

Okresný úrad Žiar nad Hronom

Odbor starostlivosti o životné prostredie

Námestie Matice slovenskej č.8

965 01 Žiar nad Hronom

Váš list č.:
OU-ZH-OSZP-
2026/012894-015

Referenčné číslo:
2026-19

Kontakt:
peter.sochan@envis.sk
0903 636 032

Bratislava
8.9.2026

VEC: Zámer navrhovanej činnosti „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča“ – vyjadrenie k žiadosti o doplňujúce informácie

V mene navrhovateľa – PW geoenergy a. s., Pri Rajčianke 8591/4B, 010 47 Žilina, IČO: 53820843, ako splnomocnený zástupca na základe plnomocenstva, ktoré vám bolo doručené našim listom č. 2026-19 zo dňa 13. 7. 2026 a na základe vašej žiadosti č. OU-ZH-OSZP-2026/012894-015, zo dňa 20. 8. 2026, vo veci „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča – vyžiadanie doplňujúcich informácií“ vám zasielame doplňujúce informácie na objasnenie pripomienok a požiadaviek vyplývajúcich zo stanovísk doručených k zámeru navrhovanej činnosti „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča“.

Na základe výstupov z ústneho pojednávania uskutočneného dňa 20. 8. 2026 na Okresnom úrade v Žiari nad Hronom, Odbor starostlivosti o životné prostredie, vám formou Zmeny a doplnenia predloženého zámeru navrhovanej činnosti „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča“ zasielame doplňujúce informácie k požiadavkám uvedeným v stanovisku Ministerstva životného prostredia SR, Sekcia odpadov a geológie, Odbor geológie a štátnej geologickej správy, č. 8198/2026-2.3, 47981/2026, zo dňa 12. 8. 2026 vo veci „Zámer navrhovanej činnosti „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča“ - stanovisko“ (ďalej stanovisko MŽP SR), str. 6, odrážky č. 7 – 10.

ZMENA A DOPLNENIE

zámeru navrhovanej činnosti „**Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča**“

1. V zmysle požiadavky uvedenej v stanovisku MŽP SR, str. 6, odrážka č. 7: „*Doplniť do zámeru hydrogeologický posudok „Vplyv využívania geotermálnej energie v stredisku E-GEO-1 na PLZ Sklené Teplice“, resp. jeho závery, relevantné z hľadiska aktuálneho zámeru. Posudok odovzdať do Geofondu.*“ pripájame ako prílohu tejto Zmeny a doplnenia zámeru navrhovanej činnosti „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča“, hydrogeologický posudok pre lokalitu, ktorá je predmetom zámeru: „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného zámeru vo vzťahu ku útvaru podzemných geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina“, Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD., 2026.
2. V zmysle požiadavky uvedenej v stanovisku MŽP SR, str. 6, odrážka č. 8: „*Doplniť údaje o zneškodňovaní geotermálnej vody počas hydrogeologického prieskumu – vrtania a testovania (hydrodynamickej skúšky) čerpaceho aj reinjektážneho vrtu.*“, bol v zámere navrhovanej činnosti, kapitola č. IV.2.2 Odpadové vody, text uvedený v predposlednom odseku, nahradený nasledujúcim textom:

„Odpadové vody budú vznikať pri ťažbe geotermálnej vody počas realizácie krátkodobého čerpaceho pokusu a poloprevádzkovej hydrodynamickej skúšky. Geotermálna voda exploatovaná počas krátkodobého čerpaceho pokusu na indikatívne overenie parametrov prvého vrtu bude zachytávaná do ocelových nádrží, prípadne do zemnej nádrže. Po naplnení kapacity nádrží a ukončení krátkodobého čerpaceho pokusu bude voda prečerpaná naspäť do prvého vrtu. Všetka geotermálna voda exploatovaná počas poloprevádzkovej hydrodynamickej skúšky uskutočnenej po realizácii oboch vrtov bude zachytávaná do zemnej nádrže a priebežne prečerpávaná do reinjektážneho vrtu, prípadne bude priamo po ochladení zatláčaná do reinjektážneho vrtu. Nepredpokladá sa vypúšťanie geotermálnej vody do povrchových tokov počas celého procesu výstavby a prevádzky navrhovanej činnosti.“

V zmysle uvedenej požiadavky bol v zámere navrhovanej činnosti, kapitola č. IV.3.4 Vplyvy na vodu, text uvedený v treťom odseku, nahradený nasledujúcim textom:

„Odpadové vody budú vznikať pri ťažbe geotermálnej vody počas realizácie krátkodobého čerpaceho pokusu a poloprevádzkovej hydrodynamickej skúšky. Geotermálna voda exploatovaná počas krátkodobého čerpaceho pokusu na indikatívne overenie parametrov prvého vrtu bude zachytávaná do ocelových nádrží, prípadne do zemnej nádrže. Po naplnení kapacity nádrží a ukončení krátkodobého čerpaceho pokusu bude voda prečerpaná naspäť do prvého vrtu. Všetka geotermálna voda exploatovaná počas poloprevádzkovej hydrodynamickej skúšky uskutočnenej po realizácii oboch vrtov bude zachytávaná do zemnej

nádrže a priebežne prečerpávaná do reinjektážneho vrtu, prípadne bude priamo po ochladení zatlačaná do reinjektážneho vrtu. Nepredpokladá sa vypúšťanie geotermálnej vody do povrchových tokov počas celého procesu výstavby a prevádzky navrhovanej činnosti.“

3. V zmysle požiadavky uvedenej v stanovisku MŽP SR, str. 6, odrážka č. 9:“ *Do zámeru doplniť hodnotenie útvaru geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina.*“, bol v zámere navrhovanej činnosti, kapitola č. III.1.3 Hydrologické pomery, časť „Podzemné vody“, doplnený nasledujúci text so základnými charakteristikami útvaru geotermálnych podzemných vôd SK300190FK Žiarska kotlina, vrátane súvisu s novými údajmi seizmického prieskumu:

Útvar geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina

V členení územia Slovenska na vymedzené geotermálne oblasti (Franko et al. 1995) náleží dotknuté územie navrhovanej činnosti, vrátane prieskumného územia Lovča, do severozápadnej časti stredoslovenských neovulkanitov (Obrázok 1ZaD). Podľa Nariadenia vlády SR č. 282/2010 Z. z., ktorým sa ustanovujú prahové hodnoty a zoznam útvarov podzemných vôd (v platnom znení) sa dotknuté územie nachádza v útvare geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina.

Pozícia Žiarskej kotliny v regióne stredoslovenských neovulkanitov, resp. relatívna blízkosť magmatických krbov a reziduálneho tepla zemskej kôry, determinuje jej mimoriadne charakteristiky, najmä geotermickú aktivitu a vysoké podpovrchové teploty. Na vysokú geotermickú aktivitu poukazuje hodnota hustoty zemského tepelného toku, ktorá sa v južnej časti kotliny pohybuje v intervale $90 \sim 100 \text{ mWm}^{-2}$ („veľmi zvýšená“), resp. v smere na juh do Štiavnických vrchov viac ako 100 mWm^{-2} („dosť vysoká“). Uvedené hodnoty výrazne prevyšujú obvyklé priemerné hodnoty zemského tepelného toku na území Slovenska v intervale približne $60 \sim 70 \text{ mWm}^{-2}$.

Plochou cca 983 km^2 je útvar geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina jedným z troch najrozľahlejších geotermálnych útvarov Slovenska. Nachádza sa v strednej časti Slovenska, kde zaberá zhruba územie medzi pohoriami Kremnické vrchy, severozápadná časť Štiavnických vrchov, Vtáčnika a Pohronského Inovca.

Geologickú stavbu územia tvoria sedimentárne, vulkanogénne a vulkanosedimentárne komplexy neogénneho veku. Neovulkanické horniny sú produktom najmä andezitového vulkanizmu (báden až sarmat), v menšej miere aj ryolitového vulkanizmu. Centrálné zóny stratovulkánov budujú andezity s intruzívnymi telesami granodioritov, dioritov a porfýrov, ich okolie a perifériu tvoria lávové prúdy, vulkanoklastiká a vulkanosedimentárne komplexy.

Na zložitej geologickej stavbe predterciérneho podložia sa podieľajú všetky hlavné tektonické jednotky vnútorných Západných Karpát. Prevažnú časť podložia neovulkanitov tvoria súčasti tektonických jednotiek veporika (granitoidné jadro a mladopaleozoický až mezozoický obal). Značné rozšírenie v podloží majú formácie mladšieho paleozoika a mezozoika tektonickej jednotky hronika. Reliéf predterciérneho podložia je výrazne členitý, determinovaný intenzívnou zlomovou tektonikou. Výsledkom tektonických procesov je komplex elevačných a depresných morfoštruktúr so značnými ofsetmi na ich rozhraniach. Výrazné elevácie podložia tvoria rudniansky chrbát, hodrušsko – štiavnická hrasť a handlovský chrbát; najvýraznejšou depresiou je Žiarska kotlina.

V Žiarskej kotline sú perspektívnymi geotermálnymi kolektormi triasové karbonáty (dolomity a vápence) predterciérneho podložia. Geotermálne vody, viazané najmä na triasové karbonáty veporika, fatrika a hronika v podloží terciérnych sedimentov, sú známe z prirodzených výverov a vrtov najmä v oblasti južne od vlastnej Žiarskej kotliny, na lokalitách Sklené Teplice, Vyhne, Lukavica a v niektorých ďalších lokalitách. Prítomnosť geotermálnych vôd v hlbkej časti Žiarskej kotliny nebola do súčasnosti vrtne overená.

V geotermálnom útvare SK300190FK Žiarska kotlina bolo realizovaných 8 zdrojov termominerálnych vôd v kúpeľoch Sklené Teplice a 11 ďalších vrtov KŠ-1 [Kremnica]; H-1, H-2 a HGV-3 [Vyhne], R-3 [Hodruša Hámre – Zlatno], LKC-4 [Lukavica], KD-1 [Obyce], RGŽ-2 [Žiar nad Hronom] a vrt ST-4, ST-5 a STH-2 [Sklené Teplice]. Vrtom RGŽ-2 [Žiar nad Hronom] neboli predpokladané geotermálne kolektory triasových karbonátov overené, vrt prenikol intruzívnym telesom periférnej zóny severnej časti Štiavnického stratovulkánu.

Geotermálne vody boli vrtmi zachytené v hĺbkach do 1 695 m, výdatnosť prítokov dosahovala $0.09 \sim 23.2 \text{ ls}^{-1}$ pri teplote vody v bode výveru $27.0 \sim 57.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a tepelným výkonom jednotlivých zdrojov $0.01 \sim 3.45 \text{ MWt}$. Sumárna výdatnosť existujúcich vrtov v útvare dosahuje cca 108 ls^{-1} , čomu zodpovedá tepelný výkon cca 14 MWt . Z pohľadu chemického zloženia boli v útvare SK300190FK overené vody najmä Ca-SO_4 , $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$, $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$, $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ chemických typov s celkovou mineralizáciou $0.4\sim 5.0 \text{ g l}^{-1}$.

Podľa Remšík et al. (2000) sa rozsah hydrogeotermálnych štruktúr kryje s rozšírením triasových dolomitov a vápencov, príslušných tektonickým jednotkám veporika, hronika a fatrika. Uvedené jednotky tvoria morfoštruktúry podložia, ktorými sú poklesávajúci svah hodrušsko – štiavnickej hraste a žiarska depresia. Podľa uvedeného zdroja budujú triasové vápence a dolomity hronika vrchné hydrogeotermálne štruktúry (označené vrchná sklenoteplická a vrchná žiarska štruktúra), na ktoré sú v hĺbkach do 4 100 m viazané geotermálne vody s rezervoárovými teplotami do $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Triasové vápence a dolomity série Veľkého Boku, resp. fatrika budujú spodné hydrogeotermálne štruktúry (ozn. spodná sklenoteplická

a podná žiarska štruktúra), kde sú v hĺbkach do cca 5 000 m predpokladané geotermálne vody s rezervoárovými teplotami do 160 °C.

V zmysle metodiky kvantitatívneho hodnotenia geotermálnych útvarov podzemných vôd je útvár SK300190FK v dobrom stave so strednou mierou spoľahlivosti. Rovnako je útvár z pohľadu chemického stavu v dobrom stave so strednou mierou spoľahlivosti.

Geotermálny útvár SK300190FK Žiarska kotlina bol pred zavedením členenia na útvary podzemných vôd hodnotený ako súčasť útvaru stredoslovenské neovulkanity – severozápadná časť s pravdepodobným obnovovaným využiteľným množstvom geotermálnej energie na úrovni 82.6 MWt (Franko et al. 1995). Regionálne hydrogeotermálne hodnotenie bolo vykonané pre oblasť Žiarskej kotliny (Remšík et al. 2000). Hodnota tepelno-energetického potenciálu prírodného množstva geotermálnej vody triasových karbonátov hronika sa pohybuje v rozmedzí od 0.09 ~ 6.3 GJm⁻² s priemernou hodnotou 3.25 GJm⁻² a maximom v oblasti Dolná Ždaňa – Lovča. Pre triasové karbonáty fatrika boli určené hodnoty v rozmedzí od 0.33 ~ 3.66 GJm⁻² s priemernou hodnotou 2.36 GJm⁻². Maximálne hodnoty dosahuje rovnako oblasť Dolná Ždaňa – Lovča s pokračovaním do oblastí Prestavky – Jánova Lehota – Žiar nad Hronom. Podľa uvedeného zdroja predstavuje prírodné množstvo geotermálnych vôd 65.3 ls⁻¹ s teplotou vody 60 °C (sklenoteplíková štruktúra) a 110 °C (žiarska štruktúra), čo zodpovedá prognóznemu množstvu geotermálnej energie prírodných zdrojov 22.3 MWt.

Nakoľko do súčasnosti nebol v internej časti Žiarskej kotliny realizovaný hlboký vrt, ktorým by bolo overené predterciérne podložie, zostávala ako jednotný problém predchádzajúcich interpretácií hlbínnej stavby absencia relevantných geofyzikálnych údajov. Výsledky seizmického prieskumu realizovaného v 60. a čiastočne v 70. rokoch 20. stor. síce podávali určitý obraz o hlbokých štruktúrach Zemskej kôry danej oblasti, avšak pre riešenie podobného typu úlohy nebola ich rozlišovacia schopnosť postačujúca.

Zásadne novým typom vstupných údajov, ktorý umožnil interpretáciu hlbínnej stavby Žiarskej kotliny bol seizmický prieskum v jej centrálnej a južnej časti. Reflexno – seizmický prieskum prebehol vo dvoch etapách – profily 801/99 a 802/99 boli merané v rámci regionálneho geotermálneho zhodnotenia Žiarskej kotliny (Remšík et al. 2000), ďalšie profily 01/20 a 02/20 boli realizované v rámci prípravy aktuálneho projektu geotermálneho strediska na lokalite Lovča.

Nakoľko citovaná dokumentácia Remšík et al. [2000] neobsahovala žiadne vyhodnotenie meraní na profiloch 801/99 a 802/99, bola ich geologická interpretácia súčasťou dokumentácie hlbínnej stavby Žiarskej kotliny v predchádzajúcich etapách geologických prác, v rámci prípravy podkladov pre prieskumné územie Lovča (Vitaloš in Šujan et al. 2011). Obraz

rezov bol reinterpretovaný v rámci prípravy aktuálneho projektu, spolu s novo realizovanými seizmickými profilmi 01/20 a 02/20 (Šujan et al. 2020). Geometria priebehu seizmických línii umožňovala interpretáciu charakteristických rozhraní (najmä povrch predpokladaného geotermálneho kolektora) v priestore (pseudo 3D) vrátane identifikácie hlavných zlomových rozhraní.

Obráz kompozitného modelu [Obrázok 2ZaD] poukázal na generálne rozčlenenie Žiarskej kotliny centrálnym zlomovým systémom (približne na línii Dolná Ždaňa – Dolná Trnávka – severný okraj Žiaru nad Hronom) na dva halfgrábene s odlišnou hĺbkou povrchu predterciérneho podložia. V severozápadnom halfgrábene sa hĺbka povrchu podložia (pod úrovňou zrovnávacej roviny 400 m n. m.) pohybuje okolo 1 000 ~ 1 200 m; v juhovýchodnom segmente klesá na hĺbky okolo 1 400 ~ 1 700 m. Najvýraznejší pokles je dokumentovaný v čiastkovej depresii východne od Žiaru nad Hronom, kde podľa údajov seizmického prieskumu klesá hĺbka povrchu podložia až na 2 400 ~ 2 800 m. Veľmi výrazne sa prejavuje juhovýchodné vymedzenie depresie voči severným svahom štiavnického stratovulkánu.

Priame podložie terciérnej výplne je v Žiarskej kotline budované vulkanosedimentami ipoltickej skupiny (perm hronika), na čo poukazuje najmä profil vrtu JL-1 (Janova Lehota) ako aj syntetické mapové podklady (Fusán et al. 1987; Hók et al. 2014). Súbor vulkanosedimentov ipoltickej skupiny tvorí vo vrstevnom slede predterciérneho podložia regionálny hydrogeologický izolátor, ktorého celkovú mocnosť je podľa reflexného obrazu možné odhadnúť na $\pm 1\,000$ m s určitými laterálnymi variáciami. Povrch karbonátov príslušných vyšším príkrovom (resp. sedimentárnemu obalu severného veporika v juhovýchodnej časti územia) je podľa uvedeného predpokladaný v severozápadnom halfgrábene okolo 1 800 ~ 2 200 m (pod úrovňou zrovnávacej roviny 400 m n. m.); v juhovýchodnom bloku okolo 2 600 ~ 3 200 m, resp. východne od poklesového zlomu pri Žiari nad Hronom povrch klesá až na cca 3 600 m. Ako sekundárny geotermálny kolektor môžu v danom profile vystupovať bazálne klastiká terciérnej sedimentárnej výplne centrálnej depresie kotliny.

Súhrnnou interpretáciou reflexno – seizmického prieskumu bol získaný reprezentatívny obraz o hlbínnej stavbe Žiarskej kotliny, vrátane jej tektonického obmedzenia voči štiavnickému stratovulkánu. Výsledky geofyzikálnych prác potvrdili predchádzajúce údaje o priebehu okrajových zlomov, pričom celkový ofset na zlome (resp. systéme zlomov) presahuje až 1 000 m (Obrázok 3ZaD). Podľa uvedeného je možné jednotky predterciérneho podložia, vrátane perspektívnych geotermálnych kolektorov, rozdeliť na podložie internej časti Žiarskej kotliny a podložie severnej časti štiavnického stratovulkánu vrátane zdrojových hornín termominerálnych vôd na lokalite Sklené Teplice. V stavbe predterciérneho podložia blízkeho okolia lokality Lovča bol v seizmickom obraze identifikovaný zlom generálneho smeru JZ – SV s úklonom na juhovýchod, ktorý vymedzuje severozápadný okraj hlbkej časti grábenú Žiarskej kotliny [Obrázok 3ZaD].

Hydrogeologická produktivita karbonátov bude závisieť najmä na konkrétnom litologickom zložení a tektonickom porušení. V danom prostredí je ako najpriaznivejší litotyp možné očakávať dolomity stredného a vrchného triasu, ďalej rôzne variety čistých vápencov a na opačnej strane spektra rôzne variety piesčitých, slienitých a ďalších analogických vápencových litotypov. Podstatné zastúpenie menej priaznivých karbonátických vývojov je v tektonickej jednotke fatrika a v mezozoickom sedimentárnom obale severného veporika.

Hydrogeologická produktivita karbonátov bude narastať s mierou tektonického postihnutia hornín, pričom pôsobiaci tlak má významnejšie účinky na rigidne litotypy. Pri rozdelení predpokladaných geotermálnych kolektorov podľa litológie (resp. podľa litologicky podmienených reologických vlastností hornín) je v danom zmysle účinnejšie porušenie v dolomitoch, ktoré na tlak reagujú vznikom krehkých deformácií (rôzne typy diskontinuit). Zvýšený podiel horčika v zložení karbonátov (dolomity) spôsobuje významný nárast odolnosti horniny voči deformácii. Reakcie vápencov na pôsobiaci tlak sú síce kvalitatívne porovnateľné, avšak kvantitatívne menej významné. V smere k slienitým varietam narastá duktilita vápencov, t. j. klesá podiel krehkej deformácie a výraznejšie sa uplatňuje vznik plastických deformácií (napr. vrásky), čím súvisí pokles hydrogeologickej produktivity hornín.

Pri hodnotení perspektív výskytu geotermálnych kolektorov je potrebné uviesť polohy bazálnych klastík, ktoré boli identifikované v reflexnom obraze nad povrchom predterciérneho podložia. Ich rozsah, resp. celková mocnosť narastá najmä na báze terciérnej výplne centrálnej depresie kotliny. Z hľadiska geotermálneho potenciálu ide o druhoradý kolektor, nakoľko jeho predpokladané hydraulické parametre sú konvenčne pokladané za horšie ako v prípade triasových karbonátov. Pozícia kolektora v menšej hĺbke dáva zároveň predpoklad nižších ložiskových teplôt.

Bazálne klastiká sú veľmi pravdepodobne komplexom, ktorý sedimentoval pred začiatkom bádenskej vulkanickej aktivity štiavnického stratovulkánu. Prevažne by mali byť tvorené siliciklastickými fáciami, ktoré sú z hľadiska predpokladov hydraulickej vodivosti priaznivejším prostredím. V smere do nadložia nie je možné vylúčiť synchrónnu sedimentáciu klastík a začínajúcu vulkanickú aktivitu, t. j. existuje reálny predpoklad prevrstvenia panvových sedimentov (interfingering) s vulkanoklastikami, resp. ich redepozitmi. Vulkanoklastické fácie spravidla obsahujú pomerne významné zastúpenie ílových minerálov vo vysokom štádiu premeny, ktorá súvisí s vysokým geotermickým gradientom v oblasti. Zvýšený podiel ílových minerálov v matrix sedimentu bude významne znižovať jeho hydraulickú vodivosť a súčasne predpokladanú hydrogeologickú produktivitu hornín. Rovnako ako v prípade karbonátických kolektorov môže byť hydrogeologická produktivita významne zvýšená tektonickým postihnutím hornín.

Problém tektonickej afiliácie horninových súborov a litologickej diferenciácie vo vrstevnom slede predterciérneho podložia nie je možné bez realizácie hlbokého parametrického vrtu v centrálnej depresii Žiarskej kotliny uspokojivo vyriešiť. V danom prípade bola na základe seizmického prieskumu ako pravdepodobnejšia vyhodnotená alternatíva existencie dvoch superponovaných šupín tektonickej jednotky hronika, pričom vrchná etáž má tektonicky amputované triasové členy (t. j. najmä karbonáty) a v spodnej etáži vystupuje triasový sled vrátane karbonátov. Výskyt reliktovej triasových karbonátov tektonickej jednotky hronika nie je vylúčený ani na povrchu vulkanosedimentov ipoltickej skupiny (t. j. v priamom podloží terciérnej výplne kotliny), avšak regionálny kontext túto alternatívu minimálne nepotvrdzuje.

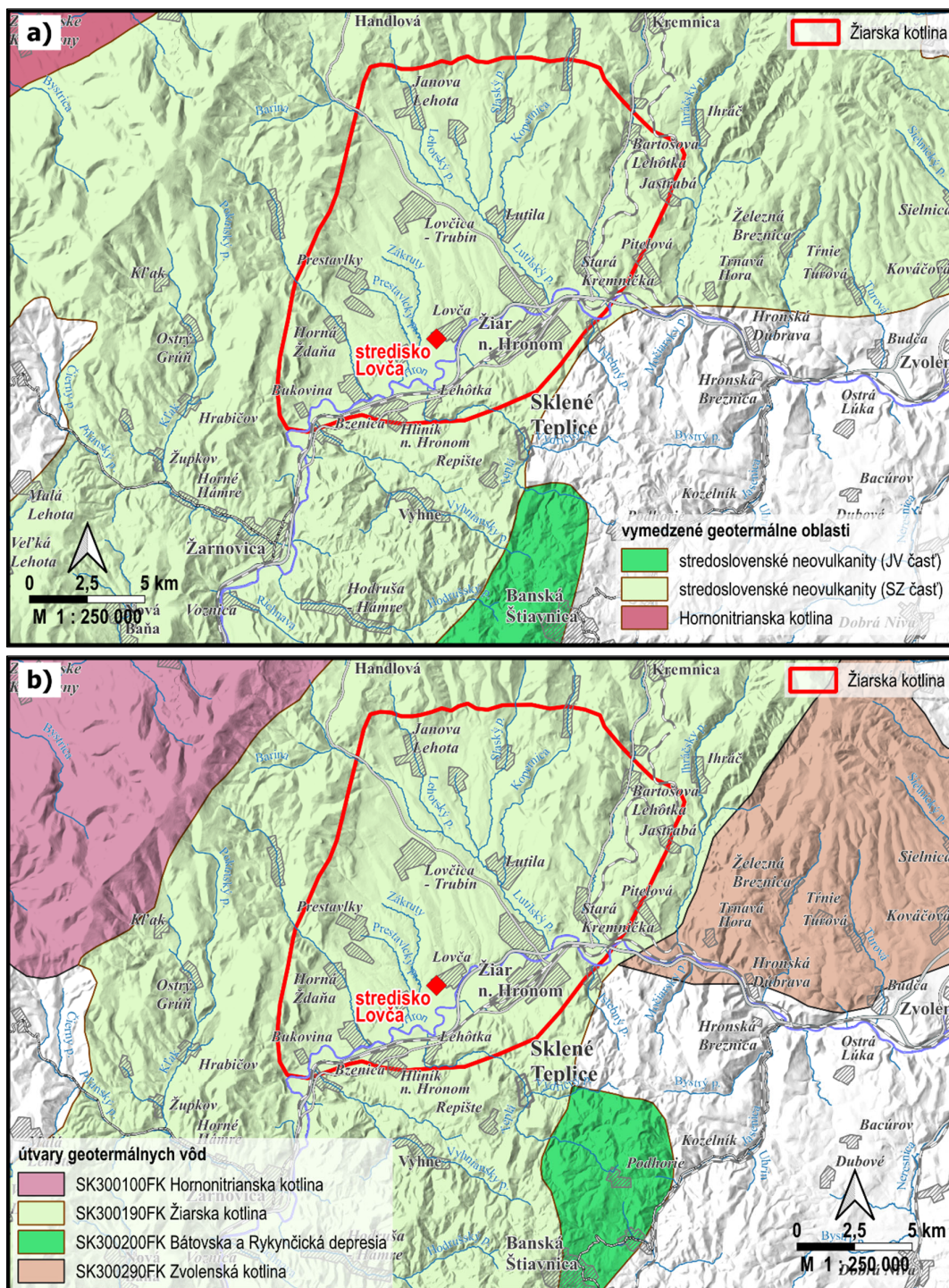
Napriek uvedeným neurčitostiam je na základe komplexnej interpretácie súboru údajov seizmického prieskumu a ich korelácie na existujúce štruktúrne vrty vysoko pravdepodobný predpoklad výskytu triasových karbonátov ako potenciálnych geotermálnych kolektorov v predterciérnom podloží Žiarskej kotliny. Tento predpoklad je v súlade s predchádzajúcimi názormi na hlbinnú stavbu kotliny, novými výsledkami bola pozícia potenciálnych kolektorov detailizovaná. Uvedené horninové súbory sú cieľovým objektom geotermálnych vrtov na lokalite Lovča, ktorá vykazuje podľa súhrnnej interpretácie najlepšie kondície pre lokalizáciu geotermálnych vrtov. V prípade pozitívneho výsledku geotermálnych vrtov v rámci zámeru navrhovanej činnosti, vrátane interpretácie hlbinnnej stavby podľa výsledkov seizmického prieskumu, budú vytvorené podklady pre nové hydrogeotermálne hodnotenie Žiarskej kotliny.

