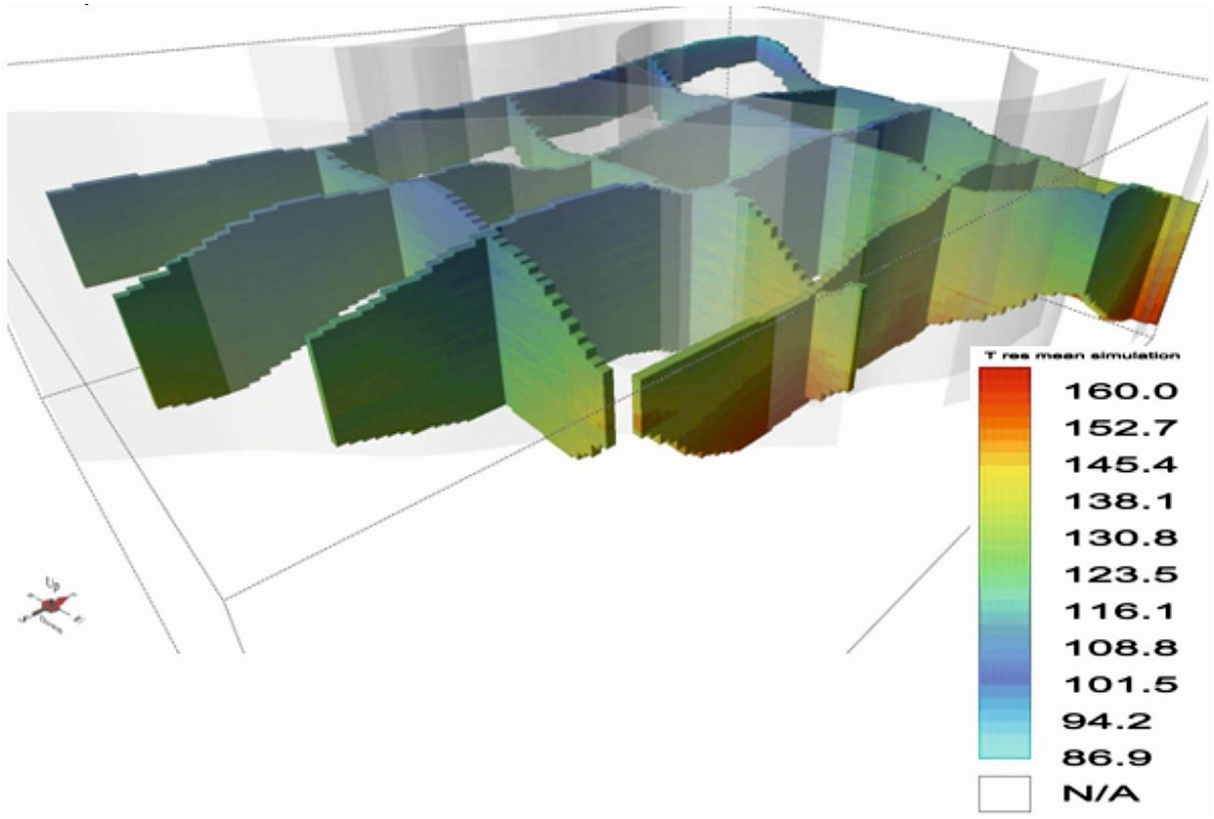
$mW.m^{-2}$ a na báze karpatu / strope strednotriasových karbonátov q = 92-113 $mW.m^{-2}$, pričom klesá až ku q = 91-112 $mW.m^{-2}$ na ich modelovanej spodnej hranici v hĺbke 1 960 – 4 035 m. Hoci generálny trend ostáva v celej štruktúre zachovaný, trend straty gradientu teploty medzi stropom a bázou strednotriasových karbonátov poukazuje na možnosti priestorovo obmedzených konvekčných buniek na východnom okraji štruktúry, predovšetkým v okolí línie Ruskov - Ďurkov - Bidovce (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020). Tie boli následne testované modelmi lineárnej a fázovej stability.

3.3.2 Geotermické pole

Geotermické pole ďurkovskej depresie je možné klasifikovať ako konduktívne v neogénnom profile, s rozptylom konduktívneho geotermického gradientu $\Gamma_{th\text{-}Ng}$ = 46-59 ˚C.km^{-1} a pásmom stredných hodnôt odhadu $\Gamma_{th\text{-}Ng}$ = 51 – 52 ˚C.km^{-1}; respektíve prevažne-konduktívne v mezozoiku pri gradiente $\Gamma_{th\text{-}Mz}$ = 23-30 ˚C.km^{-1} (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; FRIČOVSKÝ ET AL., 2020). Priestorová distribúcia teploty na strope rezervoáru zodpovedá T = 87-143 ˚C, na báze T = 95-180 ˚C (Obr. 3.5), s lokálnymi maximami výrazne koncentrickými v okolí línie Ďurkov – Bidovce v očakávanej hĺbke 1 960 – 4 035 m. Izobáty rezervoárovej teploty T = 100 °C sa pohybujú v hĺbkovom interval z = 1 400 – 2 200 m, pre teplotu T = 120 °C v rozpätí z = 1 800 – 2 900 m, respektíve T = 150 °C v rozmedzí z = 2 700 – 3 500 m. Modelované hĺbky zachytenia klesajú v smere Z – V ako funkcia geotermickej aktivity územia (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020). Teploty na ústí geotermálnych vrtov GTD-1, GTD-2 a GTD-3 sa v rámci testovania pohybovali v intervale T_{wh} = 122 – 135 °C (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; HALÁS ET AL., 2016).

3.3.3 Analýza lineárnej a fázovej stability

Model lineárnej stability (FRIČOVSKÝ ET AL., 2018, 2020; VIZI – FRIČOVSKÝ, 2023) identifikoval v prevažne-konduktívnom režime rezervoárového prostredia potenciálnu zónu konvekcie v polygóne obcí Olšovany – Svinica – Ďurkov – Bidovce, so stropom potenciálnej konvektívnej zóny v hĺbke 2 900 – 3 500 m a hrúbkou 100 – 1 200 m. V rámci konvektívnej zóny rovnaký model predpokladá 5 konvekčných buniek (Obr. 3.6) s primárnou S2 a S3 geometriou, bifurkujúce do S1 štruktúr. Ide o geometrie podporujúce monotónnu konvekciu,



Obrázok 3.5: Vertikálna distribúcia rezervoárovej teploty v strednotriasových karbonátoch ďurkovskej depresie. Zdroj: Fričovský et al. (2020)

bez výrazných zmien v rýchlosti a (priestorovom) dosahu zostupných a vzostupných smerov. Najvýraznejšie účinky konvekcie sa prejavujú v okolí zlomových systémov, pričom presahy medzi parciálnymi tektonickými blokmi neboli identifikované, t.j. ich vzájomná komunikácia nie je pravdepodobná, alebo v izotermickom režime. Pomer transportu tepla v okolí prvého tripletu medzi konduktívnou a konvektívnou zložkou je Q_{CD} : Q_{CV} = 0,53 : 0,47; pri konvektívnom gradiente teploty Γ_{CV} = 17 °C.km^{-1}. Práve prítomnosť možnej konvekcie v produkčnej zóne, jej stabilita, a zachovanie počas dlhodobej produkcie môže následne výrazne ovplyvňovať (pozitívne, negatívne) rezervoárovú odozvu prostredia a zároveň chemicko-technologické parametre geotermálnych vôd vplyvom zmeny v ich chemizme. **Model fázovej stability** (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020) prakticky vylúčil možnosti spontánneho adiabatického varu v rezervoárovom prostredí; pričom vplyvom konvekcie dochádza pri teplote T = 120 – 179 °C k spontánnej separácii, ktorá je následne kondenzovaná v nadložnom konvektívnom alebo konduktívnom regióne, keďže pomer hrúbky potenciálnej zóny adiabatického varu a konvektívnej zóny dosahuje 0,1 – 38 %. Vo výsledku potom potenciálne generovaná parná fáza je alebo okamžite kondenzovaná pre udržanie dynamiky konvektívnej

bunky, respektíve potenciálne presycuje nadložný konvektívny región. Plynná čiapka na strope rezervoáru (VRANOVSKÁ ET AL., 1999) je teda pravdepodobne indukovaného pôvodu pri narušení stacionárneho prostredia s extrémnym presýtením CO_2 pri vysokých teplotách.

3.3.4 Koncepčná klasifikácia ďurkovskej depresie a jej implikácie z pohľadu rezervoárového manažmentu

Z pohľadu globálnej klasifikačnej schémy koncepčných modelov geotermálnych systémov – angl. geothermal play-types (MOECK, 2014; MOECK – BEARDSMORE, 2016; MOECK ET AL., 2019) je celú štruktúru ďurkovskej depresie, vrátane parciálnych tektonických blokov možné charakterizovať ako **prevažne konduktívnu koncepciu (CD)** so štruktúrno-tektonickými a hydrogeotermickými charakteristikami **typov orogénnych pásiem a predoblúkových panví (CD2)** (FRIČOVSKÝ ET AL., 2022). V rámci (doteraz) neformálne vymedzených – regionálnych subtypov (FRIČOVSKÝ ET AL., 2022, 2023) ďurkovská depresia zodpovedá podmienkam **neogénnych sedimentárnych paniev (CD2d)**. Rezervoárový manažment spojený s produkciou, reinjektážou, a komplexným monitoringom štruktúry by z pohľadu dlhodobo udržateľnej rezervoárovej produkcie v priemete na typológiu CD2(d) koncepcií mal zohľadňovať predovšetkým:

- prúdenie je dominantne viazané na efektívne filtračné profily, menej štruktúrno-tektonické a mechanické zóny porušenia, z čoho vyplýva možnosť vertikálneho striedania prítokových parametrov v čase, predovšetkým počas dlhodobej produkcie – ktoré môžu viesť ku zmenám (rôznej časovej škály) v kvalitatívnych (teplota, chemizmus, množstvo a obsah rozpustných plynov, podiel parnej frakcie) parametroch produkovaného média
- vertikálny záznam dlhodobej produktivity a distribúcie efektívnych profilov filtrácie môže byť výrazne odlišný v ich efektívnom a pomernom zastúpení na celkovej produktivite otvoreného úseku, než výsledok hydrodynamickej (VRANOVSKÁ ET AL., 1999, 2001; HALÁS ET AL., 2016), alebo (polo)prevádzkovej skúšky v dôsledku aktivácie alebo re-aktivácie filtračných profilov v závislosti na vývoji tlakových pomerov, hydraulického frontu, alebo reakcií koncových členov transportu tepla
- v súvislosti s náchylnosťou CD2(d) systémov založených prevažne na fáciách (angl. – facies controlled) alterovať efektívne profily filtrácie je zároveň pravdepodobné, že v rámci dlhodobého rienjektážneho manažmentu bude nevyhnutne dochádzať k odchýlkam

v účinnosti reinjektáže a osciláciám kritického tlaku reinjektáže, čo môže mať za následok zmeny ako v kvalitatívnych a kvantitatívnych parametroch rezervoárového prostredia v okolí reinjektážneho vrtu (účinné zasakované množstvá, krátkodobé až dlhodobé zmeny v priepustnosti, distribúcia efektívnych profilov vsakovania, zmeny rezervoárového tlaku) a rezervoárového média (chemické zloženie, frakčné pomery voda-para, chemicko-technologické vlastnosti geotermálnej vody / reinjektátu)

- keďže CD2(d) systémy sú prevažne kontrolované efektívnymi profilmi filtrácie, menej štruktúrnymi fenoménmi, je možný radiálny, alebo usmernený (pravdepodobne kónický) presun hydraulického, hydrochemického a termického frontu v smere k produkčnému vrtu, ktorý v aktuálnom čase nemusí zodpovedať presnému vektoru tlakového gradientu (overovanie geometrie frontu je častokrát riešené stopovacími skúškami), a čo výrazne ovplyvňuje rezervoárovú odozvu efektívnej zóny produkcie
- systémy CD2(d) s typickými režimami prúdenia bazénovej segmentácie a rezervoárovej stratifikácie (v lokálnych podmienkach je druhý menovaný režim prúdenia možné predpokladať len pre viaceré rozvrstvené efektívne profily filtrácie) sú charakteristické prestupmi medzi jednotlivými štruktúrnymi segmentmi, v tomto prípade tektonickými blokmi, ktoré však vzhľadom na lokálne pomery môžu prebiehať jedine v izotermálnom režime; v opačnom prípade by ich boli numerické indikátory lineárnej a fázovej stability (FRIČOVSKÝ ET AL., 2018, 2020; VIZI – FRIČOVSKÝ, 2023) schopné zachytiť; z pohľadu rezervoárovej odozvy to však napriek rovnakej, respektíve podobnej teplote potenciálneho prítoku z iných tektonických blokov nemusí znamenať rovnaké chemické zloženie
- keďže rezervoárovú dynamiku a procesy kontroluje predovšetkým kondukcia – s lokálnymi vplyvmi konvekcie viazanými na okolie zlomových systémov, je aktuálny kvalitatívny stav rezervoárového média a rezervoárového prostredia definovaný pseudo-rovnovážnym stavom medzi plošnou kondukciou a izolovanou konvekciou – dlhodobá produkcia pritom môže viesť k zmenám stability a geometrie, respektíve priestorových dosahov konvekcie vplyvom zmien v tlakovom režime rezervoárového prostredia, alebo ochladzovaním – v čoho dôsledku môže dochádzať k indukovaným zmenám vo formách termodynamickej viazanosti parnej frakcie na vodnú zložku, k zmenám chemického zloženia zdrojov geotermálnej energie, respektíve k zmenám vo vzťahu k predpokladanej plynnej čiapke voľného CO2 v stropných častiach rezervoáru – zároveň zmeny v kvalitatívnej a kvantitatívnej stabilite izolovanej rezervoárovej konvekcie (zintenzívnenie, alebo naopak útlm konvekčných buniek) môžu následne ovplyvňovať rýchlosť, intenzitu, a vektor

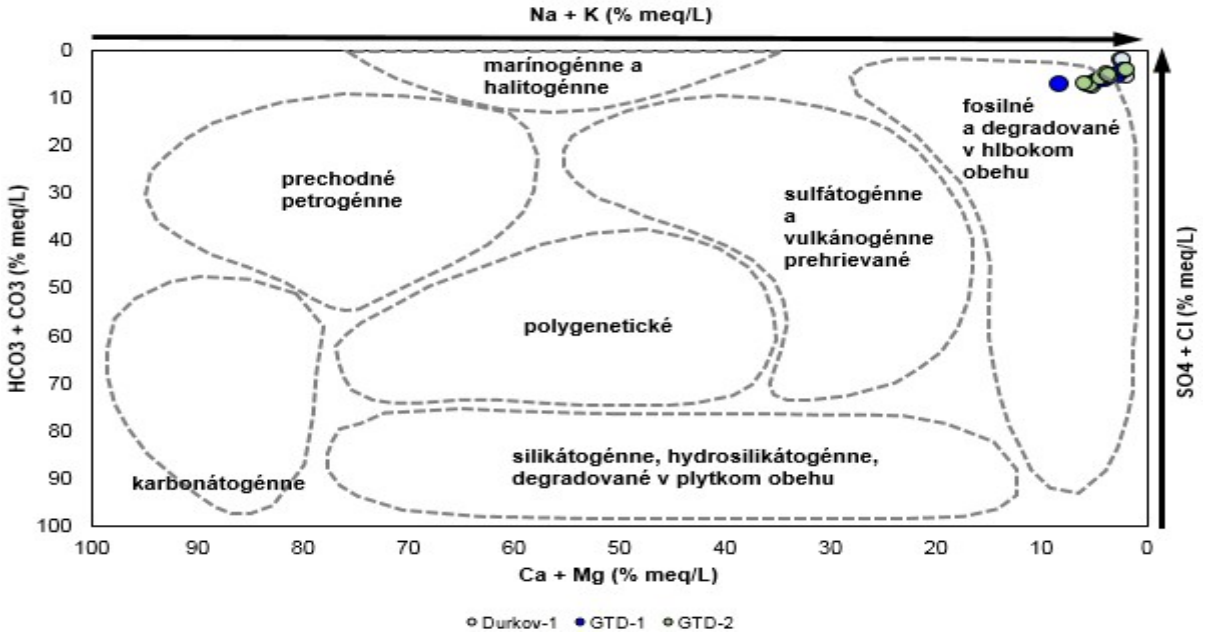
rezervoárovej odozvy vo vzťahu ku kvalitatívnym a kvantitatívnym parametrom geotermálnych vôd v okolí produkčnej zóny, čo vytvára tlak na monitorovanie indikátorov konvekcie v priebehu dlhodobej produkcie nad rámec, napríklad, charakteristických systémov s prevládajúcou konvekciou.

3.4 Hydrogeochemická charakteristika

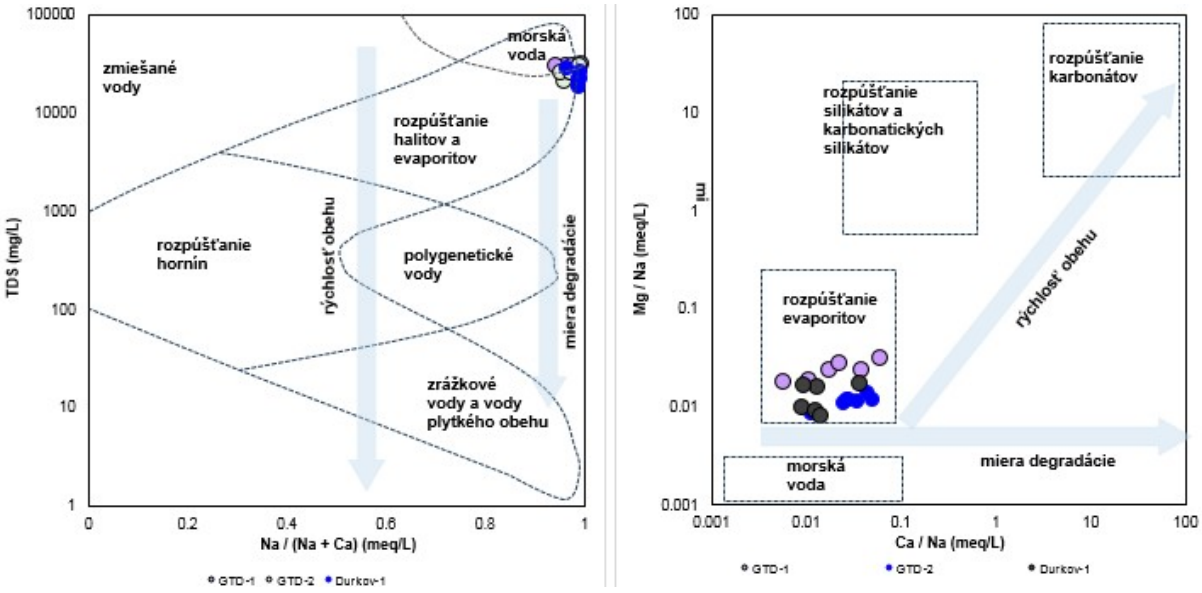
Podľa hydrogeochemickej klasifikácie geotermálnych vôd sú zdroje geotermálnej energie (t.j. geotermálna voda + termodynamicky saturovaná vlhká parná frakcia) výrazného Na-Cl typu s vysokou mineralizáciou a nízkym podielom bikarbonátovej zložky (VRANOVSKÁ ET AL., 1999) s hodnotou celkovej mineralizácie 26 – 32 $g.l^{-1}$ (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; BODIŠ – VRANOVSKÁ, 2012). Problematickými, z pohľadu environmentálneho rizika, sú predovšetkým koncentrácie kovov, napr. lítia (c = 28 – 39 $mg.l^{-1}$) alebo stopových prvkov, napríklad arzénu (c = 19 – 37 $mg.l^{-1}$); ktoré sú jedným z faktorov podmienenej reinjektáže na lokalite (VRANOVSKÁ ET AL., 2015). Kombinácia viazanej parnej frakcie a extrémne vysokých obsahov viazaného CO_2 zároveň znamená nevyhnutnosť produkcie zdrojov geotermálnej energie pri udržaní tlaku v produkčnom systéme 2,1 – 2,2 MPa, vrátane použitia inhibítorov tak, aby boli minimalizované inkrustačné, alebo korózno-inkrustačné (plošné, respektíve selektívne bodové) účinky geotermálnej vody počas jej ochladzovania (VRANOVSKÁ ET AL., 1999).