Literatúra :

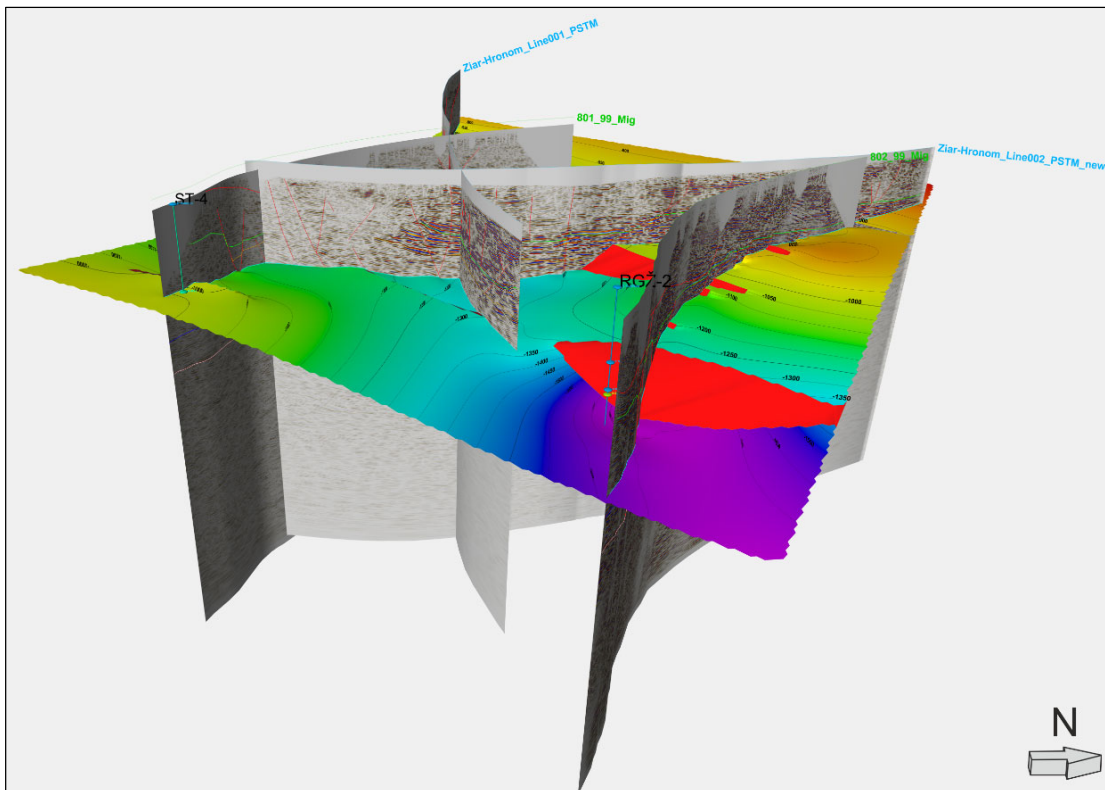
- Forgáč J., Franko O., Fusán O. & Zbořil L. 1971: Komplexné geologické zhodnotenie Žiarskej kotliny. Základný výskum priestorového rozloženia zemského tepla a vyhľadávanie vysoko-termálnych vôd. Čiastková záverečná správa. Št. geol. úst. D. Štúra Bratislava.
- Franko O., Fusán O., Král M., Remšík A., Fendek M., Bodiš D., Drozd V. & Vika K. 1995: Atlas geotermálnej energie Slovenska. Geol. úst. D. Štúra, Bratislava.
- Fusán O., Biely A., Ibrmajer J., Plančár J. & Rozložník L. 1987: Podložie terciéru vnútorných Západných Karpát. Geol. Úst. D. Štúra Bratislava.
- Hók J., Šujan M. & Šipka F. 2014: Štruktúrno-tektonická mapa predterciérneho podložia na území Slovenska. EQUIS spol. s r. o. Bratislava.
- Marcin D., Benková K., Fričovský B., Bodiš D., Bottlik F., Kordík J. & Stríček I. 2020: Hodnotenie stavu geotermálnych útvarov podzemných vôd na území Slovenskej republiky. Geo-logická štúdia. MŽP SR & Št. geol. úst. D. Štúra Bratislava.
- Remšík A., Konečný V., Fendek M., Král M., Lexa J., Hók J., Maďar D., Grand T., Weis K., Šefara J., Vika K. & Drozd V. 2000: Regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie Žiarskej kotliny. MŽP SR & Št. geol. úst. D. Štúra Bratislava.
- Šujan M., Vitaloš R. & Hók J. 2011: Žiarska kotlina – termálne podzemné vody – reinterpretácia seizmických meraní. EQUIS spol. s r. o. Bratislava.
- Šujan M., Rybár S., Hók J., Sliva L., Král M. & Šipka F. 2020: Žiarska kotlina: 2D seizmický prieskum. (Prieskumné územie Lovča – geotermálne vody) Čiastková záverečná správa. EQUIS spol. s r. o. Bratislava.

Obrázok 1 ZaD: Pozícia Žiarskej kotliny a lokality Lovča v geotermálnom členení územia:

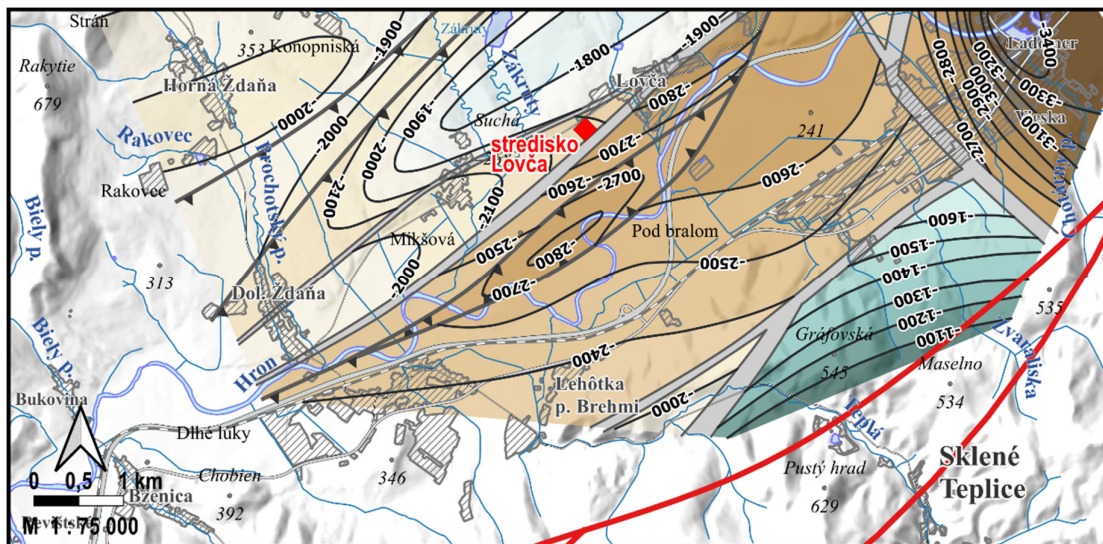
- vymedzené geotermálne oblasti podľa Franko et al. (1995);
- útvary geotermálnych vôd podľa Nariadenia vlády č. 282/2010 Z. z.



Obrázok 2ZaD: Vizualizácia obrazu seizmických rezov a povrchu predterciérneho podložia (pohľad z východu).



Obrázok 3ZaD: Zobrazenie priebehu okrajových zlomov na južnom a juhovýchodnom vymedzení Žiarskej kotliny podľa výsledkov 2D seizmického prieskumu (Šujan et al. 2020) a podľa predchádzajúcich geofyzikálnych údajov (Zbořil in Forgáč et al. 1971).



4. V zmysle požiadavky uvedenej v stanovisku MŽP SR, str. 6, odrážka č. 10: „Do podkapitoly II.16 „Druh požadovaného povolenia navrhovanej činnosti podľa osobitných predpisov“ odporúčame doplniť:

- rozhodnutie o určení, zmene alebo zrušení prieskumného územia podľa § 23, podľa §36 písm. h) zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov. Platnosť rozhodnutia je do 28. 11. 2026, termín začatia výstavby je IV. štvrťrok 2027,
- ohlásenie na vykonávanie geologických prác podľa § 2 ods. 3, §13 ods.1 zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov,
- rozhodnutie podľa § 18 ods. 2 a § 36 ods. 1 písm. k) zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov, ktorým sa schvaľuje záverečná správa s výpočtom množstiev vôd v hydrogeologickom celku.“,

bol v zámere navrhovanej činnosti, kapitola č. II.16 Druh požadovaného povolenia navrhovanej činnosti podľa osobitných predpisov, doplnený nasledujúci text:

- Rozhodnutie o určení, zmene alebo zrušení prieskumného územia podľa § 23, podľa §36, písm. h) zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov.

- Ohlásenie na vykonávanie geologických prác podľa § 2, ods. 3, §13, ods. 1 zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov.
- Rozhodnutie podľa § 18, ods. 2 a § 36, ods. 1, písm. k) zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov, ktorým sa schvaľuje záverečná správa s výpočtom množstiev vôd v hydrogeologickom celku.“

S pozdravom

elektronické podanie
dokument podpísaný zaručeným elektronickým podpisom

Peter Socháň
konateľ

Prílohy:

1. Hydrogeologický posudok „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného zámeru vo vzťahu ku útvaru podzemných geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina“, Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD., august 2026

VYUŽITIE GEOTERMÁLNEJ ENERGIE NA VÝROBU TEPLA V STREDISKU LOVČA

--

**VYHODNOTENIE VPLYVU NAVRHOVANÉHO ZÁMERU VO VZŤAHU KU
ÚTVARU PODZEMNÝCH GEOTERMÁLNYCH VÔD
SK300190FK ŽIARSKA KOTLINA**

(Hydrogeologický posudok pre potreby EIA)

august 2026

Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku
Lovča. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného zámeru vo vzťahu
ku útvaru podzemných geotermálnych vôd SK300190FK
Žiarska kotlina

Druh geologických prác:

Hydrogeologický posudok

Objednávateľ:

PW Geoenergy a.s.
Pri Rajčianke 5891/4B
010 47 Žilina
SR

Garant posudku:

RNDr. Peter Malík, CSc.

Vypracoval:

Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD.

Vypracované v:

Bratislava

Vypracované ku:

August 2026

**Schvaľujúci štatutárny
orgán objednávateľa:**

(podpis / pečiatka objednávateľa)

Rozdělovník:

- 1) 3 exempláře PW Geoenergy a.s.
- 2) Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (Geofond ŠGÚDŠ)
- 3) RNDr. Peter Malík, CSc.

Obsah

1	Vymedzenie posudkovej činnosti	1
2	Vymedzenie záujmového územia	3
2.1	Charakteristika navrhovanej činnosti	3
2.2	Miestopisné vymedzenie územia.....	4
2.2.1	Miestopisné vymedzenie geotermálneho strediska Lovča	4
2.2.2	Miestopisné vymedzenie hydrogeotermálnej štruktúry	5
2.2.3	Geologické vymedzenie	6
2.2.4	Geomorfologické vymedzenie	6
2.2.5	Regionálne hydrogeotermálne vymedzenie	7
3	Hydrogeotermálna charakteristika územia	10
3.1	Geologická stavba	10
3.1.1	Všeobecná geologická charakteristika	11
3.1.2	Hydrogeotermálna preskúmanosť územia.....	20
3.2	Hydrogeologická charakteristika.....	22
3.2.1	Všeobecná hydrogeologická funkcia komplexov	22
3.2.2	Hydraulické parametre horninového prostredia	23
3.2.3	Hydrogeotermálne štruktúry	25
3.3	Hydrogeotermická charakteristika územia	29
3.3.1	Priestorová distribúcia geotermického poľa.....	29
3.3.2	Model odhadu geotermického profilu Zámeru vrtu GTŽ-1	34
3.4	Hydrogeochemická charakteristika	41
3.5	Termochemický model Žiarskej kotliny	49
3.5.1	Východzí stav: predpoklady a situácia	50
3.5.2	Silikátová geotermometria	51
3.5.3	Zmiešavací model X-Si-H (silikáty – entalpia).....	57
3.5.4	Implikácie adiabatického varu v žiarskej hydrogeotermálnej štruktúre.....	61

4	Posúdenie vplyvu dlhodobej produkcie na kvantitatívny stav rezervoárového systému a zdrojov geotermálnej energie	65
4.1	Koncept rezervoárovej odozvy v rezervoárovom manažmente	65
4.2	Špecifikácia produkčného systému	67
4.2.1	Technická špecifikácia produkčnej schémy	67
4.2.2	Hodnotenie reinjektážnej sústavy vzhľadom na princípy rezervoárového manažmentu	69
4.3	Modely rezervoárovej odozvy	71
4.3.1	Špecifikácie variantov modelu	73
4.3.2	Analytické modely rezervoárovej odozvy	75
4.3.3	Implikácie variantu RO1	78
4.3.4	Implikácie variantu RO2	85
4.3.5	Zhodnotenie analytických modelov rezervoárovej odozvy	91
5	Posúdenie vplyvu dlhodobej produkcie na kvalitatívny stav rezervoárového systému a zdrojov geotermálnej energie	92
5.1	Energetická bilancia rezervoárového prostredia	92
5.1.1	Katalóg zdrojov a zásob geotermálnej energie	92
5.1.2	Udržateľná rezervoárová kapacita	96
5.1.3	Parametre udržateľnosti rezervoárovej produkcie	98
5.1.4	Vplyv produkčnej stratégie na energetický stav a energetickú kapacitu rezervoárového prostredia	104
5.2	Vyjadrenie k termochemickej odozve rezervoárového prostredia	105
6	Posúdenie produkčnej schémy vo vzťahu k zásade DNSH	109
6.1	Preskúmanie realizácie a činnosti produkčnej schémy podľa nariadenia DNSH	110
6.1.1	Prínos k zmierneniu zmien klímy	111
6.1.2	Adaptácia na zmeny klímy	113
6.1.3	Udržateľné využívanie a ochrana vodných a morských zdrojov	114
6.1.4	Prechod na obehové hospodárstvo	116
6.1.5	Prevencia a kontrola znečisťovania	116
6.1.6	Ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémov	118

6.2	Hodnotenie produkčnej schémy geotermálneho strediska z pohľadu DNSH	121
7	Nezáväzné odporúčania pre rezervoárový manažment geotermálneho strediska Lovča 122	
7.1	Stopovacie skúšky	123
7.1.1	Opodstatnenie stopovacích skúšok.....	123
7.1.2	Selekcia stopovačov v lokálnych podmienkach.....	124
7.1.3	Realizácia stopovacích skúšok a limity.....	125
7.2	Rezervoárový monitoring	125
7.2.1	Geofyzikálne metódy monitoringu.....	127
7.3	Hydrogeochemický monitoring.....	130
8	Vyjadrenie.....	133
9	Záver	138
10	Zoznam použitej literatúry	142

1 VYMEDZENIE POSUDKOVEJ ČINNOSTI

1. Spracovanie posudku:

Garant posudku: RNDr. Peter Malík, CSc.

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

2. Číslo osvedčenia:

Garant posudku je odborne spôsobilou osobou na vykonávanie geologických prác v oblasti geologického výskumu, hydrogeologického prieskumu (č. 79/1994) a geologického prieskumu životného prostredia.

Spracovateľ posudku je odborník so špecializáciou na rezervoárové inžinierstvo v oblasti zdrojov geotermálnej energie.

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 využívania zdrojov geotermálnej energie za účelom výroby tepla na lokalite (stredisku) Lovča 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:

Predložené posudzovanie je založené na podkladoch dokumentu „Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča. Zámer navrhovanej činnosti podľa Zákona NR SR č. 24/2006 Z.z. o posudzovaní vplyvov na životné prostredie“ (ďalej ako „Zámer“), ktorý ako navrhovateľa projektového zámeru identifikuje spoločnosť PW Geoenergy a.s. (IČO: 53820843) so sídlom: Pri Rajčianke 8591/4B, 010 47 Žilina (ďalej ako „Navrhovateľ“).

Predmetom posudzovania je návrh realizácie dubletového systému produkcie a reinjektáže zdrojov geotermálnej energie za účelom výroby tepla na lokalite Lovča zhotovením vrtov GTŽ-1 a GTŽ-2 na južnom okraji obce Lovča. Dotknuté územie je z hľadiska vlastníckych vzťahov relevantných parciel vo vlastníctve Navrhovateľa a súkromnej osoby, ktorá má s Navrhovateľom uzatvorenú nájomnú zmluvu. Vo výslednom variantnom riešení Variant 1 (V1) je účelom navrhovanej činnosti výroba tepla s využitím geotermálnej energie s očakávaným inštalovaným výkonom do 20 MWt s následnou dodávkou tepla v uzavretom okruhu do zariadení určených na výrobu tepla.

6. Cieľ posudzovania:

Cieľom predkladaného hydrogeologického posudku je, na základe dostupných a relevantných údajov, vrátane Zámeru, posúdenie krátkodobej, respektíve dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie z rezervoárového prostredia vymedzenej hydrogeotermálnej štruktúry depresie Žiaru nad Hronom (MAŤO – ŠUJAN, 2014) ako časti útvaru geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina (MARCIN ET AL., 2020), na kvalitatívne a kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia a lokálne cirkulačno-akumulačné hydrogeotermálne systémy relevantné k vzťahu s prírodnými liečivými vodami a termominerálnymi vodami na lokalite Sklené Teplice respektíve Vyhne. Pri zostavení posudku je do úvahy braný technický stav definovaný Zámerom pre uzavretý okruh dubletu produkčného (P) a reinjektážneho (I) vrtu v schéme $PI = 1 : 1$.

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.

Navrhovanou činnosťou je vybudovanie dubletovej sústavy, ako súčasti produkčnej infraštruktúry na zabezpečenie celoročnej dodávky energie pre výrobu tepla s očakávaným výkonom do 20 MWt v schéme $PI = 1 : 1$. V súvislosti s dobrými princípmi aplikačnej praxe je aj pri očakávanom priemyselnom využití tepelnej energie možné predpokladať sezónne oscilačné odbery geotermálnej energie z rezervoárového prostredia, v závislosti na energetických požiadavkách odberného miesta.

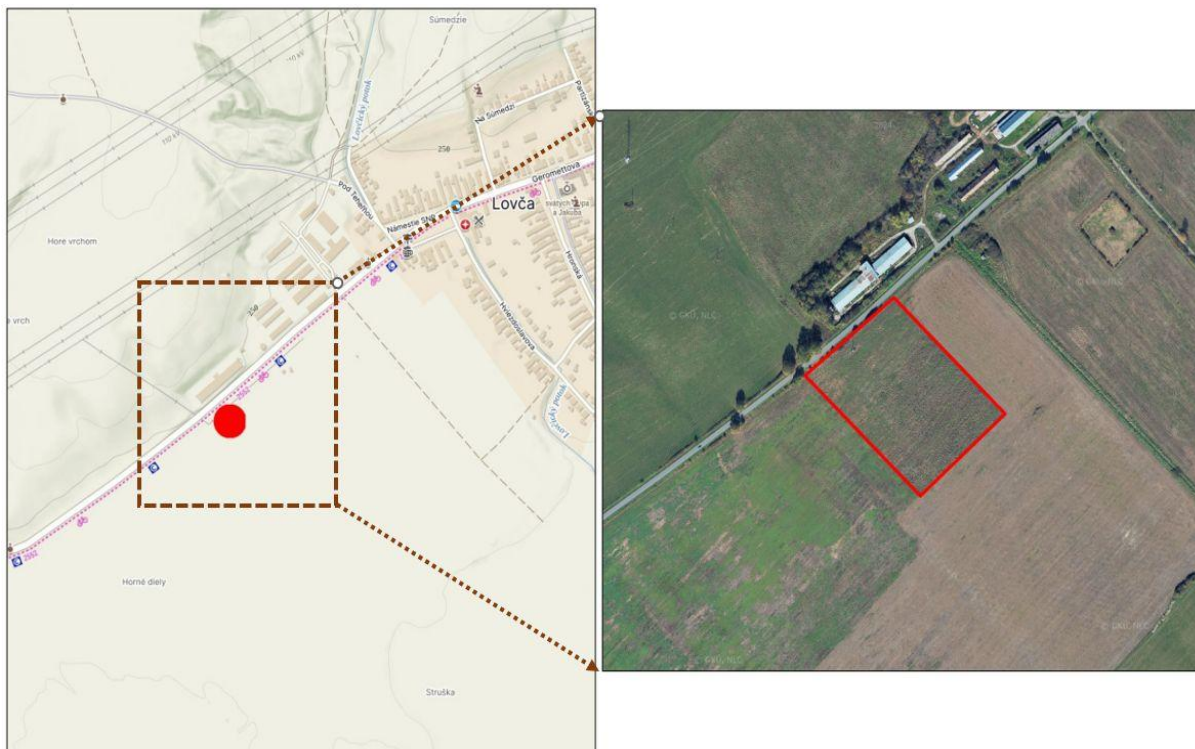
Reinjektáž predstavuje štandardný postup pri využívaní zdrojov geotermálnej energie, kde v dôsledku geologických (napr. geometria rezervoáru), hydrogeologických (napr. uzavreté systémy, tlaková bariéra), hydrogeochemických (napr. koncentrácie kovov), termodynamických / fázových (napr. povaha parnej frakcie), alebo vonkajších (napr. subsidencia) faktorov je nevyhnutné, alebo žiaduce vtláčanie odpadového tepla a rezervoárového média späť do horninového prostredia (napr. GRANT – BIXLEY, 2011; WATSON, 2013; KAMILA ET AL., 2021).

2.2 Miestopisné vymedzenie územia

2.2.1 Miestopisné vymedzenie geotermálneho strediska Lovča

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

- kraj: Banskobystrický (600)
- okres: Žiar nad Hronom (613)
- obec: Lovča (517020)
- katastrálne územie: Lovča (833169)
- relevantné parcely: KN-C č. 2372, 2373/1, 2373/2



Obrázok 2.1 Pozícia plánovaného geotermálneho strediska Lovča podľa Zámeru.

2.2.2 Miestopisné vymedzenie hydrogeotermálnej štruktúry

Pre účely hydrogeologického posudku je nevyhnutné posudzovať **interakciu činnosti geotermálneho strediska Lovča** s relevantným rezervoárovým prostredím, ktoré predstavuje:

- **čiasťková depresná (grábenová) morfoštruktúra žiarskeho bloku;**
- **sklenoteplická hydrogeotermálna štruktúra**, ktorej zachovanie dobrého kvalitatívneho a kvantitatívneho stavu je vzhľadom na prírodné liečivé zdroje kúpeľov Sklené Teplice, prirodzenou prioritou;
- **útvár podzemných geotermálnych vôd Žiarska kotlina**

Sklenoteplická hydrogeotermálna štruktúra je klasifikovaná ako otvorená (FRANKO ET AL., 2003), pričom:

- infiltračná oblasť: južné a východné svahy Kremnických vrchov, južné svahy Žiaru
- tranzitno-akumulačná oblasť: Žiarska kotlina a predkenozoické podložie Štiavnických vrchov
- výverová oblasť: dolina potoka Teplá

V súlade s Vyhláškou MZ SR 57/2005 Z.z. z 31. januára 2005, ktorou sa vyhlasujú ochranné pásma prírodných liečivých zdrojov v Sklených Tepliciach, sú tie v II. stupni vymedzené v katastrálnom území obcí: Sklené Teplice (855871), Repište (852031), Bzenica (807761), Dolná Ždaňa (811947), Dolná Trnávka (811921), Hliník nad Hronom (816191), Lovča (833169), Lehôtka pod Brehmi (831212), Horné Opatovce (874515), Žiar nad Hronom (874370), Šášovské Podhradie (860654), Pitelová (846724), Jalná (821942), Banská Štiavnica (801470), Teplá (847330), Žákyl (847348) a Močiar (837989). Ochranné pásmo II stupňa, ktorého severný okraj korešponduje s tokom rieky Hron.

Návrh geotermálneho strediska Lovča sa nachádza severne od vonkajšej hranice II. stupňa ochranných pásiem, zároveň však priestorovo zodpovedá periférii vymedzenej infiltračnej a tranzitno-akumulačnej oblasti, t.j. **plánované geotermálne stredisko priamo nezasahuje do vymedzeného ochranného pásma.**

2.2.3 Geologické vymedzenie

V zmysle regionálneho geologického členenia (VASS ET AL., 1998) je záujmové územie relevantného okolia strediska Lovča vymedzené nasledovne:

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

2.2.4 Geomorfologické vymedzenie

Z geomorfologického hľadiska (MAZÚR – LUKNIŠ, 1986) je relevantné okolie vymedzené smerom na sever podľa:

- sústava: Alpsko-himalájska
- podsústava: Karpaty
- provincia: Západné Karpaty
- subprovincia: Vnútorné Západné Karpaty
- celok: Žiarska kotlina
- podcelok: -
- časť: -
- oblasť: Slovenské stredohorie;

v smere na juh od geotermálneho strediska:

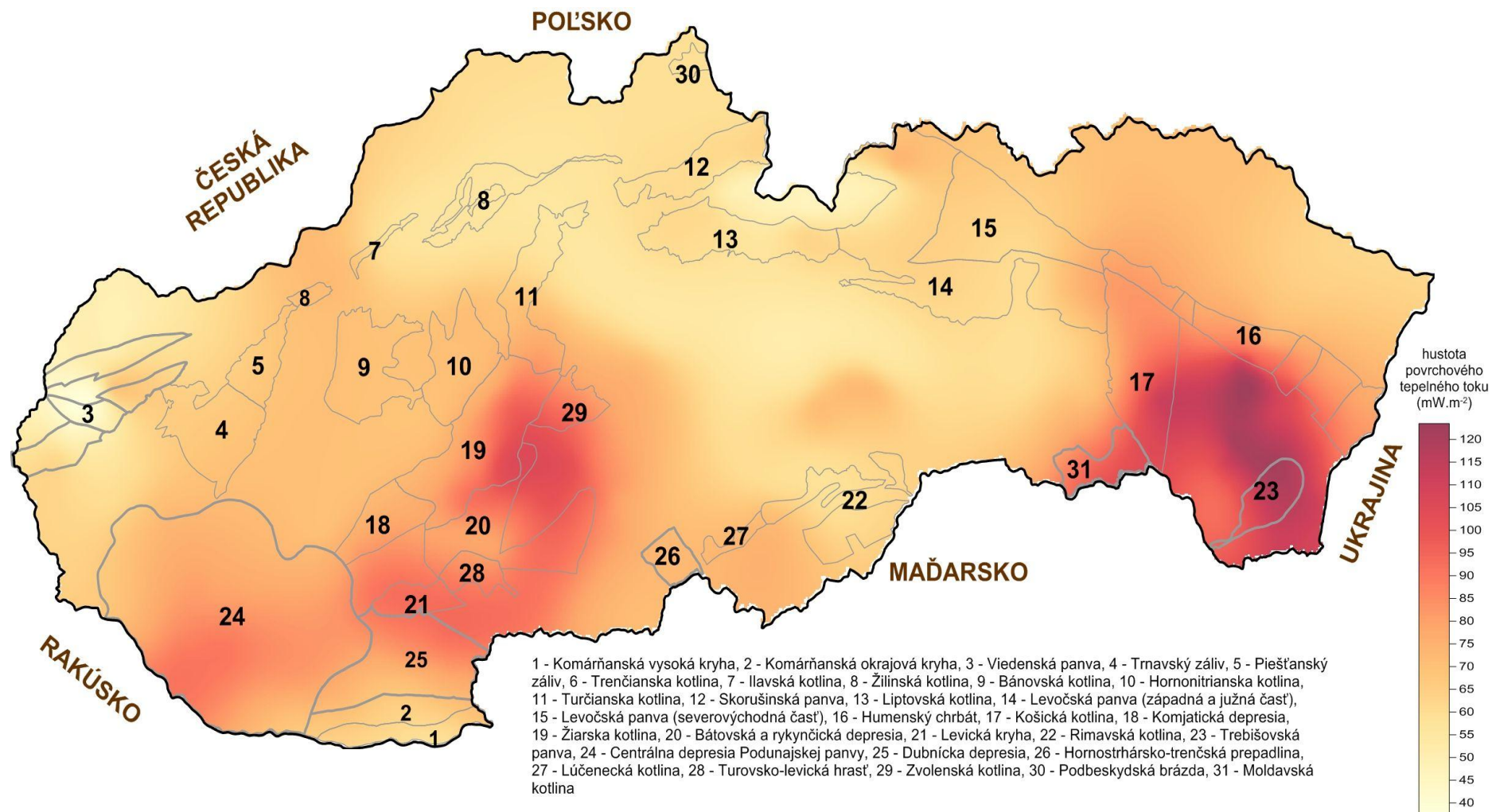
- sústava: Alpsko-himalájska
- podsústava: Karpaty
- provincia: Západné Karpaty
- subprovincia: Vnútorné Západné Karpaty
- celok: Štiavnické vrchy
- podcelok: Hodrušská hornatina
- časť: Vyhnianska brázda (len línia Sklené Teplice - Vyhne)
- oblasť: Slovenské stredohorie;

2.2.5 Regionálne hydrogeotermálne vymedzenie

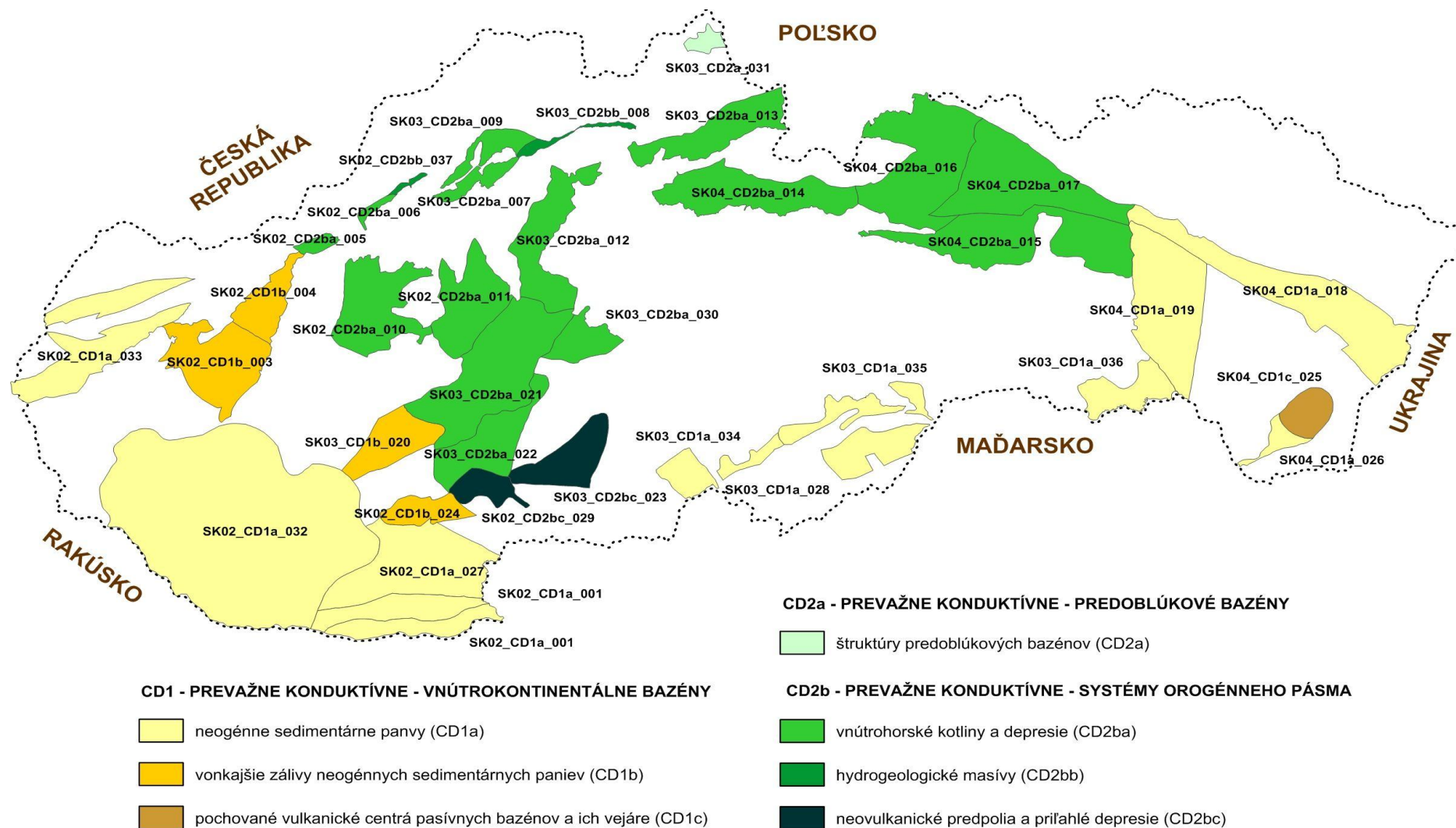
V rámci vymedzenia útvarov geotermálnych vôd na Slovensku (MARCIN ET AL., 2016, 2020) je ako predmetné územie strediska Lovča, tak aj sklenoteplická hydrogeotermálna štruktúra súčasťou útvaru podzemných geotermálnych vôd **SK300190FK Žiarska kotlina**. Vymedzenie nadobúda účinnosť aj Nariadením vlády 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 (Obrázok 2.2).

Z pohľadu koncepcnej (geothermal play-type) charakteristiky (MOECK, 2014; MOECK ET AL., 2019, 2020), ktorá je zároveň v krajinách EÚ odporúčaná pri hodnotení výskumu a prieskumu, ako aj plánovania využívania zdrojov geotermálnej energie (napr. HERMS ET AL., 2025, 2026) je relevantné okolie lokality Lovča v rámci Žiarskej kotliny (Obrázok 2.3) klasifikované nasledovne (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025, 2026):

- základný typ: konduktívne a prevažne konduktívne koncepcie – CD2
- subtyp: koncepcie orogénneho pásma – CD2b
- regionálny typ: vnútrohorské kotliny a depresie – CD2ba
- kód v rámci európskeho geotermálneho katalógu: SK03_CD2ba_021



Obrázok 2.2: Vymedzenie útvarov geotermálnych vód na Slovensku. Stav k obdobiu 2025. Zdroj: Marcin et al. (2020), Fričovský et al. (2025).



Obrázok 2.3: Pozícia Žiarskej kotliny na vymedzených geotermálnych koncepciách na Slovensku. Zdroj: Fričovský et al. (2025, 2026)

3 HYDROGEOTERMÁLNA CHARAKTERISTIKA ÚZEMIA

3.1 Geologická stavba

Predmetné územie je súčasťou pravdepodobne širšie rozšírenej (vrchnej alebo spodnej) sklenoteplickej hydrogeotermálnej štruktúry (REMŠÍK ET AL., 2000), respektíve cirkulačno-akumulačnej sklenoteplickej štruktúry fatrika / série Veľkého boku (FRANKO ET AL., 2003; DZÚRIK ET AL., 2023). **Z morfoštruktúrneho hľadiska ale ide o tektonicky výrazne tektonicky segmentované systémy predkenozoického podložia, naďalej s otáznou hydraulickou, alebo termickou spojitosťou** v rámci vymedzených tektonických jednotiek, a vôbec ich rozšírenia, respektíve medzi samotnými tektonickými (a rezervoárovými) jednotkami (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). Najvýraznejšie sa táto neistota prejavuje v interpretovaní predkenozoickej stavby, pri ktorej existujú dva názorové prúdy:

- *regionálne hydrogeotermálne hodnotenie* (REMŠÍK ET AL., 2000), ktoré následne prebral aj *stochastický katalóg zdrojov a zásob geotermálnej energie Slovenska* (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) na základe konštrukcie morfoštruktúrnych máp (napr. KONEČNÝ ET AL., 2000A) podľa interpretácie geofyzikálnych podkladov a ich korelácie s geologickou stavbou okolia **predpokladá vývoj karbonátov hronika** (Obrázok 3.1, 3.2) v obrátenom vrstvovom slede, t.j. v podloží nasunutého permsko-vrchnotriasového vývoja, ktorý vystupuje v podloží kenozoickej výplne kotliny
- *reinterpretácia ochranných pásiem* (FRANKO ET AL., 2003) na základe hydrogeologického monitoringu a bilancie; respektíve *hydrogeotermálne štúdie* s využitím reinterpretácie seizmických meraní za účelom prípravy podkladov *pre využívanie geotermálnej energie na lokalite Lovča* a v jej relevantnom okolí (MAŤO – ŠUJAN, 2014; DZÚRIK ET AL., 2023) **nepredpokladajú vývoj karbonátov hronika** v tejto časti Žiarskej kotliny, a redukujú vertikálnu štruktúru celého geotermálneho systému na karbonáty série Veľkého boku v podloží jeho vrchno-triasového vývoja a siliciklastík hronika (Obrázok 3.3).

Keďže v grábenovej časti Žiarskej kotliny prakticky neexistuje relevantný a dostatočne hlboký štruktúrny, prieskumný, alebo hydrogeotermálny vrt, považujeme túto situáciu naďalej

za predmet neistoty do momentu, kým bude geologická stavba relevantne overená realizovanými vrtnými prácami.

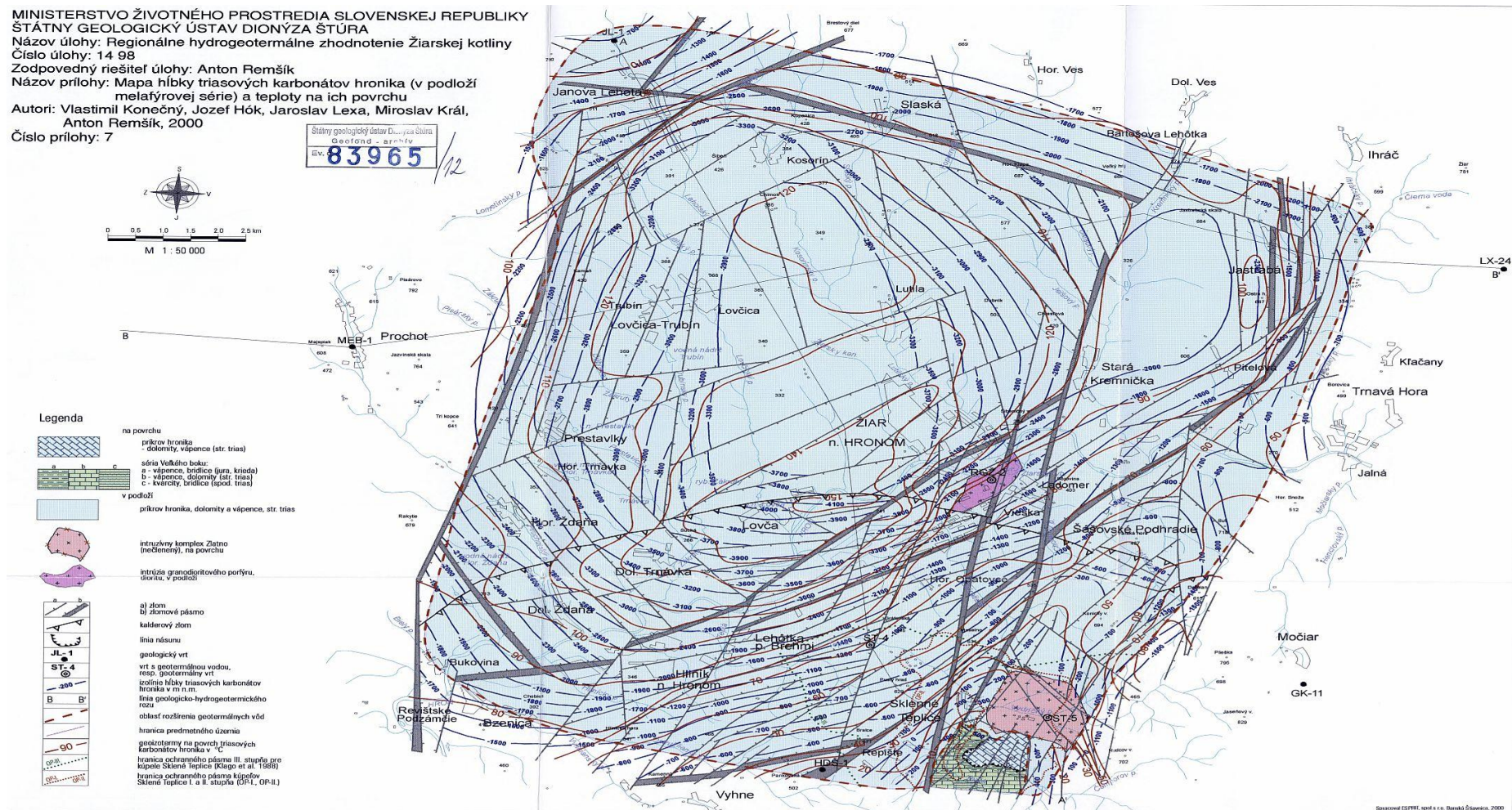
3.1.1 Všeobecná geologická charakteristika

Ak berieme do úvahy reliéf kenozoickej výplne kotliny, jej severnú časť predstavuje tektonicky segmentovaný (centrálny) gráben, ktorého čiastkové morfoštruktúry (syn. subgrábeny, subštruktúry) predstavujú tektonické depresie (MAŤO – ŠUJAN, 2014) predovšetkým na jeho okraji a jeho tektonickom styku s okolím (Obrázok 3.3). Súčasťou tejto morfotektonickej stavby je aj čiastková morfoštruktúra žiarskeho bloku.

V kenozoickej výplni Žiarskej kotliny je podľa viacerých autorov (KONEČNÝ ET AL., 1998; LEXA ET AL., 1998; VASS, 2002) možné identifikovať tri základné komplexy vyznačujúce sa rozdielnou genézou a s ňou spojenou litologickou výplňou. Paleogénne sedimenty, ak v kotline vystupujú, zrejme predstavujú len reliktné, priestorovo izolované polohy - šupiny bazálnych pieskovcov a polymiktných konglomerátov s prechodom do prevažne-ílovcových facií, ktorých hrúbka je vzhľadom na absolútnu hrúbku kenozoického komplexu zanedbateľná. Neogénna časť kenozoickej výplne je na báze tvorená pravdepodobne fluvio-limnickým a prevažne-hruboklastickým vývojom, ktorý postupne prechádza do komplexu bádenských až sarmatských vulkanosedimentárnych komplexov (andezitové a ryolitové lávové prúdy, pyroklastiká, k juhu s prevahou častokrát redeponovaných pyroklastík nad lávovými prúdmi). Vrchnú časť komplexu predstavujú vo všeobecnosti panónske limnické a fluvio-limnické sedimenty s nahor klesajúcim podielom pyroklastík a lávových prúdov (výrazné zastúpenie majú spevnené aj nespevnené formy ílovej až piesčitej, menej štrkovej frakcie, tufy, tufity).

Pri hodnotení hrúbky kenozoického komplexu ide o odhadovaný rozsah 2900 – 3100 m (Obrázok 3.4) modelovaný za predpokladu superpozície permsko-spodnotriasového vývoja hronika voči strednotriasovému karbonátovému komplexu v dôsledku jeho tektonického presunu k severovýchodu (REMŠÍK ET AL., 2000; KONEČNÝ ET AL., 2000A,B; FRIČOVSKÝ ET AL., 2025), až 3300 – 3400 m, ktorý vychádza z interpretácie spodnotriasového vývoja hronika bez nadložných strednotriasových karbonátov (ŠUJAN ET AL., 2011; MAŤO – ŠUJAN, 2014; DZÚRIK ET AL., 2023). Všetky názory sú založené na posúdení geofyzikálnych (gravimetria, odporové merania, seizmické merania) dát (ZBOŘIL ET AL., 1983; MAĐAR ET AL., 1999; REMŠÍK ET AL., 2000; ŠUJAN ET AL., 2011, 2020) bez možnosti korelácie s vrtními.

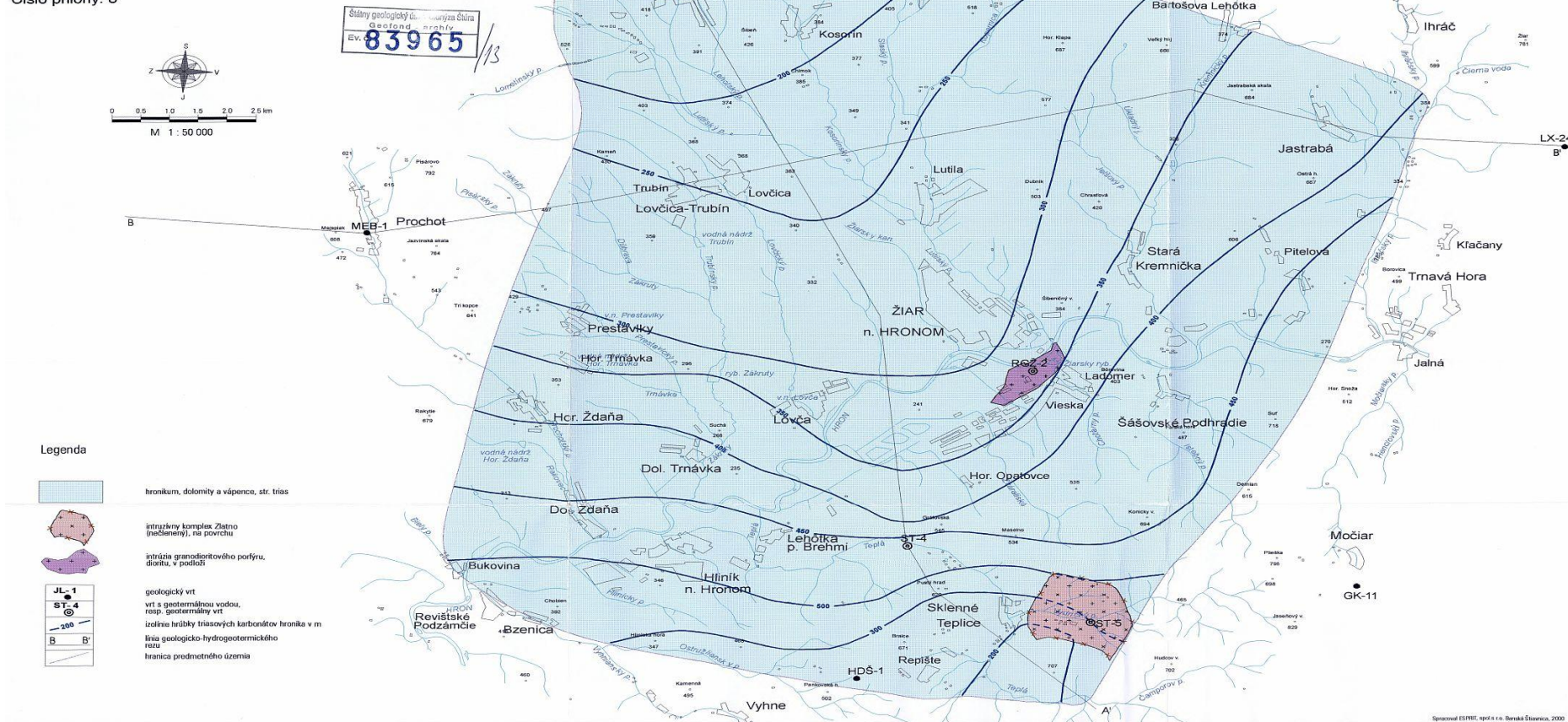
Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného zámeru vo vzťahu ku útvaru podzemných geotermálnych vód SK300190FK Žiarska kotlina.



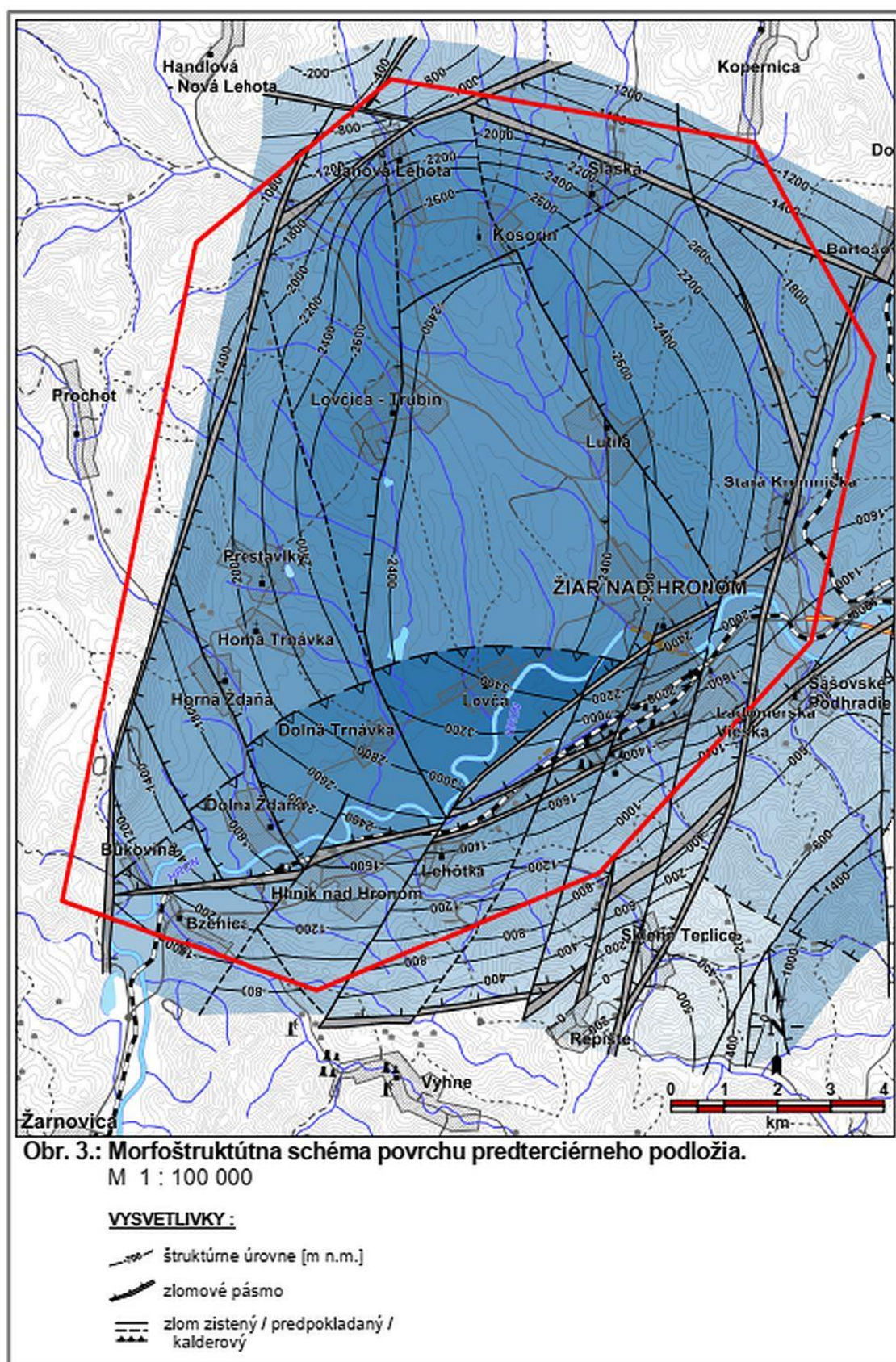
Obrázok 3.1: Mapa hĺbky triasových karbonátov hronika (v podloží melafýrovej série) a teploty na ich povrchu. Zdroj: Konečný et al. (2000a).

Využitie geotermálnej energie na výrobu tepla v stredisku Lovča. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného zámeru vo vzťahu ku útvaru podzemných geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina.