Z genetického hľadiska ide pravdepodobne o meteorické vody (Obr. 3.7 a 3.8) – pričom nie je vylúčený ani ich čiastočne marínogénny pôvod – ktoré infiltrovali soľnonosnými, a pre vysoký podiel arzénu aj vulkanickými, respektíve vulkanoklastickými formáciami, čo znamená, že k posledným štádiám dopĺňania rezervoárového prostredia muselo dochádzať v bádene (BODIŠ – VRANOVSKÁ, 2012; VRANOVSKÁ ET AL., 2015). Geochemické, tzv. genetické modely (Obr. 3.9), predovšetkým Langellier – Ludwigov diagram zároveň poukazujú na uzavretosť hydrogeologickej štruktúry s minimálnou mierou (laterálnej) degradácie. Tomu zodpovedajú aj rozdiely v kvalitatívnej geotermometrii (viď nižšie) medzi geotermálnymi vodami ďurkovskej štruktúry a overenými geotermálnymi vodami v najbližšej, čižatickej (čiastkovej?) štruktúre (FRIČOVSKÝ ET AL., 2022). Hydrogeologická, respektíve hydraulická uzavretosť štruktúry tak pravdepodobne spolu s otáznymi formami komunikácie medzi jednotlivými tektonickými blokmi ďurkovskej depresie, predstavuje ďalším argument

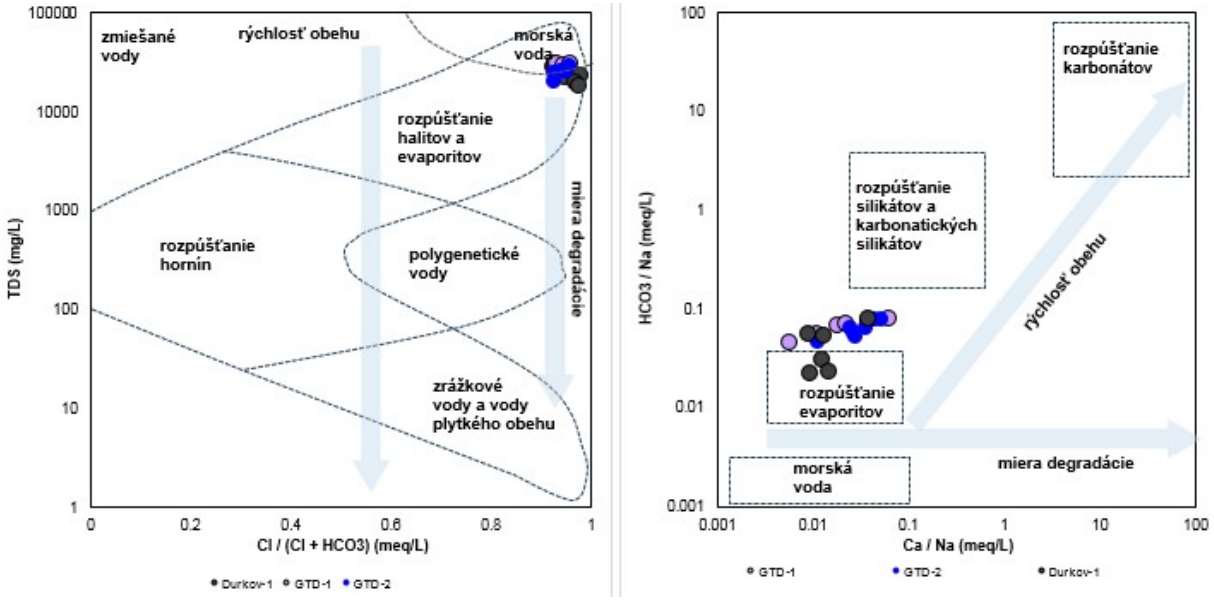
podporujúci nevyhnutne efektívny manažment reinjektáže s cieľom podporiť hydraulickú udržateľnosť rezervoárového prostredia, a zároveň udržiavať fázovú stabilitu z pohľadu foriem termodynamickej viazanosti parnej frakcie na vodnú zložku, podľa čoho je štandardne optimalizovaná povrchová produkčná schéma (GRANT – BIXLEY, 2011; KAMILA ET AL., 2021).



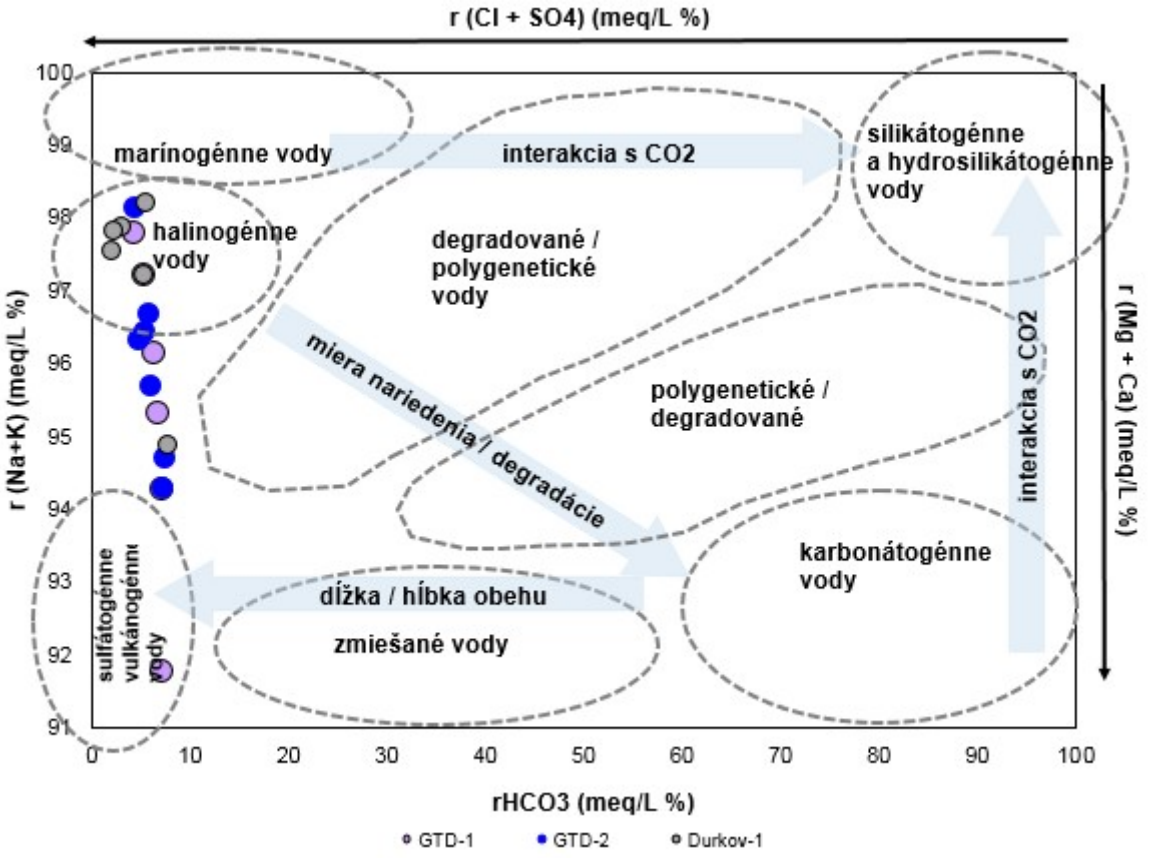
Obrázok 3.7: Klasifikačný Piperov diagram geotermálnych vôd strediska Svinica – Ďurkov / ďurkovskej štruktúry



Obrázok 3.8a: Katiónový Gibbsov diagram geotermálnych vôd strediska Svinica – Ďurkov / ďurkovskej štruktúry



Obrázok 3.8b: Aniónový Gibbsov diagram geotermálnych vôd strediska Svinica – Ďurkov / ďurkovskej štruktúry



Obrázok 3.9: Langellier-ludwigov diagram geotermálnych vôd strediska Svinica – Ďurkov / ďurkovskej štruktúry

4 KONCEPT REZERVOÁROVEJ ODOZVY V REZERVOÁROVOM MANAŽMENTE ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

Stav zdrojov geotermálnej energie, pri ktorých platí rovnováha medzi množstvom energie prirodzene vstupujúceho do (rezervoárového) systému a prirodzene vystupujúceho z (rezervoárového) systému je výsledkom geologického, hydrogeologického, geotermického a tektono-termického vývoja konkrétneho hydrogeotermálneho systému (JAUPART – MARESCHAL, 2010; EPPELBAUM ET AL., 2014); ktorý je z termodynamického hľadiska možné považovať za uzavretý, a v rovnováhe so svojim okolím a to bez ohľadu na hydrogeologickú povahu (otvorenosť) rezervoárového prostredia (WATSON, 2013); pričom však tento stav je obrazom kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov komplexného rezervoárového systému v iniciálnom štádiu – t.j. **v čase pred otvorením, respektíve pred testovaním produkcie**. Pri akomkoľvek zásahu do rezervoárového systému, pričom za zásah sa štandardne považuje testovanie produkcie, alebo plná produkcia rezervoárového prostredia (GRANT – BIXLEY, 2011; WATSON, 2013), dochádza k narušeniu termodynamickej rovnováhy na rozhraní systém – okolie a systém – systém, pričom rezervoárový systém prechádza do pseudo-rovnovážneho až nerovnovážneho (dynamického, neustáleného) stavu (GUDMUNDSSON, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011), pričom z termodynamického hľadiska je možné následne ho charakterizovať ako otvorený systém (WATSON, 2013). **Narušenie termodynamickej rovnováhy systému s okolím následne vedie k prirodzeným, respektíve indukovaným zmenám v kvalitatívnych a kvantitatívnych parametroch rezervoárového systému – rezervoárovej odozve**. Z pohľadu rezervoárového manažmentu, respektíve rezervoárového inžinierstva, ako multidisciplinárneho odboru, ktorého hlavným predmetom je štúdium a – v prevažnej väčšine krajín sveta aktívny manažment produkovaných / neprodukovaných geotermálnych systémov a polí potom neexistuje spôsob produkcie zdrojov geotermálnej energie, ktorý by nevyvolal kvalitatívne, alebo kvantitatívne zmeny v rezervoárovom prostredí, prípadne rezervoárovom médiu (GRANT – BIXLEY, 2011). Primárnym cieľom (udržateľného) rezervoárového manažmentu ale má byť zabezpečenie stavu, v ktorom by prejavy, procesy, alebo produkty rezervoárovej odozvy boli **zvratné** (t.j. obnoviteľné v zmysle koncepcie obnoviteľnosti a regenerácie zdrojov geotermálnej energie, čiže simultánne sa obnovujúce počas produkcie zdrojov geotermálnej energie alebo v čase po ukončení produkcie, ktorý by nepresiahol dobu samotnej produkcie); nezamedzovali využívanie zdrojov geotermálnej energie v okolí

využívaného rezervoárového prostredia; neohrozovali by bezpečnosť obyvateľstva a povrchové prírodné systémy; **a neohrozovali dlhodobú udržateľnosť produkcie zdrojov geotermálnej** energie utlmovaním, alebo predčasným odstavením produkcie v dôsledku hydraulickej, alebo energetickej depletácie rezervoárového prostredia, pričom za dlhodobo udržateľný horizont produkcie sa považuje minimálne 100 rokov (RYBACH ET AL., 1999; AXELSSON ET AL., 2001; AXELSSON, 2010, 2012; AXELSSON – STEINGRÍMSSON, 2018; JOLIE ET AL., 2021; RYBACH, 2022).

Pojem rezervoárová odozva teda predstavuje všetky prirodzené, alebo vyvolané **fyzikálne a chemické procesy** týkajúce sa rezervoárového prostredia, alebo povrchu geotermálneho poľa, **ktoré majú preukázateľný súvis s produkciou zdrojov geotermálnej energie**, najčastejšie napríklad (KJARAN – ELIASSON, 2008; GRANT – BIXLEY, 2011; ; JACOBO – MONTALVO, 2013; KAMILA ET AL., 2021; SOLTANI ET AL., 2021): 1) subsidencia alebo lokálny diapirizmus reliéfu; zmeny v rezervoárovom tlaku; 2) zmeny v rezervoárovej produktivite; 3) zmeny v rezervoárovej entalpii a termodynamickej kvalite zdrojov geotermálnej energie; 4) zmeny v rezervoárovej teplote; 5) zmeny v rezervoárovej dynamike a rezervoárových procesov ako sú vektory a charakter prúdenia alebo zmeny v koncových členoch transportu tepla; 6) zmeny v chemickom zložení geotermálnej vody a/alebo pary a technicko-technologických parametroch; 7) zmeny v množstve parnej frakcie alebo termodynamickej forme viazanosti parnej frakcie; 8) zmeny v seizmicite územia; 9) ovplyvňovanie povrchových prejavov zdrojov geotermálnej energie; 10) zmeny v rozložení pôdnych plynov a pôdnom ekosystéme; a iné. **Za rezervoárovú odozvu sa pritom považujú zmeny s negatívnym, ale aj pozitívnym vplyvom na udržateľnosť a obnoviteľnosť produkovaných zdrojov geotermálnej energie**.

V zmysle vyššie uvedených štandardov v koncepčnom prístupe ku udržateľnému rezervoárovému manažmentu potom v priemete na zásadu DNSH tak, ako je definovaná v zmysle „Nariadenia Európskeho parlamentu a Rady EÚ 2020/852 z 18. júna 2020 o vytvorení rámca na uľahčenie udržateľných investícií a o zmene nariadenia 2019/2088, tzv. „taxonómii“ nasledujúce časti predkladaného posudku:

- **predpokladajú, že produkciou, a predovšetkým reinjektážou** počas krátkodobej, aj dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie **dôjde k prejavom rezervoárovej odozvy**
- **hodnotia potenciálne vplyvy a dopady dlhodobej produkcie a reinjektáže na rezervoárový systém z hľadiska udržateľného rezervoárového manažmentu**.

5 POSÚDENIE PRODUKČNEJ SCHÉMY VO VZŤAHU K ZÁSADE DNSH

Predkladaný hydrogeologický posudok je vypracovávaný pre Zámer (ďalej ako Zámer) podľa Zákona č. 24/2006 Z.z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie a o zmene a doplnení niektorých zákonov v znení neskorších predpisov pre „Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline: geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov“, v nadväznosti na Stanovisko Sekcie vôd MŽP SR 8600/2024 k predmetnému zámeru (ďalej ako Vyjadrenie) a v súlade s Podmienkami pre zabezpečenie súladu projektu so zásadou nespôsobovať významnú škodu – DNSH k výzve PSK-MIRRI-006-2023-NP-FST (ďalej ako Podmienky) tak, ako je zásada DNSH definovaná v zmysle „Nariadenia Európskeho parlamentu a Rady EÚ 2020/852 z 18. júna 2020 o vytvorení rámca na uľahčenie udržateľných investícií a o zmene nariadenia 2019/2088, tzv. „taxonómii“ (ďalej ako Nariadenie).

Pri zosúladení Zámeru, Vyjadrenia, Podmienok, a všeobecných zásad (udržateľného) rezervoárového manažmentu produkcie zdrojov geotermálnej energie v zmysle Koncepcie trvalo udržateľnej produkcie zdrojov geotermálnej energie (AXELSSON ET AL., 2001) a best-practice rezervoárového inžinierstva (KJARAN – ELIASSON, 2008; GRANT – BIXLEY, 2011; WATSON, 2013) je posudzovanie prezentované v Kapitole 6 a Kapitole 7 zamerané na **vplyv konfigurácie produkčnej schémy** na kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia a rezervoárového média, a na **vplyv produkčného manažmentu / produkčnej stratégie** na kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia a rezervoárového média; v tomto prípade geotermálnej vody s termodynamicky viazanou vlhkou parnou fázou.

V kapitole 5 je preto pozornosť zameraná na **posúdenie súladu produkčnej schémy primárne so zásadami DNSH** tak, ako sú špecifikované v Nariadení, s pozornosťou venovanou predovšetkým **funkčnému prínosu realizácie druhého tripletu** na geotermálnom stredisku Svinica – Ďurkov k plánovanému dlhodobému zásobovaniu teplom mesta Košice z využívania zdrojov geotermálnej energie, všeobecne považovaných za „obnoviteľné zdroje energie“. Triplet č. 1 (GTD-1 až GTD-3) bol, v zmysle konštatácií Zámeru, podrobený samostatnému hodnoteniu, a na rozdiel od tripletu č.2 je jeho aktivácia v rámci geotermálneho strediska založená na technickom a technologickom, prípadne produkčnom oživení jeho konfigurovanej schémy.

5.1 Charakteristika produkčnej schémy

Podľa predkladaného Zámeru je geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov založené na produkcii zdrojov geotermálnej energie v rámci dvoch tripletových sústav v plánovanej schéme P:I = 1:2, respektíve sumárne P:I = 2:4 (produkčné vrty : reinjektážne vrty); pričom prvý triplet, vrty GTD-1, GTD-2 a GTD-3 sú realizované, vrátane legislatívne podmienených hydrodynamických skúšok a realizovaného posudzovania, druhý triplet vrtov GTD-4, GTD-5 a GTD-6 je predmetom realizácie v zmysle predkladaného Zámeru.

5.1.1 Konfigurácia tripletu č. 1

Triplet č.1 (Tab. 5.1) bol realizovaný v rámci hydrogeotermálneho prieskumu Košickej kotliny – ďurkovskej depresie (VRANOVSKÁ ET AL., 1999). Predpokladaná schéma je nasledovná:

- produkčný vrt: GTD-2
- reinjektážne vrty: GTD-1 a GTD-3
- orientácia tripletu v smere východ – západ: GTD-2 – GTD-1 – GTD-3

Tabuľka 5.1. Charakteristika produkčnej schémy tripletu č.1

hydrogeotermálny vrt	funkcia	prevedenie	ťažobná kolóna		vertikálna hrúbka v karbonátoch
			od	do	(m)
GTD-1	reinjektážny	priamy	2 050	3 210	1 150
GTD-2	produkčný	uklonený	2 241	3 150	910
GTD-3	reinjektážny	orientovaný	2 003	2 250	247

Podľa predloženého Zámeru, voči ktorému sa hydrogeologický posudok vzťahuje, pri zásobovaní teplom mesta Košice z geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov sa predpokladá **celoročná prevádzka tripletu** s inštalovaným výkonom 15 MWt, pričom schéma P:I = 1:2 je dizajnovaná tak, aby zabezpečila rovnovážny stav medzi jednotkovou produkciou zdrojov geotermálnej energie a jednotkovou reinjektážou, t.j. bez vonkajších strát rezervoárového média. Reinjektážny systém tripletu je možné charakterizovať nasledovne:

1) podľa priestorovej pozície produkčných a reinjektážnych vrtov: **blízka / priama reinjektáž**; keďže pozícia produkčných vrtov je viazaná na rovnakú zónu termickej anomálie

- štandardná funkcia (AXELSSON, 2012): priama hydraulická podpora produkčnej schémy a udržiavanie produktivity okamžitým dopĺňaním
- riziká (KAYA ET AL., 2011): malá vzdialenosť medzi produkčnou a reinjektážnou zónou v rámci možných spojitých efektívnych profilov filtrácie, riziko tlakovej stimulácie kondenzácie parnej frakcie

2) podľa vertikálnej pozície produkčných a reinjektážnych vrtov v rámci rezervoáru: **priama reinjektáž**; t.j. reinjektáž približne v rovnakej hĺbkovej pozícii, ako produkčný vrt, charakterizovaná predovšetkým bližšou vzdialenosťou vrtov GTD-1 a GTD-2, a zároveň podľa distribúcie rezervoárového tlaku (3.2.3) aj preferenčným gradientom prúdenia (ktorý pre CD2d štruktúry nemusí byť ale časovo stabilný)

- štandardná funkcia (DIAZ ET AL., 2016): priama kontrola tlakových pomerov, udržiavanie produktivity, efektívne dopĺňanie rezervoárového média
- riziká (KAYA ET AL., 2011): vzhľadom na rovnakú vertikálnu výšku infiltrácie najvyššie riziko negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy
- v prípade, ak by prevládajúci vektor gradientu tlaku bol medzi vrtmi GTD-2 a GTD-3, je pravdepodobné, že dominantný vplyv na manažment reinjektáže by mala takzvaná **plytká reinjektáž**, ktorej sadf nadložia indukovať, pri vhodnej optimalizácii gradient teploty v rezervoárovom prostredí (konvektívny a konduktívny); pri súbežnom riziku rýchlejšieho ochladzovania efektívnej zóny produkcie gravitačným poklesávaním

3) podľa vzťahu produkovaných a reinjektážnych množstiev geotermálnych vôd: **plná reinjektáž**; vychádzajúca z princípu pomeru 1 : 1 medzi zdrojom geotermálnej energie a reinjektovanej geotermálnej vode, bez strát povrchovým zneškodnením, pričom technickou podporou plnej reinjektáži je aj tripletová schéma P:I = 1:2

- štandardná funkcia (KAYA ET AL., 2011): maximalizovaná tlaková podpora rezervoárového prostredia pre zabezpečenie tlakových gradientov a produktivity
- riziká (KAYA ET AL., 2011): vyššie ekonomické náklady a zvýšená intenzita ochladzovania rezervoárového prostredia vo vzťahu medzi advektívnym ochladením a konduktívnym zahrievaním (retardáciou)

4) podľa teploty reinjektáže: **studená reinjektáž**; keďže predpokladaná teplota reinjektáže na ústí vtláčacích vrtov je 45 °C, t.j. pod štandardizovaným limitom T_{inj} = 70 °C globálnej dobrej praxe (GRANT – BIXLEY, 2011)

- štandardná funkcia (GRANT – BIXLEY, 2011; KAYA ET AL., 2011): zvyšovanie energetického výkonu formovaním gradientu voči vstupu do výmenníkových sústav, v prípade udržiavania podsýtenia voči Ca- a Mg-kalcitom zároveň aj zvyšovanie priepustnosti okolia reinjektážneho vrtu indukovaným rozpúšťaním karbonátov, a tým aj zvyšovania účinnosti reinjektáže
- riziká (KAYA ET AL., 2011): intenzívne vyhojovanie puklín precipitáciou v prípade straty tlaku v reinjektážnom vrte a znižovanie účinnosti reinjektáže kalcitmi-presýtených reinjektátov v karbonátoch, podpora advektívneho prenikania studeného frontu.

5.1.2 Konfigurácia tripletu č. 2

Triplet č.2 (Tab. 5.2) je predmetom činností v zmysle predkladaného Zámeru podľa nasledovnej schémy:

- produkčný vrt: GTD-4
- reinjektážne vrty: GTD-5 a GTD-6
- orientácia tripletu v smere východ – západ: GTD-6 – GTD-5 – GTD-4

Tabuľka 5.2. Charakteristika produkčnej schémy tripletu č.2

hydrogeotermálny vrt	funkcia	prevedenie	ťažobná kolóna		vertikálna hrúbka v karbonátoch
			od	do	(m)
GTD-4	produkčný	orientovaný	2 850	3 550	700
GTD-5	reinjektážny	orientovaný	2 450	3 080	630
GTD-6	reinjektážny	orientovaný	2 200	2 830	630

Podľa predloženého Zámeru, voči ktorému sa hydrogeologický posudok vzťahuje, pri zásobovaní teplom mesta Košice z geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov sa predpokladá **sezónna, podporná prevádzka tripletu** s inštalovaným výkonom 15 MWt, pričom schéma P:I = 1:2 je dizajnovaná tak, aby zabezpečila rovnovážny stav medzi jednotkovou produkciou zdrojov geotermálnej energie a jednotkovou reinjektážou, rovnako, ako pre triplet č. 1 Reinjektážny systém tripletu je možné charakterizovať nasledovne:

1) podľa priestorovej pozície produkčných a reinjektážnych vrtov: **blízka / priama reinjektáž**; keďže pozícia produkčných vrtov je viazaná na rovnakú zónu termickej anomálie

- štandardná funkcia: viď 5.1.1.
- riziká : viď 5.1.1.

2) podľa vertikálnej pozície produkčných a reinjektážnych vrtov v rámci rezervoáru: **plytká reinjektáž**; keďže v zmysle Zámeru je rozdiel v TVD na počve vrtov GTD-5 a GTD-6 proti GTD-4 500 m respektíve 720 m, rozdiel v TVD počiev a kotvy do 50 m a rozdiel v TVD kotví 400 a 650 m v súlade s očakávanou geometriou stropu rezervoárového prostredia

- štandardná funkcia (DIAZ ET AL., 2016): zneškodňovanie odpadového tepla s environmentálne neprijateľným chemizmom, podpora indukovaného konduktívneho alebo konvektívneho gradientu teploty ochladzovaním nadložia, znižovanie nákladov
- riziká (KAYA ET AL., 2011): podpora prieniku hydraulického a termického frontu gravitačným poklesávaním, extrémne rizikové v prípade orientovaných preferenčných profilov filtrácie alebo štruktúrnych porúch, zvýšené nároky na pravidelný monitoring

3) podľa vzťahu produkovaných a reinjektážnych množstiev geotermálnych vôd: **plná reinjektáž**; vychádzajúca z princípu pomeru 1 : 1 medzi zdrojom geotermálnej energie a reinjektátom, bez strát povrchovým zneškodnením, pričom technickou podporou plnej reinjektáži je aj tripletová schéma P:I = 1:2

- štandardná funkcia: viď 5.1.1.
- riziká : viď 5.1.1.

4) podľa teploty reinjektáže: **studená reinjektáž**; keďže predpokladaná teplota reinjektáže na ústí vtláčacích vrtov je 45 °C, t.j. pod štandardizovaným limitom T_{inj} = 70 °C globálnej dobrej praxe (GRANT – BIXLEY, 2011)

- štandardná funkcia: viď 5.1.1.
- riziká : viď 5.1.1.

5.1.3 Poznámky ku produkčnej schéme

Zvolené tripletové riešenie P:I = 1:2 respektíve P:I = 2:4 pre celé geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov vytvára z pohľadu priestorových parametrov existujúcich (GTD-1 až GTD-3), alebo plánovaných vrtov (GTD-4 až GTD-6) vhodný priestor pre optimalizáciu možných

funkcií jednotlivých vrtov v prípade, ak hydrodynamickými skúškami, respektíve prevádzkovou skúškou a následne počas plnej prevádzky dôjde k identifikovaniu iných, optimálnejších konfigurácií pri ponechaní konfigurácie. Výmeny, respektíve zámeny funkcií medzi jednotlivými vrtmi sú, ak to umožňujú ich technické riešenia, štandardným nástrojom pri rezervoárovom manažmente geotermálnych polí predovšetkým v situáciách, kedy rezervoárový monitoring identifikuje modelovaním a prediktívnymi modelmi neidentifikované prejavy rezervoárovej odozvy s potenciálnym rizikom na parametre udržateľnosti a obnoviteľnosti zdrojov geotermálnej energie (THÓRHALSSON, 2009; THÓRHALSSON – GUNNLAUGSSON, 2012; AXELSSON – FRANZSON, 2012). Rozšírenie geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov o ďalší produkčný triplet preto pri udržaní plánovaného inštalovaného výkonu 30 MWt:

- rozdelí energetickú záťaž spojenú s požadovanou produktivitou a množstvom odoberaných zdrojov geotermálnej energie (v prípade ich overenia a schválenia na MŽP SR) a množstvom odoberanej geotermálnej energie medzi dve produkčné sústavy
- rozdelí záťaž vyplývajúcu z reinjektáže medzi dve produkčné sústavy, s predpokladaným pozitívnym efektom znižovania rozdielu medzi konvektívnym / advektívnym ochladzovaním efektívneho profilu filtrácie a rezervoárového prostredia a medzi prevažne-konduktívnou retardáciou teplotného (a pravdepodobne aj hydraulického) frontu
- umožní dynamické zmeny v manažmente geotermálneho strediska, respektíve geotermálneho systému ďurkovskej depresie a tým aj aplikovanie praktických postupov pre znižovanie dopadu potenciálnych negatívnych aspektov rezervoárovej odozvy.

V súvislosti s dobrou praxou (angl. good examples, best-praxis), je v podmienkach, ktoré vo všeobecnosti platia pre hydrogeotermálnu štruktúru ďurkovskej depresie (nízkoentalpické zdroje geotermálnej energie do 150 – 200 °C s termodynamicky saturovanou vlhkou parou, prevažne-konduktívne prostredie, podľa produktivity potenciálne až vysoko-potenciálne rezervoárové prostredie) je štandardná konfigurácia reinjektážnej schémy P:I = 1:2 až 1:X, a zároveň vzhľadom na priestorové vzťahy medzi produkčnými a reinjektážnymi vrtmi: primárne blízka reinjektáž, primárne priama reinjektáž, primárne plná reinjektáž, a primárne studená reinjektáž (KAYA ET AL. 2011; DIAZ ET AL 2016; KAMILA ET AL. 2021). **Z pohľadu konfigurácie produkčnej schémy s konfiguráciou produkčných systémov dobrej praxe rezervoárového manažmentu následne vyplýva, že plánovaná konfigurácia spĺňa štandardy aplikované v analogických podmienkach a z technického hľadiska rezervoárového manažmentu je navrhovaná konfigurácia optimálna**.

5.1.4 Neistoty spojené s produkčnou schémou

V súčasnom stave príprav a realizácie spustenia produkcie zdrojov geotermálnej energie na geotermálnom stredisku Svinica – Ďurkov sú dostupné výsledky z testovania tripletu č. 1. Aktuálne nie je možné posúdiť, aké interferenčné prejavy bude mať na účinnosť reinjektáže a časovú dynamiku v očakávaných nepravidelných zmenách preferenčných režimov prúdenia (typické pre CD2d koncepčné systémy) spoločná reinjektáž v rámci oboch tripletov. V prípade formovania časovo viac alebo menej stabilných preferenčných tlakových gradientov, a aj vzhľadom na očakávanú povahu geometrie „studeného" frontu je však možné predpokladať, že pri optimalizácii tlakového režimu produkcie a reinjektáže bude možné zabezpečiť distribúciu frontov v smere k efektívnym zónam produkcie v okolí vrtov GTD-2 respektíve GTD-4.

Definované neistoty je možné odstrániť jedine realizáciou vrtov druhého tripletu s následnými interferenčnými a stopovacími skúškami, ktoré ale v zmysle platnej legislatívnej úpravy nie sú definované zákonom. Druhou možnosťou odstránenia neistoty je kontinuálne hydraulické predikčné modelovanie na základe pravidelných kalibrácií (history-matching) pre nelineárne anizoteplotné systémy uzavretých nádrží (napr. SATMAN – TUREYEN, 2012; TUREYEN ET AL., 2014).

5.2 Preskúmanie realizácie a činnosti produkčnej schémy podľa nariadenia DNSH

Podľa princípov posudzovania, ktoré vychádzajú z Nariadenia, je preskúmavanie projektov s podporou z verejných rozpočtových prostriedkov založené na bodoch:

- významnosť prínosu k zmierneniu zmien klímy
- adaptácia na zmeny klímy
- udržateľné využívanie a ochrana vodných a morských zdrojov
- prechod na obehové hospodárstvo
- prevencia a kontrola znečisťovania
- ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémov.

5.2.1 Prínos k zmierneniu zmien klímy

Zdroje geotermálnej energie v útvare geotermálnych vôd Košická kotlina – SK300170FK, a jej čiastkovej štruktúre ďurkovská depresia sú viazané na hydrogeologicky uzavreté rezervoárové prostredie, v ktorom zdroj geotermálnej energie predstavuje geotermálna voda s termodynamicky viazanou vlhkou parnou fázou schopnou spontánnej separácie pri kvázi-atmosférickom alebo atmosférickom tlaku, a s hodnotami celkovej mineralizácie 25 – 32 $g.l^{-1}$, vrátane vysokých obsahov kovov a ekotoxických stopových prvkov, vrátane As a Li. V zmysle platnej legislatívy, predovšetkým 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); Vyhlášky Ministerstva životného prostredia SR č. 51/2008 Z.z., ktorou sa vykonáva geologický zákon; a Zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach v znení neskorších predpisov (geologický zákon), je produkčná schéma postavená na reinjektážnom systéme jediným možným spôsobom produkcie zdrojov geotermálnej energie. Nakoľko je produktom Zámeru rozvoj dodávok tepla z obnoviteľných zdrojov energie pre mesto Košice, je produkcia zdrojov geotermálnej energie v navrhovanej schéme P:I jediným technickým riešením, ktorým je možné signifikantne prispieť k redukcii CO_2, respektíve GHGs a AHSs pre miestny centralizovaný systém zásobovania teplom. Pri porovnaní technického riešenia produkčnej schémy, ktorá je založená na dvoch tripletoch so zásadami dobrej praxe v rezervoárovom manažmente geotermálnych polí (5.1.3) je zároveň zrejmé, že schéma tak, ako je definovaná v Zámere, pričom triplet č.1 prešiel hydraulickými skúškami aj posudzovaním, a jeho krátkodobé prejavy a vplyv na rezervoárové prostredie sú zrejmé, je funkčná a spĺňa základné požiadavky na reinjektážne systémy nízkoentalpických, prevažne-jednofázových zdrojov geotermálnej energie. Okrem možných dopadov na rezervoárové prostredie a rezervoárové médium, ktoré sú charakterizované v Kapitole 6 a Kapitole 7, z dlhodobého hľadiska realizácia druhého tripletu a otvorenie geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov v jeho plnej konfigurácii pri možných, krátkodobých negatívnych prejavoch, ako sú technické práce, krátkodobé emisie, emisie spojené so skúškami vrtov, predstavuje výrazný krok ku zmierneniu dopadov klimatických zmien. **Vzhľadom na technické parametre produkčnej schémy a jej funkciu vo vzťahu k produkcii zdrojov geotermálnej energie a vo vzťahu ku ochrane rezervoárového prostredia, respektíve rezervoárového média, produkčná schéma spĺňa podmienku významne nenarušiť – DNSH**.

5.2.2 Adaptácia na zmeny klímy

Podľa predloženého Zámeru je plánovaný inštalovaný výkon geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov 30 MWt, pri celoročnej prevádzke tripletu č.1 s plánovanou produkciou 7 200 h / rok a podpornou, cyklickou prevádzkou tripletu č.2 s plánovanou produkciou 4 800 h / rok, čo znamená ročne produkciu tepelnej energie na úrovni 180 000 MWh. Rovnako, ako v prípade väčšiny územia Slovenska, aj mesto Košice, respektíve dotknuté územie aktuálne podlieha akútnym, alebo chronickým zmenám klímy v zmysle Oddielu II dodatku A Nariadenia. Celoročná prevádzka geotermálneho strediska, ktorá je možná jedine realizáciou druhého tripletu, a zabezpečenie jeho dlhodobo udržateľnej produktivity, je pritom vhodným adaptačným riešením voči zmene klímy prostredníctvom substitúcie vysokoemisných fosílnych zdrojov využívaných pri súčasnej výroby tepla za nízkoemisné zdroje geotermálnej energie. Z vyššie uvedeného vyplýva, že **realizácia produkčnej sústavy a jej prevádzka spĺňa podmienku významne nenarušiť – DNSH z pohľadu vytvorenia možností a podpory adaptability na zmenu klímy.**

5.2.3 Udržateľné využívanie a ochrana vodných a morských zdrojov

Pre nízkoentalpické jednofázové zdroje geotermálnej energie, respektíve zdroje geotermálnej energie s mobilnou fázou – geotermálnou vodou, a termodynamicky viazanou, vlhkou saturovanou parnou frakciou schopnou spontánnej separácie, t.j. adiabatického varu a vlastnej mobility pri kvázi-atmosférickom až atmosférickom tlaku v hydrogeologicky uzavretých rezervoárových prostrediach s variabilnou dynamikou a potenciálom časovo variabilného vektoru filtrácie je v zmysle dobrej globálnej praxe (udržateľného) rezervoárového manažmentu nevyhnutné zabezpečiť hydraulicky a termicky účinnú reinjektáž (KJARAN – ELIASSON, 2008; GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON, 2012), primárne konfigurovanú ako priamu (v špecifických prípadoch plytkú alebo hlbokú) a blízku, optimalizovanú pre plnú reinjektáž (množstvo reinjektátu jednotkovo prekračuje 90 percent množstva produkovaných zdrojov geotermálnej energie) pri nízkych teplotách (KAYA ET AL. 2011; DIAZ ET AL 2016; KAMILA ET AL. 2021); detto v prípade, ak je vzhľadom na technicko-technologické parametre produkovaných zdrojov geotermálnej energie žiaduce udržiavať tlak nasýtenia parnej frakcie (t.j. stabilitu viazanej vlhkej pary bez jej separácie) tak, aby

v rezervoárovom prostredí, voči ktorému je zdroj geotermálnej energie nedosýtený, nedochádzalo zmenou frakčných pomerov k inverzii saturačných stavov a eliminácii efektívnej priepustnosti. Základnými funkciami reinjektáže (udržateľného) rezervoárového manažmentu v analogických podmienkach sú (GRANT – BIXLEY, 2011; DIAZ ET AL., 2016):

- okamžitá podpora produktivity (kvantitatívna ochrana geotermálnych vôd)
- priama podpora tlakových podmienok v rezervoári pre udržiavanie pseudo-ustáleného až dynamického stavu bez zmien vo fázových pomeroch plynnej a vodnej zložky
- priama podpora tlakových podmienok v rezervoári pre udržiavanie pseudo-ustáleného až dynamického stavu bez zmien v termodynamickej forme viazanosti parnej frakcie
- manažment hospodárstva odpadového tepla a jeho zneškodňovanie bez ovplyvnenia biotických a abiotických zložiek povrchu tepelnou kontamináciou
- manažment odpadového tepla a priama ochrana povrchových a plytkých podzemných vôd zneškodňovaním produkovanej geotermálnej vody (rezervoárového média) do pôvodného prostredia a ochrana biotických a abiotických zložiek povrchu chemickou kontamináciou.

V zmysle výsledkov analýzy konfigurácie tripletu č.1 (5.1.1) a tripletu č.2 (5.1.2) je existujúci triplet a navrhovaný triplet definovaný v Zámere možné považovať za funkčne vyhovujúci dobrej praxi (udržateľného) rezervoárového manažmentu (5.1.3). Následne je možné konštatovať, že **v zmysle definície Nariadenia, ako aj v zmysle požiadaviek RSV je** samotná produkčná schéma – a predovšetkým **reinjektáž, technickým riešením umožňujúcim** (pri vhodnom a udržateľnom manažmente rezervoárovej produkcie) **ochranu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov zdrojov geotermálnej energie** (rezervoárového média) **a rezervoárového prostredia**. Posudzovanie čiastkových vplyvov produkcie a reinjektáže, ktoré vychádzajú z prirodzenej alebo indukovanej rezervoárovej odozvy na rezervoárové prostredie a rezervoárové médium, je predmetom nasledujúcej Kapitoly 6 a Kapitoly 7. Ako v príslušných bodoch hodnotenia následne uvádzame, za **predpokladu dodržiavania produkčnej stratégie opisovanej v Zámere, navrhovaná produkčná schéma a na ňu viazaná činnosť** (produkcia a reinjektáž zdrojov geotermálnej energie) **spĺňajú zásadu významne nenarušiť – DNSH z pohľadu kombinácie princípov Nariadenia, požiadaviek RSV na kvalitatívny a kvantitatívny stav útvarov geotermálnych vôd, ako aj z pohľadu princípov Koncepcie trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu (TURP) respektíve Koncepcie trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie (TURM)**.

5.2.4 Prechod na obehové hospodárstvo

Neuplatňuje sa.

5.2.5 Prevencia a kontrola znečisťovania

Vychádzajúc z predkladaného Zámeru, dokončenie a otvorenie prevádzky (produkcie a reinjektáže) na geotermálnom stredisku Svinica – Ďurkov, pri celoročnom a klimaticky-špičkovom zásobovaní mesta Košice, výrazne prispeje k redukcii podielu využívaných fosílnych palív v systémoch CZT, čo v priamom dôsledku vytvára výrazný predpoklad redukcie znečisťovania ovzdušia pri generovaní tepla v rámci centralizovaných systémov vykurovania.

Podľa chemického zloženia geotermálnych vôd (viď. 3.4 a 5.2.3) je produkované rezervoárové médium (aj v rámci termodynamicky naviazanej, saturovanej frakcie vlhkej pary) typické vysokými obsahmi lítia (c = 28 – 39 $mg.l^{-1}$) alebo arzénu (c = 19 – 37 $mg.l^{-1}$); čo je jedným z kľúčových dôvodov reinjektáže. Keďže pri plnej reinjektáži (5.1.1. a 5.2.2) pracuje celý systém v uzavretom pracovnom okruhu a nedochádza ku kontaktu zdrojov geotermálnej energie s povrchom, pri správnom technickom riešení pažnicových systémov sú výrazne limitované až eliminované riziká chemickej kontaminácie povrchových tokov, respektíve zvodní v kvartérnych, respektíve predkvartérnych útvaroch podzemných vôd. Navrhovaný systém produkčnej schémy predstavuje aktívny faktor ochrany a prevencie znečisťovania ovzdušia, povrchových a podzemných vôd. Z vyššie uvedeného následne vyplýva, že **produkčná schéma a jej prevádzka spĺňa podmienku významne nenarušiť – DNSH z pohľadu vytvorenia možností a podpory adaptability na zmenu klímy.**

5.2.6 Ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémov

Technické kritéria preskúmania vo vzťahu k ochrane a obnove biodiverzity a ekosystémov, ktoré je potrebné splniť sú stanovené v dodatku D prílohy k Nariadeniu. Splnenie týchto kritérií bude možné vyvodiť so Zámeru, Správy o hodnotení a primeraného posúdenia. Ktoré budú spoločne s týmto hydrogeologickým posudkom podkladom pre vydanie rozhodnutia z posudzovania vplyvov na životné prostredie. Samotné rozhodnutie bude

stanovovať podmienky v širokom kontexte, ktoré bude navrhovateľ povinný splniť pri príprave, realizovaní, prevádzkovaní a ukončovaní činnosti.

5.3 Hodnotenie produkčnej schémy geotermálneho strediska z pohľadu DNSH

Výsledky preskúmania realizácie a činnosti produkčnej schémy sú zhrnuté v Tabuľke 5.3. Samotná **realizácia strediska Svinica – Ďurkov, a** samotná **činnosť, z pohľadu reinjektáže,** pri rizikách, ktoré sú čiastkovo hodnotené v Kapitole 6 a Kapitole 7, ale ktoré sú zároveň typické pre všetky projekty zamerané na produkciu zdrojov geotermálnej energie bez ohľadu na konfiguráciu a otvorenosť produkčných schém, **spĺňa podmienky zásady DNSH – významne nenarušiť**, **a** naopak **vo výraznej miere,** a pri dodržiavaní princípov TURM a TURP **predstavuje výrazný prvok** ako **ochrany kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia a rezervoárového média**, tak aj ochrany ovzdušia a zdravia, **pri súbežnom zvyšovaní adaptability spoločnosti na klimatické zmeny a zmierňovaní dopadov klimatických zmien**.

Tabuľka 5.3. Hodnotenie produkčnej schémy a činnosti produkčnej schémy geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov z pohľadu zásady výrazne nepoškodiť - DNSH

Technické kritériá preskúmania	Vzťah ku zásade DNSH	Významnosť prínosu podľa taxonómie
Prínos k zmierneniu zmeny klíny	spĺňa podmienky DNSH	jediné technické riešenie produkcie geotermálnej energie pre nízkoemisné systémy CZT a technická podpora výroby energie z OZE **hodnotenie: významný prínos**
Adaptácia na zmeny klímy	spĺňa podmienky DNSH	neidentifikované ako významný prínos
Udržateľné využívanie a ochrana vodných a morských zdrojov	spĺňa podmienky DNSH	1) kvalitatívna ochrana povrchových a podzemných vôd 2) kvalitatívna a kvantitatívna ochrana geotermálnych vôd a rezervoárového prostredia 3) udržiavanie kvalitatívne a kvantitatívne dobrého stavu útvaru geotermálnych vôd Košická kotlina a útvarov povrchových a podzemných vôd **hodnotenie: významný prínos**
Prechod na obehové hospodárstvo	neaplikuje sa	neaplikuje sa
Prevencia a kontrola znečisťovania	spĺňa podmienky DNSH	1) technické riešenia prevencie chemického znečistenia povrchových alebo podzemných vôd 2) znižovanie emisnej záťaže ovzdušia prechodom na nízkoemisnú produkciu tepla v systémoch CZT **hodnotenie: významný prínos**
Ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémov	viď. textová časť 5.2.6	viď. textová časť 5.2.6

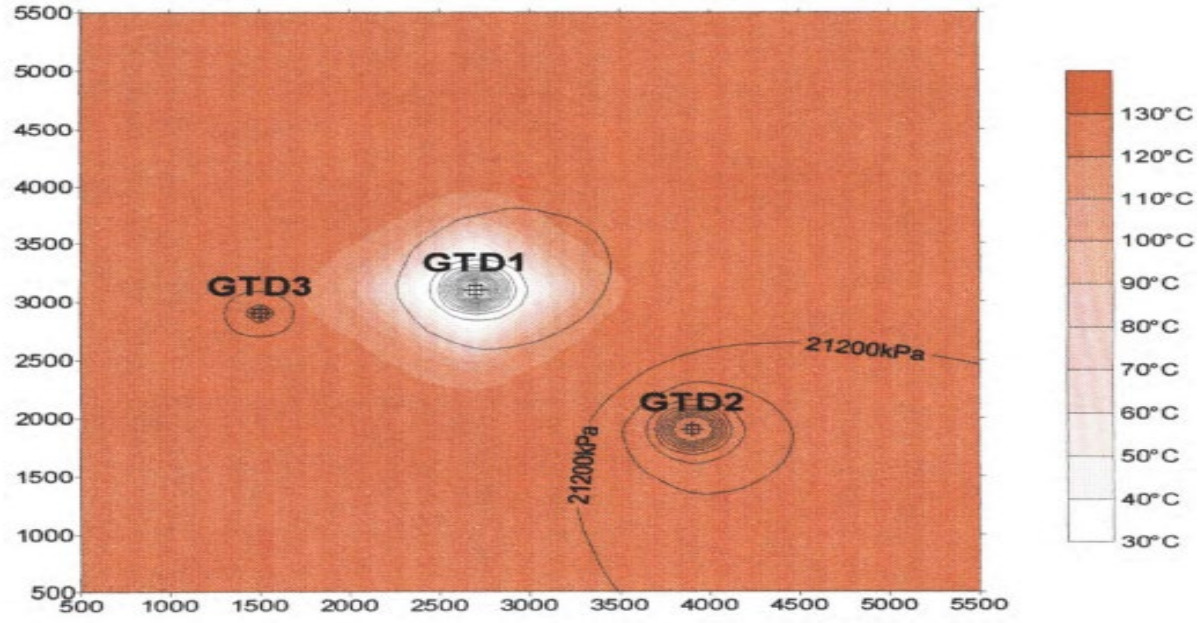
6 POSÚDENIE VPLYVU DLHODOBEJ PRODUKCIE NA KVANTITATÍVNY STAV REZERVOÁROVÉHO SYSTÉMU A ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

Posúdenie vplyvu dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie na geotermálnom stredisku Svinica – Ďurkov je založené na prediktívnom modelovaní rezervoárovej odozvy, pričom dôraz je kladený na predbežný **model postupu studeného frontu – termický front** medzi reinjektážnym a produkčným vrtom tripletu č. 1. Prediktívne modelovanie tripletu č.2 nie je možné z objektívnych dôvodov realizovať:

a) v štádiu Zámeru sú dostupné očakávané profily a technické riešenia vrtov

b) analogické podmienky rezervoárového prostredia, ktoré sú dostatočné pre posúdenie možnej rezervoárovej odozvy a jej interpretáciu pre triplet č.1, nie sú dostatočné pre samotné modelovanie odozvy rezervoárového prostredia v jeho okolí – z pohľadu hydraulických, geotermických a tlakových pomerov.