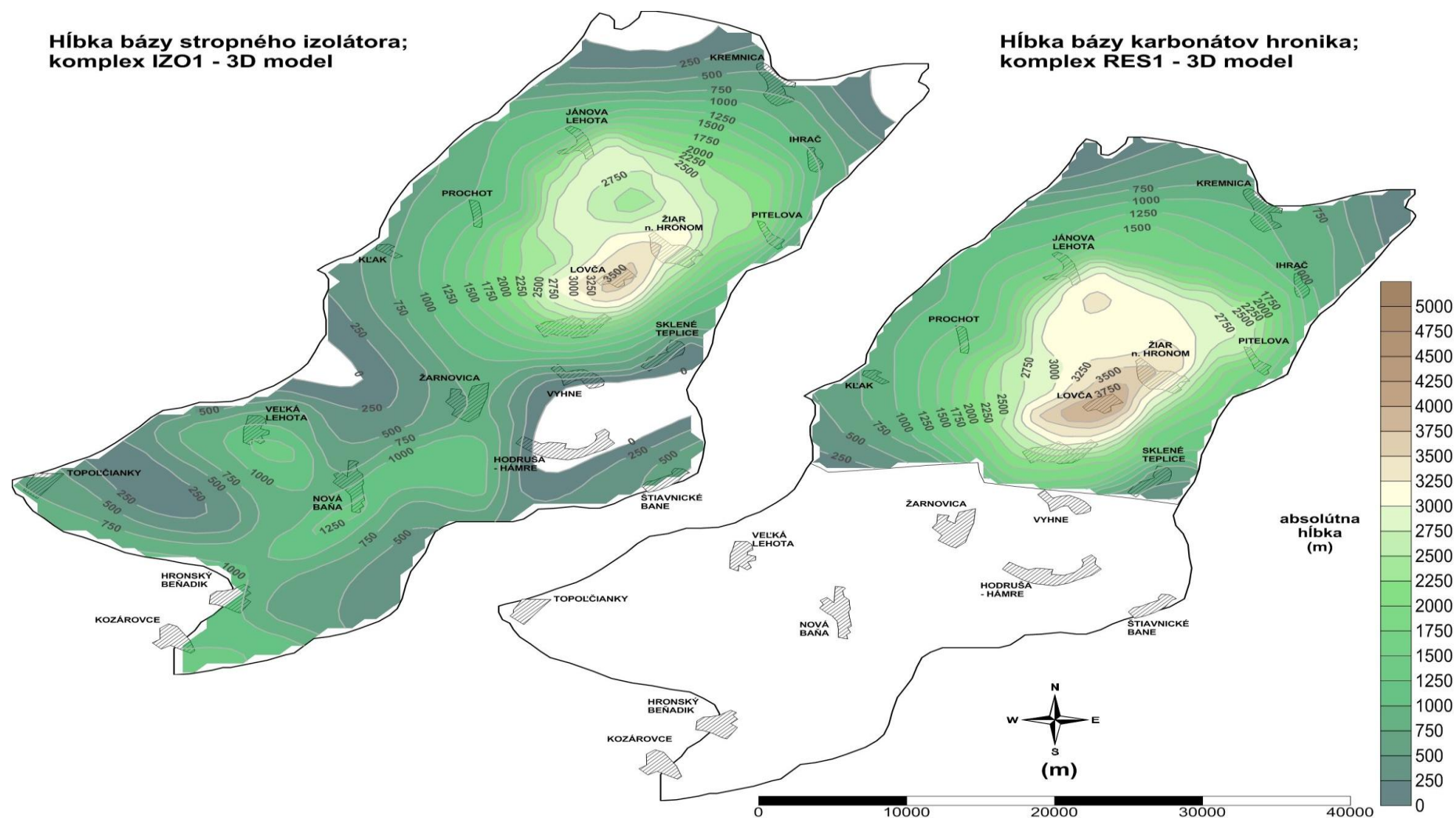
MINISTERSTVO ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SLOVENSKEJ REPUBLIKY
ŠTÁTNY GEOLOGICKÝ ÚSTAV DIONÝZA ŠTÚRA
Názov úlohy: Regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie Žiarskej kotliny
Číslo úlohy: 14 98
Zodpovedný riešiteľ úlohy: Anton Remšík
Názov prílohy: Mapa hrúbky triasových karbonátov hronika
(v podloží melafýrovej série)
Autori: Vlastimil Konečný, Jozef Hók, Jaroslav Lexa, 2000
Číslo prílohy: 8



Obrázok 3.2: mapa hrúbky triasových karbonátov hronika (v podloží melafýrovej série). Zdroj: Konečný et al. (2000b).



Obrázok 3.3: Morfoštruktúrna schéma povrchu predterciérneho podložia. Zdroj: Šujan et al. (2011), Maťo – Šujan (2014).

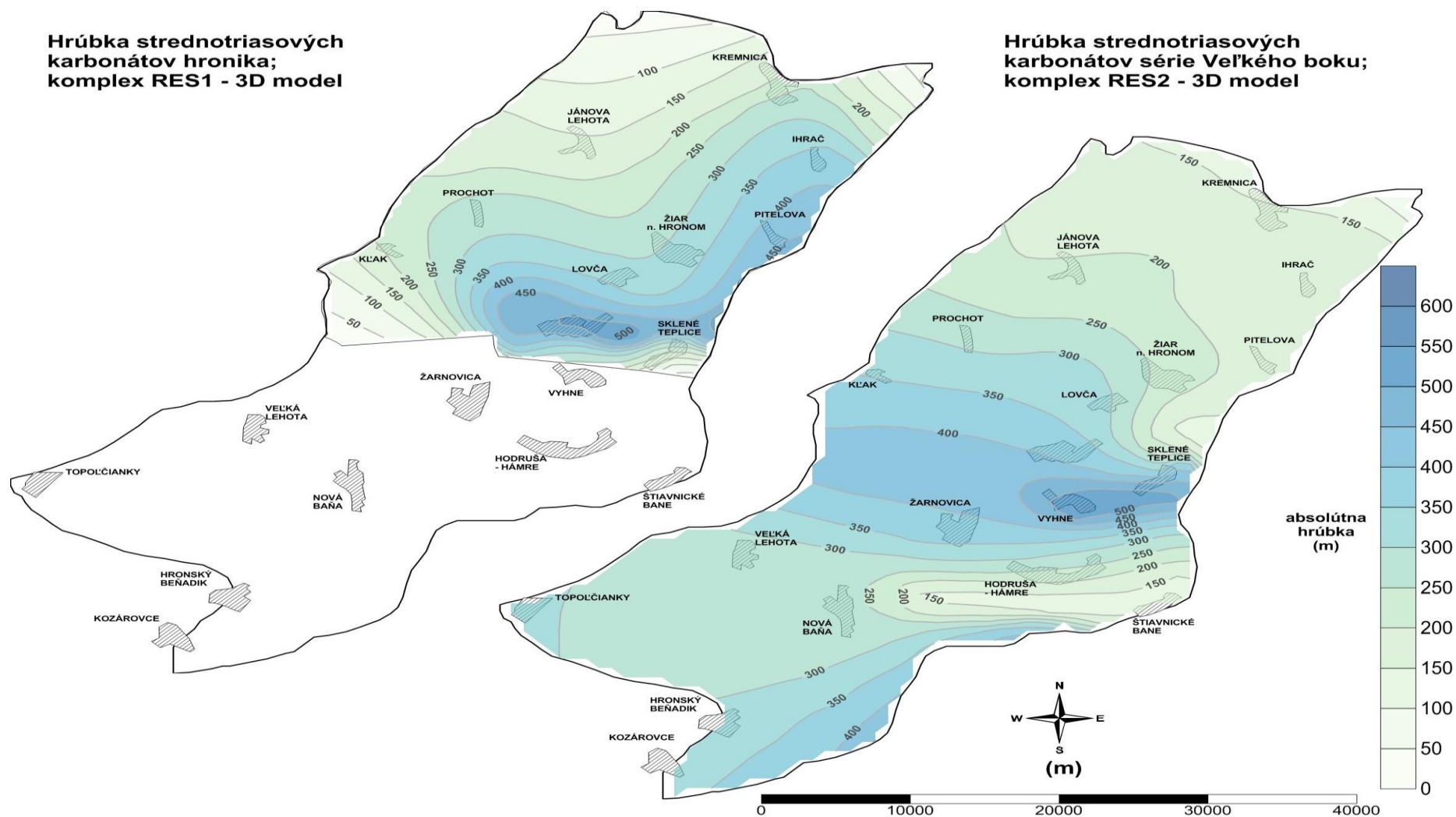


Obrázok 3.4: Interpretácia bázy komplexu IZO1 (vulkanosedimentárna kenozoická výplň Žiarskej kotliny + melafýrová séria hronika) a strednotriasového komplexu karbonátov hronika RES1 v atektonickom modeli Žiarskej kotliny pre stochastický model katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie na Slovensku. Zdroj: Fričovský et al. (2025).

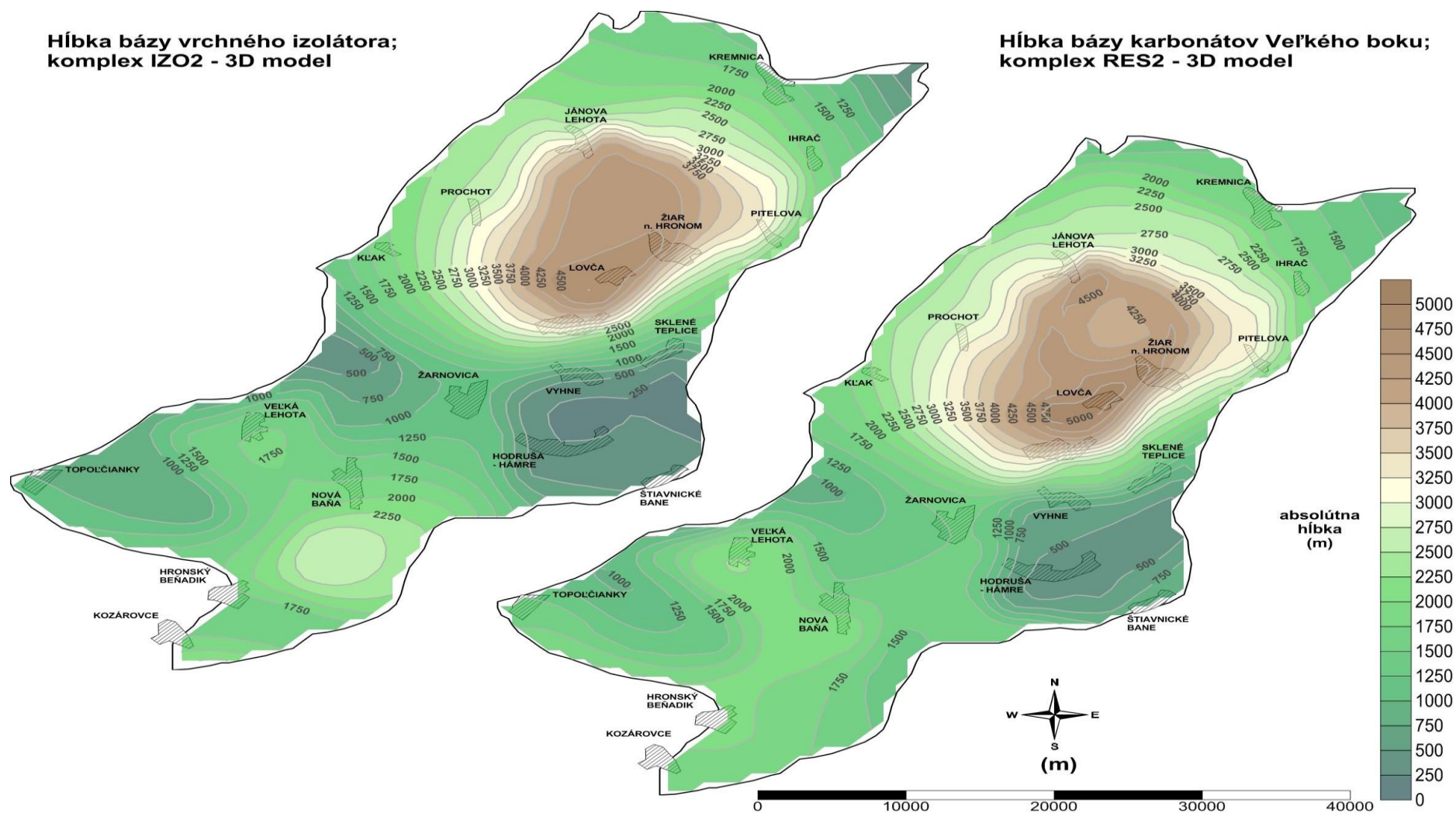
Rovnako zásadné rozdiely sú aj v názore na vývoj **komplexov hronika** v oblasti Lovče. Geologický model využitý pre stochastický model katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie na Slovensku (Obrázok 3.4 a 3.5) predpokladá v oblasti strop karbonátov v hĺbke $z_{(T,RES1)} = 3\,400 - 3\,600$ mpt, bázu v hĺbke $z_{(B,RES1)} = 3\,700 - 3\,800$ mpt s hrúbkou $\Delta z_{(RES1)} = 300 - 350$ m (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). V centre kotliny bolo hronikum dokumentované najmä vrtom JL-1 Jánová Lehota (BIELY ET AL., 1977). Analogicky s ním je možné očakávať vývoj strednotriasových karbonátov v spodnom a vrchnom subkomplexe (hlavný dolomit) pravdepodobne separovaných kössenskými vrstvami; pri obrátenom vrstvovom slede s permsko-spodnotriasovým vývojom drôb, piesčitých drôb až bridlíc s polohami paleobazaltov (BIELA, 1978; BIELY ET AL., 1977). Permsko-spodnotriasový vývoj, dokumentovaný v okolí tzv. sklenoteplického ostrova (KONEČNÝ ET AL., 1998) tvorí zrejme v normálnom slede nižnobocianske, maluzinské a benkovské súvrstvie. Procesy formovania superpozície permsko-spodnotriasového vývoja nad karbonatickými komplexami hronika boli pomerne dobre opísané na základe kinematickej analýzy horninových komplexov (napr. HÓK ET AL., 2013).

V podloží hronika vystupuje **komplex série Veľkého boku**, ktorý je zastúpený krížňanským príkrovom. Jeho ideálny profil tvorí bazálne lúžňanské (bridlice, kvarcity) a verfénske (pestrofarebné piesčité bridlice) súvrstvie spodného triasu, s vývojom komplexu karbonátov a rauwakov strednotriasového veku (MAŤO – ŠUJAN, 2014). V geologickom modeli katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie je komplex označený ako RES2, tzv. spodná rezervoárová jednotka (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). Vo vrstevnom slede následne vystupujú pestré bridlice, pieskovce, ílovité dolomity a evapority karpatského keuperu s variabilnou mierou metamorfózy a skarnovatenia (vrchný trias), a jursko až spodnokriedový profil vápencov, radiolaritov, kremitých vápencov, slieňovcov s variabilnou mierou bridličnatosti a metamorfózy (MAŤO – ŠUJAN, 2014). Táto časť série Veľkého boku je označovaná v katalógu ako IZO2, tzv. spodný komplex izolátorov (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025).

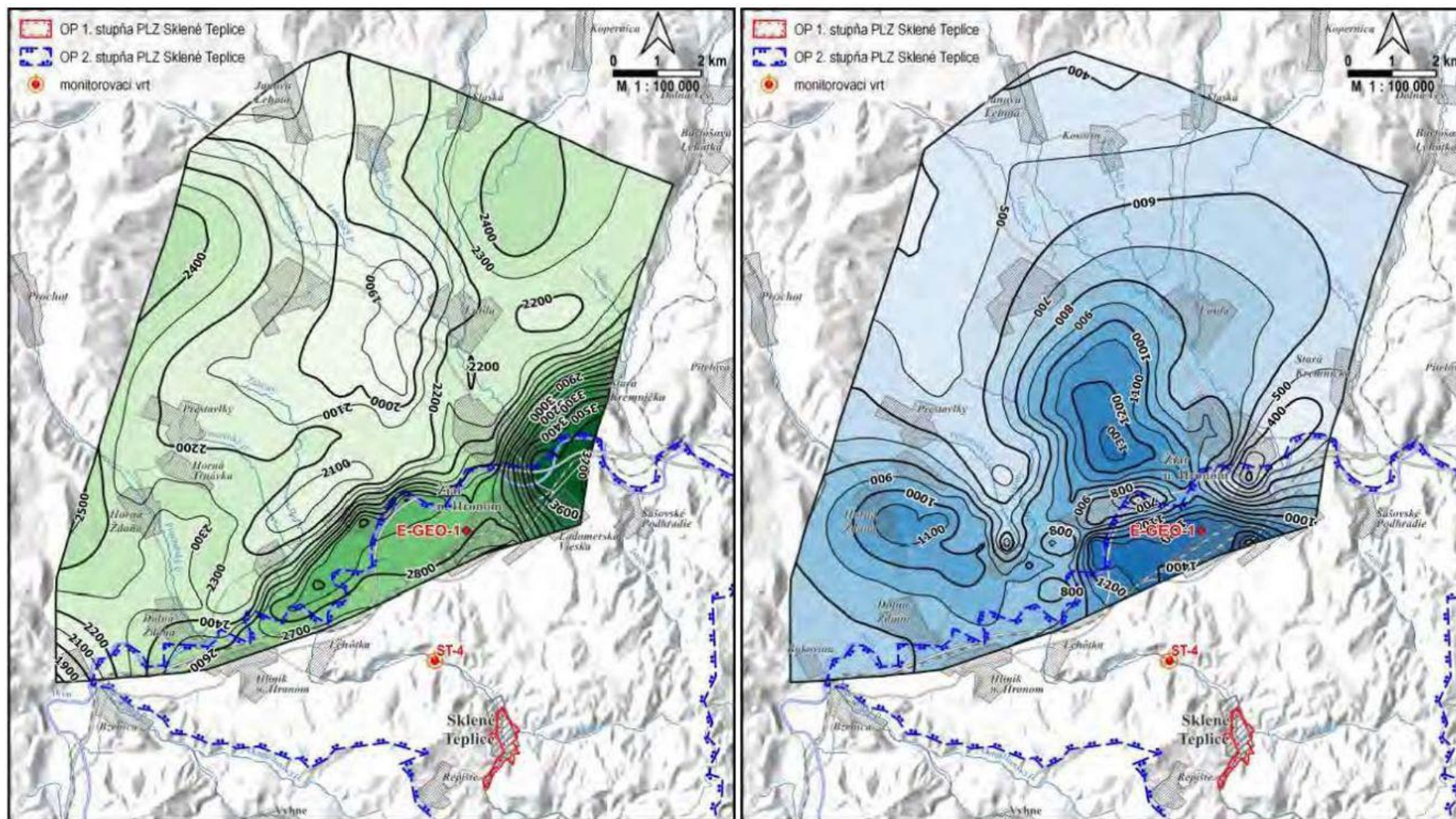
Opätovne sú aj v tomto prípade rozdiely medzi predpokladanou geometriou série Veľkého boku. V katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie (Obrázok 3.6) vystupuje komplex RES2 v hĺbke $z_{(T,RES2)} = 4\,500 - 4\,700$ mpt a $z_{(B,RES2)} = 5\,000 - 5\,200$ mpt pri celkovej modelovanej hrúbke $\Delta z_{(RES2)} = 300 - 350$ m (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). Podkladové materiály pre účely Zámeru, naopak, predpokladajú (re)interpretáciou seizmických meraní pozíciu rezervoárového prostredia karbonátov Veľkého boku v hĺbke $z = 2\,800 - 3\,000$ mpt (Obrázok 3.7) na strope rezervoáru s celkovou hrúbkou Obrázok 3.7) $\Delta z = 700 - 800$ m (DZÚRIK ET AL., 2023).



Obrázok 3.5: Mapa distribúcie hrúbok komplexov karbonátov hronika (vľavo) a Veľkého boku (vpravo) v stochastickom katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie. Zdroj: Fričovský et al.(2025).



Obrázok 3.6: Mapa distribúcie stropu (vľavo) a bázy (vpravo) karbonátov série Veľkého boku v stochastickom katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie Slovenska. Zdroj: Fričovský et al. (2025)



Obrázok 3.7: Mapa hĺbky stropu (vľavo) a očakávanej hrúbky (vpravo) karbonátov série Veľkého boku. Zdroj: Dzúrik et al. (2023).

3.1.2 Hydrogeotermálna preskúmanosť územia

Významná časť hydrogeologického a hydrogeotermálneho prieskumu v Žiarskej kotline je doteraz viazaná predovšetkým na oblasť Vyhne a Sklené Teplice, čo vychádza z ich historických úloh a stavu poznania.

Špecifickým príkladom overenia geotermálnych vôd je podzemný vrt KŠ-1 Kremnica s hĺbkou 500 m, ktorý v šachte Ludovika overil geotermálne vody s teplotou 47 °C a výdatnosťou 23 l.s⁻¹ (BÖHMER – ŠKVARKA, 1968), čo v prepočte na referenčnú teplotu 15 °C zodpovedá overeným zásobám geotermálnej energie 3 MWt.

Systematický prieskum termominerálnych vôd na lokalite Sklené Teplice bol spustený etapou realizácie vrtov ST-1 až ST-3, ktorý overil zdroje v hĺbke (m) / teplote (°C) / a výdatnosti (l.s⁻¹) 70 / 25 / 51 (ST-1), 74 / 50 / 4,5 (ST-2), s negatívnym vrtom ST-3, čo viedlo k vyčleneniu samostatných, priestorovo a štruktúrne nesúvisiacich obehových hydrogeotermálnych štruktúr Sklených Teplic, Vyhní a Banskej Štiavnice (STRUŇÁK ET AL., 1965). Poznatky o priestorovej distribúcii geotermálnych vôd v Sklených Tepliciach boli doplnené vrtom ST-4 (KLAGO, 1984; KLAGO – MATEJČEKOVÁ, 1988) s hĺbkou 1 820 m (teplota geotermálnych vôd 57 °C a výdatnosť 16 l.s⁻¹) a ST-5 s hĺbkou 1 001 m (teplota geotermálnych vôd 46 °C a výdatnosť 4,4 l.s⁻¹); zároveň výsledky priniesli aj návrh ochranných pásiem minerálnych a termálnych vôd pre kúpele Sklené Teplice (KLAGO – MATEJČEKOVÁ, 1988). Analýza dlhodobých režimových meraní nakoniec viedla na lokalite Sklené Teplice aj k revidovaniu a rozšíreniu ochranných pásiem minerálnych a termálnych (liečivých) vôd, pričom do úvahy brala priestorové rozloženie obehovej štruktúry a pozíciu infiltračnej, akumuláčnej a výverovej oblasti (FRANKO ET AL., 2003). V roku 2009 – 2010 prebehla etapa konštrukcie hydrogeologických vrtov STH-1 (negatívny) a STH-2 pre komplex „Relax Thermal“, pôvodne za účelom zabezpečenie zdroja pitnej vody. Vrt STH-2 overil geotermálne vody s teplotou do 45 °C a výdatnosťou 3 l.s⁻¹, dôsledkom čoho bol účel využitia preklasifikovaný na zabezpečenie termálnej vody pre existujúce bazény v areáli komplexu. Poloprevádzkovou hydrodynamickou skúškou (ŽITŇAN, 2011) bola odporúčaná produktivita vrtu 2 l.s⁻¹.

Termálne a minerálne pramene vo Vyhniciach slúžili ako primárny vyhľadávací príznak pre štúdium zdrojov geotermálnej energie aj v tejto časti severného okraja útvaru geotermálnych vôd. Geotermálne vody boli overené v prvej etape vrtom H-1 (ORVAN ET AL., 1967) v hĺbkach od 70 do 80 m v prostredí dolomitov, s ustálenou teplotou 35,5 °C

a výdatnosťou $4,5 - 5 \text{ l.s}^{-1}$, čo zodpovedá overeným zásobám geotermálnej energie 0,5 MWt. Revízia exploatačných podmienok (VRANA – SKAVINIAK, 2013) viedla k úprave exploatovateľných množstiev na $5,3 \text{ l.s}^{-1}$. Hydrogeologický vrt H-2 pre Hotel Termál bol realizovaný v roku 2005 (ĎUROVIČ, 2005), pričom overil výdatnosť $2,5 \text{ l.s}^{-1}$ s teplotou geotermálnych vôd na ústí 36°C , čo pri referenčnej teplote na 15°C zodpovedá 0,22 MWt. Táto výdatnosť bola overená aj dlhodobou čerpacou skúškou na vrte (ŽITŇAN, 2012). Vrt HGV-3 bol realizovaný pre Hotel Sitno a overil geotermálne vody s teplotou 29°C a výdatnosťou $3,75 \text{ l.s}^{-1}$. Exploatačné množstvá vrtu boli následne zvýšené po revíznej hydrodynamickej skúške na $5,5 \text{ l.s}^{-1}$ (ŽITŇAN, 2009).

Priamo v Žiarskej kotline bol na základe zámerov podoprených geofyzikálnym prieskumom a hydrogeotermálnych hodnotení, ktoré predpokladali karbonátový vývoj pod kenozoickou výplňou kotliny (ZBOŘIL ET AL., 1971; FRANKO ET AL., 1973) realizovaný vrt RGŽ-2 Žiar nad Hronom (REMŠÍK ET AL., 1997). Napriek očakávaniam však vrt neoveril požadované rezervoárové prostredie, t.j. strednotriasové karbonáty, a prítoky geotermálnych vôd boli len veľmi obmedzené v intruzívnom komplexe, $0,01 \text{ l.s}^{-1}$ s teplotou geotermálnej vody 60°C (MARCIN ET AL., 2016).

V hraniciach vymedzeného útvaru podzemných geotermálnych vôd Žiarska kotlina (MARCIN ET AL., 2020) boli overené zdroje geotermálnej energie viazané na karbonáty série Veľkého boku aj na lokalitách Žarnovica – Lukavica vrtom LKC-4 s teplotou 35°C a výdatnosťou 10 l.s^{-1} (LUKAJ ET AL., 1983; ŠÁRIK, 2006); Topoľčianky – vrt KD-1 s teplotou / výdatnosťou na úrovni $28^\circ\text{C} / 3,5 \text{ l.s}^{-1}$ a Rudno – vrt R-3 – s parametrami 35°C a 10 l.s^{-1} (BURIAN ET AL., 1975). Sumarizácia výsledkov južnej časti útvaru geotermálnych vôd (ZBOŘIL ET AL., 1984) poukazuje na nižšiu geotermickú aktivitu územia v porovnaní so severnou časťou útvaru (oblasť Sklené Teplice, Vyhne, Žiar nad Hronom), avšak rovnako predpokladá prítomnosť vhodného rezervoárového prostredia v komplexoch strednotriasových karbonátov série Veľkého boku.

Plány rozvoja využívania zdrojov geotermálnej energie v Žiarskej kotline priniesli aj v súčasnosti najaktuálnejšiu realizáciu seizmických meraní a ich interpretáciu v okolí tektonického styku kotliny a severných svahov Štiavnických vrchov (ŠUJAN ET AL., 2011, 2020; MAŤO – ŠUJAN, 2014), ktoré zásadne zmenili predpoklady o vertikálnej geologickej stavbe v okolí strediska Lovča. V ich výsledku, oproti pôvodnej sukcesii s vývojom karbonatického komplexu hronika vystupujú v geologickej stavbe len členy série Veľkého boku.