Posúdenie vplyvu dlhodobej produkcie **nehodnotí postup a vývoj hydraulického frontu**. Predikčné riešenie vývoja stabilizovaných tlakových pomerov nelineárnym analytickým modelom (FENDEK IN VRANOVSKÁ ET AL., 1999; GIESE, 1998, 1999) **preukázalo produktivitu rezervoárového prostredia**, v prípade reinjektáže, t.j. **parciálne výdatnosti pre Q = 55 l.s^{-1} prelivom**; vychádzajúc z realizovaných hydrodynamických skúšok (VRANOVSKÁ ET AL., 1999, 2001); pričom **pozícia hydraulického frontu bola odhadovaná mimo dosah efektívnej zóny produkcie okolia vrtu GTD-2** (Obr. 6.1). Z výsledku teda vyplýva, že pri rovnovážnej, plnej reinjektáži, podľa kalibrácie na výsledky realizovaných hydrodynamických skúšok, by reinjektáž pôsobila indukčne na pohyb rezervoárového média, **zároveň by však hydraulický front bol od produkčného vrtu dostatočne vzdialený v čase t = 30 rokov** (Obr. 6.1) **na to, aby tlakovými zmenami**, ktoré vyplývajú (najmä) z rozdielnej hustoty prenikajúceho frontu – $\rho_w = f(c,T)$, **ovplyvňoval stabilitu termodynamickej formy parnej frakcie na jej spôsob viazanosti voči geotermálnej vode**, a nepriamo tak ovplyvňoval jej chemicko-technologické parametre podmieňujúce konfiguráciu povrchovej produkčnej infraštruktúry. **V priemete na dlhodobú produkciu, t = 100 rokov** podľa koncepcie TURM/TURP (AXELSSON ET AL., 2001) nelineárna odozvy predpokladá v čase 100 rokov posun hydraulického frontu k vrtu GTD-2, stále mimo dosah jeho efektívnej zóny produkcie.



Obrázok 6.1. Pozícia čela hydraulického (línie) a termického (farby) frontu medzi produkčným vrtom GTD-2 a reinjektážnym vrtom GTD-1 v hĺbke TVD = 2 300 m na základe kalibrovaného modelu hydrodynamickej skúšky v čase t = 30 rokov. Zdroj: Vranovská et al. (1999); Giese (1998, 1999).

V zmysle Vyjadrenia Sekcie vôd MŽP SR je predmetom posudzovania aj model odhadu produkcie zdrojov geotermálnej energie na vývoj teplotných pomerov v rezervoárovom prostredí. Cieľom posudzovania je, na základe realizovaných prác, poskytnúť stanovisko ku konkrétnym požiadavkám formulovaným:

- „*Upozorňujeme, že do prostredia sa nebude vracať voda v takej kvalite, v akej bola vzatá. Ide o zásah do neživej prírody, najmä o tepelné znečistenie, nakoľko pri inej teplote vody sa dejú iné chemické procesy...*“
- „*Vplyv na vodné pomery nie je zanedbateľný, v súčasnosti na základe podkladov zámeru nie je známy...*“
- „*Žiadame vypracovať hydrogeologický posudok s výpočtom odhadu straty tepla vody v tejto uzavretej hydrogeologickej štruktúre. Na základe tohto podkladu je potrebné prehodnotiť vplyv na vodné pomery...*“ .

Z definície rezervoárovej odozvy (Kapitola 4) je evidentné, že každá produkcia zdrojov geotermálnej energie vedie k zmenám v rezervoárovom prostredí, médiu. Udržateľnosť produkcie zdrojov geotermálnej energie ale závisí na amplitúde, a časovej zvratnosti týchto zmien, spolu s ich impaktom na dlhodobé možnosti produkcie rezervoárového prostredia, aj exergoekonomickej udržateľnosti samotného projektu.

6.1 Termická odozva rezervoárového prostredia

6.1.1 Špecifikácia modelu

Model rezervoárovej odozvy je postavený na skripte modulu @ALUMP-Ex (nepublikované), ktorý bol zostrojený pre dynamické / nelineárne anizotermálne modelovanie ďurkovskej depresie v rámci geologickej úlohy „*Hydrogeotermálne hodnotenie ďurkovskej depresie: aplikácia princípov trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu*“ riešenej na ŠGÚDŠ v období 2018 – 2020 (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020). **Skript je postavený pre produkčnú schému tripletu č.1,** pričom koncepčne vychádza z kombinácie nelineárnych lumpfitových a pseudo-lumpfitových analytických modelov pre prostredia s variabilnou distribúciou koncových členov transportu tepla. Modul umožňuje:

- model odhadu prieniku studeného frontu v konvektívnom (s konduktívnou retardáciou) alebo konduktívnom režime ochladzovania pre filtračné profily (efektívne profily v horninovom prostredí) alebo filtračné štruktúry (štruktúrne poruchy, zlomy, krasové fenomény v prípade ich vymapovania); vrátane analýzy horizontálneho postupu studeného (termického) frontu v čase – viď 6.1.3
- model odhadu vývoja strednej rezervoárovej teploty vplyvom produkcie a/alebo reinjektáže v rezervoárovom prostredí pre efektívnu zónu ovplyvnenia – viď 6.1.4
- model odhadu vývoja strednej teploty na ústí produkčného vrtu vplyvom produkcie podľa požadovanej produkčnej stratégie – viď 6.1.5 (konštantné Q, konštantné Pth, dynamické krokové útlmové alebo zvyšujúce stratégie)
- model teplotnej a termickej regenerácie rezervoárového prostredia na ústí produkčného vrtu po ukončení aktivity produkčnej schémy – viď 6.1.6.

V súlade s hydrogeotermálnou a koncepčnou charakteristikou ďurkovskej depresie (3.3) je pre posúdenie vplyvu zvolený **model konvektívneho postupu studeného frontu s retardáciou** štandardne využívaný pre dubletové systémy (UNGEMACH ET AL., 2005, 2009); pričom model pracuje s predpokladom postupu v pseudo-ustálených podmienkach, a retardáciou konvektívneho (advektívneho) prieniku studeného frontu konduktívnym zahrievaním z okolia efektívneho profilu filtrácie:

$$t_B = \frac{\pi}{3}.\frac{c_{inj}.\rho_{inj}}{\gamma_a}.\frac{D^2.H}{Q_{inj}}$$

$$kde: \gamma_a = \phi.\rho_{res}.c_{res} + (1-\phi).\rho_m.c_m$$

kde t_B– čas prieniku studeného frontu (chemického frontu) medzi zónou dopĺňania (perifériou) rezervoáru a produkčnou zónou (s), c – špecifická tepelná kapacita ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), ρ – špecifická hustota ($kg\ m^{-3}$), γ_a – celková tepelná kapacita rezervoáru ($J\ m^3.K^{-1}$), D – vzdialenosť medzi produkčnou a infiltračnou zónou (m), H – priemerná hrúbka rezervoárového prostredia / filtračného profilu (m), Q_{rech} – dopĺňané množstvá ($m^3.s^{-1}$), λ_m – tepelná konduktivita horniny ($W.m^{-1}.K^{-1}$); a SYMBOLY INJ – reinjektovaná voda, m – horninové prostredie, res – rezervoár

Model odhadu rezervoárovej odozvy je založený na podmienkach analytického lumpfit modelu pre uzavretú nádrž s jedným konduktorom, pri kontinuálnom príkone konduktívneho, konvektívneho a rádiogénneho tepla do systému počas produkcie a po jej ukončení; z čoho vyplýva potreba nelineárnej odozvy (SATMAN, 2010; SATMAN, 2011; SATMAN – TUREYEN, 2012; ONUR ET AL., 2008); pre teplotu rezervoárového prostredia následne platí

$$V_{eff}.\gamma_a.\frac{dT}{dt} = -Q_{prod}.c_{w,wh}\,T_{wh} + Q_{inj}.c_{w,inj}.T_{inj} + E_n$$

$$T_{t=i} = T_{ini}.e^{-at} - \frac{g'}{a}.\left(1-e^{-at}\right)$$

kde: $g' = -g + x = -\frac{Q_{inj}.c_{w,inj}.T_{inj}}{V_{eff}.\gamma_a} + \frac{E_n}{V_{eff}.\gamma_a}$

a kde: $E_n = Q_{IN} + Q_{CD} + Q_{CV} + Q_{RG} - Q_{OUT} - Q_{PROD}$

a **model vývoja strednej teploty ústí produkčného vrtu** je definovaný z energetickej bilancie pre teplotnú stratu v telese vrtu a kalibrovaný chybovou funkciou na vývoj tlaku v telese vrtu (AXELSSON, 1991; BJORNSSON ET AL., 1994; MARTINÉZ – AXELSSON, 2011):

$$T_{wh,t} = \left(T_{wh,t=0}.e^{-\beta_{CD}\,Q_{inj}\,t_{prod}}\right) + \left[\left(\frac{Q_{prod}-Q_{inj}}{Q_{prod}}\right).T'_{rech} + \left(\frac{Q_{inj}}{Q_{prod}}.T_{inj}\right)\right].\left(1-e^{-\beta_{CD}\,Q_{inj}\,t_{prod}}\right)$$

kde: $\beta_{CD} = \frac{c_{w,inj}}{V_{eff}.\gamma_a}$

kde: V – objem rezervoáru (m^3), γ – celková tepelná kapacita ($J\ m^3.K^{-1}$), Q – množstvá geotermálnych vôd ($m^3.s^{-1}$), c – špecifická tepelná kapacita ($J.kg^3.K^{-1}$), α – kapacita dopĺňania ($kg.bar^{-1}.s^{-1}$), T – teplota (°C), t – čas produkcie (s), En – tepelná bilancia systému (W), Q_{IN} – prírastok na báze rezervoáru (W), Q_{CD} – prírastok konduktívny prechádzajúci rezervoárom (W), Q_{CV} – konvektívny prírastok (W), Q_{RG} – rádiogénny prírastok

v rezervoári (W), Q_{OUT} – množstvo tepla na výstupe z rezervoáru a prestupe do nadložia (W), Q_{PROD} – množstvo tepla odoberaného produkciou, β_{CD} – konduktívna deformácia postupujúceho frontu; A SYMBOLY: prod – produkcia, inj - reinjektáž, m – hornina, w – rezervoárové médium, wh – ústie vrtu, a – rezervoárové podmienky

Model termickej regenerácie vychádza z princípu obnovovania iniciálnych podmienok v stave t = 0 pre čas ukončenia produkcie, tj. $t_0 = t_{SI,}$ v uzavretej nádrži bez laterálneho prísunu tepla prítokmi; pričom platí, že konduktívny prísun je počítaný z bázy rezervoárového prostredia v ovplyvnenej ploche A_{SI} /3.42/, t.j. z podložia, kým rádiogénny prírastok je počítaný pre rezervoárovú formáciu; a konvektívny prírastok pre hrúbku konvektívnej zóny (SATMAN, 2011; SATMAN – TUREYEN, 2012; FRIČOVSKÝ ET AL., 2020):

$$T_{(t')} = T_{SI} + x.t_{(r)}$$

$$\text{kde: } x = \frac{E_{NAT}}{\left(V.\gamma_a\right)}$$

$$E_{NAT} = Q_{CD} + Q_{RG} + Q_{CV}$$

$$\text{kde: } Q_{CD} = q_{r,BASE}.A_{SI} \wedge Q_{RG} = q_{RG}.V$$

$$A_{SI} = \frac{\left[Q_{prod}.c_w.\left(T_{(ini)} - T_{(t')}\right)\right].\gamma_a.\Delta z}{4\left(T_{(ini)} - T_{(t')}\right).\left(\lambda_{top}.\rho_m.c_m\right)}.G \wedge G = \left[2\left(\sqrt{\frac{t_{DML}}{\pi}}\right) - 1\right] + \left[e^{t_{DML}}.1 - erf\left(\sqrt{t_{DML}}\right)\right] \wedge t_{DML} = 4\frac{\left(\lambda_{top}.\rho_m.c_m\right).t_{prod}}{\gamma_t^{\,2}.\Delta z^2}$$

$$\text{a kde: } Q_{CV} = A_{CV}.\phi.\rho_w.c_w.\left[\frac{\upsilon_D.H_{CV}.\lambda_m}{\phi.\rho_w.c_w.H_{CV}}\right].\left(T_{CV} - T_{(t')}\right)$$

kde: T(t') – vývoj teploty po uzavretí produkcie (°C), T_{SI} – teplota pri ukončení produkcie, t(r) – čas od ukončenia produkcie, E_{NAT} – tepelný prírastok do systému (W), Q_{CD} – konduktívny prírastok (W), Q_{CV} – konvektívny prírastok (W), Q_{RG} – rádiogénny prírastok (W), $q_{r,BASE}$ – hustota tepelného toku na báze rezervoáru ($W.m^{-2}$), A_{SI} – plocha ovplyvnená ochladením (m^2), q_{RG} – rádiogénna produktivita (W), V – rezervoárový objem v celom systéme (m^3), γ_a – celková tepelná kapacita ($J.m^{-3}.K^{-1}$), Δz – hrúbka rezervoáru (m), Q_{prod} – produkované množstvá geotermálnych vôd ($m^3.s^{-1}$), c_w – špecifická tepelná kapacita geotermálnej vody ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), $T_{(ini)}$ – iniciálna rezervoárová teplota (°C), T_{CV} – teplota konvektívnej zóny (°C), t_{DML} – bezrozmerný čas (-), λ_{top} – tepelná vodivosť stropného izolátora ($W.m^{-1}.K^{-1}$), ρ_m – špecifická hustota rezervoárovej horniny ($kg.m^{-3}$), c_m – špecifická tepelná kapacita rezervoárovej horniny ($J\ kg^{-1}.K^{-1}$), t_{prod} – čas produkcie (s), ACV – plocha konvektívnej zóny, υ_D – vertikálna rýchlosť prúdenia (m.s-1), H_{CV} – hrúbka konvektívnej zóny (m), T_{CV} – priemerná teplota v konvektívnej zóne (°C)

Model rezervoárovej odozvy je zároveň v každom výpočtovom kroku kalibrovaný pre okrajové podmienky:

- T_{res} a $T_{CV} \geq T_{inj}$ tak, aby nedošlo k zníženiu teploty pod kritickú teplotu reinjektáže

- $T_{wh} \geq T_{wh,crit}$ tak, aby nedošlo v prípade prieniku studeného frontu k poklesu teploty na ústí pod 90 % iniciálnych podmienok (SUTTER ET AL., 2011; FOX ET AL., 2013) – čo zodpovedá tolerovanej miere ochladenia, pri ktorej sa rezervoárový manažment stále môže považovať za udržateľný; v prípade poklesu modul za predpokladu, ak nie je podmienka znefunkčnená, simuluje zastavenie produkcie v rámci produkčnej schémy a následne jej regeneráciu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020)

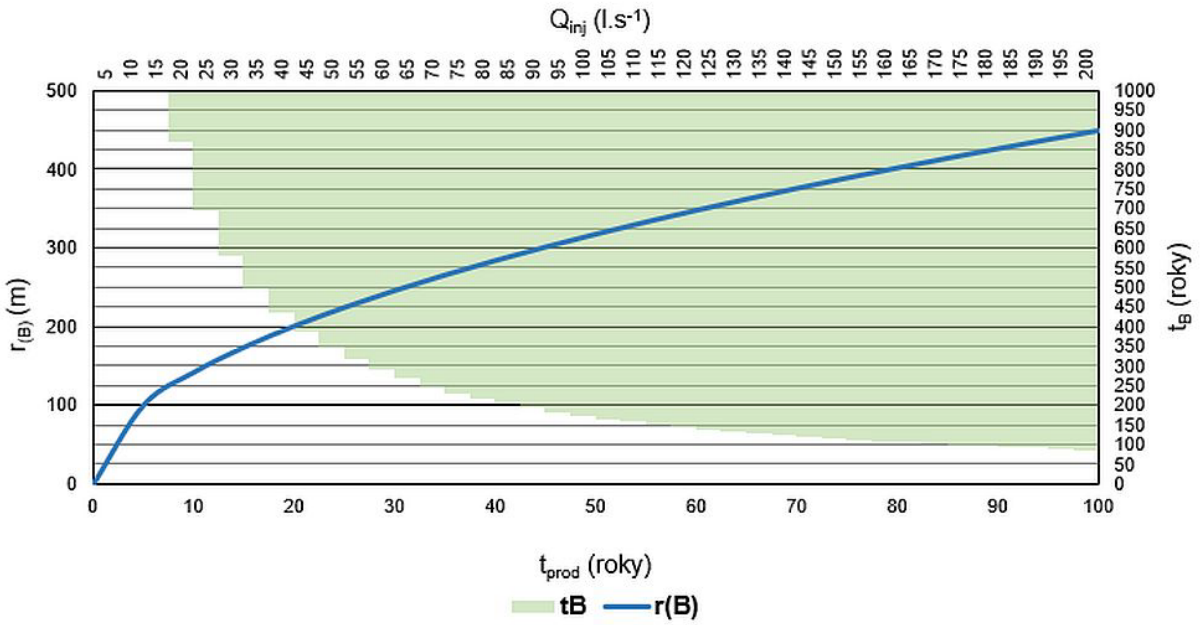
6.1.2 Špecifikácia produkcie a produkčnej schémy

Špecifikácia produkcie a produkčnej schémy je oproti pôvodnému modulu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020) upravená na základe predkladaného Zámeru pre **triplet č.1**:

- produkčná teplota v čase t = 0 – T_{wh} = 130 °C
- teplota reinjektáže – T_{inj} = 45 °C
- produkčné množstvá – $Q_{prod} = Q_{inj}$ = 55 l.s^{-1}
- produkčná stratégia – Q_{prod} = konšt.
- produkčná schéma – P:I = 1:2 , $Q_{prod} = Q_{inj}$ = 1:1, D = 800 m
- testovaný čas produkcie – t_{prod} = 20 rokov (podľa Zámeru), t_{prod} = 100 rokov podľa Koncepcie trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie (AXELSSON ET AL., 2001)
- parametre produkčnej zóny, hydraulika, parametre konvekčných buniek atp. sú zachované podľa referenčnej práce (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020 – PRÍLOHA Č. IV)

6.1.3 Model postupu termického (studeného) frontu

Konvektívny model prieniku studeného frontu optimalizovaný na podmienky štruktúry ďurkovská depresia a zároveň na parametre **produkčnej schémy a produkcie** (Obrázok 6.2) **udáva strednú dobu odhadu prieniku studeného frontu medzi produkčným a reinjektážnym vrtom t_B = 315 rokov** pre $Q_{prod} = Q_{inj}$ = 55 l.s^{-1} **± 17 rokov**. Model, optimalizovaný na aktuálne podmienky produkcie podľa Zámeru zároveň predpokladá, že kritickým množstvom produkovaných / reinjektovaných vôd pri danej teplote T_{inj} = 45 °C je $Q_{prod} = Q_{inj}$ = 174 l.s^{-1}, pri ktorom $t_B = t_{prod}$ = 100 rokov, čo by zodpovedalo definovanej minimálnej hranici udržateľnej produkcie.



Obrázok 6.2. Analýza prieniku studeného frontu v produkčnej sústave tripletu č.1 podľa Qinj; a vývoj postupu studeného frontu v produkčnej sústave tripletu č.1 pre Q_{prod} = 55 l.s^{-1} a T_{inj} = 45 °C pre konvektívny model s retardáciou.

Výsledok aplikovania postupu termického frontu v smere medzi reinjektážnymi vrtmi (GTD-1 a GTD-3) a produkčným vrtom GTD-2 teda naznačuje, že **v priebehu t_{prod} = 20 rokov pravdepodobne nedôjde k preniku studeného frontu vplyvom reinjektáže do efektívneho dosahu produkčnej oblasti pre Q_{prod} = Q_{inj} = 55 l.s^{-1}**, pre ktorý je navrhovaná produkčná schéma tripletu č.1 a zároveň tripletu č.2. Zároveň je pravdepodobné, že ani **v priebehu t_{prod} = 100 rokov nedôjde k prieniku studeného frontu medzi zónou efektívnej reinjektáže a produkcie.** Miera spoľahlivosti odhadu však v prípade dlhodobej predikcie výrazne klesá s tým, ako dramaticky klesá vzťah medzi kalibračnou bázou z výsledkov hydrodynamickej skúšky (VRANOVSKÁ ET AL., 1999, 2001) a trvaním predikcie; predovšetkým v stave, keď hydrodynamická skúška nemohla – vplyvom trvania – zachytiť ani očakávané alterovanie prítokových profilov, ktoré sú charakteristické pre koncepčné modely geotermálnych systémov CD2(d) typu.