3.2 Hydrogeologická charakteristika

3.2.1 Všeobecná hydrogeologická funkcia komplexov

Vo vertikálnej geologickej a hydrogeologickej stavbe je možné vymedziť niekoľko základných hydrogeologických funkcií litostratigrafických komplexov Žiarskej kotliny (Tabuľka 3.1).

Tabuľka 3.1. Hydrogeologická funkcia litostratigrafických komplexov

litostratigrafický komplex	vek	funkcia	hlavný typ priepustnosti
vulkanosedimentárna výplň	báden – panón	izolátor	puklinová (S), medzizimová (P)
bazálne súvrstvie	karpát	kolektor	puklinová (S)
hronikum, karbonátové komplexy	stredný trias	kolektor	krasovo-puklinová (S)
hronikum, melafýrová séria	perm – spodný trias	izolátor	puklinová (S)
Veľký bok, vrchný komplex	vrchný trias – spodná krieda	(polo)izolátor	puklinová (S)
Veľký bok, karbonátový komplex	stredný trias	kolektor	krasovo-puklinová (S)*
Veľký bok, spodný komplex	spodný trias	izolátor	puklinová (S)
veporikum, vrchný komplex	vrchný trias – stredná krieda	izolátor	puklinová (S)
veporikum, karbonátový komplex	stredný trias	kolektor	puklinová, puklinovo-krasová (S) *
veporikum, spodný komplex	perm – spodný trias	izolátor	puklinová (S)
veporikum, kryštalínium	silúr – devón	(polo)izolátor	puklinová (S)

Všeobecným znakom situácie poznania hydrogeologických, hydraulických, ale aj hydrogeochemických parametrov zdrojov geotermálnej energie v Žiarskej kotline je nepomer medzi významne preskúmanou oblasťou Sklených Teplíc (napr. KLAGO – MATEJČEKOVÁ, 1988; FRANKO ET AL., 2003; ŽITŇAN, 2011), eventuálne Vyhní (napr. ORVAN ET AL., 1967; ŽITŇAN, 2009, 2012), a centrálnou časťou kotliny, kde absentuje relevantný hydrogeotermálny vrt. Hydrogeologické charakteristiky sú tak definované analogicky s funkciou litostratigrafických komplexov vo vnútrohorských depresiách Západných Karpát.

Napriek rozdielnym názorom na geologickú stavbu Žiarskej kotliny sa autori (napr. ZBOŘIL ET AL., 1984; REMŠÍK ET AL., 2000; FRANKO ET AL., 2003, 2006; ŠUJAN ET AL., 2020) zhodujú, že v priestore severnej, ale aj južnej časti vymedzeného útvaru geotermálnych vôd (Marcin et al., 2020) existujú vhodné podmienky pre vývoj cirkulačno-akumulačných alebo prevažne-akumulačných systémov najmä v stredotriasových karbonátových komplexoch série Veľkého boku, respektíve v stredno- a vrchno-triasových karbonátoch hronika.

3.2.2 Hydraulické parametre horninového prostredia

V dostupných databázach sú známe údaje o hydraulických parametroch rezervoárového prostredia len z hydrodynamickej skúšky na vrtoch ST-4 a ST-5 v Sklených Tepliciach (KLAGO – MATEJČEKOVÁ, 1988):

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

test	odskúšaný úsek od – do (m)	kolektor -	koeficient prietoknosti $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	koeficient filtrácie $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
ST-4	1 453 – 1 698	karbonáty	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
ST-5	800 – 1 000	karbonáty	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$

V tejto súvislosti ohľadom hydraulických parametrov je nevyhnutné pripomenúť:

- údaje sú z tzv. sklenoteplického ostrova, t.j. hrastovej, okrajovej štruktúry Žiarskej kotliny
- podľa geologického modelu útvaru geotermálnych vôd (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) sa hĺbka uloženia karbonátov hronika pohybuje v intervale $z_{(T,RES1)} = 3\,400 - 3\,600$ mpt, a $z_{(B,RES1)} = 3\,700 - 3\,800$ mpt; pre karbonáty Veľkého boku $z_{(T,RES2)} = 4\,500 - 4\,700$ mpt a $z_{(B,RES2)} = 5\,000 - 5\,200$ mpt
- podľa reinterpretovaných seizmických meraní (MAŤO – ŠUJAN, 2014) a realizovanej seizmiky (ŠUJAN ET AL., 2020; DZÚRIK ET AL., 2023) $z_{(RES)} = 2\,800 - 3\,000$ mpt
- Zámer projektu, pre ktorý je tento hydrogeologický posudok realizovaný, predpokladá overenie kolektorských hornín v hĺbke $z = 3\,200 - 4\,000$ mpt.

Vo všetkých uvedených prípadoch je hĺbka uloženia kolektorov výrazne väčšia, ako v Sklených Tepliciach. Ich zhoda vychádza predovšetkým z južného, tektonického vymedzenia Žiarskej kotliny oproti severným svahom Štiavnických vrchov a ich podložia, kde sú tektonikou (Obrázok 3.8) indikované offsety do 1 000 m (REMŠÍK ET AL., 2000; ŠUJAN ET AL., 2020). Pre okolie lokality Lovča je nevyhnutné zvážiť:

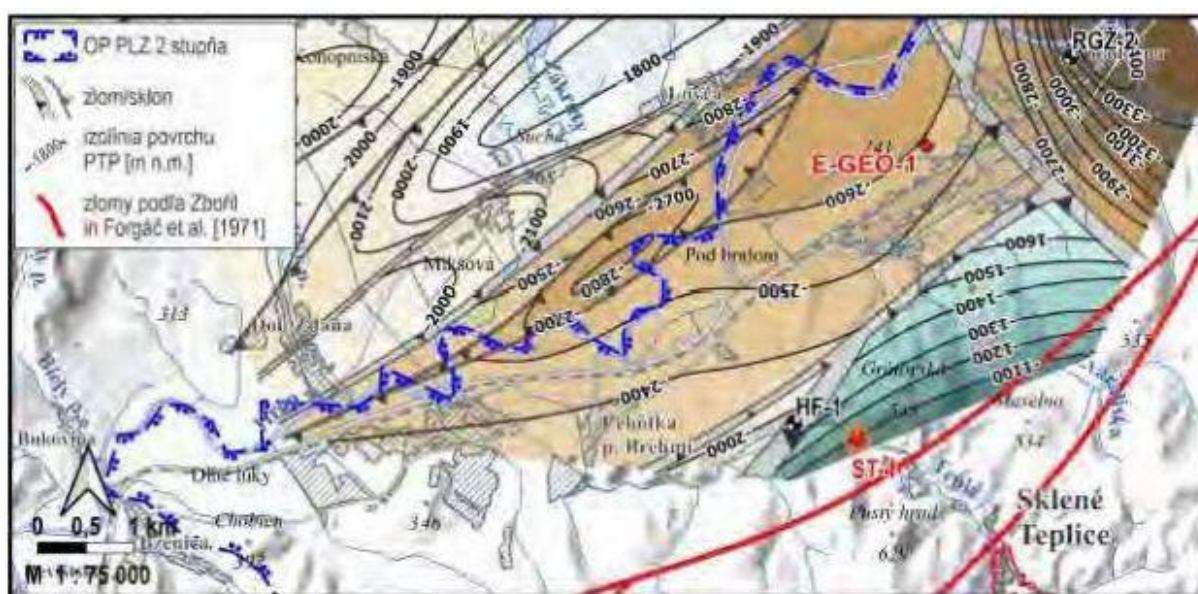
- stav paleoreliéfu na konci paleokrasovej periódy (FRANKO – BODIŠ, 1989; ČINČURA – KÖHLER, 1995) a s tým súvisiaci dosah kôry zvetrávania, odláhčenia a krasovatenia (všeobecný predpoklad je s hĺbkou klesajúci trend permeability a produktivity, ktorý je opakovane overený v karbonátových prostrediach na Slovensku)

- vplyv sekundárnej kompaktácie vplyvom tektonického poklesávania paleoreliéfu počas kenozoika a nárastu hĺbky uloženia kolektorských hornín (všeobecný predpoklad poklesu hydraulických parametrov s hĺbkou)
- vplyv kenozoickej intruzívnej činnosti a sprievodnej metamorfózy, pri ktorej dochádza na kontaktných aureolách k skarnovateniu môže byť bipolárny (napr. XU ET AL., 2015; ZUCCHI ET AL., 2023; RASHID ET AL., 2023): termickým kontaktom vyvolaná tepelná metamorfóza karbonátov zvyčajne vedie k znižovaniu ich existujúcej permeability (termická relaxácia, rekryštalizácia, hydrotermálna alterácia); kombinácia sprievodnej tektoniky a efúzie vulkanických plynov a hydrotermálnych roztokov môže viesť k chemickému, ale aj mechanickému zvyšovaniu permeability v okolí aureoly; vektor týchto zmien je ale závislý na geologických a štruktúrno-geologických, respektíve hydraulických podmienkach intrudovanej horniny v čase jej aktívnej fázy (ELDRUSI ET AL., 2009)
- prítomnosť tektoniky, a to ako hlavných zlomových systémov, tak ich križovania, a na zlomové systémy viazané puklinové hniezda môžu podporovať lokálnu produktivitu geologického prostredia a zohrávať tak významnú úlohu v produkcii zdrojov geotermálnej energie (ŠUJAN ET AL., 2020), pričom lokálne anizotropie permeability viazané na blízkosť štruktúrnych porúch môžu byť násobne, až rádovo vyššie, v porovnaní s permeabilitou (a produktivitou) matrix – v tomto prípade krasovo-puklinovou (napr. RASHID ET AL., 2023)
- otvorenosť zlomových systémov však rovnako môže viesť k efektom sekundárnej diagenézy pri cirkulácii primárnych vulkanických roztokov, respektíve v cirkulačno-akumulačných systémov roztokov najmä vo fáze ich laterálneho, alebo výstupného smeru, pri ktorom dochádza k nadobudnutiu termodynamickej saturácie a presýtenia voči konkrétnym minerálnym fázam, a následnému chladnutiu (napr. HAINES ET AL., 2016; WU ET AL., 2020), čo sa následne prejavuje redukciou výslednej produktivity zlomových systémov a puklinových hniezd v rezervoárovom prostredí, ktoré sú na nich viazané

Napriek uvedeným možnostiam je preto otázka permeability horninového prostredia, alebo horninového prostredia na styku s tektonickými líniami alebo zónami ich štruktúrneho dosahu neistotou. Keďže doteraz nebol realizovaný hydrogeotermálny vrt v analogických podmienkach vzhľadom na geotermickú aktivitu, a štruktúrno-geologickú stavbu, pre komplexný obraz uvádzame aspoň prehľad o hydraulických parametroch karbonátov d'urkovskej depresie v podobnej hĺbke uloženia a geotermickej situácii (Tabuľka 3.2):

Tabuľka 3.2. Hydraulicke parametre geotermálnych vrtov GTD-1 a GTD-2; ťurkovská depresia, Košická kotlina. Zdroj: Vranovská et al. (1999); Vranovská (2001); Halás et al. (2016).

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



Obrázok 3.8: Tektonický styk južného okraja Žiarskej kotliny a severných svahov Štiavnických vrchov na mape reliéfu predkenozoického podložja. Zdroj: Šujan et al. (2020).

3.2.3 Hydrogeotermálne štruktúry

Pri aktuálnom stave poznatkov sú v relevantnom okolí územia vymedzené dve (čiastkové?) hydrogeotermálne štruktúry:

- sklenoteplická hydrogeotermálna štruktúra
- žiarska hydrogeotermálna štruktúra.

Sklenoteplická hydrogeotermálna štruktúra podľa súčasného vymedzenia, ktoré predstavuje zároveň základ pre priestorové vymedzenie ochranných pásiem I. a II. stupňa

predstavuje **otvorenú** cirkulačno-akumulačnú, respektíve prevažne-akumulačnú štruktúru **viazanú predovšetkým na strednotriasové karbonáty série Veľkého boku**, pre ktorú platí (FRANKO ET AL., 2003, 2006):

- *infiltračná oblasť*: južné a východné svahy Kremnických vrchov, južné svahy Žiaru, východné svahy Vtáčnika (vymedzenie infiltračnej oblasti predpokladá expozíciu karbonátov)
- *tranzitno-akumulačná oblasť*: Žiarska kotlina po južné tektonické vymedzenie kotliny voči Štiavnickým vrchom
- *akumulačná oblasť*: severný až severozápadný okraj sklenoteplického ostrova, mezozoické podložie severného okraja Štiavnických vrchov
- *výverová oblasť*: dolina potoka Teplá viazaná na križovania sklenoteplických zlomových systémov SSZ – JJV a JZ – SV smerov

V rámci definovania štruktúry viacerí autori (FRANKO, 2000, 2001; REMŠÍK ET AL., 2000A,B; FRANKO ET AL., 2003, 2006) následne, okrem iného, uvádzajú:

- podľa $\delta^{18}\text{O} = -10,28$ až $-11,4$ ‰ sú geotermálne vody meteorického pôvodu
- datovaním ^{14}C je stanovený vek geotermálnych vôd 15 400 rokov
- podľa $\delta^{34}\text{S}(\text{SO}_4) = 22 - 23,4$ ‰ je pôvod síranov v rozpúšťaní anhydritu a sádrovca vrchného werfenu križňanského príkrovu (séria Veľkého boku)
- hydrogeotermálna štruktúra križňanského príkrovu (série Veľkého boku) môže čiastočne komunikovať s karbonátovými komplexmi hronika na základe vertikálnych (hydraulická komunikácia po zlomových systémoch), respektíve laterálnych prestupov (priestorové kontakty karbonatických komplexov oboch tektonických / rezervoárových jednotiek) – tento mechanizmus je však spomínaný len v akumulačnej alebo výverovej oblasti (uvedené správy vôbec nespomínajú vzostupnú tranzitnú časť, ako typický fragment cirkulačno-akumulačných systémov)
- geotermálne vody na lokalite Vyhne sú výrazne odlišného geochemického typu, a pravdepodobne viazané na tektonickú jednotku hronika; závery o ich vzájomnej komunikácii ale chýbajú
- v rámci geotermálnych vôd viazaných na lokalitu Vyhne je charakter ich obehovo-akumulačnej štruktúry neistý, nepredpokladá sa ani vzájomná komunikácia medzi lokalitami Vyhne, Sklené Teplice a Banská Štiavnica

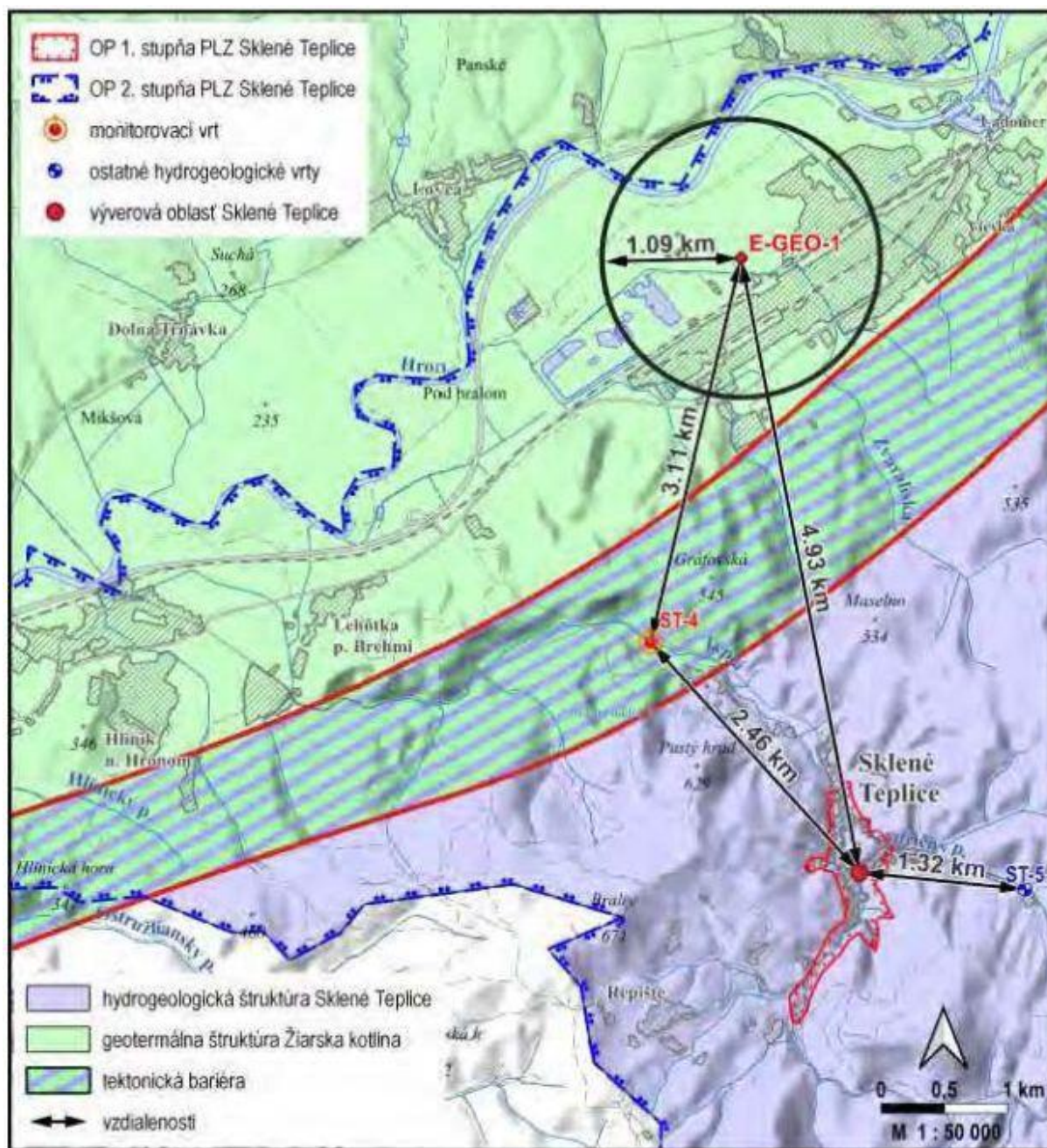
Vzájomnú zhodu medzi referenčným hydrogeotermálnym hodnotením (REMŠÍK ET AL., 2000) a revíziou ochranných pásiem LTV v Sklených Tepliciach (FRANKO ET AL., 2003) vykazuje predpoklad **vrchnej žiarskej hydrogeotermálnej štruktúry a spodnej žiarskej hydrogeotermálnej štruktúry**, ktoré sú viazané na karbonáty hronika, respektíve krížňanského príkrovu (série Veľkého boku), pre ktoré platí:

- *infiltračná oblasť*: južné a východné svahy Kremnických vrchov, južné svahy Žiaru, južné svahy Vtáčnika (vymedzenie infiltračnej oblasti predpokladá expozíciu karbonátov príslušných tektonických jednotiek)
- *tranzitno-akumulačná oblasť*: severná, západná a východná periféria Žiarskej kotliny
- *akumulačná oblasť*: centrálna (grábenová) časť Žiarskej kotliny a jej príslušné subštruktúry predkenozoického podložia
- *výverová oblasť*: neexistuje.

Hydrogeologický posudok „Vplyv využívania geotermálnej energie v stredisku E-GEO-1 na PLZ Sklené Teplice“ (DZÚRIK ET AL., 2023) identifikuje zlomové systémy na južnom a juhovýchodnom okraji kotliny pri jej styku so Štiavnickými vrchmi ako „hydrogeologickú“ respektíve „tektonickú“ bariéru (Obrázok 3.9), ktorá oddeľuje sklenoteplickú štruktúru (viazanú v tomto materiály výlučne na sériu Veľkého boku / krížňanský príkrov) a žiarsku štruktúru – ktorá na základe seizmického prieskumu (MAŤO – ŠUJAN, 2014; ŠUJAN ET AL., 2011, 2020) v celej tejto oblasti len s vývojom karbonátov Veľkého boku. Z posudku vyplýva:

- offset rovnocenných komplexov s analogickou hydrogeologickou funkciou predstavuje približne 900 – 1 000 m
- takýto offset slúži ako komunikačná bariéra oddeľujúca obe hydrogeotermálne štruktúry (princíp tektonickej bariéry, tektonickej pasce); čím bolo v zásade vyjadrené minimálne riziko ovplyvňovania PLZ Sklené Teplice produkciou na plánovanom stredisku, lokalizovanom v II. stupni ich OP.

Takto významné offsety, v skutočnosti, opakovane naozaj pôsobia ako bariéra (napr. FENDEK ET AL. 2017), **a tento predpoklad nie je možné vylúčiť**. Na druhej strane, **hydrogeologická, a hydraulická funkcia zlomových systémov nie je závislá len na samotnom offsete**. Kritickými faktormi hydraulickej funkcie zlomových systémov sú štruktúra a vektorová orientácia zlomového systému a jeho deformačnej zóny, očakávaný generálny vektor prúdenia (nielen) zdrojov geotermálnej energie, mineralógia stien zlomového systému a výplne zlomovej poruchy



Obrázok 3.9: Situácia tektonickej bariéry na styku Žiarskej kotliny a Štiavnických vrchov. Zdroj: Dzúrik et al. (2023).

a sprievodného pásma deformácie, šírka hlavnej zlomovej línie (dilatácia), rezervoárová dynamika (prítomnosť konvekcie, adiabatického varu) v okolí zlomovej línie, tlakový gradient a vertikálny dosah zlomového systému a.i. (napr. CAINE ET AL., 1996; BENSE – PERSON, 2006; ZHANG ET AL., 2011). Významnými príkladmi toho, že aj zlomy s extrémnymi offsetmi pri kombinácii priaznivých podmienok pôsobia ako komunikačné (zostupné a vzostupné) cesty sú (nielen) geotermálne polia Rýnsky gráben (FREY ET AL., 2022), Gariga-Samalus (MITJANAS ET AL., 2024), Taupo (MILICICH ET AL., 2016) alebo Rongcheng (ZHANG ET AL., 2026).

Hydraulickú spojitosť žiarskej a sklenoteplickej štruktúry preto je naďalej možné považovať za významný prvok neistoty, ktorého odstránenie je možné jedine realizáciou geotermálneho vrtu na vonkajšom okraji udávaného zlomového systému, a realizovaním intenzívneho hydrogeochemického a p-T monitoringu, vrátane aplikovania metód (geotermometrické a termochemické zmiešavacie modely) schopných zachytiť vzájomné vzťahy medzi geotermálnymi vodami hydrogeotermálnych štruktúr.

3.3 Hydrogeotermická charakteristika územia

Pri posudzovaní hydrogeotermickej charakteristiky územia sa naplno prejavujú rozdiely v názoroch na geologickú stavbu Žiarskej kotliny a oblasti v okolí Lovče. Z tohto dôvodu v nasledujúcom texte uvádzame:

- priestorovú charakteristiku geotermického poľa Žiarskej kotliny na základe konštrukcie geologického a geotermického modelu útvaru geotermálnych vôd pre účely stochastického katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie a udržateľnej rezervoárovej kapacity (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) – **VARIANT 1 (3.3.1)**
- 1D pravdepodobnostný model distribúcie geotermického poľa na základe očakávaného geologického profilu vrtu GTŽ-1 Žiar nad Hronom (priestorový model na základe reinterpretácie seizmických dát nie je k dispozícii) podľa Zámeru (ŠUJAN ET AL., 2020) – **VARIANT 2 (časti 3.3.2)**

vrátane ich vzájomného porovnania a implikácií voči geotermickému poľu. Oba podklady zároveň slúžia ako vstupné dáta pre posudzovanie vplyvov dlhodobej produkcie geotermálnej energie na rezervoárové prostredie.

3.3.1 Priestorová distribúcia geotermického poľa

Z pohľadu geotermickej aktivity územia Západných Karpát (Obrázok 2.3) s celkovým rozsahom povrchovej hustoty tepelného toku $q_{(s)} = 50 - 130 \text{ mW.m}^{-2}$ a priemerom $82,1 \pm 20 \text{ mW.m}^{-2}$ (BODIŠ ET AL., 2018) je možné geotermickú aktivitu Žiarskej kotliny v celku považovať za zvýšenú, pri rozpätí $q_{(s)} 72 - 106 \text{ mW.m}^{-2}$ a priemerom $88 \pm 6 \text{ mW.m}^{-2}$, ktorej

spoločným znakom vo vertikálnom geologickom profile (IZO1 → RES1 → IZO2 → RES2) vystihuje (napriek rozdielnej geometrii komplexov) zachovanie pomerne zreteľného kvázikoncentrického trendu s vektorom SV – JZ (Tabuľka 3.3). Z pohľadu rezervoárového inžinierstva indikuje zachovanie koncentrických až pseudo-koncentrických anomálií možné vertikálne prestupy medzi viacerými tektonickými / rezervoárovými jednotkami vplyvom otvorenej alebo skrytej, plošnej alebo izolovanej konvekcie – t.j. systémy vertikálnej alebo laterálnej evázie (napr. PEÑA-DOMÍNGUEZ ET AL., 2022), alebo reliéfom a tektonikou usmernené advektívne prúdenie, predovšetkým, ak dochádza k významným zmenám v geometrii a topografii rezervoárových jednotiek (napr. EBIGBO ET AL., 2016). Ide o nepriame indikátory v súlade s očakávaniami vertikálneho prestupu (a teda zmiešavania) medzi jednotkami fatrika (Veľkého boku) a hronika na okraji kotliny, respektíve pred dosiahnutím výverovej oblasti (REMŠÍK ET AL., 2000; FRANKO ET AL., 2023; FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). Analogické podmienky vertikálneho prestupu a zmiešavania medzi dvoma faciálne izolovanými rezervoárovými jednotkami boli s využitím zmiešavacích modelov a geotermometrie interpretované aj v rýdzo-tektonosedimentárnych podmienkach Liptovskej kotliny (napr. FRIČOVSKÝ ET AL., 2016) s podobnou faciálnou a štruktúrnou izoláciou medzi rezervoárovými jednotkami hronika a fatrika (FENDEK ET AL., 2017).

Tabuľka 3.3. Distribúcia hustoty tepelného toku v modelovanom vertikálnom profile (VARIANT 1) okolia lokality Lovča. Upravené podľa: Fričovský et al. (2025).

parameter	vertikálne vymedzené komplexy (od – do)			
	mW.m ⁻²	mW.m ⁻²	mW.m ⁻²	mW.m ⁻²
vertikálne vymedzenie	vulkanosedimentárna výplň a vývoj permu-stredného triasu v nadloží hronika (IZO1)		strednotriasové karbonáty hronika (RES1)	
strop komplexu q _(s)	94	97	90	93
báza komplexu	90	93	89	92
vertikálne vymedzenie	vrchnotriasový – spodnokriedový vývoj série Veľkého boku / fatrika (IZO2)		strednotriasové karbonáty série Veľkého boku / fatrika (RES2)	
strop komplexu	89	92	88	92
báza komplexu	88	92	88	91

Priestorová distribúcia stacionárneho geotermického gradientu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) je výrazne heterogénnejšia, čo autori vysvetľujú vplyvom zostupných alebo vzostupných smerov prúdenia najmä na juhovýchodnom styku Žiarskej kotliny a podložia Štiavnických vrchov. Ide o ďalší indikátor dynamického prúdenia medzi oboma rezervoárovými jednotkami, a zároveň o ďalší indikátor možnej spojitosti medzi kotlinou a jej tektonickými okrajmi. V centrálnej časti je pole geotermického gradientu (Tabuľka 3.4) monotónne.

Tabuľka 3.4. Distribúcia konduktívneho geotermického gradientu v modelovanom vertikálnom profile (VARIANT 1) okolia lokality Lovča. Upravené podľa: Fričovský et al. (2025).

parameter	vertikálne vymedzené komplexy (od – do)			
	°C.km ⁻¹	°C.km ⁻¹	°C.km ⁻¹	°C.km ⁻¹
vertikálne vymedzenie	vulkanosedimentárna výplň a vývoj permu-stredného triasu v nadloží hronika (IZO1)		strednotriasové karbonáty hronika (RES1)	
minimum / maximum	39	43	27	29
medián / priemer	41	41	28	28
vertikálne vymedzenie	vrchnotriasový – spodnokriedový vývoj série Veľkého boku / fatrika (IZO2)		strednotriasové karbonáty série Veľkého boku / fatrika (RES2)	
minimum / maximum	40	43	26	29
medián / priemer	41	42	28	27

Model priestorovej distribúcie rezervoárovej teploty bol v referenčnej práci (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) konštruovaný pre podmienky konduktívneho, alebo prevažne-konduktívneho prostredia s využitím systémov Fourierových rovníc vedenia tepla (JAUPART – MARESCHAL, 2014; EPPELBAUM ET AL., 2014) opísaných v nasledovnej časti, z čoho jednoznačne vyplýva ich závislosť na topografii a geometrii rezervoárových prostredí a reliéfu ich nadložia; pri zohľadnení povrchovej hustoty tepelného toku a aproximatívnych modelov termickej vodivosti pre horninové prostredie a rezervoárové médium (HOLZBECHER, 1998; BEARDSMORE – CULL, 2001; LIMBERGER ET AL., 2018). Z tohto dôvodu, pri pomerne značnej korelácii s geometriou, je možné odhady rezervoárových teplôt (Tabuľka 3.5; Obrázok 3.10, 3.11) považovať za maximálnu teplotu, ktoré je prostredie schopné dosiahnuť v ustálených podmienkach, a ako referenčný stav pri modelovaní odhadov rezervoárovej odozvy.

Vo vzťahu lokality Lovča a Sklené Teplice (vektor SV – JZ) je aj pri atektonickom modeli (Obrázok 3.4 – 3.6) zreteľný pomerne významný gradient teploty súvisiaci s geometriou rezervoárových prostredí, pre strednotriasové karbonáty hronika $T_{(T,RES1)} = 155 \rightarrow 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a $T_{(B,RES1)} = 162 \rightarrow 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a strednotriasové karbonáty série Veľkého boku / fatrika $T_{(T,RES1)} = 196 \rightarrow 41 \text{ }^{\circ}\text{C}$, a $T_{(B,RES1)} = 162 \rightarrow 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$; a to pri horizontálnej vzdialenosti do 7 km. Napriek tomu, že analýza lineárnej stability nebola pre daný geologický a geotermický model realizovaná, kombinácia vysokého horizontálneho gradientu, možný efekt otvorenosti zlomových systémov, a negatívne anomálie difúzneho gradientu teploty môžu pôsobiť ako podporný faktor pre konvektívne a advektívne systémy práve v okolí tektonických porúch (napr. BARLETTA ET AL. 2010), ktoré sú apriori (DZÚRIK ET AL., 2023) považované za komunikačné bariéry medzi Žiarskou kotlinou a jej tektonicky vymedzeným okolím. Samozrejme, ide o predpoklad, ktorý sa viaže na konkrétny modelový variant.

*Bratislava, 2026*

*Bratislava, 2026*

Tabuľka 3.5. Distribúcia rezervoárovej teploty v modelovanom vertikálnom profile (VARIANT 1) okolia lokality Lovča – Sklené Teplice. Upravené podľa: Fričovský et al. (2025).

parameter	vertikálne vymedzené komplexy (od – do)			
	°C	°C	°C	°C
vertikálne vymedzenie	vulkanosedimentárna výplň a vývoj permu-stredného triasu v nadloží hronika (IZO1)		strednotriasové karbonáty hronika (RES1)	
strop komplexu	7	11	10	166
báza komplexu	10	166	11	174
vertikálne vymedzenie	vrchnotriasový – spodnokriedový vývoj série Veľkého boku / fatrika (IZO2)		strednotriasové karbonáty série Veľkého boku / fatrika (RES2)	
strop komplexu	11	174	11	203
báza komplexu	11	203	22	212

3.3.2 Model odhadu geotermického profilu Zámeru vrtu GTŽ-1

Rovnaký princíp, ako bol použitý pre konštrukciu katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie na Slovensku (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) bol využitý aj pri modelovaní odhadu geotermického profilu zámeru vrtu GTŽ-1 definovaného Zámerom (Obrázok 3.12). Fourierové rovnice vedenia tepla [1] (JAUPART – MARESCHAL, 2014; EPELBAUM ET AL., 201) vyjadrujú distribúciu teploty vo vertikálnom smere geotermického poľa bez vplyvu prirodzeného alebo indukovaného prísunu tepla do systému (GRANT – BIXLEY, 2011). Na rozdiel od diskrétného modelu katalógu, je v tomto prípade využitý pravdepodobnostný model odhadu vertikálneho profilu teploty s využitím Monte Carlo simulácií (DUNN – SHULTIS, 2022), čo vyplýva z potreby zohľadniť neistoty, ktoré vyplývajú z rozdielov medzi oboma modelmi, ktorých charakter môže výrazne ovplyvňovať výsledné implikácie odozvy rezervoáru voči dlhodobej produkcii.

V konduktívnom, až prevažne-konduktívnom prostredí narastá teplota neporušeného geotermického poľa ako funkcia hĺbky a miery vertikálneho prenosu tepla, ktorý je kontrolovaný termofyzikálnymi parametrami geologického prostredia a prírastku tepla rádiogénnou produktivitou (LIMBERGER ET AL., 2018):

$$T_{i-1} = T_{i+1} + \left(\frac{1}{\lambda_{i-1}} \cdot q_{i+1} \times \Delta z_{i-1} \right) - \frac{Q_{RG,i-1}}{2 \times \lambda_{i-1}} \times \Delta z_{i-1}^2 \quad [1]$$

kde: T_{i-1} = teplota na báze výpočtového kroku (°C), T_{i+1} = teplota na strope výpočtového kroku (°C), λ_{i-1} = tepelná konduktivita v komplexe ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), q_{i+1} = hustota tepelného toku na strope výpočtového komplexu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), Δz_{i-1} = hrúbka výpočtového komplexu (m), $Q_{RG,i-1}$ = rádiogénna produktivita výpočtového komplexu ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)

Tepelná vodivosť ($\lambda_{(REP)}$) predstavuje model priemeru objemovej ($\lambda_{(BULK)}$), hĺbkovej ($\lambda_{(Z)}$) funkcie odvodených z referenčnej tepelnej vodivosti z geologických vrstev ($\lambda_{(LIT)}$) [2] a tepelnej vodivosti fluíd ($\lambda_{(W)}$) [3] (HOLZBECHER, 1998; BEARDSMORE – CULL, 2001)

$$\lambda_{(REP)} = AVG(\lambda_{(LIT)}; \lambda_{(BULK)}; \lambda_{(Z)}) \left| \begin{array}{l} \lambda_{(LIT)} = \text{konšt.} \\ \lambda_{(BULK)} = [(1 - \varphi_{(Z)}) \times \sqrt{\lambda_{(LIT)}} + \varphi_{(Z)} \times \lambda_{(W)}]^2 \\ \lambda_{(Z)} = \lambda_{(LIT)} + 0,2 \times [(z_{(i+1)} \times 10^{-3}) + (0,5 \times \Delta z_{(i-1)} \times 10^{-3})] \end{array} \right. \quad [2]$$

$$\lambda_{(W)} = -992.47 + 3839.5 \times \left(\frac{T_{(T,RES)}}{273.15}\right) - 1800.7 \times \left(\frac{T_{(T,RES)}}{273.15}\right)^2 + 525.77 \times \left(\frac{T_{(T,RES)}}{273.15}\right)^3 - 73.44 \times \left(\frac{T_{(T,RES)}}{273.15}\right)^4 \quad [3]$$

kde „ $T_{(T,RES)}$ “ je teplota v K; $\lambda_{(REP)}$ = výsledná funkcia tepelnej vodivosti ($W.K^{-1}m^{-1}$), $\lambda_{(LIT)}$ = referenčná tepelná vodivosť pre konkrétny komplex ($W.K^{-1}m^{-1}$), $\lambda_{(BULK)}$ = model tepelnej vodivosti nasýtenej horniny ($W.K^{-1}m^{-1}$), $\lambda_{(Z)}$ = hĺbková funkcia tepelnej vodivosti ($W.K^{-1}m^{-1}$), $\varphi_{(Z)}$ = funkcia pórovitosti geologického prostredia s hĺbkou (-), z_{i+1} = strop i-teho komplexu ($W.m^{-2}$), Δz_{i-1} = hrúbka i-teho komplexu (m)

Parameter rádiogénnej produktivity ($Q_{RG,i}$) [4] vyjadruje množstvo tepla generovaného horninovým komplexom prirodzeným rozpadom rádiogénnych izotopov ^{238}U , ^{232}Th a ^{40}K (JAUPART – MARESCHAL, 2011); pričom referenčná hodnota $Q_{RG(0)}$ je korigovaná hĺbkovou funkciou (JAUPART ET AL., 1981; EPELBAUM ET AL., 2014):

$$Q_{RG,i} = Q_{RG(0)} \times e^{-\frac{(z_{(i+1)} + 0,5 \times \Delta z_{(i-1)})}{D}} \left| D = \frac{(z_{(i+1)} + 0,5 \times \Delta z_{(i-1)})}{\ln\left(\frac{Q_{RG(0)}}{X(Q_{RG})}\right)} \right. \quad [4]$$

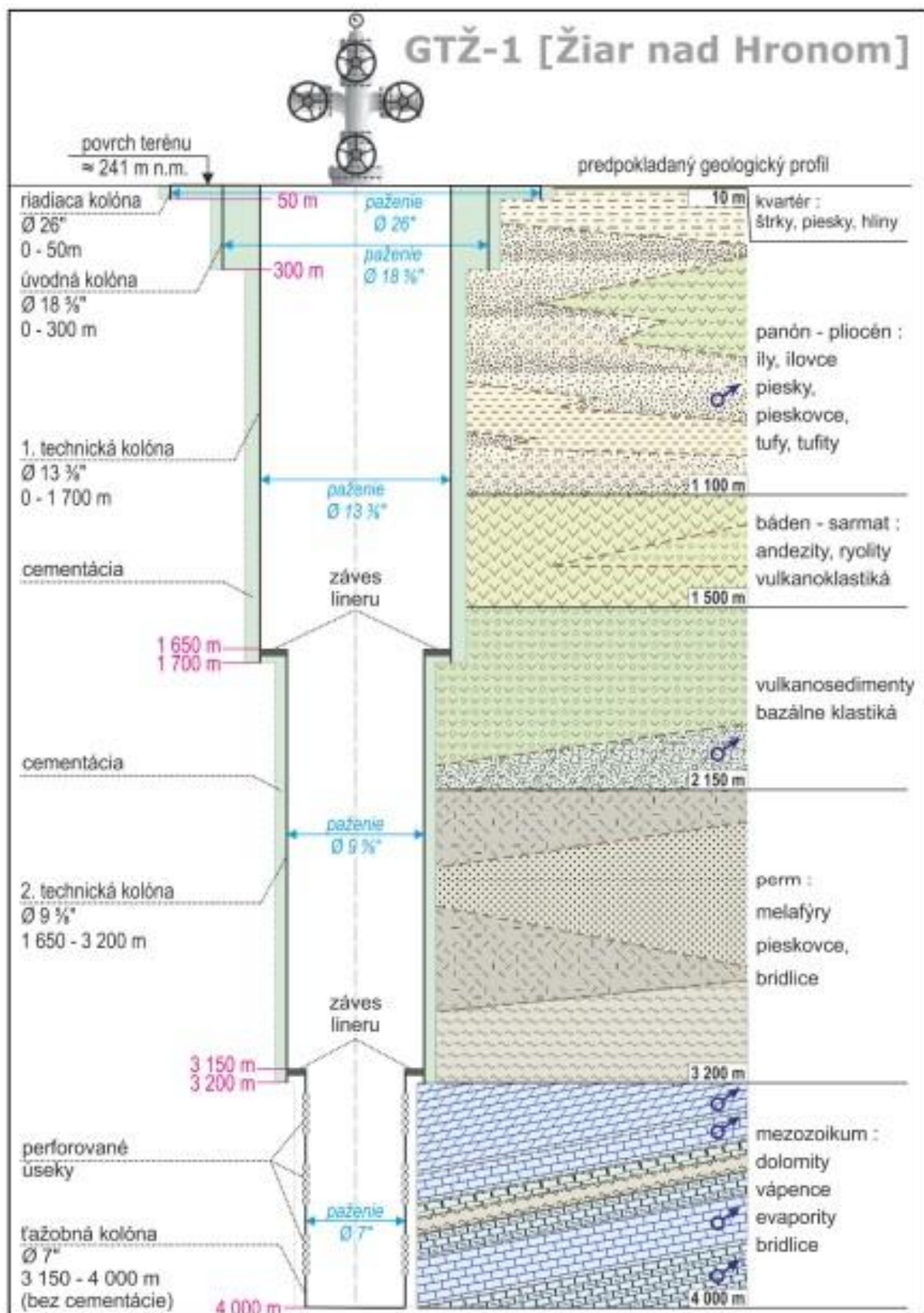
kde: $Q_{RG,i}$ = rádiogénna produktivita i-teho komplexu ($W.m^{-3}$), $Q_{RG(0)}$ = referenčná rádiogénna produktivita ($W.m^{-3}$), $X(Q_{RG,i})$ = priemerná regionalizovaná rádiogénna produktivita ($W.m^{-3}$), D = hĺbková funkcia rádiogénnej produktivity ($W.K^{-1}m^{-1}$), z_{i+1} = strop i-teho komplexu ($W.m^{-2}$), Δz_{i-1} = hrúbka i-teho komplexu (m)

Vertikálna distribúcia, a logický pokles hustoty tepelného toku s hĺbkou (vplyvom straty rádiogénnej produktivity Q_{RG} nadložných horizontov je vyjadrená podľa vzťahu [5]:

$$q_{i-1} = q_{i+1} - \Delta z_{i-1} \times Q_{RG,i-1} \quad [5]$$

kde: q_{i-1} = hustota tepelného toku na báze hodnoteného horizontu ($W.m^{-2}$), q_{i+1} = hustota tepelného toku na strope hodnoteného horizontu ($W.m^{-2}$), Δz_{i-1} = hrúbka hodnoteného horizontu (m), $Q_{RG,i-1}$ = rádiogénna produktivita v modelovanom horizonte ($W.m^{-3}$).

Zámer geologického vrtu GTŽ-1 (ŠUJAN ET AL., 2020) je uvedený na Obrázku 3.12. Podklady stochastického modelu s parametrickými distribučnými funkciami sumárne udáva Tabuľka 3.6.



Obrázok 3.12: Zámer geologického vrtu GTŽ-1 (Šujan et al., 2020) ako podklad pre stochastický model.

Tabuľka 3.6. Simulačné nastavenie vstupných parametrov stochastického modelu vertikálnej distribúcie teploty v profile GTŽ-1

parameter	$T_{(top)}$	$\Delta z_{(i)}$	$q_{(top)}$	$\lambda_{(LIT)}$	$\lambda_{(w)}$	$\lambda_{(BULK)}$	$\lambda_{(z)}$	$Q_{(RG)}$	$\Phi_{(z)}$
	°C	m	W.m ⁻²	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻³ × 10 ⁻⁶	-
povrch									
min / max	7 – 11	0	90 – 100	-	-	-	-	-	-
priemer	9	-	95	-	-	-	-	-	-
ML	-	-	-	-	-	-	-	-	-
št.odchýlka	1,02	-	1,67	-	-	-	-	-	-
PDF	normálne	konštanta	normálne	-	-	-	-	-	-
panón – pliocén (komplex K1)									
min / max	7 – 11	1 000 – 1 200	90 – 100	1,4 – 1,5	0,6	-	-	1,15 – 1,19	-
priemer	9	-	95	-	-	-	-	-	-
ML	-	1 100	-	1,45	-	-	-	-	-
št.odchýlka	1,02	-	1,67	-	-	-	-	-	-
PDF	normálne	Δ na stred	normálne	Δ na stred	konštanta	funkcia	funkcia	rovnorné	funkcia
sarmat – bádén (komplex K2)									
min / max	-	300 – 500	-	1,56 – 2,12	0,6	-	-	1,19 – 1,23	-
priemer	-	-	-	1,818	-	-	-	-	-
ML	-	400	-	-	-	-	-	-	-
št.odchýlka	-	-	-	1,098	-	-	-	-	-
PDF	funkcia	Δ na stred	funkcia	lognormálne	konštanta	funkcia	funkcia	rovnorné	funkcia
bazálne klastiká (komplex K3)									
min / max	-	600 – 700	-	1,5 – 3,5	0,6	-	-	1,34 – 1,37	-
priemer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ML	-	650	-	2,5	-	-	-	-	-
št.odchýlka	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PDF	funkcia	Δ na stred	funkcia	Δ na stred	konštanta	funkcia	funkcia	rovnorné	funkcia

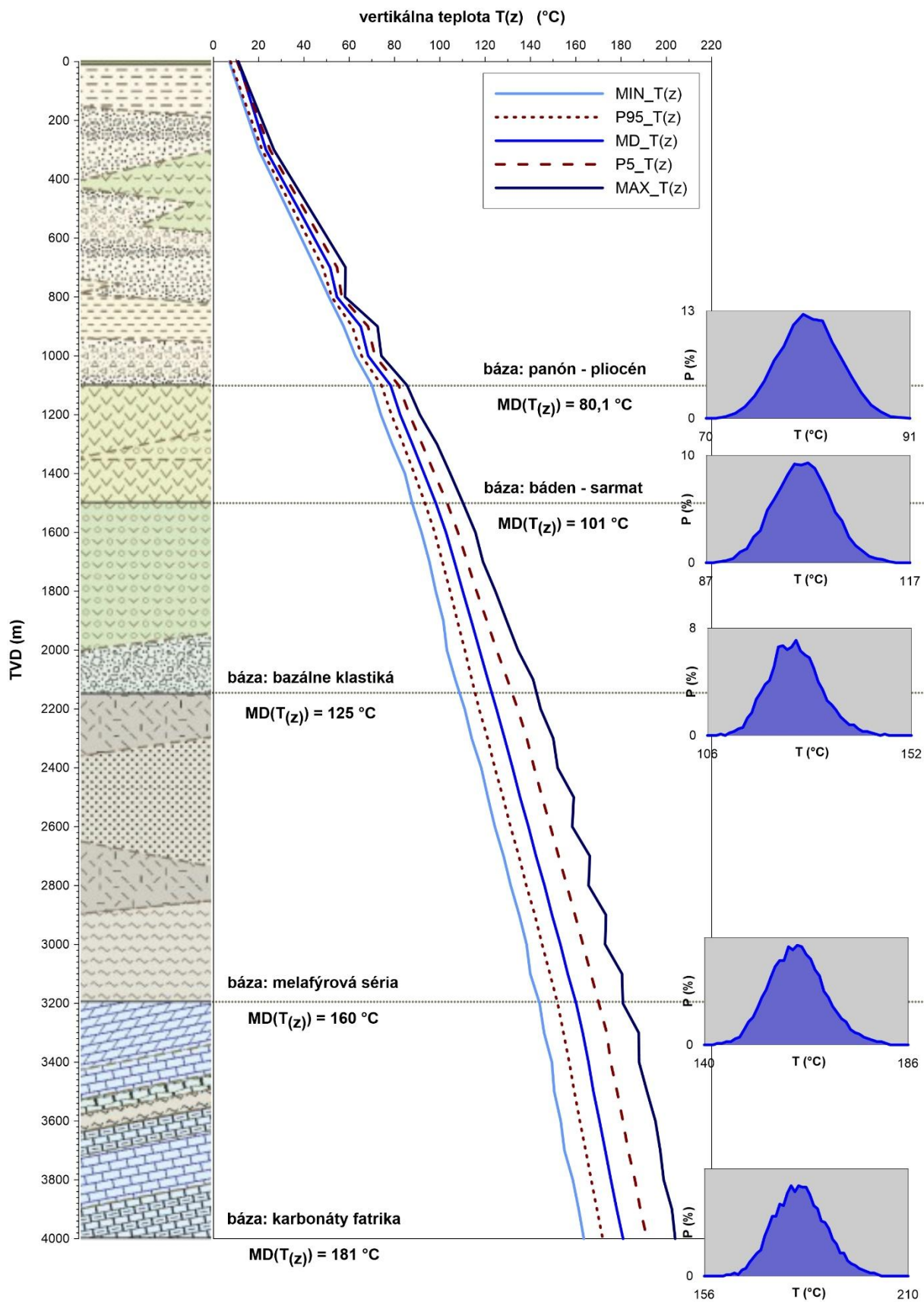
Tabuľka 3.6. Simulačné nastavenie vstupných parametrov stochastického modelu vertikálnej distribúcie teploty v profile GTŽ-1 (pokračovanie)

parameter	$T_{(top)}$	$\Delta z_{(i)}$	$q_{(top)}$	$\lambda_{(LIT)}$	$\lambda_{(w)}$	$\lambda_{(BULK)}$	$\lambda_{(z)}$	$Q_{(RG)}$	$\Phi_{(z)}$
	°C	m	W.m ⁻²	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	W.m ⁻³ × 10 ⁻⁶	-
hronikum, melafýrová séria (komplex K4)									
min / max	-	900 – 1 100	-	2,4 – 2,6	0,6	-	-	1,46 – 1,5	-
priemer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ML	-	1000	-	-	-	-	-	-	-
št.odchýlka	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PDF / rozdelenie	funkcia	Δ na stred	funkcia	rovnorné	konštanta	funkcia	funkcia	rovnorné	funkcia
strednotriasové až vrchnotriasové komplexy série Veľkého boku / fatrika (komplex RES)									
min / max	-	600 – 1 000	-	2,8 – 3,9	-	-	-	1,21 – 1,25	-
priemer	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ML	-	800	-	3,6	-	-	-	-	-
št.odchýlka	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PDF	funkcia	Δ na stred	funkcia	Δ vľavo	funkcia	funkcia	funkcia	rovnorné	funkcia

Výsledky modelovania stacionárneho geotermického poľa profilu vrtu GTŽ-1 je nevyhnutné vnímať v kontexte modelu odhadu, to znamená v rámci očakávaných rozptylov odhadu, nakoľko situáciu považujeme za zaťaženú významnou mierou neistoty. Ich sumarizácia pre vertikálny profil teploty stacionárneho, prúdením neporušeného geotermického poľa je uvedená v Tabuľke 3.7.

Stredná teplota aktívneho povrchu pôdy bola zvolená v rozpätí $T_{(s)} = 7 - 11$ °C, s hustotou tepelného toku na povrchu $q_{(s)} = 90 - 100$ mW.m⁻² a priemerom $q_{(s)} = 95$ mW.m⁻², rovnako s normálnym rozdelením. Aplikáciou vzťahov [1] – [5] je odhadovaný interval $T_{(z)} = 70 - 90$ °C na báze panónsko-pliocénneho komplexu. Očakávaný pokles hustoty tepelného toku dosahuje $q_{(K1)} = 89 - 99$ mW.m⁻². Na báze kenozoika, ktorá vo vertikálnom profile zodpovedá spodnému vymedzeniu bazálnych klastík (Obrázok 3.12) dosahujú očakávané teploty $T_{(B,K3)} = 107 - 152$ °C so strednou hodnotou $MD(T_{(B,K3)}) = 125$ °C, respektíve s rozpätím $T_{(B,K3)} = 116 - 136$ °C v 90-percentnom intervale spoľahlivosti. Hustota tepelného toku na báze kenozoického vulkanosedimentárneho vývoja podľa modelu odhadu dosahuje $q_{(B,K3)} = 89 - 95$ mW.m⁻² v rovnakom intervale spoľahlivosti. Model odhadu pre teplotu na očakávanom strope rezervoárového prostredia / báze melafýrovej série dosahuje $T_{(T,RES)} = 141 - 186$ °C respektíve $T_{(T,RES)} = 151 - 171$ °C pre 90-percentný interval spoľahlivosti s očakávaným rozpätím hustoty tepelného toku $q_{(T,RES)} = 88 - 93$ mW.m⁻². Pre bázu rezervoárového prostredia – karbonátov série Veľkého boku / fatrika, model predpokladá absolútnu distribúciu teploty $T_{(B,RES)} = 156 - 209$ °C respektíve $T_{(B,RES)} = 170 - 193$ °C pre 90-percentný interval spoľahlivosti, v ktorom hustota tepelného toku predstavuje $q_{(B,RES)} = 87 - 92$ mW.m⁻².