Ak budú platiť konfiguračné nastavenia produkčnej schémy a zároveň aj geotermického modelu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020); v čase t_{prod} = 20 rokov sa bude stredná pozícia čela termického frontu nachádzať približne vo vzdialenosti $r_{(B)}$ = 200 m od reinjektážneho vrtu. V čase t_{prod} = 40 rokov bude pozícia čela termického frontu vo vzdialenosti $r_{(B)}$ = 285 m od reinjektážneho vrtu. V čase t_{prod} = 100 rokov zároveň model predpokladá pozíciu čela studeného frontu vo vzdialenosti $r_{(B)}$ = 450 m.

6.1.4 Model rezervoárovej odozvy

Modul @ALUMP-Ex aplikuje postupy prediktívneho modelovania rezervoárovej odozvy pre stanovené body prierezu medzi infiltračnou a produkčnou zónou (D = 50 m, D = 200 m, D = 400 m, D = 600 m, D = 800 m; avšak voľne nastaviteľné) vždy ak platí $D < r_{(B)}$. Z výsledkov očakávaného konvektívneho postupu studeného frontu s retardáciou (6.1.3) vyplýva, že k teplotným zmenám vplyvom postupu frontu z reinjektážnej oblasti = vplyvom reinjektáže by nemalo dochádzať na vzdialenosť väčšiu ako D = 450 m ± 50 m, a termické, respektíve dynamické podmienky rezervoárového prostredia by mali byť podobné iniciálnemu štádiu.

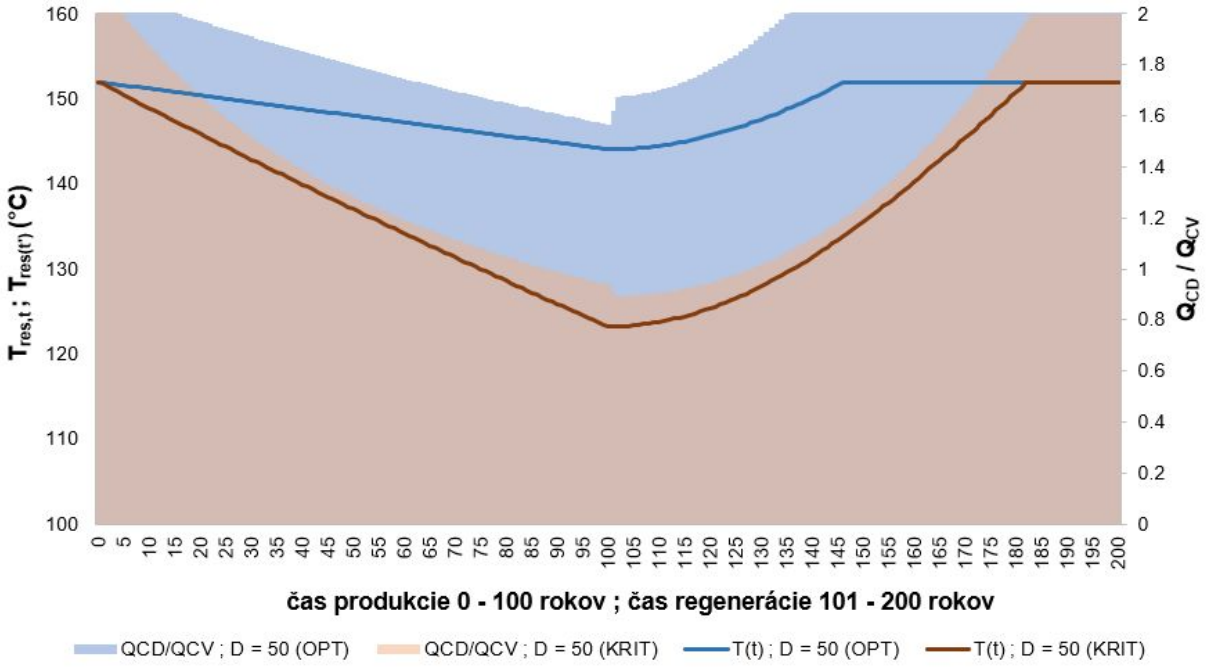
Pre **D = 50 m** (Obr. 6.3) je možné predpokladať, že ochladzovanie rezervoárového prostredia nastane okamžite, respektíve pozícia studeného frontu bude v tejto vzdialenosti po 1 – 1,5 roku produkcie. **Pre t_{prod} = 20 rokov**, pre ktorý sú **podľa Zámeru** tripletové schémy navrhované **zodpovedá odhad strednej rezervoárovej teploty $T_{res,t}$ = 146 – 150 °C**; čo predstavuje rozdiel teploty ΔT = 1 až 4 %; **t.j. v bezpečnom pásme tolerovateľnej miery ochladenia podľa koncepcie TURM** (SUTTER ET AL., 2011; FOX ET AL., 2013). **Pre t_{prod} = 100 rokov v zmysle koncepcie TURM, model udáva rozsah odhadu strednej rezervoárovej teploty $T_{res,t}$ = 123 - 144 °C**; čo znamená ΔT = 5 - 19 % rozdiel oproti iniciálnym podmienkam po dobu ochladzovania t_{cool} = 98 rokov. Zistený rozsah, ktorý predstavuje 21 °C medzi scenármi odhadu teploty súvisí so zvyšovaním neistoty s tým, ako sa kalibračná krivka hydrodynamickej skúšky (VRANOVSKÁ ET AL., 1999, 2001) skracuje s extrapolovanou dobou predikcie. V iniciálnom štádiu dosahuje pomer konduktívneho a konvektívneho transportu tepla Q_{CD}/Q_{CV} = 2,1 pre blízke okolie produkčnej schémy (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020); čo jednoznačne znamená prevahu konduktívneho transportu tepla nad pomerne izolovanou konvekciou – ktorej fázovú stabilitu a povahu je nateraz možné len nepriamo, numericky modelovať (FRIČOVSKÝ ET AL., 2018, 2020; VIZI – FRIČOVSKÝ, 2023). Je možné očakávať, že pokles strednej hodnoty rezervoárovej teploty v efektívnom profile filtrácie vyvolá nárast gradientu teploty vo vzťahu k očakávanej konvekčnej bunke v podloží, pri pomerne menšom ochladení teploty na strope rezervoáru (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020). Následne **pre t_{prod} = 20 rokov** je rozsah pomeru konduktívneho a konvektívneho transportu tepla v systéme **Q_{CD}/Q_{CV} = 1,6 až 1,7** – preto **pravdepodobne počas 20-ročnej doby produkcie nedôjde k výrazným zmenám v distribúcii koncových členov transportu tepla v okolí reinjektážneho vrtu**. Nárast konvektívneho gradientu pravdepodobne stabilizuje geometriu konvekčnej bunky

v ďurkovskom bloku, avšak nevyvolá výrazné zmeny v rezervoárovej dynamike, ktoré by mali vplyv na tvorbu chemického zloženia geotermálnych vôd alebo stav termodynamickej viazanosti parnej frakcie. Pre t_{prod} = 100 rokov model odhaduje pomer koncových členov transportu tepla **Q_{CD}/Q_{CV} = 0,9 až 1,5**. **V prípade**, ak by došlo k ochladeniu na spodnej hranici odhadu pre **$Q_{CD}/Q_{CV} \leq 1$ model indikuje výrazné zmeny v dynamike rezervoárového prostredia**. Prevládajúci konvektívny transport by pravdepodobne viedol **k zmene geometrie konvekčných buniek a predovšetkým zrejme k zmene ich vertikálneho rozsahu, posunu hrúbky konvektívnej zóny v smere k efektívnemu profilu filtrácie, a pravdepodobne aj k zmene režimu regiónov fázovej stability. To by mohlo mať za následok formovanie regiónu separovanej parnej frakcie pod efektívnym profilom filtrácie** (model lineárnej a fázovej stability predpokladá v iniciálnom štádiu, že potenciálna konvektívna zóna nedosahuje definovaný efektívny profil filtrácie podľa pozície hydrogeotermálnych vrtov v rezervoári) **respektíve s presahom do efektívneho profilu.** Zníženie konduktívneho transportu tepla následne znamená pokles retardačnej kapacity okolia efektívneho profilu filtrácie a zrýchlenie postupu studeného frontu k produkčnej zóne, respektíve priestorovo do okolia reinjektážnej zóny. Tento stav môže byť potvrdený zároveň aj prirodzeným poklesom teploty pri adiabatickom vare, ktorý by indukovaným konvektívnym gradientom bolo vyvolané.

Model termickej regenerácie (Obr. 6.3) @ALUMP-Ex začína v čase produkcie t_{prod} = 100 rokov a umožňuje modelovať obnovovanie iniciálnych podmienok rezervoárového prostredia od času ukončenia produkcie, vrátane vývoja distribúcie kvantitatívneho prírastku koncových členov transportu tepla. **Vo vzdialenosti D = 50 m** po ukončení produkcie je pravdepodobné, že **pri konzervatívnom scenári (KRIT) dôjde k obnoveniu strednej rezervoárovej teploty v čase t_{reco} = 83 rokov ± 4 roky, pre optimistický scenár v čase t_{reco} = 47 rokov ± 3 roky**. Spolu s vývojom rezervoárových teplôt je zároveň zrejmé, že dôjde k postupnému obnovovaniu priestorovej a kvantitatívnej distribúcie koncových členov transportu tepla, čo v praxi znamená postupné zanikanie indukovanej konvektívnej zóny a jej tepelno-energetických a fázových prejavov a návrat k prevažne-konduktívnemu prostrediu kontrolujúcemu procesy viazané na lineárnu a fázovú stabilitu rezervoárového prostredia a rezervoárového média. Výsledok automatického režimu termickej regenerácie zároveň znamená, že **k obnoveniu iniciálnych podmienok dôjde aj pre optimalizovanú dobu produkcie tripletovej schémy t = 20 rokov, po ktorej sú účinky na rezervoárové prostredie výrazne menšie**.

Podľa základných princípov udržateľného rezervoárového manažmentu a obnoviteľného využívania zdrojov geotermálnej energie (RYBACH ET AL., 1999; RYBACH,

2003, 2007, 2022; RYBACH – MONGILLO, 2006; STEFANSSON – AXELSSON, 2006) **je doba regenerácie** – t_{reco} – **kratšia, ako plánovaná doba produkcie** – t_{prod} - , **čo znamená,** že aj pre najviac produkciou a reinjektážou ovplyvnenú časť rezervoárového prostredia je možné konštatovať, **že navrhovaný spôsob produkcie zdrojov geotermálnej energie zodpovedá princípom udržateľného rezervoárového manažmentu** v prípade, ak dlhodobý monitoring, spojený s kalibráciou modelu, potvrdí reprezentatívne nastavenia využité v prezentovanom modeli rezervoárovej odozvy a regenerácie.



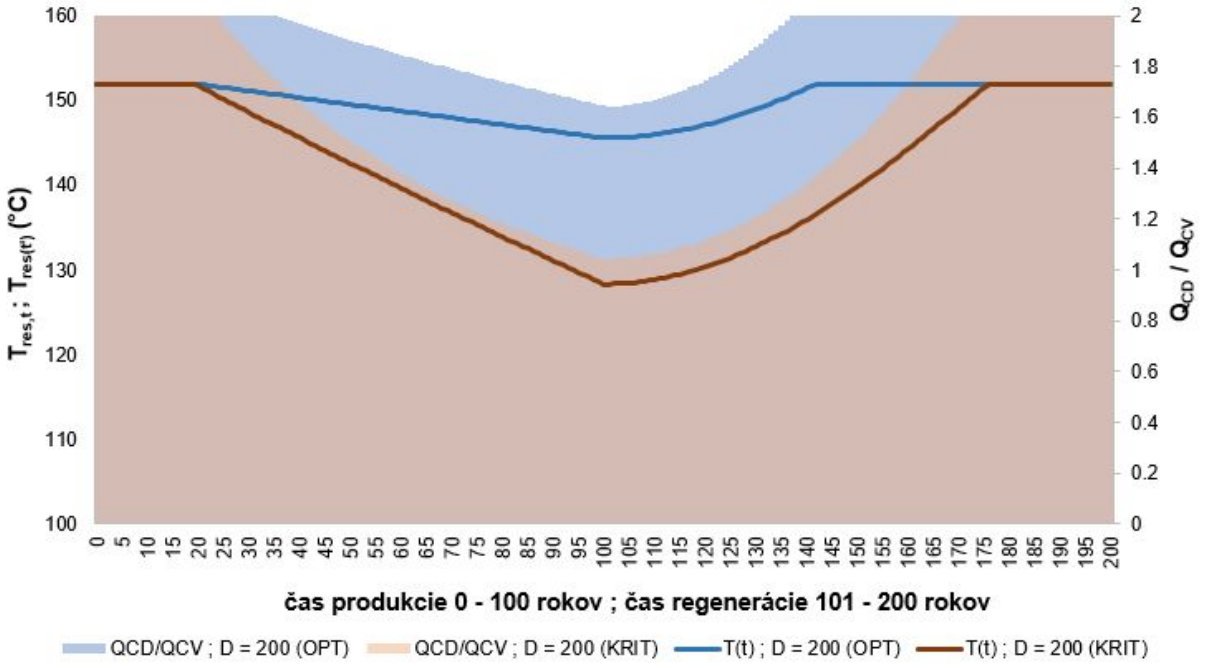
Obrázok 6.3: Model odhadu rezervoárovej odozvy prostredia pre schému tripletu č.1 vo vzdialenosti D = 50 m od reinjektážnej zóny pre $Q_{prod} = Q_{inj} = 55\ l.s^{-1}$.

Vplyv krátkodobej alebo dlhodobej produkcie a reinjektáže na rezervoárové prostredie klesá so vzdialenosťou od reinjektážneho vrtu. Pre **D = 200 m konvektívny model prieniku studeného frontu s retardáciou odhaduje jeho dosah v čase $t_{(B)}$ = 20 rokov ± 3 roky, teda v čase plánovaného ukončenia produkcie, respektíve zmeny produkčnej schémy podľa predkladaného Zámeru**, čo vytvára podmienenú dobu ochladzovania t_{cool} = 80 rokov pre modelované riešenie dlhodobej produkcie s celkovým časom t_{prod} = 100 rokov. **Model postupu studeného frontu teda predpokladá, že rezervoárové prostredie nebude vo vzdialenosti D = 200 m po 20 rokoch produkcie ovplyvnené**. Modelovaný **pokles strednej hodnoty rezervoárovej teploty v okolí tripletu $T_{res,t}$ = 128 - 145 °C** (Obr. 6.4) **pre dobu ochladzovania 80 rokov** znamená pri ukončení produkcie ΔT = 4 – 16 %, čo znamená

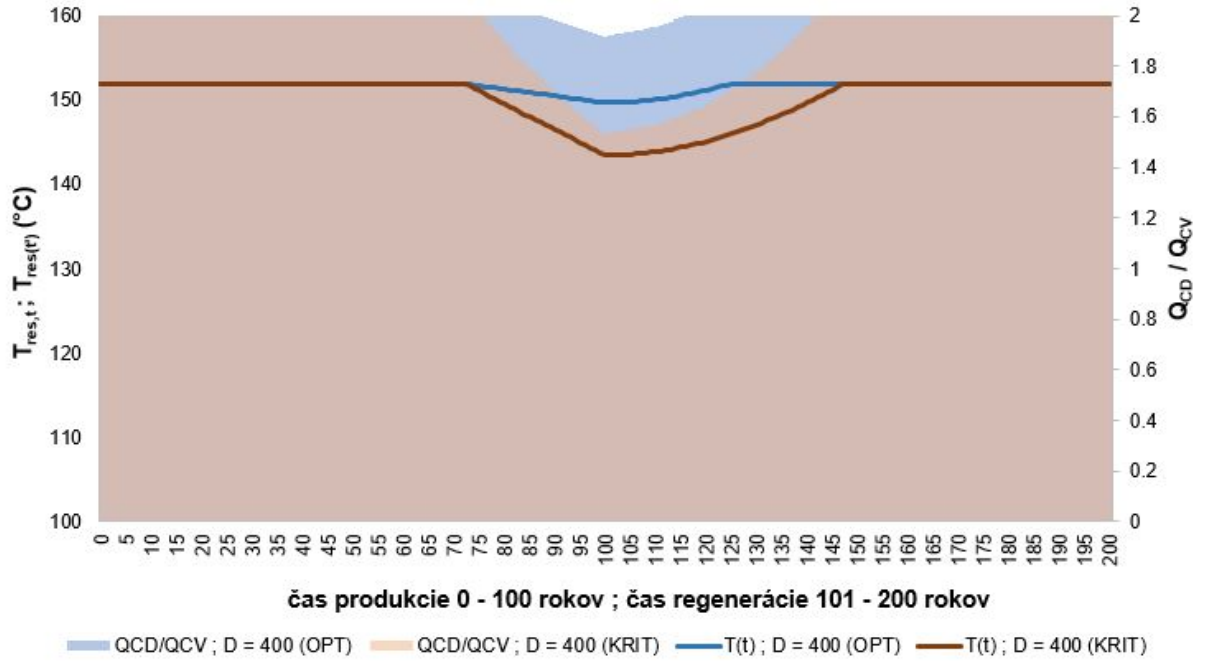
prekročenie kritického limitu tolerovateľného ochladzovania pre konzervatívny scenár a v prípade produkčnej zóny by to viedlo k nevyhnutnosti upraviť produkčnú schému respektíve samotnú produkciu zdrojov geotermálnej energie. **V prípade**, ak by pri technických zmenách infraštruktúry produkcia pokračovala, v čase $\mathbf{t_{prod}}$ **= 100 rokov** by pomer medzi konduktívnym a konvektívnym prírastkom a transportom tepla v okolí efektívneho profilu filtrácie klesol z iniciálneho pomeru koncových členov transportu tepla Q_{CD}/Q_{CV} = 2,1 na rozhranie $\mathbf{Q_{CD}/Q_{CV}}$ **= 1 až 1,6**, čo v kritickom, konzervatívnom scenári znamená vyrovnanie množstva tepla zabezpečovaného kondukciou a konvekciou. Pri vývoji Q_{CD}/Q_{CV} najmä formovaním gradientu voči konvektívnej zóne **by bolo možné očakávať postupné rozširovanie vertikálneho, alebo priestorového dosahu konvekčných buniek, pravdepodobne ale stále bez zmien vo fázovej stabilite systému**.

Podľa modelu regenerácie rezervoárových podmienok, ktorý pracuje s predpokladom ukončenia rezervoárovej produkcie v čase t_{prod} = 100 rokov **dôjde k obnoveniu iniciálnych podmienok**, predovšetkým strednej hodnoty rezervoárovej teploty **v čase** $\mathbf{t_{reco}}$ **= 76 rokov ± 5 rokov, pre optimistický scenár v čase** $\mathbf{t_{reco}}$ **= 42 rokov ± 2 roky.** Je veľmi pravdepodobné, že výsledná doba regenerácie by skôr zodpovedala hornej hranici odhadu, nakoľko k vyrovnaniu pomeru Q_{CD}/Q_{CV} dochádza podľa výsledkov modelu (Obr. 6.4) skôr, ako k vyrovnaniu strednej rezervoárovej teploty a gradienty podporujúce regeneráciu teplotných podmienok v okolí efektívneho profilu filtrácie nad úroveň iniciálnych podmienok tak zaniknú. **Podľa základných princípov udržateľného rezervoárového manažmentu a obnoviteľného využívania zdrojov geotermálnej energie** (RYBACH ET AL., 1999; RYBACH, 2003, 2007, 2022; RYBACH – MONGILLO, 2006; STEFANSSON – AXELSSON, 2006) **je doba regenerácie** – t_{reco} – **kratšia, ako plánovaná doba produkcie** – t_{prod} - , **čo znamená,** že spôsob a vplyv produkcie zdrojov geotermálnej energie na rezervoárové prostredie vo vzdialenosti D = 200 m od reinjektážnej sústavy **zodpovedá princípom udržateľného rezervoárového manažmentu** v prípade, ak dlhodobý monitoring, spojený s kalibráciou modelu, potvrdí reprezentatívne nastavenia využité v prezentovanom modeli rezervoárovej odozvy a regenerácie.

Konvektívny model s konduktívnou retardáciou udáva **pre D = 400 m** (Obr. 6.5) odhad prieniku studeného frontu $\mathbf{t_{(B)}}$ **= 71 rokov ± 4 roky,** čo znamená, že **pre čas** $\mathbf{t_{prod}}$ **= 20 rokov je nepravdepodobné, aby došlo k ovplyvneniu rezervoárového prostredia v polomere 400 m od reinjektážnej zóny**, kým pre t_{prod} = 100 rokov je počítaná stredná doba ochladzovania t_{cool} = 29 rokov.



Obrázok 6.4: Model odhadu rezervoárovej odozvy prostredia pre schému tripletu č.1 vo vzdialenosti D = 200 m od reinjektážnej zóny pre $Q_{prod} = Q_{inj} = 55$ l.s^{-1}.



Obrázok 6.5: Model odhadu rezervoárovej odozvy prostredia pre schému tripletu č.1 vo vzdialenosti D = 400 m od reinjektážnej zóny pre $Q_{prod} = Q_{inj} = 55$ l.s^{-1}.

Pri prípadnej prevádzke tripletu, po nevyhnutnej technickej a technologickej úprave produkčných zariadení je možné predpokladať, že **v čase t_{prod} = 100 rokov klesne stredná teplota rezervoárového prostredia na rozhranie $T_{res,t}$ = 144 - 150 °C**, čo predstavuje rozdiel oproti iniciálnym podmienkam $\Delta T = 2 – 6$ %. **Podiel Q_{CD}/Q_{CV}** = 2,1 v čase otvorenia produkcie zdrojov geotermálnej energie v čase t_{prod} = 0 rokov pravdepodobne **poklesne vplyvom zvýšenia konvektívneho gradientu** pre (predpokladane) konvektívnu bunku na báze, alebo pod efektívnym profilom filtrácie, **na rozpätie Q_{CD}/Q_{CV} = 1,5 až 1,9** v závislosti na miere ochladenia rezervoárového prostredia v okolí rozširovania studeného frontu. Tento nárast **priamo pravdepodobne neovplyvní priestorové charakteristiky konvekčnej bunky, prispeje ale pravdepodobne k stabilite jej geometrie**. Z pohľadu rezervoárového inžinierstva je teda možné hovoriť o zachovaní pôvodných podmienok.

Model regenerácie termických parametrov rezervoárového prostredia (Obr. 6.5) udáva odhad obnovenia pôvodnej strednej teploty rezervoárového prostredia v okolí efektívneho profilu filtrácie a vo vzdialenosti D = 400 m od reinjektážneho vrtu **t_{reco} = 26 rokov ± 4 roky pre optimistický a t_{reco} = 48 rokov ± 5 rokov pre pesimistický, konzervatívny scenár**. Keďže k vyrovnaniu prírastku konduktívneho a konvektívneho transportu tepla dôjde pred modelovanou regeneráciou strednej teploty je zároveň pravdepodobné, že reálna doba regenerácie bude zodpovedať vrchnej hranici odhadu. **Podľa základných princípov udržateľného rezervoárového manažmentu a obnoviteľného využívania zdrojov geotermálnej energie** (RYBACH ET AL., 1999; RYBACH, 2003, 2007, 2022; RYBACH – MONGILLO, 2006; STEFANSSON – AXELSSON, 2006) **je doba regenerácie** – t_{reco} – **kratšia, ako plánovaná doba produkcie** – t_{prod} - , **čo znamená,** že spôsob a vplyv produkcie zdrojov geotermálnej energie na rezervoárové prostredie vo vzdialenosti D = 200 m od reinjektážnej sústavy **zodpovedá princípom udržateľného rezervoárového manažmentu** v prípade, ak dlhodobý monitoring, spojený s kalibráciou modelu, potvrdí reprezentatívne nastavenia využité v prezentovanom modeli rezervoárovej odozvy a regenerácie.

6.1.5 Model teplotnej odozvy na ústí produkčného vrtu

Keďže vzdialenosť medzi produkčným a reinjektážnym vrtom predstavuje D = 800 m a čas prieniku studeného frontu podľa konvektívneho modelu je **t_B = 315 rokov** pre $Q_{prod} = Q_{inj}$ = 55 $l.s^{-1}$ **± 17 rokov**; je pravdepodobné, že **priamym vplyvom produkcie a reinjektáže**

zdrojov geotermálnej energie nedôjde k ovplyvneniu produkčnej zóny a následne ani k poklesu strednej hodnoty teplôt na ústí produkčného vrtu, v tomto prípade GTD-2.

Napriek výsledkom modelu, ktorý je zameraný na efekt produkčnej schémy – aj to pri obmedzenej možnosti kalibrácie časových radov pre chybovú funkciou odhadu – je možné, že v priebehu produkcie zdrojov geotermálnej energie bude dochádzať k oscilácii teploty na ústí produkčného vrtu, pri zachovaní strednej hodnoty teploty v dlhodobom priemere na úrovni iniciálnej teploty, t.j. $T_{wh,t} = T_{wh,ini}$; alebo, pravdepodobnejšie, pri oscilácii s trendom poklesu pre strednú hodnotu teploty. Hlavným dôvodom môže byť, v zmysle koncepčnej klasifikácie ďurkovskej depresie, prirodzená tendencia striedania prítokových horizontov a ich aktivácia, respektíve reaktivácia na základe vývoja tlaku ako v produkčnej, tak aj reinjektážnej zóne. V tomto prípade nie je možné uvažovať o podmienenom, ale prirodzenom ochladzovaní. Ďalším z dôvodov oscilácie, alebo poklesu rezervoárovej teploty je štruktúra prítokových profilov pozorovaných počas hydrodynamických skúšok a testovania vrtov GTD-1 až GTD-3, kde väčšinové prítoky sú viazané na stropné časti rezervoárového prostredia, prípadne sekundárne na bazálne klastiká karpatu. V prípade straty tlaku môže byť prednostne aktivovaná práve táto časť rezervoárového prostredia pri nižších teplotách. Posledným z významných dôvodov možného pozorovania zmien v strednej hodnote teploty na ústí produkčných vrtov je miera adiabatického ochladzovania varom v telese vrtu alebo v rezervoárovom prostredí, pri zmene tlakových pomerov alebo fluktuácii vektorov konvekčných buniek (a ich štruktúrnou bifurkáciou), ktorá by podmienila zmenu v distribúcii alebo v charaktere regiónov nasýtenia alebo spontánneho varu v rezervoárovom prostredí. **Všetky uvedené zmeny ako v strednej teplote na ústí produkčných vrtov, tak aj v strednej teplote rezervoárového prostredia sú ale prirodzeným dôsledkom produkcie zdrojov geotermálnej energie**.

6.2 Limity modelu rezervoárovej odozvy

Predkladaný model rezervoárovej odozvy je založený na dostupných parametroch produkčnej schémy (VRANOVSKÁ ET AL., 1999, 2001; HALÁS ET AL., 2016) a pomerne rozsiahlom geotermickom a dynamickom modelovaní rezervoárového prostredia (FRIČOVSKÝ ET AL., 2018, 2020; VIZI – FRIČOVSKÝ, 2023). V rámci iterácií model kalibruje produktivitu a vertikálne rýchlosti prúdenia v telese rezervoáru na základe priebehu tlakových kriviek

z hydrodynamickej skúšky (FENDEK IN VRANOVSKÁ ET AL., 1999; VRANOVSKÁ ET AL., 2001). Kritickým limitom samotného modelu je obmedzenosť dostupných údajov pre kalibráciu chybovej funkcie, a ich nepomer voči extrapolovanej dobe produkcie zdrojov geotermálnej energie pri prediktívnom postupe modelu. Vzhľadom na technickú a technologickú náročnosť projektu je nevyhnutné pravidelne kalibrovať model rezervoárovej odozvy na základe získaných výsledkov testovacej, polo-prevádzkovej a prevádzkovej skúšky, ako aj z výsledkov produkčného monitoringu tripletu. V zmysle globálnej dobrej praxe rezervoárového inžinierstva (KJARAN – ELIASSON, 2008; GUDMUNDSSON, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011) je odporúčanou dobou prehodnocovania a kalibrácie 1 rok.

Hydrogeotermálna štruktúra ďurkovskej depresie je z pohľadu štruktúrnej charakteristiky segmentovaná na viacero primárnych, a čiastkových tektonických blokov, ktorých geometria uloženia významne ovplyvňuje (charakteristicky pre prevažne-konduktívne prostredie) distribúciu teploty rezervoárového prostredia a následne aj rezervoárového média, za predpokladu jeho termickej a termodynamickej rovnováhy s okolím. **Model rezervoárovej odozvy je kalibrovaný pre výsledky tripletu č.1**. **Z princípu jednoduchej analógie je možné predpokladať, že podobné prejavy rezervoárovej odozvy**, hoci pravdepodobne s inou magnitúdou, **budú platiť aj v prípade produkcie geotermálnej energie z tripletu č.2**, pre ktorý v súčasnosti nie je možné podobný model zostrojiť. Problémom je v tomto prípade konfigurácia tripletu č.2, ktorý predpokladá plytkú reinjektáž. V prípade, ak prienik reinjektážneho frontu aktivuje zostupné líniové / štruktúrne profily, ako sú systémy orientovaných puklín alebo trhlín, poprípade krasových fenoménov, bude pravdepodobné, že rýchlosť postupu studeného frontu sa násobne zvýši. Štruktúry prúdenia a geometriu prúdenia je možné overiť jedine stopovacími skúškami; respektíve z dlhodobého hľadiska analýzou produkčného monitoringu a vyhodnocovaním produkčnej histórie.

Realizovaný nelineárny a anizotermický **model** rezervoárovej odozvy a regenerácie pri súčasných poznatkoch o rezervoárovom prostredí a rezervoárovom médiu **potvrdzuje** skutočnosť, **že z dlhodobého hľadiska je možné produkciu zdrojov geotermálnej energie z navrhovanej produkčnej schémy tripletu č.1 a tripletu č.2 považovať za udržateľnú a obnoviteľnú, pričom zmeny v kvalitatívnych a kvantitatívnych parametroch rezervoárového prostredia je možné považovať za prirodzenú súčasť rezervoárovej odozvy a efekt ich trvania pravdepodobne za zvratný. Uvedené zodpovedá požiadavkám ochrany dobrého kvalitatívneho a kvantitatívneho stavu útvarov geotermálnych vôd podľa RSV a princípom trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu**.

7 POSÚDENIE VPLYVU DLHODOBEJ PRODUKCIE NA KVALITATÍVNY STAV REZERVOÁROVÉHO SYSTÉMU A ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

7.1 Energetická kapacita rezervoárového prostredia

7.1.1 Prehľad modelov energetickej bilancie rezervoárového prostredia

Jedným z faktorov posúdenia vplyvu inštalácie zariadení pre produkciu zdrojov geotermálnej energie je vzťah voči energetickej bilancii rezervoárového prostredia. Regionálne hydrogeotermálne hodnotenie Košickej kotliny – ďurkovskej depresie (VRANOVSKÁ ET AL., 1999; BEŇOVSKÝ ET AL., 1999) udáva odhad pravdepodobných zásob geotermálnej energie pre T_{ref} = 65 °C na úrovni R_{pb} = 113 MWt pre koeficient dostupnosti zdrojov geotermálnej energie R0 = 0,075 a odhadovaný čas produkcie t_{prod} = 40 rokov. Model bol zostavený na základe diskrétneho modelu.

Stochastický model McKelveyovej schémy ďurkovskej depresie (FRIČOVSKÝ ET AL., 2019, 2020) založený na krátkodobom (t_{prod} = 40 rokov) a dlhodobom (t_{prod} = 100 rokov) horizonte produkcie pri T_{ref} = 65 °C a regionalizovanom odhade stacionárneho R0 = 0,053, pričom pre krátkodobý / udržateľný horizont produkcie platí:

- celkové zdroje geotermálnej energie: RS_T = 7 535 / 3 015 MWt s P < 5 %
- celkové zásoby geotermálnej energie: RE_T = 450 / 180 MWt s P = 5 – 10 %
- celkový tepelno-energetický potenciál: $TTP_{(p)} = M(H0/t_{prod})$ = 242 / 97 MWt s P = 50 %
- pravdepodobné zásoby geotermálnej energie: $R_{pb} = TTP_{(p)} – P90(H0/t_{prod})$ = 150 / 60 MWt s P > 50 %.

Keďže energetická kapacita rezervoárového prostredia nelineárne stúpa s poklesom teploty reinjektáže, ako sa technické limity približujú prirodzeným podmienkam, a podľa Zámeru je očakávaná teplota reinjektáže T_{inj} = 45 °C platí, že zdroje a zásoby geotermálnej energie pre daný teplotný spád sú vyššie, ako prezentovaný model odhadu. Pre účely posudzovania je model možné brať ako konzervatívny scenár.

7.1.2 Parametre udržateľnosti produkcie na geotermálnom stredisku

Produkciu zdrojov geotermálnej energie na geotermálnom stredisku Svinica – Ďurkov podľa Zámeru zodpovedajú:

- sumárny tepelný výkon $P_{th,inst}$ = 30 MWt sumárne pre oba triplety (15 + 15 MWt)
- sumárny odber geotermálnych vôd: $Q_{prod} = Q_{inj}$ = 110 $l.s^{-1}$ sumárne pre oba triplety (55 + 55 $l.s^{-1}$)
- produkčná stratégia: pravdepodobne cyklická so sezónnym režimom
- predpokladaná teplota reinjektáže: T_{inj} = 45 °C
- predpoklad: inštalovaný tepelný výkon geotermálnych vrtov zodpovedá aktuálnemu výkonu (reálny tepelný výkon bude sezónne variabilný vplyvom produkčnej stratégie ovplyvnenej energetickou záťažou z GCZT)
- hodnotený čas produkcie: t_{prod} = 100 rokov podľa Koncepcie TURM / TURP (AXELSSON ET AL., 2001) a t_{prod} = 40 rokov podľa priemernej amortizovanej životnosti technických zariadení projektov geotermálnej energie (SANYAL, 2005)

1) UDRŽATEĽNOSŤ AKTUÁLNEJ (PLÁNOVANEJ) PRODUKCIE ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

Klasifikácia (energetickej) udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa predkladaného Zámeru vychádza z koeficientu kapacity zásob geotermálnej energie (BJARNADOTTIR, 2010), ktorý vyjadruje pomer odoberaného množstva geotermálnej energie vo vzťahu k energetickej bilancii rezervoáru na príslušnej hladine istoty odhadu – v tomto prípade pre celkový tepelno-energetický potenciál (FRIČOVSKÝ ET AL., 2024):

$$r_{cap(U,100)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{97 - 30\,[\mathrm{MWt}]}{97\,[\mathrm{MWt}]} = \frac{67\,[\mathrm{MWt}]}{97\,[\mathrm{MWt}]} = \mathbf{0,691}$$

$$r_{cap(U,40)} = \frac{TTP_{(p)} - P_{th,ref}}{TTP_{(p)}} = \frac{242 - 30\,[\mathrm{MWt}]}{242\,[\mathrm{MWt}]} = \frac{212\,[\mathrm{MWt}]}{242\,[\mathrm{MWt}]} = \mathbf{0,876}$$

Z bilančného modelu vyplýva, že aj pri konzervatívnom predpoklade, že výsledná teplota reinjektáže bude nižšia, ako referenčná teplota, voči ktorej bola energetická kapacita

rezervoárového prostredia odhadovaná, bude otvorením produkcie zdrojov geotermálnej energie na stredisku Svinica – Ďurkov naďalej k dispozícii 88 % respektíve 69 % potenciálu.

Pre hodnotenie vzťahu medzi produkciou zdrojov geotermálnej energie a energetickou bilanciou rezervoárového prostredia s ohľadom na ďalšie možnosti produkcie a energetické zásoby v rezervoárovom prostredí je využívaná jednoduchá bilančná schéma – Tabuľka 7.1 (BJARNADOTTIR, 2010; FRIČOVSKÝ ET AL., 2020, 2024; MARCIN ET AL., 2020).

Tabuľka 7.1. Udržateľnosť produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa Zámeru voči stochastickému modelu energetickej bilancie rezervoárového prostredia

charakteristika koeficientu zásob geotermálnej energie	definícia produkčnej stratégie	kritické hranice produkcie zdrojov geotermálnej energie pre t_{prod} = 100 rokov (MWt)
$r_{cap} < 0$	kritická depletácia	$P_{th} > 97$ MWt
$r_{cap} = 0 – 0,49$	depoletácia	$P_{th} = 49 – 97$ MWt
$r_{cap} = 0,5 – 0,74$	**udržateľná produkcia**	**$P_{th} = 24 – 49$ MWt**
$r_{cap} = 0,75 – 1,0$	veľmi udržateľná produkcia	$P_{th} < 24$ MWt

Podľa bilančnej schémy klasifikácie udržateľnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie **je plán využívania zdrojov geotermálnej energie podľa Zámeru** pre geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov **z rezervoárového prostredia štruktúry možné hodnotiť ako udržateľný pre krátkodobý aj dlhodobý horizont produkcie**.

2) UDRŽATEĽNÝ POTENCIÁL ROZVOJA PRODUKCIE ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

Udržateľný potenciál rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie $P_{th(D)}$ je definovaný ako množstvo geotermálnej energie, ktoré je možné odoberať zo systému rezervoárového prostredia pri jeho plánovanej / aktuálnej intenzite využívania bez narušenia udržateľnej rezervoárovej kapacity $P_{th(S)}$ predstavujúcej – podľa Tabuľky 7.1, 50 % celkového tepelno-energetického potenciálu rezervoárového prostredia (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020, 2024). Tento parameter je aktuálne využívaný pri konštrukcii stochastického modelu odhadu zdrojov a zásob geotermálnej energie na Slovensku pre (okrem iného) aj účely cielenej a systematickej podpory rozvoja výskumu, prieskumu a produkcie zdrojov geotermálnej energie so zreteľom na zásady udržateľného rezervoárového manažmentu.

$$P_{th(D,100)} = P_{th,(S)} - P_{th,ref} \Rightarrow 0,5.TTP_{(P)} - P_{th} = (0.5_{\,x}\,97) - 30[\mathrm{MWt}] = \mathbf{19}\,[\mathbf{MWt}]$$

$$P_{\text{th(D,40)}} = P_{\text{th,(S)}} - P_{\text{th,ref}} \Rightarrow 0,5.TTP_{(P)} - P_{\text{th}} = \left(0.5_{\ x}\ 242\right) - 30\left[\text{MWt}\right] = \mathbf{91}\left[\mathbf{MWt}\right]$$

Za predpokladu, že v rámci produkcie zdrojov geotermálnej energie budú dodržané parametre produkcie tak, ako sú definované v predkladanom Zámere, je aj pri plánovanom inštalovanom výkone 30 MWt možné predpokladať ďalší rozvoj produkcie zdrojov geotermálnej energie v priestore hydrogeotermálnej štruktúry ďurkovská depresia o 19 MWt respektíve 91 MWt v závislosti na optimalizovanej dobe produkcie.

3) PERSPEKTIVITA UDRŽATEĽNÉHO ROZVOJA PRODUKCIE ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

Perspektivita udržateľného rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie vyjadruje mieru dostupnej energie, ktorú je možné využívať pri zachovaní udržateľnej kapacity rezervoárového prostredia (MARCIN ET AL., 2020; FRIČOVSKÝ ET AL., 2024). Ako bilančný bezrozmerný parameter vyjadruje normovaný potenciál, ktorý je možné odoberať z rezervoárového prostredia pri budúcom posudzovaní projektov inštalácie podpory aktuálnych lokalít, na ktorých aktuálna produkcia zdrojov geotermálnej energie prebieha, respektíve možnosti budúceho rozvoja produkcie pri zachovaní parametrov udržateľnosti na konkurenčných lokalitách, pri minimalizovaní rizika energetickej depletácie rezervoáru.

$$r_{\text{cap(S,100)}} = \frac{P_{\text{th,(S,100)}} - P_{\text{th,ref}}}{P_{\text{th,(S,100)}}} = \frac{49 - 30\left[\text{MWt}\right]}{49\left[\text{MWt}\right]} = \frac{19\left[\text{MWt}\right]}{49\left[\text{MWt}\right]} = \mathbf{0,381}$$

$$r_{\text{cap(S,40)}} = \frac{P_{\text{th,(S,40)}} - P_{\text{th,ref}}}{P_{\text{th,(S,40)}}} = \frac{121 - 30\left[\text{MWt}\right]}{121\left[\text{MWt}\right]} = \frac{91\left[\text{MWt}\right]}{121\left[\text{MWt}\right]} = \mathbf{0,752}$$

Z bilančného modelu vyplýva, že otvorením produkcie zdrojov geotermálnej energie na stredisku Svinica – Ďurkov naďalej k dispozícii 28 % respektíve 75 % odhadovaného udržateľného potenciálu rezervoárového prostredia.

Analýza perspektívnosti rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie – Tabuľka 7.2 zreteľne definuje ďalšie možnosti udržateľného rozvoja produkcie v rámci hydrogeotermálnej štruktúry ďurkovská depresia, ktoré sú ale výrazne menšie, ako plánovaná miera využívania, čo samozrejme znižuje perspektívnosť vo vzťahu ku normalizovanej hodnote energetickej bilancie. Zároveň však **Zámer – v rámci jeho plánovanej produkčnej stratégie a množstiev**

odoberanej geotermálnej energie vytvára ďalšie predpoklady pre rozvoj produkcie zdrojov geotermálnej energie aj v rámci samotného strediska Svinica – Ďurkov, respektíve v jeho okolí alebo iných častiach ďurkovskej depresie **a to aj pre t_{prod} = 100 rokov**.

Tabuľka 7.2. Perspektívnosť udržateľného rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie v ďurkovskej depresii po otvorení produkcie strediska Svinica – Ďurkov vo vzťahu ku udržateľnej rezervoárovej kapacite pre dlhodobý / udržateľný horizont produkcie t_{prod} = 100 rokov

charakteristika koeficientu zásob geotermálnej energie	definícia potenciálu rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie	charakteristika rizika pre rezervoárové prostredie v prípade ďalšieho rozvoja produkcie geotermálnej energie (MWt)
$r_{cap(S)} < 0$	neudržateľný, neperspektívny	stredné až vysoké riziko energetickej depletácie
$r_{cap(S)} = 0 – 0,49$	**udržateľný, málo perspektívny**	**veľmi nízke až nízke riziko energetickej depletácie**
$r_{cap(S)} = 0,5 – 0,74$	udržateľný, perspektívny	veľmi nízke riziko energetickej depletácie
$r_{cap(S)} = 0,75 – 1,0$	udržateľný, veľmi perspektívny	bez rizika energetickej depletácie

7.1.3 Vplyv produkčnej stratégie na energetický stav a energetickú kapacitu rezervoárového prostredia

Jedným z faktorov podmieňujúcich rezervoárovú odozvu na produkciu zdrojov geotermálnej energie je aj vzťah medzi množstvom geotermálnej energie odoberanej z rezervoárového prostredia a množstvom geotermálnej energie v rezervoárovom prostredí, ktoré predstavuje dynamická (vstupujúca a vystupujúca) a statická (akumulovaná) zložka (Axelsson, 2009, 2012). Energetická depletácia rezervoáru narúša statickú a dynamickú bilanciu energetickú bilanciu rezervoárového prostredia, a to aj bez štandardných prejavov, ako je zmena rezervoárovej teploty, lineárnej, alebo fázovej stability (Kjaran – Eliasson, 2008; Watson, 2013) a to priamo – ovplyvňovaním dynamiky a vektoru rezervoárových procesov, alebo nepriamo, stimulujúc prebiehajúce procesy v rezervoári s pozitívnym, alebo negatívnym vplyvom na kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia a rezervoárového média (Axelsson et al., 2001, 2002, 2005).