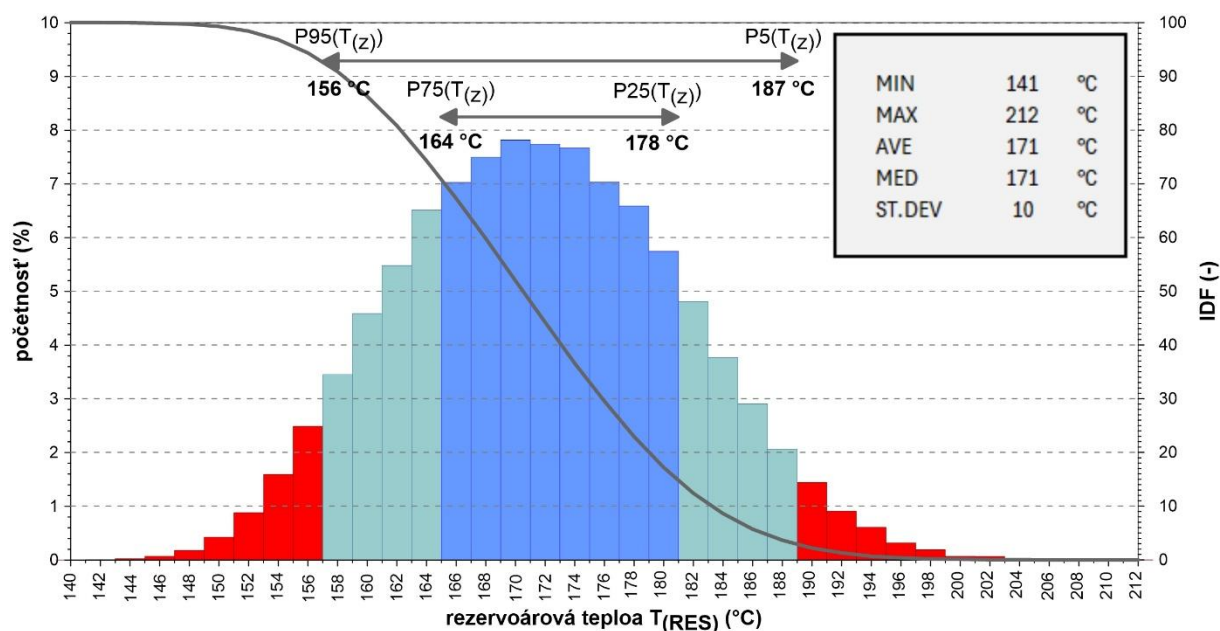
Porovnaním modelu uvedeného v Katalógu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) a očakávaného profilu GTŽ-1 (ŠUJAN ET AL., 2020) je zrejmé, že hĺbkové vymedzenie očakávaných karbonátov hronika (RES1) z Katalógu ($z_{(T,RES1)} = 3\,400 - 3\,600$ mpt, a $z_{(B,RES1)} = 3\,700 - 3\,800$ mpt) koreluje s vertikálnym rozpätím v profile vymedzených karbonátov série Veľkého boku / fatrika. Katalógom očakávané teploty $T_{(T,RES1)} = 144 - 161$ °C a $T_{(B,RES1)} = 156 - 163$ °C sú v spodnej hranici intervalu odhadu v profile GTŽ-1 $T_{(z)} = 150 - 198$ °C respektíve $T_{(z)} = 159 - 186$ °C v rozpätí 90-percentného intervalu spoľahlivosti (Obrázok 3.13). Tieto rozdiely je nevyhnutné vnímať predovšetkým v kontexte zmien v hrúbke nadložia (melafýrová séria hronika a vulkanosedimentárna výplň kotliny v okolí Lovče), ktoré vo vzájomnej zhode medzi oboma modelovými variantmi predstavuje tzv. tepelnú čiapku (heat-cap) a významne prispieva k nárastu teploty na strope rezervoárového prostredia. Histogram distribúcie modelovanej rezervoárovej teploty karbonátov v profile GTŽ-1 uvádza Obrázok 3.14.



Obrázok 3.13: Vertikálny stochastický model odhadu teploty v profile geologického vrtu GTŽ-1; stacionárne pole.

Tabuľka 3.7. Štatistická charakteristika modelu odhadov teploty na báze vymedzených komplexov profilu GTŽ-1

litostratigrafický komplex	komplex K1	komplex K2	komplex K3	komplex K4	komplex RES
	°C	°C	°C	°C	°C
minimum	70	88	107	141	158
maximum	91	117	152	188	211
priemer	81	101	126	161	181
medián	81	101	126	161	181
št.odchýlka	4	5	6	7	7
P95	76	94	117	151	171
P75	78	98	122	157	177
P25	83	104	129	165	186
P5	86	108	136	172	193



Obrázok 3.14: Model odhadu distribúcie rezervoárovej teploty v mezozoiku podľa profilu GTK-1 a v jeho okolí.

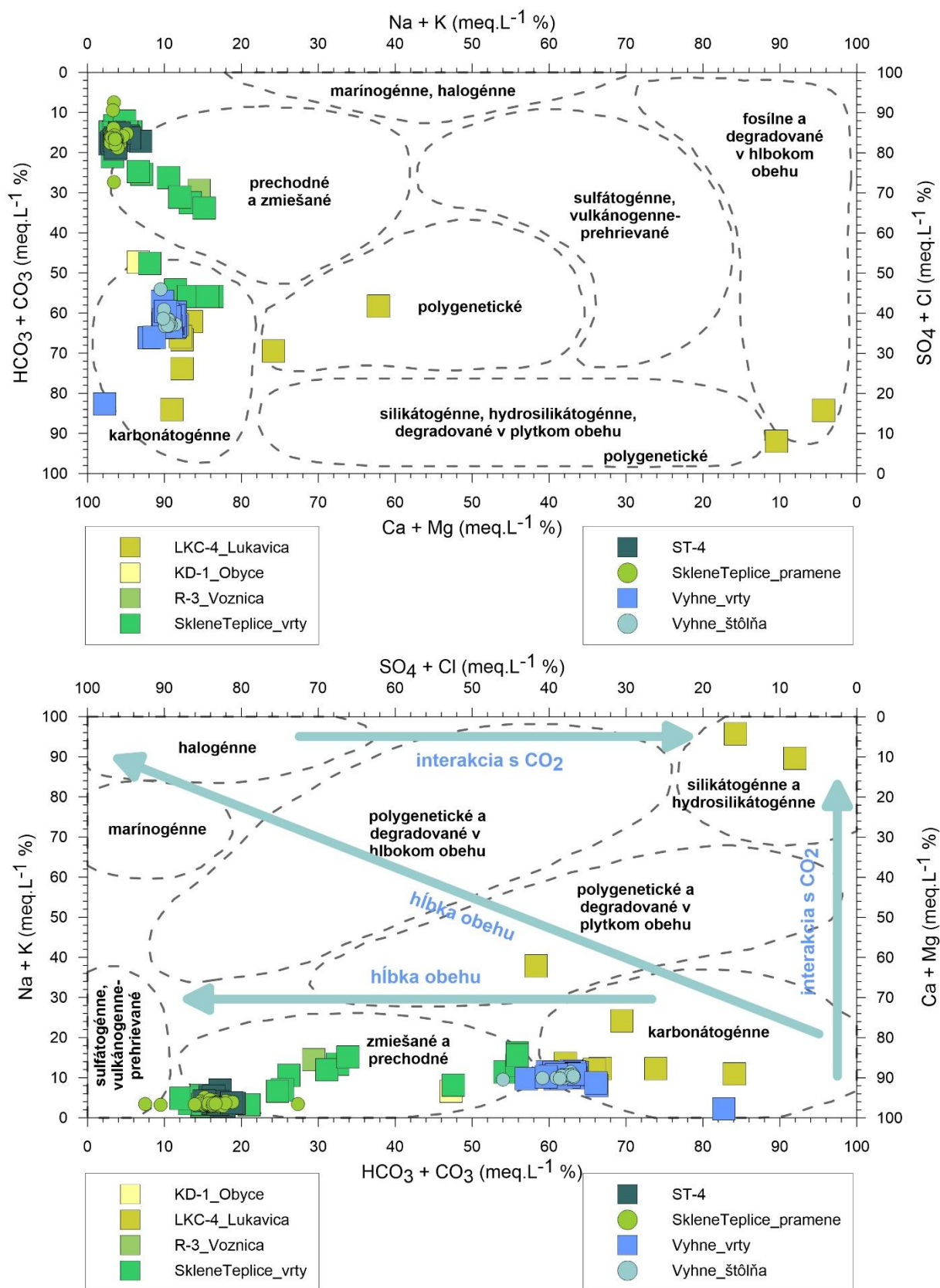
3.4 Hydrogeochemická charakteristika

Ako opakovane uvádzame vyššie, zdroje geotermálnej energie boli predovšetkým overené na lokalite Sklené Teplice a Vyhne, respektíve v menšej miere na lokalite Žarnovica – časť Lukavica (LKC-4), Obyce (KD-1) a Voznica (R-3).

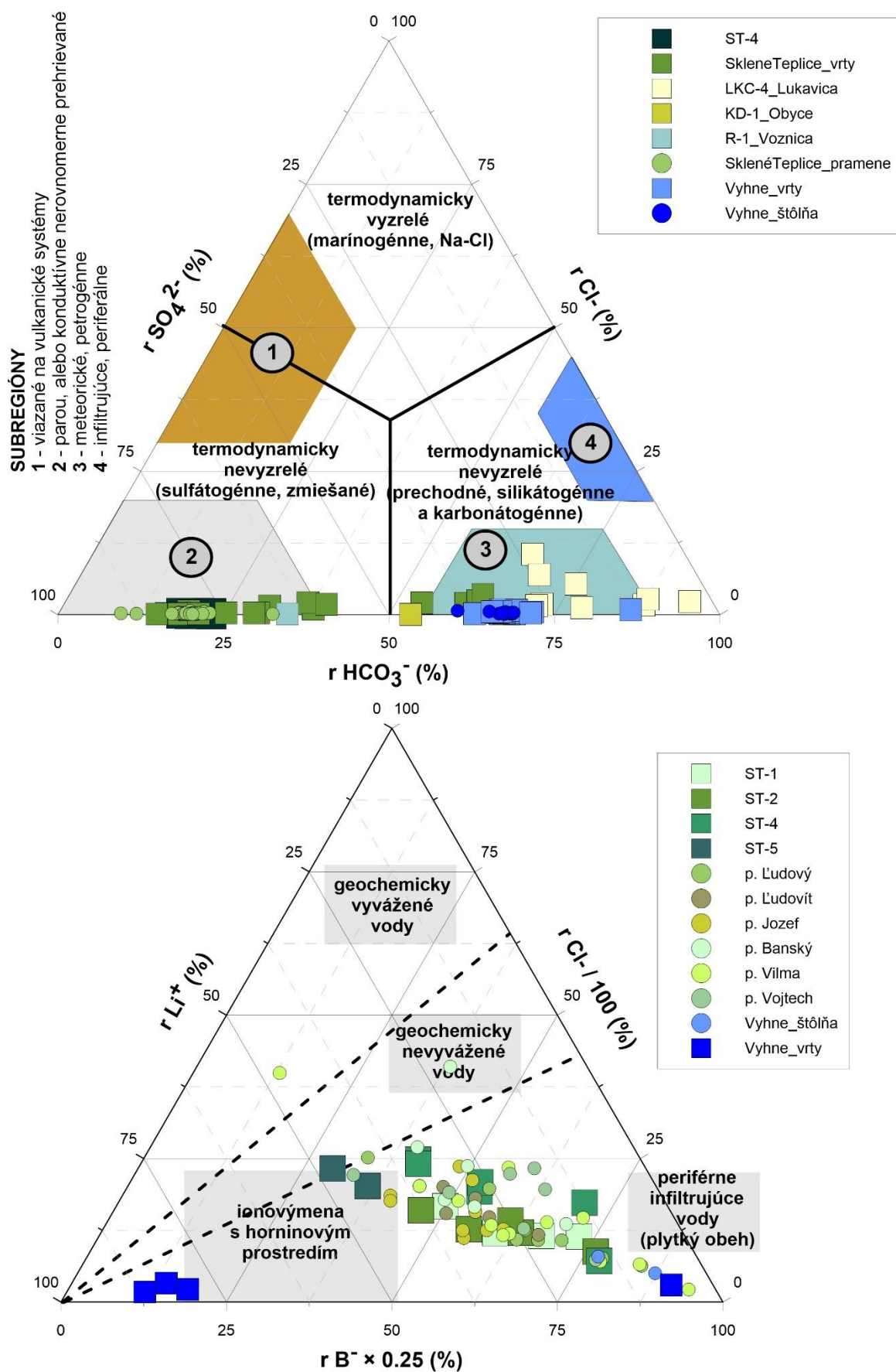
Klasifikačný Piperov ortogonálny a Langellier-Ludwigov diagram (Obrázok 3.15) zreteľne indikujú (a v súlade s, napr. REMŠÍK ET AL., 1997, 2000; FRANKO ET AL., 2003, 2006)

prevažujúci prechodný / zmiešaný typ ($\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$; menej $\text{Ca-Mg-SO}_4\text{-HCO}_3$) typický pre Sklené Teplice v porovnaní s karbonátogénnym (Ca-Mg-HCO_3) a hydrosilikátogénnym typom chemizmu na lokalitách Vyhne, respektíve Lukavica. Predovšetkým v poslednom prípade ide takmer definitívne o rozdielne procesy formovania chemického zloženia geotermálnych vôd, ktorý, aj vzhľadom na geologický profil vrtu, zrejme nemá súvislosť s hydrogeotermálnymi štruktúrami Žiarskej kotliny. Nepriame indikácie genetických diagramov poukazujú najmä na pomerne rýchly a intermediárny, až hlboký obeh. Prehľad základných štatistických ukazovateľov vybraných makrokomponentov zdrojov geotermálnej energie je uvedený v Tabuľke 3.8; korelogram geotermálnych vôd je uvedený na Obrázku 3.17.

Genetické HCS a CLB diagramy (Obrázok 3.16) zreteľne poukazujú na termodynamickú nevyzrelosť systému, avšak pri absolútnych pomeroch komponentov, ktoré indikujú prevažujúci dlhodobější obeh (prechod do regiónu ionovýmeny a geochemicky nevyvážených geotermálnych vôd na CLB diagrame), než blízkosť aktívnej infiltračnej oblasti (región 4 na HCS diagrame). Pri predpokladanom rozložení infiltračnej oblasti geotermálnych vôd na severozápadnom, severnom, a severovýchodnom až východnom okraji Žiarskej kotliny (FRANKO ET AL., 2003, 2006; DZÚRIK ET AL., 2023), potom tieto znaky môžu byť nepriamo prejavom intenzívneho naried'ovania zmiešavaním pred dosiahnutím výverovej oblasti. Vrt ST-4 (KLAGO, 1984; KLAGO – MATEJČEKOVÁ) zachytil termominerálne vody ešte v rezervoárovom prostredí (karbonátové komplexy fatrika), ktorého teplota ($T_{\text{ST-4}} = 36 - 57\text{ }^{\circ}\text{C}$) a priemerné absolútne koncentrácie chloridov ($c_{\text{Cl}} = 3,6\text{ mg.l}^{-1}$) sú najvyššie dokumentované vo výverovej oblasti, a ktorého naopak koncentrácie silikátov ($c_{\text{SiO}_2} = 21\text{ mg.l}^{-1}$) a Mg^{2+} zložky ($c_{\text{Mg}^{2+}} = 113\text{ mg.l}^{-1}$) sú najmenšie, môže za istých okolností indikovať stav termominerálnej vody pred procesom naried'ovania zmiešavaním lokálne infiltrujúcimi vodami plytkého, zrejme prevažne-cirkulačného (absentujúca, alebo potlačená akumulčná zložka) obehu s vyšším obsahom Mg^{2+} a SiO_2 v kenozoických vulkanických brekciách, tufoch, tufitoch a štruktúrne porušených porfýrických ryolitoch a puklinových systémoch, ktorý sa následne prejavuje prechodom prameňov k regiónu periférnych (infiltrujúcich) vôd blízkeho obehu. Tento proces naried'ovania potom môže ovplyvňovať pomery Mg/Ca vo vodnej zložke, ktorý je blízky pomerom v karbonátoch hronika (REMŠÍK ET AL., 2000), a zároveň vplývať na výsledné hodnoty korelogramov (Obrázok 3.17), v ktorých korelačná závislosť Na-Ca a Na-Mg je výrazne menšia, ako kombinácia Ca^{2+} a Mg^{2+} s K^+ , s extrémne nízkou závislosťou medzi TDS a Cl^- (kombinácia efektu naried'ovania a Mg-K alterácie naried'ujúcich vôd v silikátoch). **Túto dynamiku vo výverovej oblasti je ale nevyhnutné vnímať nad'alej ako hypotézu.**



Obrázok 3.15: Piperov ortogonálny (hore) a Langellier-Ludwigov klasifikačný diagram (dole) zdrojov geotermálnej energie v Žiarskej kotline



Obrázok 3.16: Triangulárne HCS (hore) a CLB (dole) diagramy zdrojov geotermálnej energie v Žiarskej kotline.

Tabuľka 3.8a: Lokalita Sklené Teplice: štatistické parametre základných makrokomponentov v dokumentovaných termominerálnych vodách

	T	ph	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂ ⁻	B ⁻	Li ²⁺	Fe	TDS
	°C	-	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹
lokalita: Sklené Teplice (pramene)														
minimum	27	6.4	307	12	14	8	129	2	789	24	0.1	0.1	0.1	1597
maximum	57	7.9	550	142	31	21	397	12	1656	45	3.7	0.1	12.7	2887
priemer	46	6.9	494	113	22	12	345	4	1426	33	0.6	0.1	0.5	2458
medián	48	6.9	499	114	23	12	348	3	1437	33	0.5	0.1	0.3	2474
P95	38	6.5	466	105	19	11	330	2	1337	24	0.2	0.1	0.1	2338
P90	38	6.6	473	107	20	11	336	3	1354	24	0.3	0.1	0.1	2355
P75	42	6.8	489	110	22	11	342	3	1417	26	0.3	0.1	0.2	2441
P25	51	7.1	504	116	23	13	354	4	1457	35	0.6	0.1	0.4	2493
P10	52	7.4	509	118	24	13	354	5	1470	41	1.3	0.1	0.6	2514
P5	53	7.5	514	122	24	14	361	5	1484	43	1.5	0.1	0.9	2538
lokalita: Sklené Teplice (vrty)														
minimum	6	6.4	26	8	6	2	55	2	42	4	0.3	0.1	0.1	188
maximum	57	7.9	539	143	52	32	580	15	1903	37	1.3	0.3	37.8	2742
priemer	46	6.8	463	104	24	12	345	4	1324	28	0.5	0.1	7	2319
medián	52	6.8	506	113	23	12	348	3	1460	32	0.5	0.1	0.9	2502
P95	10	6.5	66	19	11	2	100	3	137	12	0.3	0.1	0.1	420
P90	21	6.6	301	70	19	7	280	3	858	19	0.3	0.1	0.1	1563
P75	48	6.7	497	110	22	12	341	3	1437	26	0.4	0.1	0.5	2476
P25	53	6.9	523	115	25	13	375	4	1478	34	0.5	0.1	2.9	2602
P10	53	7.1	532	118	33	15	417	6	1502	35	0.9	0.1	31.8	2647
P5	54	7.5	536	120	40	17	440	7	1510	36	1.2	0.2	36.4	2708

Tabuľka 3.8b: Lokalita Vyhne: štatistické parametre základných makrokomponentov v dokumentovaných termominerálnych vodách

	T	ph	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SiO ₂ ⁻	B ⁻	Li ²⁺	Fe	TDS
	°C	-	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹	mg.l ⁻¹
lokalita: Vyhne (vrty)														
minimum	28	6.8	156	41	20	14	434	2	243	21	1.3	0.1	0.3	991
maximum	38	8	184	50	27	18	550	5	284	21	2.8	0.1	7.3	1092
priemer	35	7.2	175	46	24	17	529	3	254	21	1.8	0.1	1.2	1069
medián	36	7.3	176	46	24	17	537	3	252	21	1.3	0.1	0.8	1071
P95	32	6.8	168	44	23	16	501	2	244	21	1.3	0.1	0.5	1047
P90	33	6.8	173	44	23	16	517	2	245	21	1.3	0.1	0.5	1061
P75	34	6.9	174	45	23	17	527	2	248	21	1.3	0.1	0.7	1065
P25	36	7.4	177	46	25	18	542	4	257	21	2.1	0.1	0.9	1082
P10	36	7.4	177	48	25	18	544	4	268	21	2.5	0.1	1.5	1087
P5	36	7.6	179	49	25	18	545	5	275	21	2.7	0.1	3.2	1089
lokalita: Vyhne (šachta)														
minimum	16	6.5	85	41	4	2	388	2	59	8	0.1	0.1	0.1	597
maximum	44	8.1	188	49	26	23	562	7	295	32	3.5	1.4	26.3	1167
priemer	35	6.8	169	45	23	18	515	3	240	22	0.6	0.4	8.6	1038
medián	36	6.7	176	45	24	18	528	3	249	22	0.5	0.1	7.1	1080
P95	28	6.5	137	41	17	12	457	2	185	15	0.1	0.1	0.4	893
P90	29	6.5	153	43	20	15	464	2	214	18	0.1	0.1	0.6	925
P75	35	6.6	161	44	22	16	481	3	232	21	0.1	0.1	0.9	982
P25	36	6.8	181	47	25	22	544	4	255	23	0.8	0.8	14.2	1110
P10	37	7.2	184	48	25	23	550	5	268	29	0.9	1.1	18	1126
P5	39	7.5	186	48	25	23	552	6	274	29	1.2	1.4	20.5	1134

	T	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	SiO ₂	TDS
T										
Ca	0.71									
Mg	0.64	0.89								
Na	0.4	0.44	0.36							
K	0.53	0.71	0.6	0.62						
HCO ₃	0.55	0.75	0.69	0.64	0.58					
Cl	0.2	0.3	0.26	0.17	0.17	0.1				
SO ₄	0.71	0.98	0.91	0.4	0.7	0.7	0.33			
SiO ₂	0.1	0.22	0.2	0.36	0.1	0.1	0.1	0.22		
TDS	0.72	0.99	0.91	0.53	0.73	0.79	0.3	0.98	0.24	

Obrázok 3.17: Sklené Teplice – korelogram makrokomponentov v termominerálnych vodách

Výnimkou z vyššie uvedených vzťahov je vrt ST-5 na východnom okraji sklenoteplického ostrova so stabilne vysokými priermi Cl⁻ ($c_{(Cl)} = 9,4 \text{ mg.l}^{-1}$) a Li²⁺ zložky ($c_{(Li)} = 0,13 \text{ mg.l}^{-1}$), pri súčasne nízkom B⁻ ($c_{(B)} = 0,4 \text{ mg.l}^{-1}$), overujúci termominerálne vody v hlbokom rezervoárovom prostredí (karbonáty) v nadloží s vystupujúcimi intrudovanými karbonátmi, ktoré prechádzajú do porfýrických a vulkanoklastických komplexov. Ide o hodnoty významne podobné vrtu ST-4, avšak na protihľahlej strane štruktúry z pohľadu pozície vymedzenej (REMŠÍK ET AL., 2000; FRANKO ET AL., 2003, 2006; DZÚRIK ET AL., 2023) infiltračnej a tranzitno-akumulačnej oblasti. Ak zvážime, že prechod medzi regiónmi rezervoárovej dynamiky súvisí s poklesom Cl⁻ (pokles nariadením) a nárastom B- zložky (interakcia lokálne infiltrujúcich, nariadených vôd s vulkanickými a vulkanoklastickými komplexmi), a v tomto prípade je Cl⁻ v rámci dokumentovaných hodnôt jedno z najvyšších; potom obraz vrtu ST-5 môže indikovať ďalšiu dynamickú fáciu lokálneho subsystému prúdenia a jeho vertikálnu rozvetvenosť charakteristické pre cirkulačné systémy bazénovej segmentácie, pre ktorú sú charakteristické ako horizontálne, tak aj vertikálne vetvenia filtračných profilov v rámci rovnakého rezervoárového prostredia. V tejto situácii ide zrejme o geotermálne vody, ktoré sa ale pravdepodobne nepodieľajú na dotovaní infiltračnej oblasti.

Vrty ST-4 a ST-5 podľa tohto modelu môžu predstavovať stav pred nariadením vyvierajúcich geotermálnych vôd. Pri očakávanej geometrii rezervoárového prostredia (ŠUJAN ET AL., 2020; FRIČOVSKÝ ET AL., 2025), vekovom rozmedzí geotermálnych vôd (FRANKO, 2000, 2001; FRANKO ET AL., 2003, 2006), a pozícii infiltračnej, tranzitnej, a tranzitno-akumulačnej

oblasti (REMŠÍK ET AL., 2000; FRANKO ET AL., 2003; DZÚRIK ET AL., 2023) ale ide stále o veľmi nízke koncentrácie väčšiny makrokomponentov, ak tieto vody predstavujú fáciu pred nariadením počas výstupu v infiltračnej oblasti. Detto pri zohľadnení možných teplôt stacionárneho prostredia na profile infiltračná – tranzitná – tranzitno-akumulačná a akumulácia oblasť. Za predpokladu, že vyššie uvedené platí, potom do úvahy prichádzajú nasledujúce možnosti:

- a) nariadenie interpretované predovšetkým pre pramenné vývery a zachytené zdroje vo výverovej oblasti sa realizuje aj s dosahom do rezervoárového prostredia, a netýka sa len výstupných ciest a kontaktu voda-voda vo výstupnej tranzitnej zóne a zóne výveru
- b) v skutočnosti sú termominerálne (geotermálne) vody zachytené vrtmi ST-4 a ST-5 nariadené v predchádzajúcej etape cirkulovania v hydrogeotermálnom systéme, čo následne poukazuje na možnosť hydraulického komunikácie žiarskej a sklenoteplickej štruktúry cez systémy bazénovej segmentácie, vertikálnej alebo laterálnej evázie, alebo elevovaného podlažia.

Obe možnosti priamo nepotvrdzujú komunikáciu medzi žiarskou a sklenoteplickou hydrogeotermálnou štruktúrou; zároveň však túto komunikáciu ani nevylučujú. Vzhľadom na tektonickú a litologickú členitosť geologického prostredia a očakávané geotermické pomery je vývoj systémov bazénovej segmentácie, elevovaného podlažia, a laterálneho / vertikálneho prestupu (napr. SOREY ET AL., 1982; WALKER ET AL., 2005; HEASLER ET AL., 2009) prirodzený. Tieto systémy sú charakteristické opakovanými prestupmi medzi jednotlivými filtračnými profilmi v rámci konkrétnej rezervoárovej jednotky, alebo medzi jednotlivými rezervoárovými jednotkami. Zmena kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia môže v jednej rezervoárovej jednotke, alebo jednej hydrogeotermálnej štruktúre, môže viesť k zmenám kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového média prestupujúceho do susednej hydrogeotermálnej štruktúry, s ktorou komunikuje. Prakticky by to znamenalo, že funkcia zlomového okraja kotliny nie je vyslovene hydrogeologickou bariérou. Ide však o stav, ktorý je nevyhnutné overiť monitorovaním a vyhodnocovaním priamych a nepriamych indikátorov režimov prúdenia, a ktorý je zároveň možné realizovať až po realizácii hydrogeotermálneho vrtu v priestore žiarskej hydrogeotermálnej štruktúry. **Zároveň – ani hydraulická, alebo termická komunikácia medzi oboma štruktúrami nevytvára základ pre odmietavé stanovisko realizácie vrtu mimo ochranných pásiem. Zvyšuje však nároky na komplexnosť monitorovacieho systému a manažmentu rizík.** Rovnako, táto situácia vyvoláva potrebu štúdia dopadu dlhodobej produkcie nielen na Zámer dubletu, ale aj na možné tektonické okraje Žiarskej kotliny.