Z realizovaného hodnotenia parametrov udržateľnosti a perspektívnosti produkcie zdrojov geotermálnej energie v rámci geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov je zrejmé, že **zvolená produkčná stratégia vyjadrená v Zámere** odberom množstiev geotermálnej energie na úrovni 30 MWt **zodpovedá princípom trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu / trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie**. Z tohto dôvodu nie je možné

predpokladať, že vplyvom produkcie by došlo k rozvoju dynamických procesov rezervoárovej odozvy vplyvom depletácie energetického potenciálu rezervoárového prostredia. Tým **sú splnené predpoklady RSV pre zachovanie dobrého kvalitatívneho a kvantitatívneho stavu útvarov geotermálnych vôd v krátkodobom aj dlhodobom časovom horizonte**.

7.2 Vyjadrenie k termochemickej odozve rezervoárového prostredia

7.2.1 Environmentálna ochrana povrchových a podzemných vôd

Podľa Vyjadrenia citovaného v Kapitole 5 je predmetom posudku aj vyjadrenie k vplyvu produkcie zdrojov geotermálnej energie na kvalitatívny stav zdrojov geotermálnej energie – geotermálnych vôd z pohľadu ich chemického zloženia.

Z environmentálneho hľadiska je produkcia zdrojov geotermálnej energie v systémoch reinjektáže, pri vyššie opísanom chemickom zložení geotermálnych vôd jediným riešením pre zabezpečenie ochrany a zachovania dobrého kvalitatívneho stavu útvarov povrchových a podzemných vôd podľa požiadaviek RSV, nakoľko pri plnej reinjektáži nevznikajú možné úniky do povrchových recipientov, respektíve plytkých (kvartér, neogén) alebo hlbokých (neogén) zvodní. Nevyhnutnosť reinjektážnych systémov, ktoré by umožňovali takzvanú plnú, alebo úplnú reinjektáž, t.j. $Q_{prod} = Q_{inj} = 1:1$, vyplýva aj z vysokých obsahov arzénu a lítia, podobne, ako chloridov v produkovanej geotermálnej vode.

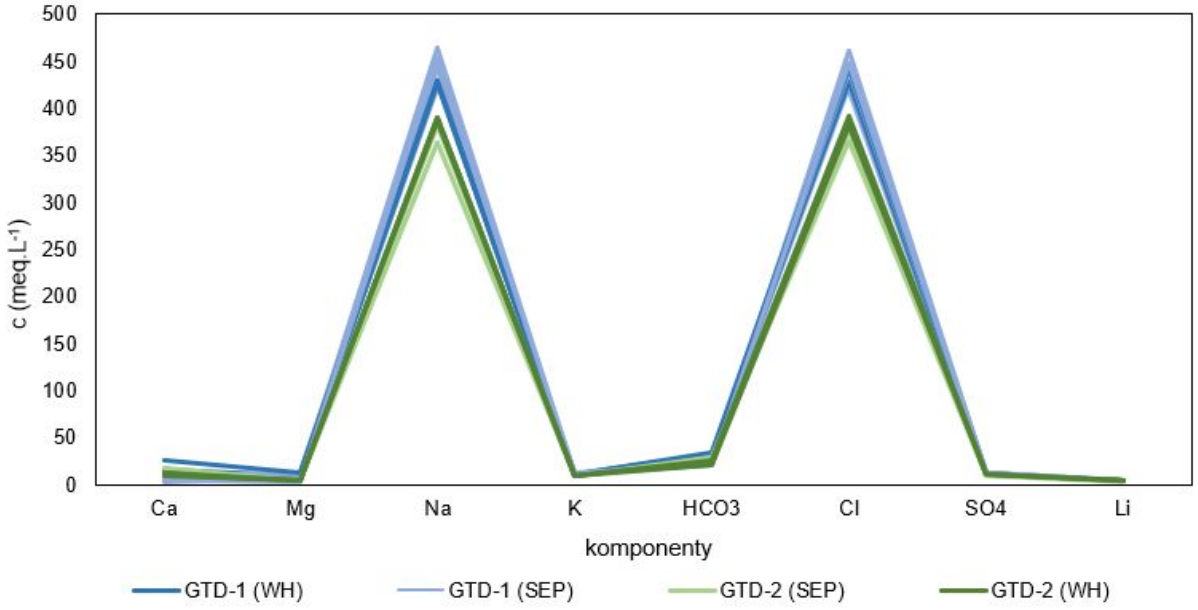
7.2.2 Útvar geotermálnych vôd Košická kotlina

Z pohľadu kvantifikovania termochemickej odozvy na rezervoárové prostredie je nevyhnutné zdôrazniť, že pre modelovanie vývoja chemického zloženia geotermálnych vôd v okolí produkčného vrtu, respektíve reinjektážnych vrtov, nie je dostatočné množstvo relevantných údajov k dispozícii, predovšetkým – v zmysle štandardov rezervoárového inžinierstva a manažmentu (AXELSSON – KRISTMASDOTTIR, 2009; KRISTMANSDOTTIR, 2009)

- rozbory geotermálnej vody na vstupe do reinjektážneho vrtu
- rozbory geotermálnej vody v reinjektážnom vrte
- rozbory geotermálnej vody po prečerpávaní reinjektážneho vrtu
- rozbory geotermálnej vody s rôznym stupňom odplynenia (rôzny stupeň separácie)
- termodynamické frakčné modely konduktívneho a adiabatického ochladzovania.

Tieto rozbory sa v reprezentatívnej miere, t.j. každý z členov koncepčného modelu má aspoň 4 – 6 vzoriek, realizujú podľa dobrej praxe rezervoárového inžinierstva a manažmentu až v overovacej a otváracej fáze rozvoja geotermálnych polí (KJARAN – ELIASSON, 2008; GRANT – BIXLEY, 2011; WATSON, 2013). Následne je potrebné konštatovať, **že kvantifikovať zachovanie dobrého kvalitatívneho stavu útvaru geotermálnych vôd, alebo zlepšenie / zhoršenie kvalitatívneho stavu útvaru geotermálnych vôd nie je objektívne možné**.

Chemizmus geotermálnych vôd ďurkovskej depresie je pritom výsledkom čiastkovej alebo úplnej termodynamickej rovnováhy v rezervoárovom prostredí na rozhraní voda – hornina – minerálna fáza, ktorý je kontrolovaný aktuálnym stavom parciálnych systémov geotermálna voda – CO_2 – geotermálna para (termodynamicky saturovaná, vlhká parná fáza). Z porovnania fáciálnych vzťahov vzoriek geotermálnych vôd odobraných z vrtov GTD-1 a GTD-2 pred a po separátore nie sú viditeľné výrazné rozdiely v makrochemických komponentoch geotermálnej vody (Obr. 7.1). Výraznejšie rozdiely v chemickom zložení môžu nastať v dôsledku zmien termodynamickej aktivity CO_2 respektíve CO_2-$CaCO_3$ systému ako reakcia na odplynenia, alebo adiabatické ochladenie stratou parnej fázy, a to nielen v telese reinjektážnych vrtov, ale aj ich efektívnom rezervoárovom okolí, kde vplyvom rozdielnych tlakov môže dôjsť k zmenám v úrovni termodynamickej viazanosti parnej frakcie, respektíve k jej kondenzovaniu vo vodnej zložke; detto počas konvektívneho ochladzovania (viď. 6.1.3).



Obrázok 7.1: Fáciálna analýza vzoriek geotermálnej vody vrtov GTD-1 a GTD-2 pred vstupom a na výstupe z plynných separátorov na Schoellerovom diagrame.

Z pohľadu kvalitatívneho posúdenia vplyvu dlhodobej produkcie a reinjektáže geotermálnych vôd na lokalite geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov je možné konštatovať, že pri súčasnom stave znalostí o rezervoárovej dynamike a chemickom zložení geotermálnych vôd **neexistujú dôvody, pre ktoré by malo dôjsť k zhoršeniu kvalitatívneho stavu útvaru geotermálnych vôd Košická kotlina – v časti hydrogeotermálnej štruktúry ďurkovská depresia** z dlhodobého hľadiska, keďže:

- množstvo kritických komponentov, predovšetkým As, Li, Cl, Na na výstupe a na vstupe do systému bude zodpovedať prirodzeným podmienkam rezervoárového prostredia a počas reinjektáže nedôjde ku kontaktu geotermálnej vody s formáciami, ktoré by zvýšili ich prirodzený rozsah v rezervoárovom prostredí (plytká, alebo priama reinjektáž priamo v strednotriasových karbonátoch)
- reinjektát predstavuje geotermálna voda bez vonkajšieho narieďovania v uzavretom systéme produkčnej schémy, t.j. bez kontaktu s okolím, ovplyvnený jedine vplyvom zmien p-T podmienok kontrolujúcich CO_2 respektíve CO_2-$CaCO_3$ systém
- **analogicky s modelom termickej odozvy** rezervoárového prostredia je možné predpokladať, že v prípade zmien v chemickom zložení geotermálnych vôd v okolí reinjektážnych vrtov, prípadne vplyvom prieniku tzv. chemického frontu k produkčnej zóne aj v okolí produkčných vrtov, **budú procesy vedúce k formovaniu chemického zloženia**

geotermálnych vôd obnovené v škále zodpovedajúcej regeneračnej kapacite tepelného a teplotného poľa v okolí produkčnej schémy; t.j. zmeny so zvratnou tendenciou.

Počas produkcie zdrojov geotermálnej energie na stredisku Svinica – Ďurkov je ale možné s veľkou pravdepodobnosťou očakávať zmeny v chemickom zložení produkovanej geotermálnej vody, ktoré sú prirodzené, nakoľko ide o komplexný systém voda – para – CO_2, a ktoré súvisia s:

- aktiváciou rôznych prítokových profilov podľa prirodzenej, alebo indukovanej variácie tlakových pomerov v efektívnej časti produkčnej zóny, ktoré sú prirodzene rozdielneho chemického zloženia, aj vplyvom rozdielnych obsahov CO_2 a parnej frakcie, respektíve rozdielnej intenzity jej termodynamickej viazanosti na vodnú zložku, a ktoré sú zároveň aj rozdielnej rezervoárovej teploty v čase jej prieniku ku efektívnemu profilu filtrácie alebo do telesa geotermálneho vrtu; pričom ide o prirodzený prejav CD2(d) hydrogeotermálnych systémov, detto v produktívnych rezervoárových fáciách, ako sú karbonáty
- nateraz nevysvetleným, respektíve neznámym režimom tvorby a stability plynného CO_2 regiónu (FENDEK IN VRANOVSKÁ ET AL., 1999; FRIČOVSKÝ ET AL., 2020), ktorý podmieňuje chemické zloženie plynov schopných spontánnej separácie, a tým aj chemické zloženie geotermálnej vody a stavu termodynamickej saturácie minerálnych fáz v systéme voda – hornina – minerálna fáza
- prirodzenou tendenciou termodynamicky viazanej, vlhkej parnej frakcie meniť intenzitu svojej viazanosti a kritické tlaky spontánnej separácie, s priamym účinkom predovšetkým na pH v geotermálnej vode a CO_2-$CaCO_3$ systém, respektíve pri zohľadnení termodynamicky rovnovážnej ionovýmeny následne aj Na-Ca-SiO_2 subsystém.

Z uvedeného vyplýva, že **Zámer dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie na geotermálnom stredisku Svinica – Ďurkov zodpovedá požiadavkám Smernice 2000/60/ES Európskeho parlamentu a Rady z 23. októbra 2000, ktorou sa stanovuje rámec pôsobnosti pre opatrenia spoločenstva v oblasti vodného hospodárstva (Rámcová smernica o vodách, RSV)**.

8 NEZÁVÄZNÉ ODPORÚČANIA PRE REZERVOÁROVÝ MANAŽMENT GEOTERMÁLNEHO STREDISKA SVINICA - ĎURKOV

Na základe posúdenia Zámeru rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie na geotermálnom stredisku Svinica – Ďurkov; ako aj pri posúdení dostupnej kvality a kvantity údajov, ktoré sú pre zostavenie posudku k dispozícii (vrátane zostavenia modelu rezervoárovej odozvy po modifikácii skriptu @ALUMP-Ex), je nevyhnutné uviesť niekoľko odporúčaní pre budúci trvalo udržateľný rezervoárový manažment geotermálneho strediska a jeho efektívne okolie, pričom tie majú podporný charakter, a vychádzajú z:

- nedostatku údajov, predovšetkým z pohľadu znalostí vývoja teplotných a tlakových odpovedí na rezervoárovú produkciu, a zároveň reinjektáž (tento stav je prirodzený v úvodných etapách výskumu a prieskumu a overovania zdrojov geotermálnej energie, ale dôsledný overovací, testovací, pred-produkčný a produkčný monitoring na komplexnej báze vedie následne k výraznej zmene)
- nedostatku relevantných údajov o chemickom zložení koncových a prechodných členov koncepčného modelu / koncepčnej histórie vzoriek pre modelovanie rezervoárovej odozvy (detto podľa vyššie uvedeného)
- energetickej dôležitosti a nízkej-strednej termodynamickej kvality zdrojov geotermálnej energie (FRIČOVSKÝ ET AL., 2018, 2020), nie typických pre zdroje geotermálnej energie na Slovensku, s prirodzenou potrebou ich efektívneho monitorovania a ochrany
- nevyhnutnosti kalibrovania modelov rezervoárovej odozvy, modelov prieniku studeného frontu a modelov odhadu (stochastického alebo diskrétneho) zdrojov a zásob geotermálnej energie v čase podľa výsledkov pred-produkčného a produkčného (prevádzkového) monitoringu
- prirodzenej činnosti rezervoárového inžinierstva, respektíve rezervoárového manažmentu (STEFANSSON ET AL., 1995; KETILSSON ET AL., 2010; JOLIE ET AL., 2021) minimalizovať riziká hydraulickej, termickej, termodynamickej, alebo chemickej depletácie rezervoárového prostredia alebo rezervoárového média, ktoré by viedli k nutnosti obmedzenia produkcie a/alebo ukončenia produkcie zdrojov geotermálnej energie.

1) REALIZÁCIA STOPOVACÍCH SKÚŠOK

Realizovaný posudok je aplikovaný zakaždým na podmienky tripletu č.1, pričom je možné predpokladať, pri analogickom postupe, že podobné výsledky z pohľadu produkcie a reinjektáže môžu byť dosiahnuté aj na triplete č.2. Hoci koncepčný model predpokladá skôr kužeľový, prípadne lúčový postup hydraulického, a pravdepodobne aj termického a chemického frontu medzi reinjektážnou a produkčnou zónou, reálna konfigurácia frontov môže (ale nemusí) byť výrazne odlišná v prípade súbežnej reinjektáže oboch tripletov. Identifikácia postupov všetkých typov vyvíjajúcich sa frontov je možná predovšetkým nepriamo z výsledkov termochemických modelovaní založených na prevádzkovom hydrogeochemickom monitoringom, avšak priamou indikačnou metódou pri pomerne nízkych nákladoch na realizáciu je opakovanie stopovacích skúšok v pravidelných intervaloch (v úvodnej etape produkcie 1x za 2 roky, neskôr, ak neexistujú prejavy okamžitého prieniku frontu rezervoárovej odozvy 1x za 5 - 10 rokov) v závislosti na hydraulických parametroch rezervoárového prostredia. Stopovacie skúšky predstavujú prakticky jediný spôsob priamej kvantifikácie účinnosti reinjektáže, pričom sú v zmysle globálnej praxe nevyhnutné pre optimalizáciu produkčnej sústavy počas testovania alebo produkcie rezervoáru, respektíve pre optimalizáciu produkčnej stratégie a kalibráciu modelov rezervoárovej odozvy (GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON, 2012).

2) MIKROGRAVIMETRIA

Doplnkový geofyzikálny monitoring – predovšetkým mikrogravimetria – je jedným z geofyzikálnych indikátorov, v rámci globálnej praxe jediným spôsobom priestorového mapovania pozície a tvaru (konfigurácie) prenikajúceho studeného frontu. Výhodou produkčnej schémy je pomerne malá plocha realizácie, čo výrazne znižuje cenu mikrogravimetrických prác, a zároveň pomerne výrazné rozdiely medzi teplotou, a tým aj hustotou reinjektovanej geotermálnej vody voči rezervoárovému prostrediu. Pri frekvencii mikrogravimetrického prieskumu 1x ročne respektíve 1x za 2 až 3 roky je možné vo výraznej miere, predovšetkým v úvodných etapách produkcie a reinjektáže, kalibrovať modely rezervoárovej odozvy a prípadne podľa výsledkov optimalizovať produkčnú schému, alebo samotnú produkčnú stratégiu (BJORNSSON, 2009; AXELSSON – KRISTMANSDÓTTIR, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011).

3) HYDROGEOCHEMICKÝ MONITORING

Prezentovaný rozbor schém priameho (Tabuľka 7.3) a nepriameho (Tabuľka 7.4) monitoringu vychádza z globálnej praxe využívanej v rezervoárovom inžinierstve (AXELSSON – KRISTMANSDÓTTIR, 2009; KRISTMANSDOTTIR, 2009; GRANT – BIXLEY, 2011; JACOBO – MONTALVO, 2013).

Tabuľka 7.3 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

Tabuľka 7.4 Režim geochemického monitoringu v závislosti na type zdroja geotermálnej energie. Upravené podľa: Kristmansdottir (2009)

Frekvencia monitorovacieho programu	nízkoentalpické geotermálne systémy (rezervoárová teplota do 120 C a parná frakcia vo forme vlhkej pary)	vysokoentalpické 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_2S, NO_3, Al, Fe, F) parná zložka (CO_2, H_2S, N_2, O_2, CH_4) rozbor rozpustených plynov
aspoň 2-krát ročne	Al, Fe, Mn, Br, F, NO_3, H_2S, stabilné izotopy, rozbor 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)

Cieľom monitoringu je pri minimálnom náraste nákladov na základe priamych, respektíve nepriamych indikátorov posudzovať vývoj kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia v porovnaní s dobou otvorenia, alebo testovania produkcie zdrojov geotermálnej energie, a následne s využitím modelovacích schém aplikovať interpretačné postupy pre identifikáciu rezervoárových procesov ako súčasti rezervoárovej odozvy; pričom vo všeobecnosti platí, že náklady vynaložené na monitoring a vyhodnocovanie sú rádovo nižšie ako náklady spojené s limitovaním negatívnych dôsledkov prieniku frontov rezervoárovej odozvy, respektíve s nevyhnutnou zmenou alebo ukončením produkcie (STEFANSSON ET AL. 1995; AXELSSON, 2009, MONTEROSSA – AXELSSON, 2013). **V konkrétnych podmienkach ďurkovskej depresie sú kritickými indikátormi rezervoárovej odozvy** (Tab. 7.4) v rámci rozborov geotermálnej vody predovšetkým **Cl, B, SiO_2, CO_{2aq}, CO_{2v}, Mg a As, ako indikátory vertikálnych, respektíve laterálnych prítokov**; respektíve **fázové pomery na rozhraní voda – parná zložka** indikujúce možné procesy nástupu, alebo útlmu rezervoárovej konvekcie alebo zmien v intenzite termodynamickej viazanosti parnej fázy. Systematické vyhodnocovanie overovacieho, alebo prevádzkového monitoringu, je aj s ohľadom na lokálne hydrogeotermálne podmienky a charakter rezervoárových procesov a rezervoárovej dynamiky, vhodné orientovať predovšetkým na:

- sporadické kontroly fáciálnej stability geotermálnych vôd (pred separátorom, respektíve pri hlbinnom odbere) s využitím genetických alebo fáciálnych modelov, napríklad Langellier-Ludwigovho, Gibbsovho, alebo Piperovho diagramu a B-Cl-Li, HCO_3-Cl-SO_4, Mg-Cl-B mapovacie schémy
- využívanie zmiešavacích modelov a modelov mapovania adiabatického varu, predovšetkým silikáty – karbonáty, entalpia – chlorid a chloridy – bikarbonáty s koncovými členmi nastavenými pre jednotlivé triplety, respektíve pre požadované vektory analýzy
- aplikovanie konvenčnej kvalitatívnej (indikátorovej) a kvantitatívnej (predovšetkým silikátovej) geotermometrie pre hodnotenie vývoja stability termodynamickej rovnováhy geotermometrických systémov a subsystémov ako indikátorov stability rezervoárových procesov alebo ich zmien v čase (napríklad) vplyvom produkcie / reinjektáže
- pravidelné aplikovanie multikomponentovej geotermometrie (index celkovej saturácie, typové krivky TSI, komplexný rovnovážny stav, mediánová teplota rovnovážneho stavu, chloridový multikomponentový model zmiešavania) schopnej indikovať zmeny v intenzite zmiešavania, adiabatického varu, konvektívneho alebo adiabatického ochladzovania, rekalibrácie vertikálnym prúdením, alebo kombinácie týchto procesov.

9 VYJADRENIE

Predkladaný Zámer, voči ktorému je hydrogeologický posudok realizovaný, predpokladá rozvoj geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov pre kontinuálne dodávanie tepla zo zdrojov geotermálnej energie do systému centralizovaného zásobovania teplom mesta Košice. Stredisko počíta s aktiváciou tripletu č.1 geotermálnych vrtov GTD-1 až GTD-3 a realizáciou tripletu č.2 vrtov GTD-4 až GTD-6 v produkčnej schéme s reinjektážou a konfiguráciou P:I = 1:2, respektíve P:I = 2:4 sumárne. Produkcia zdrojov geotermálnej energie počíta s inštalovaným výkonom 30 MWt a produkciou Q = 110 $l.s^{-1}$ z vrtov GTD-2 a GTD-4 sumárne pri plnej reinjektáži v plytkom a priamom režime – podľa technického plánu vrtov určených na realizáciu, respektíve existujúcich. Rezervoárové prostredie predstavujú strednotriasové karbonáty v hlbokom podloží (vulkano)sedimentárnej výplne Košickej kotliny; ako súčasť útvaru geotermálnych vôd Košická kotlina – hydrogeotermálnej štruktúry ďurkovská depresia, pričom z hydrogeologického hľadiska ide o uzavreté rezervoárové prostredie bez prirodzených foriem dopĺňania. Prevládajúcim režimom kontrolujúcim transport a distribúciu tepla v systéme je kondukcia, so sekundárnym vplyvom priestorovo izolovanej konvekcie. Rezervoárové médium predstavuje geotermálna voda s termodynamicky viazanou, vlhkou parnou frakciou schopnou spontánnej separácie (adiabatického varu) v podmienkach kvázi-atmosférického alebo atmosférického tlaku, pri celkovej mineralizácii 26 – 35 $g.l^{-1}$ a vysokých koncentráciách vybraných komponentov, z environmentálneho hľadiska ale predovšetkým As a Li. Predmetom hydrogeologického posudku je hodnotenie konfigurácie produkčnej schémy v zmysle Požiadaviek a základných princípov DNSH, ako aj hodnotenie vplyvov produkcie a reinjektáže zdrojov geotermálnej energie v rámci produkčnej schémy na rezervoárové prostredie, ako z pohľadu RSV, tak aj z pohľadu Koncepcie TURM / TURP. Projekt „Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline bol dňa 12. 07 2023 na 3. zasadnutí Komisie pri monitorovacom výbore pre Program Slovensko 2021 – 2027 pre Fond na spravodlivú transformáciu schválený ako „Národný projekt“. Pre investičný projekt „Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline“ bolo v súlade s bodom A.1. Uznesenia vlády Slovenskej republiky č. 426/2023 z 23. augusta 2023 vydané Ministerstvom hospodárstva SR Osvedčenie o významnej investícii č. 121127/2023-4270-401742, na základe ktorého je projekt považovaný za významnú investíciu a jeho uskutočnenie je vo verejnom záujme. Z posudzovania Zámeru a plánov rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie využitím strediska Svinica – Ďurkov vyplýva:

1) **Zámer geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov plne vyhovuje požiadavke „nespôsobiť významnú škodu“ – DNSH z pohľadu návrhu, konfigurácie, funkcie a predpokladaného spôsobu využívania produkčnej schémy tripletu č.1 a č.2; ktorý spĺňa podmienku významného prínosu v oblasti zmiernenia zmien klímy, udržateľného využívania a ochrany vodných a morských zdrojov a prevencie a kontroly znečisťovania**

pričom hodnotenie vychádza predovšetkým zo skutočnosti, že neexistuje, vzhľadom na chemicko-technologické parametre zdrojov geotermálnej energie v ďurkovskej depresii iná možnosť pre ich produkciu, ako využívanie reinjektáže pri plnom reinjektážnom režime v uzavretom okruhu, a to aj v súvislosti s ochranou povrchových a podzemných vôd, respektíve pôdy a pôdnych ekosystémov, či ľudských aktivít; vrátane zabezpečovania hydraulickej udržateľnosti rezervoárového prostredia, nakoľko ide o hydraulicky uzavretý systém; a zároveň je navrhovaná konfigurácia oboch tripletov, predovšetkým z pohľadu základných úloh príslušných typov reinjektáže optimálna pre lokálne podmienky a účel reinjektáže; pričom spĺňa parametre dobrej praxe v udržateľnom rezervoárovom manažmente

2) **Zámer geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov plne vyhovuje požiadavkám na udržanie / zlepšenie kvalitatívneho a kvantitatívneho stavu útvarov povrchových vôd, podzemných vôd a geotermálnych vôd podľa Rámcovej smernice o vodách – RSV (Smernica 2000/60/ES Európskeho parlamentu a Rady z 23. októbra 2000, ktorou sa stanovuje rámec pôsobnosti pre opatrenia spoločenstva v oblasti vodného hospodárstva)**

pričom hodnotenie je podložené samotným prínosom reinjektáže, ktorá v uzavretom systéme bráni kontaktu zdrojov geotermálnej energie s vysokým obsahom vybraných zložiek

s povrchovými recipientmi, respektíve plytkými podzemnými vodami; a zároveň výsledkami bilančného, respektíve dynamického modelovania odhadu rezervoárovej odozvy, z ktorých vyplýva dostatočná energetická kapacita rezervoárového prostredia zabezpečiť dlhodobú a udržateľnú produkciu predpokladaného tepelného výkonu oboch tripletov (30 MWt); a zároveň zvratnosť zmien v rezervoárovom prostredí vyvolaných prirodzenou rezervoárovou odozvou voči dlhodobej produkcii / reinjektáži pri parametroch definovaných v Zámere, a to v miere, kedy je riziko prieniku frontov rezervoárovej odozvy (hydraulický, chemický, termický) z reinjektážnej do produkčnej zóny nízke, čo zároveň zodpovedá v globálnej praxi prijatému ponímaniu udržateľnej, a obnoviteľnej produkcii zdrojov geotermálnej energie (Koncepcia trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu / produkcie).

Doplnenie: Uvedené hodnotenie je založené na údajoch prezentovaných v Zámere, a preto predpokladá dostatočný súlad medzi špecifikáciami v Zámere a realizáciou v čase otvorenia prevádzky geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov. Uvedené hodnotenie zároveň vychádza z dostupných údajov, ktorých limity sú opísané v časti 6.2. Pozitívny výsledok hodnotenia nenahrádza nevyhnutnosť dôsledného a komplexného testovacieho a produkčného monitoringu, ako aj následne jeho vyhodnocovania a pravidelnej aktualizácie prediktívnych modelov rezervoárovej odozvy (kvalitatívnych, kvantitatívnych), s cieľom minimalizovať riziká pre dlhodobú udržateľnosť produkcie zdrojov geotermálnej energie.

10 ZÁVER

Rozvoj produkcie geotermálnej energie na stredisku Svinica – Ďurkov pre centralizované zásobovanie teplom mesta Košice je v kontexte využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku najkomplexnejší a riešením najzložitejší projekt. Cieľom, ktorý prezentuje Zámer, je produkcia, a následne reinjektáž zdrojov geotermálnej energie v rámci rezervoáru v strednotriasových karbonátoch útvaru geotermálnych vôd Košická kotlina systémom dvoch tripletov, každý v konfigurácii 1 produkčný vrt, 2 reinjektážne vrty. Predpokladané produkčné charakteristiky, sumárny tepelno-energetický výkon 30 MWt (15 + 15 MWt) a sumárne produkované množstvá 110 $l.s^{-1}$ (55 + 55 $l.s^{-1}$) pri ročnej produkcii geotermálnej energie 180 000 MWh,t predstavujú výrazný prínos pre prechod centralizovaného systému zásobovania teplom mesta Košice na nízkoemisné vykurovanie. Reinjektáž je podľa predkladaného Zámeru navrhovaná ako „plná“, čo znamená bezodpadové vtláčanie využitých zdrojov geotermálnej energie do horninového prostredia bez tvorby odpadov a únikov, ktoré by viedli k ohrozeniu povrchových, alebo plytkých podzemných vôd v okolí geotermálneho strediska.

Hydrogeologický posudok hodnotí Zámer **z pohľadu rezervoárového manažmentu a požiadaviek Rámcovej smernice o vodách**, ako aj z pohľadu zásady „nespôsobiť významnú škodu“ – DNSH. V prvom prípade boli pre hodnotenie vplyvu činnosti strediska využité matematické prediktívne modely predpokladanej odpovede rezervoáru na produkciu a reinjektáž v kombinácii s modelmi energetickej bilancie rezervoárového prostredia, z ktorých vyplýva:

- zmeny, ku ktorým v rezervoárovom prostredí dôjde vplyvom produkcie a reinjektáže, sú prirodzeným prejavom rezervoárovej odozvy (zmena teploty, rezervoárových procesov) spojenej s reinjektážou, a ich vplyv bude pravdepodobne priestorovo obmedzený do vzdialenosti 400 – 500 m od reinjektážnych vrtov pre dobu produkcie 100 rokov, respektíve do vzdialenosti 200 – 300 m pre očakávanú dobu produkcie 20 rokov
- zmeny, ku ktorým v rezervoárovom prostredí dôjde budú obmedzené len na samotný rezervoár so stropom v hĺbke 2 000 – 2 300 m.p.t, a neovplyvnia povrchové a plytké podzemné vody

- zmeny, ku ktorým v rezervoárovom prostredí dôjde, neovplyvnia pravdepodobne okolie produkčného vrtu, a z pohľadu možností obnovovania podmienok v rezervoári je možné považovať ich za zvratné
- produkcia a reinjektáž zdrojov geotermálnej energie je jediným technologickým riešením manažmentu „odpadového tepla“ po využití zdrojov geotermálnej energie vo výmenníkovej sústave, ktorý eliminuje riziká spojené s povrchovým vypúšťaním zvyškových zdrojov geotermálnej energie do povrchových tokov
- predpokladaný spôsob využívania zdrojov geotermálnej energie (produkcia + reinjektáž) predstavuje výrazný prvok v ochrane povrchových a plytkých podzemných vôd bezozvyškovým vtláčaním „odpadového tepla“ do rezervoárového prostredia po využití
- plánovaná produkcia geotermálnej energie je udržateľná vo vzťahu k celkovej energetickej bilancii rezervoáru, čo znamená výrazné zníženie rizík nezvratných alebo dlhodobých zmien v rezervoárovom prostredí, a zároveň umožňuje ďalší rozvoj produkcie geotermálnej energie ako v Košickej kotline, tak aj v priestore ďurkovskej depresie.

Z pohľadu zásady DNSH, t.j. „nespôsobiť významnú škodu“ predkladaný hydrogeologický posudok hodnotí Zámer nasledovne:

- realizácia geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov, vrátane produkcie a reinjektáže zdrojov geotermálnej energie spĺňa podmienky zásady DNSH, naopak, dodržiavaním produkcie v zmysle Zámeru, ak to geotermické a hydrogeotermické podmienky umožnia, predstavuje výrazný prvok ochrany rezervoáru zdrojov geotermálnej energie, ochrany plytkých podzemných vôd, ochrany povrchových vôd, a ochrany ovzdušia
- stredisko Svinica – Ďurkov predstavuje výrazný prínos k zmierneniu zmeny klímy, ako jediné technické riešenie produkcie zdrojov geotermálnej energie, a zároveň ako významný zdroj prechodu na nízkoemisné CZT mesta Košice
- modelovanie rezervoárovej odpovede na produkciu a reinjektáž poukazuje na priestorovo obmedzené, a pravdepodobne časovo zvratné – a prirodzené – zmeny v rezervoári počas využívania zdrojov geotermálnej energie, ktoré nemajú vplyv na plytké podzemné a povrchové vody, a zároveň na rešpektovanie udržateľnej energetickej kapacity rezervoáru, čo znamená významný prínos k udržateľnému využívaniu a ochrane vodných a morských zdrojov

- navrhovaná plná reinjektáž, pri ktorej nedochádza k vypúšťaniu „odpadových“ zdrojov geotermálnej energie do povrchových tokov, ani k ich pôdnemu vsakovaniu, predstavuje technické riešenie prevencie chemického aj termického znečistenia povrchových a podzemných vôd, pri minimalizovaní emisií plynov udržiavaním ich rozpustného stavu, čo výrazne prispieva k prevencii a kontrole znečisťovania
- navrhovaný Zámer v prípade jeho realizácie spĺňa všetky princípy DNSH.

Predkladaný Zámer geotermálneho strediska Svinica – Ďurkov plne zodpovedá národným aj medzinárodným požiadavkám na udržateľný rozvoj produkcie zdrojov geotermálnej energie. Zmysluplná produkcia geotermálnej energie, v tomto prípade tepelná podpora systémov centralizovaného zásobovania teplom mesta Košice, predstavuje nielen energeticky, ale aj spoločensky dôležitý projekt, ktorý svojim rozsahom môže výrazne podporiť tvorbu dobrej aplikačnej praxe pri využívaní zdrojov geotermálnej energie na Slovensku, a jeho realizácia je v spoločenskom záujme.

V Bratislave, 15. 5 2024





....

RNDr. Radovan Černák, PhD. Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD.

11 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

Axelsson, G., 1991: Reservoir engineering studies of small low-temperature hydrothermal systems in Iceland. In: *Proceedings 16th Workshop on Geothermal Reservoir Enfineering*, Stanfor University, CA, 1-7.

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., 2012: 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., Kristmansdottir, H., 2009: *Geothermal reservoir monitoring and forecasting: GEO604 coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 153 s.

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 Coutse III on Geothermal Reservoir Characterization: well loging, 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., Bjornsson, S., Stéfansson, V., 2001a: Sustainable production of geothermal energy: suggested definition. *International Geothermal Association News Quaterly*, **43 (1)**, 1-2.

Axelsson, G., Stefansson, V., Xu, Y., 2002: Sustainable management of geothermal resources. *Proceedings Beijing International Geothermal Symposium*, Beijing, China, 277-283.

Axelsson, G., Stefansson, 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.

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.

Bjornsson, G., Axelsson, G., Flóvenz, O.G., 1994: Feasibility study for the Thelamork low-temperature system in Iceland. In: *Proceedings 19th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, 1-9.

Bodiš, D., Vranovská A., 2012: Genéza anomálneho obsahu arzénu v hydrogeotermálnej štruktúre Ďurkov. *Podzemná voda*, ***XVIII (2)***, 123-136.

Čverčko, J., 1971: Závěrečná geologická zpráva o pionierskom vrte Rozhanovce-1. [manuskript – záverečná správa]. Obal vrtov 230. ŠGÚDŠ, Bratislava

Čverčko, J. 1973: Plytký a stredne hlboký štruktúrny prieskum Košicko-prešovskej kotliny. Náplň úlohy: vyhľadávanie ropy a zemného plynu [manuskript – Záverečná správa]. Michalovce: Nafta, Archív Geofond (ID 33477), 88 s.

Čverčko, J., 1974: Závěrečná geologická zpráva o hl. štruktúrnom vrte Kecerovské Pekľany-1. [manuskript – Záverečná správa]. Obal vrtov 242. Manuscript, ŠGÚDŠ, Bratislava.

Čverčko, J., Rudinec, R., 1971: O geologických pomeroch neogénu z vrtu Ďurkov-1. *Geologické práce, Správy*, ***55***, 111-116.

Čverčko J., Rudinec R., Magyar J., Řeřicha M., Očovský J., Smetana J., Tlumač C., Stankovská A., Jánošíková H., Praščák L., Krištek J.. 1977: Výročná správa prieskumného závodu Michalovce o výsledkoch geologicko-vyhľadávacích a prieskumných prác za rok 1977 [manuskript - Čiastková záverečná správa]. ŠGÚDŠ, archív Geofond, Bratislava, 54 s.

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.

Eppelbaum, L., Kutasov, I., Pilchin, A., 2014: *Applied Geothermics*. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, DE, 745 s.

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.

Franko O., Remšík, A., Fendek, M., 1995: *Atlas geotermálnej energie Slovenska*. ŠGÚDŠ, Bratislava.

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., Surový, M., 2018b: Vplyv segmentácie rezervoáru na formovanie priaznivých podmienok konvekcie: model uklonenéhо pórovitého prostredia; príklad hydrogeotermálnej štruktúry Ďurkovská depresia, Košická kotlina. In: *Proceedings, Zborník – 19. Slovenská hydrogeologická konferencia*, Kúpele Nimnica, Slovakia, 1-2.

Fričovský, B., Vizi, L., Surový, M., Fordinál, K., Zlocha, M., Gregor, M., Fričovská, J., 2020a: Hydrogeotermálne hodnotenie ďurkovskej depresie: Aplikácia princípov trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu. [manuskript – čiastková záverečná správa], ŠGÚDŠ Bratislava, 167 s.

Fričovský, B., Vizi, L., Fordinál, K., Surový, M., Zlocha, M., 2020b: 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., Vizi, L., Fordinál, K., 2022: Geothermal resource feasibility study in the Košická kotlina Basin- Stage 1 Final Report [manuskript]. SOYAK ENERGY Ltd., Istanbul, Turecko, 268 s., (**na vyžiadanie**)

Fričovský, B., Marcin, D., Černák, R., Benková, K., Fordinál, K., Pelech, O., 2023: 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 Stúra, Bratislava, nestr. (**koniec úlohy: september 2024**)

Giese, L., 1998: Report on the evaluation of well test data – geothermal well GTD-2, Ďurkov geothermal field, Košice Basin. [manuskript – Záverečná správa], Geothermia, Geochimica, Berlin.

Giese, L., 1999: Report on the evaluation of well test data – geothermal well GTD-3, Ďurkov geothermal field, Košice Basin. [manuskript – Záverečná správa], Geothermia, Geochimica, Berlin.

Grant, M.A., Bixley, P.F., 2011: *Geothermal Reservoir Engineering, 2nd Edition*. Elsevier – Academic Press, Amsterdam, NL, 359 s.

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.

Halás Sr. 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.

Jacko, S., Fričovský, B., Pachocká, K., Vranovská, A. 2014. Reverse stationary temperature modeling and geothermal resource callibration for the Košice depression (eastern Slovakia). *Geological exploration technology, geothermics, sustainable development*, ***1 (2014)***, 3 - 25.

Jacko, J., Farkašovský, R., Ďuriška, I., Ščerbáková, B., Bátorová, K., 2021: Critical tectonic limits for geothermal aquifer use: Case study from the East Slovakian Basin Rim. *Resources*, ***10 (4)***, a.31

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.

Jaupart C., Mareschal J.C., 2010: *Heat generation and transport in the Earth*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 462 s.

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.

Kaličiak, M. et al. 1991: V*ysvetlivky ku geologickej mape severnej časti Slanských vrchov a Košickej kotliny, Geologická mapa severnej časti Slanských vrchov a Košickej kotliny, M 1:50 000*. GÚDŠ, Bratislava.

Kaličiak, M., Baňacký, V., Bodnár, J., Dubéciová, A., Jacko, S., Janočko, J., Jétel, J., Karoli, S., Petro, Ľ., Spišák, Z., Syčev, V., Zlínska, A., Žec, B., 1996: *Vysvetlivky ku geologickej mape Slanských vrchov a Košickej kotliny – južná časť, M: 1: 50 000*. GÚDŠ, Bratislava.

Kamila, Z., Kaya, E., Zarrouk, S.J., 2021: Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020. *Geothermics*, **89**, 1-88.

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.

Ketilsson, J., Axelsson, G., Bjornsson, A., Bjornsson, G., Palsson, B., Sveinbjornsdottir, A.E., Saemundsson, K., 2010: Introducing the Concept of Sustainable geothermal utilization into Icelandic legislation*. Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-8.

Kjaran, S.P., Eliasson, J., 2008: *Geothermal reservoir engineering*. United Nations University Geothermal Training Pogramme, Reykjavik, Iceland, 248 s.

Kristmansdottir, H., 2009: *Chemical monitoring in low- and high- geothermal fields: GEO604 coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 97 s.

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.

Moeck, I.S., 2014: Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Geothermics*, **37**, 867-882.

Moeck, I.S., Beardsmore, 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.

Moeck, I.S., Dussel, M., Weber, J., Schintgen, T., Wolfgramm, M., 2019: Geothermal play typing in Germany, case study Molasse Basin: a modern concept to categorise geothermal resources related to crustal permeability, *Netherlands Journal of Geosciences*, **98 (14)**, 1-10

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.

Onur, M., Sarak, H., Tureyen, I., Cinar, M., Satman, A., 2008: A new non-isothermal lumped-parameter model for low temperature, liquid dominated geothermal reservoirs and its application. *Proceedings 33th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, 1-10.

Pachocká, K., Jacko, S., Pachocki, M., 2010: *3D modeling of a geothermal reservoir in Eastern Slovakia*. VDM Verlag Publ. Saarbrücken, 62 s.

Pereszlenyi, M., Pereszlenyiova, A., Masaryk, P., 1999a: Geological setting of the Košice Basin in relation to geothermal energy resources. *Bulletin d'Hydrogeologie*, ***17***, 115-122.

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., 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., Mégel, T., Eugster, W.J., 1999: How renewable are geothermal resources? *Geothermal Resources Council Transactions*, **23**, 563-567.

Sanyal, S.K., 2005: Cost of geothermal power and factors that affect it. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-10.

Satman, A., 2010: Sustainability of a geothermal reservoir. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-13.

Satman, A., 2011: Sustainability of geothermal doublets. *Proceedings 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, 1-6.

Satman, A., Tureyen, O.I., 2012: Sustainability factors for doublets and conventional geothermal systems. *Proceedings 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, 1-6.

Smetana, J., 1972: Závěrečná geologická zpráva o pionierskom vrte Ďurkov-3. . [manuskript - záverečná správa]. Obal vrtov 217. Manuscript, ŠGÚDŠ, Bratislava

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

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., Kjaran, S.P., 1995: Geothermal reservoir management in Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, 1-6.

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.

Šefara J., Bielik M., Bodnár J., Čížek P., Filo M., Gnojek I., Grecula P., Halmešová S., 1987: Štruktúrno - tektonická mapa vnútorných Západných Karpát pre účely prognózovania ložísk - geofyzikálne interpretácie, text k súboru máp [manuskript - Záverečná správa]. Bratislava, ŠGÚDŠ, archív Geofond, nestr.

Thorhalsson, S., 2009: *Geothermal Drilling Technology: GEO6034 coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 348 s.

Thórhalsson, S., Gunnlaugsson, E., 2012: Directional wells. *Proceedings UNU GTP Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells*, Santa Tecla, El Salvador, 1-3.

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 Antalya*, Turkey, (2005).

Ungemach, P., Antics, M., Lalos, P., 2009: Sustainable geothermal reservoir management practice. *Geothermal Resources Council Transactions*, ***33***, 885-891.

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], ŠGÚDŠ Bratislava, 19 s.

Vranovská, A., Bodiš, D., 1999: Survey for prospective utilization of geothermal energy in Košice Basin. *Bulletin d'Hydrogeologie*, ***17***, 106-113.

Vranovská A., Bondarenková,Z., Král M., Drozd, V., 1999a: Košická kotlina - štruktúra Ďurkov - hydrogeotermálne zhodnotenie, vyhľadávací prieskum [manuscript – Záverečná správa]. Bratislava: SLOVGEOTERM, Archív Geofond (ID 83225), 90 s.

Vranovská, A., Bodiš, D., Drozd, V., 1999b: Zhodnotenie hydrogeotermálnej štruktúry Ďurkov na základe vrtov GTD-1,2 a 3. *Podzemná voda*, ***V (2)***, 45-53.

Vranovská, A., Bodiš, D., Šráček, O., Ženišová, Z., 2015: Anomalous arsenic concentrations in the Ďurkov carbonate geothermal structure, eastern Slovakia. *Environmental Earth Science*, ***73***, 7103-7114.

Watson, A., 2013: *Geothermal engineering: fundamentals and applications*. Springer, New York, 346 s.