3.5 Thermochemický model Žiarskej kotliny

Hydraulická (prúdením) alebo termická (nerovnomerným prehrievaním) spojitosť žiarskej kotliny a sklenoteplického ostrova je jednou z dlhodobých neistôt celej oblasti. Ide o pomerne zásadný stav, nakoľko sú prírodné liečivé zdroje v Sklených Tepliciach z legislatívneho, ale aj spoločenského hľadiska primárnym predmetom ochrany. Princíp predbežnej opatrnosti definovaný Zákonom č. 17/1992 Zb. v znení neskorších predpisov (Zákon o životnom prostredí) jasne definuje nevyhnutnosť podniknúť (vzhľadom na východiskovú situáciu) kroky adekvátne k prevencii, alebo zabráneniu rizík ovplyvnenia kvalitatívneho alebo kvantitatívneho stavu dotknutých zložiek životného prostredia – v tomto prípade rezervoárového prostredia, zdrojov geotermálnej energie a termominerálnych vôd v Sklených Tepliciach. V zmysle aplikačnej praxe rezervoárového inžinierstva (napr. GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON, 2022) bol pre účely Posudku zostrojený thermochemický model interakcie zdrojov geotermálnej energie s okolím, ktorého účelom je:

- prispieť k názorom o spojitosti / nespojitosti oboch hydrogeotermálnych štruktúr;
- prispieť k názorom o vzťahu termominerálnych vôd sklenoteplickej štruktúry k rezervoárovému prostrediu a dynamike v grábenovej časti Žiarskej kotliny;
- posúdiť nevyhnutnosť konštrukcie modelov odhadu rezervoárovej odozvy voči dlhodobej produkcii pre produkčnú dubletovú schému definovanú Zámerom – a zároveň pre sklenoteplickú hydrogeotermálnu štruktúru; a
- posúdiť nevyhnutnosť hodnotenia rizík vyplývajúcich z dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie ako na okolie produkčnej dubletovej schémy definovanej Zámerom, tak aj na subsystémy cirkulačno-akumulačnej sklenoteplickej štruktúry a využívané prírodné liečivé zdroje v Sklených Tepliciach.

Za týmto účelom boli realizované geochemické a thermochemické modelovania:

- silikátová geotermometria (viď. 3.5.2)
- zmiešavací X-Si-H (FOURNIER – TRUESDELL, 1974) model silikátov a fixovanej entalpie (viď. 3.5.3); a
- bilančný model jednostupňového adiabatického varu (viď 3.5.4).

Zdôrazňujeme, že ide o predbežný, indikatívny model, a ďalšie aplikácie štandardne využívaných geotermometrických a termochemických techník by nevyhnutne boli záležitosťou samostatnej štúdie. Následne je aj **výsledok nevyhnutne vnímať ako indikatívny model, ktorého overenie si vyžaduje realizáciu hlbokého geotermálneho vrtu (vrtov) v priestore žiarskej hydrogeotermálnej štruktúry. Zároveň zdôrazňujeme, že samotná hydraulická / termická komunikácia, ktorá by bola modelom indikovaná, nezakladá – keďže ide o lokalitu mimo ochranného pásma – dôvod odmietavého stanoviska, a neznamená nevyhnutné ohrozenie kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov prírodných liečivých vôd v Sklených Tepliciach.** Komunikácia medzi hydrogeotermálnymi systémami je štandardným javom. Namiesto toho, ak by došlo k indikácii, alebo neskôr overeniu týchto foriem komunikácií medzi oboma hydrogeotermálnymi štruktúrami, je na mieste uvažovať o komplexnom monitorovaní systému a manažmente rizík, založených na pravidelnom vyhodnocovaní a kalibrácii prediktívnych modelov rezervoárovej odozvy, s následnými, adekvátnymi krokmi, ktorých hlavným cieľom je ochrana prírodných liečivých zdrojov.

3.5.1 Východzí stav: predpoklady a situácia

Predpoklady, ktoré má modelové riešenie potvrdiť, alebo vyvrátiť, je na základe vyššie uvedeného možné sumarizovať nasledovne:

- sklenoteplická hydrogeotermálna štruktúra je otvorená
- infiltračná, zostupná-tranzitná a akumulčná oblasť sa nachádzajú v Žiarskej kotline
- tranzitno-akumulčná oblasť zodpovedá severozápadnému okraju sklenoteplického ostrova
- potenciálne studené členy sú formované plytkým lokálnym obehom bez dlhej doby zdržania v geologickom prostredí
- termominerálne vody overené zdrojmi Banský, Gejza, Irena, Janka, Jozef, Ľudovít, Ľudový, Rudolf, Viera, Vilma a Vojtech (Tabuľka 3.9) sú považované za produkty zmiešavania medzi lokálnymi studenými členmi plytkého obehu a vystupujúcimi termominerálnymi vodami overenými v rezervoárovom prostredí vrtmi ST-4 ev. ST-5 (I. skupina)
- termominerálne vody overené vrtom ST-4 predstavujú tzv. termálny člen – geotermálne vody mimo svojej dlhodobej akumulčnej oblasti (FOURNIER – TRUESDELL, 1974), ktorých pôvodné prostredie sa pravdepodobne nachádza v hlbších častiach žiarskej kotliny (II. Skupina)

- referenčné podmienky pre termominerálne vody prameňov na lokalite Sklené Teplice odvodzujeme zo stacionárneho geotermického prostredia sklenoteplického ostrova (Obrázok 3.10 a 3.11), podľa predpokladu oblasti, kde pred zmiešavaním nadobudli posledný stav termickej rovnováhy voči silikátom
- referenčné podmienky pre termominerálne vody overené vrtom ST-4, vzhľadom na ich definíciu, kladieme do oblasti Lovče, posudzujúc ako model geotermického poľa (Obrázok 3.10 a 3.11), tak aj stochastický model vychádzajúci z reambulovanej geometrie (Obrázok 3.14) s 90-percentným intervalom spoľahlivosti.

3.5.2 Silikátová geotermometria

Základom silikátovej geotermometrie je selekcia polymorfu SiO_2 , ktorý kontroluje jeho rozpustnosť v rezervoárovom prostredí pri daných p-T-t podmienkach; s následnou kvalitatívnou, respektíve kvantitatívnou analýzou.

Termominerálne vody I. skupiny – pre ktorých chemické rozbory boli kompletne – rozptyl teploty $T_{(\text{wh})} = 27 - 53\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $c_{(\text{SiO}_2)} = 24 - 45\text{ mg.l}^{-1}$. Pozícia vzoriek voči krivkám rozpustnosti chalcedónu a HT kremeňa (Obrázok 3.18) osciluje. Ak je teplota rezervoárového prostredia v okolí sklenoteplického ostrova $T_{(\text{RES2})} = 50 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, nie je pravdepodobné, aby kontrolujúcou fázou bol HT kremeň (FOURNIER – POTTER, 1982), a rozpustnosť SiO_2 v termominerálnych vodách, aj vzhľadom na ich koncepčný model (viď 3.5.1) kontroluje chalcedón. Priemerné odhady teploty posledného rovnovážneho stavu $T_{(\text{CHALC})} = 51 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre chalcedónové geotermometre (Tabuľka 3.10) spolu s pozíciou vzoriek nad krivkami rovnovážnej koncentrácie potom poukazujú na **ochladzovanie primárnych termominerálnych vôd** (pre túto skupinu je to II. skupina) prejavene horizontálnym odstupom od rovnovážnych kriviek rozpustnosti **zmiešavaním**, pravdepodobne s rozdielnou intenzitou / rýchlosťou. Keďže priemery $c(\text{SiO}_2)$ sú pre I. skupinu pri nižšej teplote vyššie, ako priemery $c_{(\text{SiO}_2)}$ pre II. skupinu, intenzita a rýchlosť výverov následne ovplyvňuje nárast SiO_2 v termominerálnych vodách, pričom podsýtené vzorky predstavujú rýchlejšie výstupy viazané na hlavné zlomové systémy a ich križovania s vyššou permeabilitou (bez kompenzácie straty SiO_2 nariedovaním) pri nízkej strate teploty oproti rezervoárovému prostrediu (pod krivkou rovnovážneho stavu); kým pomalšie výstupy sprevádza konduktívne ochladzovanie a nárast

rozpusteného SiO₂ prúdením v zrejme pri-zlomových puklinových zónach (posun nad krivku rovnovážneho stavu).

Termominerálne vody II. skupiny (teploty $T_{(wh)} = 40 - 56$ °C a $c_{(SiO_2)} = 23 - 36$ mg.l⁻¹) vykazujú komplexnejšie charakteristiky z pohľadu silikátovej geotermometrie. Referenčným prostredím, vzhľadom na teóriu ich pôvodu v žiarskej hydrogeotermálnej štruktúre, nech je ako výsledok stacionárneho geotermického modelu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025; Obrázok 3.11) $T_{(RES1)} = 144 - 163$ °C; respektíve $T_{(RES)} = 156 - 187$ °C podľa stochastického modelu odhadu na základe reambulovanej geologickej stavby (ŠUJAN ET AL., 2020) v okolí lokality Lovča (Obrázok 3.14). V oblasti sklenoteplického ostrova sa teploty stacionárneho prostredia pohybujú v intervale $T_{(RES2)} = 50 - 80$ °C (Obrázok 3.11) respektíve $T_{(RES1)} = 20 - 60$ °C v prípade, ak je prítomná aj plytká rezervoárová jednotka (Obrázok 3.10). Vzorky overené vrtmi ST-1 a ST-2 vykazujú mimoriadny fit s krivkami chalcedónových geotermometrických funkcií rozpustnosti SiO₂ (Obrázok 3.18); vzorka vrtu ST-4 vykazuje pozíciu pod krivkami. Ak berieme do úvahy fakt, že termominerálne vody prešli cirkuláciou a akumuláciou v hlbších častiach Žiarskej kotliny (viď ich koncepčný model v 3.5.1), potom nie je možné, aby vzhľadom na oboma variantmi modelované rezervoárové teploty bol kontrolnou fázou chalcedón. Odhady teploty posledného rovnovážneho stavu pre HT kremeň $T_{(SiO_2)} = 57 - 106$ °C ale indikujú, vzhľadom na geotermické pole, prostredie, kde očakávame prechod medzi hlbinnou časťou kotliny a perifériou jej podložia v sklenoteplickom ostrove. Pri tejto rezervoárovej dynamike nie je možné, najmä v karbonatickom prostredí, očakávať nadobudnutie rovnovážneho stavu, nakoľko okrem zmeny teploty, zmenou hĺbky dochádza k zmene parciálneho tlaku CO₂, ktorého prítomnosť sa viaže na očakávanú saturáciu kalcitmi a Mg-kalcitmi, a ktorý v karbonatickom prostredí primárne atakuje Na- a K-živce, čím znemožňuje nadobudnutie rovnováhy voči SiO₂. Tento stav môže teda indikovať stratu pôvodnej koncentrácie rozpusteného SiO₂, a to pred teplotou vzorkovania, ktorá je najvýraznejšia práve vo vrte ST-4. Stratu je možné vysvetliť alebo vyvráťaním počas konduktívneho ochladzovania (ak v predchádzajúcej etape došlo k nadobudnutiu presýtenia a následne rovnovážneho stavu), alebo nariedovaním. Na test zmiešavania využívame zmiešavací X-Si-H (FOURNIER – TRUESDELL, 1974) model silikátov a fixovanej entalpie (viď. 3.5.3). Stav, a proces, pri ktorom termominerálne vody vo vrte ST-4 strácajú SiO₂ zložku, je následne kritický z pohľadu interpretácií možných budúcich výsledkov monitoringu chemizmu na lokalite Lovča, a v prípade overenej hydraulikkej alebo termickej komunikácie, aj na lokalite Sklené Teplice.

Tabuľka 3.9a: Žiarska kotlina: kvantitatívna geotermometria, nízko- a strednoteplotné polymorfy SiO₂

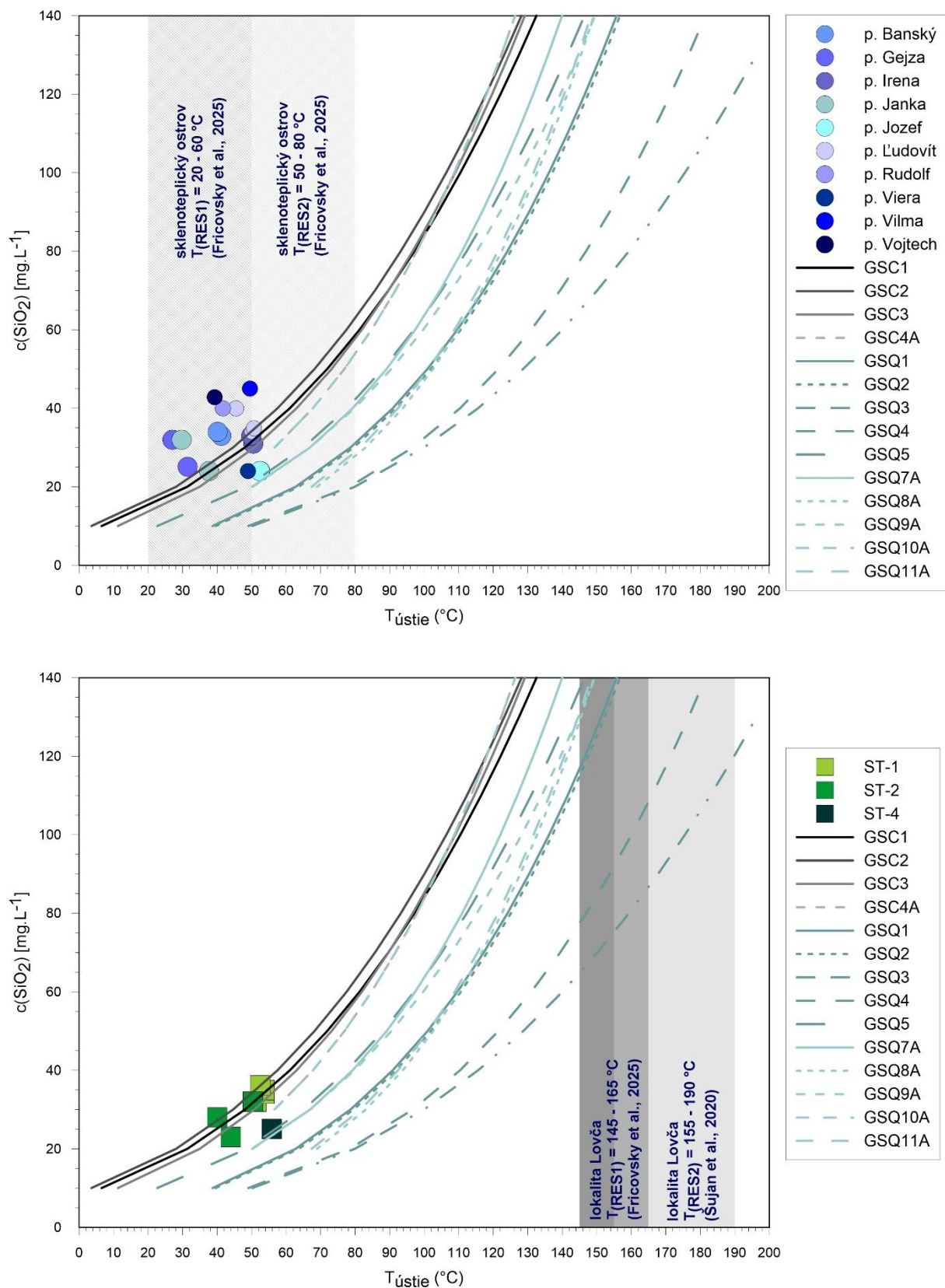
parameter	vzorkovanie		geotermometrické funkcie								
	T	SiO ₂	GSA1	GSA2	GSM	GSOL	GSOH	GSC1	GSC2	GSC3	GSC4A
	°C	mg/l	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Banský	41	33	-30	-29	17	25	-12	52	49	55	60
Banský	40	34	-29	-28	17	26	-11	54	50	56	61
Gejza	31	25	-39	-38	10	15	-22	41	37	44	50
Gejza	27	32	-31	-30	16	24	-13	51	47	53	59
Irena	51	31	-32	-31	15	23	-14	49	46	52	58
Irena	50	33	-30	-29	17	25	-12	52	49	55	60
Janka	38	24	-40	-39	9	13	-24	39	35	42	48
Janka	30	32	-31	-30	16	24	-13	51	47	53	59
Jozef	53	24	-40	-39	9	13	-24	39	35	42	48
Jozef	52	24	-40	-39	9	13	-24	39	35	42	48
Ludovít	46	40	-23	-23	22	33	-5	61	57	63	68
Ludový	50	34	-29	-28	17	26	-11	54	50	56	61
Ludový	51	35	-28	-27	18	27	-10	55	51	57	62
Rudolf	42	40	-23	-23	22	33	-5	61	57	63	68
Viera	49	24	-40	-39	9	13	-24	39	35	42	48
Vilma	50	45	-18	-19	26	38	0	67	63	68	73
Vojtech	39	43	-20	-20	24	36	-2	64	61	66	70
ST-1	51	32	-31	-30	16	24	-13	51	47	53	59
ST-1	54	34	-29	-28	17	26	-11	54	50	56	61
ST-1	54	35	-28	-27	18	27	-10	55	51	57	62
ST-1	53	36	-26	-26	19	29	-9	56	53	59	64
ST-2	44	23	-42	-40	8	12	-25	37	34	40	47
ST-2	40	28	-35	-34	13	19	-18	45	42	48	54
ST-2	50	32	-31	-30	16	24	-13	51	47	53	59
ST-4	56	25	-39	-38	10	15	-22	40	37	44	50

Tabuľka 3.9b: Žiarska kotlina: kvantitatívna geotermometria, vysokoteplotný (HT) polymorf SiO₂ (kremeň)

parameter	vzorkovanie		geotermometrické funkcie											
	T	SiO ₂	GSQ1	GSQ2	GSQ3	GSQ4	GSQ5	GSQ6	GSQ7A	GSQ8A	GSQ9A	GSQ10A	GSQ11A	GST1
	°C	mg/l	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Banský	41	33	83	84	105	101	69	105	71	87	71	60	85	57
Banský	40	34	84	85	107	103	70	107	72	88	72	61	86	58
Gejza	31	25	71	72	91	89	58	93	59	77	59	50	75	44
Gejza	27	32	81	82	103	100	68	104	70	85	70	59	84	55
Irena	51	31	80	81	102	98	66	102	68	84	68	58	83	54
Irena	50	33	83	84	105	101	69	105	71	87	71	60	85	57
Janka	38	24	70	71	89	86	56	91	58	75	58	48	74	42
Janka	30	32	81	82	103	100	68	104	70	85	70	59	84	55
Jozef	53	24	70	71	89	86	56	91	58	75	58	48	74	42
Jozef	52	24	70	71	89	86	56	91	58	75	58	48	74	42
Ludovít	46	40	91	92	116	110	78	115	79	94	80	68	92	66
Ludový	50	34	84	85	107	103	70	107	72	88	72	61	86	58
Ludový	51	35	85	86	108	104	72	108	73	89	74	62	87	59
Rudolf	42	40	91	92	116	110	78	115	79	94	80	68	92	66
Viera	49	24	70	71	89	86	56	91	58	75	58	48	74	42
Vilma	50	45	96	97	122	116	83	121	84	98	85	73	97	72
Vojtech	39	43	94	95	119	114	81	118	82	96	83	70	95	69
ST-1	51	32	81	82	103	100	68	104	70	85	70	59	84	55
ST-1	54	34	84	85	107	103	70	107	72	88	72	61	86	58
ST-1	54	35	85	86	108	104	72	108	73	89	74	62	87	59
ST-1	53	36	86	87	110	105	73	110	75	90	75	64	88	61
ST-2	44	23	68	69	87	85	54	89	56	74	56	47	72	40
ST-2	40	28	76	77	96	93	62	98	64	81	64	54	79	49
ST-2	50	32	81	82	103	100	68	104	70	85	70	59	84	55
ST-4	56	25	71	72	91	88	58	93	59	77	59	50	75	44

Tabuľka 3.10: Prehľad využitých geotermometrických funkcií pri kvantitatívnej silikátovej geotermometrii

Fáza / polymorph	Geotermometer	Autor	Typ modelu	Kód
Amorfne SiO ₂	$[731 / (4.52 - \log CS)] - 273.15$	Fournier, 1977	konduktívny	GSA1
	$121.6 + 0.2694CS - 1.8101 \cdot 10^{-4}CS^2 + 7.5521 \cdot 10^{-8}CS^3 + 55.184 \log CS$	Gunarsson & Arnórsson, 2000	konduktívny	GSA2
Moganit	$30.7 + 0.53113CS + 1.2578 \cdot 10^{-4}CS^2 - 5.9241 \cdot 10^{-7}CS^3 + 19.57 \log CS$	Gíslason et al., 1997	konduktívny	CGM
Chalcedón	$[1032 / (4.69 - \log CS)] - 273.15$	Fournier, 1977	konduktívny	GSC1
	$[1021 / (4.69 - \log CS)] - 273.15$	Arnórsson et al., 1983	konduktívny	GSC2
	$[1112 / (4.91 - \log CS)] - 273.15$	Fournier, 1991	konduktívny	GSC3
	$[1264 / (5.31 - \log CS)] - 273.15$	Arnórsson et al., 1983	adiabatický	GSC4A
Kremeň	$[1309 / (5.198 - \log CS)] - 273.15$	Fournier, 1977	konduktívny	GSQ1
	$[1315 / (5.205 - \log CS)] - 273.15$	Truesdell, 1975	konduktívny	GSQ2
	$[1157.7 / (4.88 - \log CS)] - 273.15$	Verma, 2011	konduktívny	GSQ3
	$42.2 + 0.28831CS - 3.6686 \cdot 10^{-4}CS^2 + 3.1665 \cdot 10^{-7}CS^3 + 88.390 \log CS$	Fournier & Potter, 1982	konduktívny	GSQ4
	$55.3 + 0.3659CS - 5.3954 \cdot 10^{-4}CS^2 + 5.5132 \cdot 10^{-7}CS^3 + 74.360 \log CS$	Arnórsson et al., 1988	konduktívny	GSQ5
	$44.119 + 0.24469mS - 1.7414 \cdot 10^{-4}mS^2 + 79.305 \log mS$	Verma & Santoyo, 1997	konduktívny	GSQ6
	$66.9 + 0.1378CS - 4.9727 \cdot 10^{-5}CS^2 + 1.0468 \cdot 10^{-8}CS^3 + 87.841 \log CS$	Arnórsson et al., 1988	adiabatický	GSQ7A
	$[1522 / (5.75 - \log CS)] - 273.15$	Fournier, 1973	adiabatický	GSQ8A
	$[1164 / (4.9 - \log CS)] - 273.15$	Arnórsson et al., 1983	adiabatický	GSQ9A
	$[1264 / (5.81 - \log CS)] - 273.15$	Arnórsson et al., 1983	adiabatický	GSQ10A
	$[1498 / (5.7 - \log CS)] - 273.15$	Arnórsson et al., 1983	adiabatický	GSQ11A
Opál	$[1000 / (4.84 - \log CS)] - 273.15$	Fournier, 1977	konduktívny	GSOL
	$[781 / (4.51 - \log CS)] - 273.15$	Fournier, 1977	konduktívny	GSOH



Obrázok 3.18: Vzťah rovnovážnych kriviek silikátovej geotermometrie a vzoriek termominerálnych vôd sklenoteplického ostrova: I. skupina – pramene (hore), II. skupina – vrty (dole)

3.5.3 Zmiešavací model X-Si-H (silikáty – entalpia)

Pre posúdenie možnej komunikácie hydrogeotermálnych štruktúr sklenoteplického ostrova a žiarskej kotliny, respektíve ich možné súvislosti sú využité nasledovné členy modelu (FOURNIER – TRUESDELL, 1974):

- termálny člen I. skupiny (TW1): prírodné a zachytené pramene sklenoteplického ostrova (p. Banský, p. Gejza, p. Irena, p. Janka, p. Jozef, p. Ľudovít, p. Rudolf, p. Viera, p. Vilma a p. Vojtech; pri priemerných hodnotách $T_{(TW1)} = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{(TW1)} = 33\text{ mg.l}^{-1}$
- termálny člen II. skupiny (TW2): termominerálne vody vrtu ST-4 s reprezentatívnymi hodnotami $T_{(TW2)} = 43\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{(TW2)} = 33\text{ mg.l}^{-1}$
- studený člen I. skupiny (CW1): infiltrujúce podzemné vody periférneho, lokálneho obehu v okolí sklenoteplického ostrova, s cirkulačnými štruktúrami v kenozoických vulkanoklastických sedimentoch: $T_{(CW1)} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{(CW1)} = 13\text{ mg.l}^{-1}$ (na základe priemerov lokálnych vodných zdrojov)
- studený člen II. skupiny (CW2): infiltrujúce epitermálne vody : $T_{(CW2)} = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S_{(CW2)} = 11\text{ mg.l}^{-1}$ (na základe priemerov lokálnych vodných zdrojov periférie žiarskej kotliny a pri teplotných podmienkach očakávaného stropu mezozoika na severovýchodnom okraji sklenoteplického ostrova)
- koncový člen I. skupiny (GW1): testovaný stav zdrojov geotermálnej vody v podmienkach rezervoárového prostredia sklenoteplického ostrova pred výstupom v zostupných vetvách výverovej oblasti
- koncový člen II. skupiny (GW2): testovaný stav zdrojov geotermálnej energie v podmienkach hlbokých cirkulačno-akumulačných systémov žiarskej kotliny.

Špecifická entalpia modelu je vyjadrená tvarom [6] kde T je rozpätie teploty v $^{\circ}\text{C}$ (MORAN – SHAPIRO, 2006), bez potreby korekcie pre podiel parnej fázy. Rovnovážny stav silikátov je definovaný funkciami chalcedónového geotermometra pre I. skupinu [7] (FOURNIER, 1991) na základe početnosti logického odhadu teploty rovnovážneho stavu v referenčných podmienkach (Tabuľka 3.9a); a HT kremenného geotermometra pre advektívne ochladzovanie [8] (ARNÓRSSON ET AL., 1983) pre II. skupinu, vychádzajúc z predpokladu formovania parnej frakcie a jej strany (kondenzáciou) pred testovaným zmiešavaním (viď koncepčný model skupiny v 3.5.1). Kontrolná funkcia sekundárneho zmiešavania je

realizovaná geotermometrickými funkciami NT amorfného SiO₂ [9] (FOURNIER, 1977) pre I. skupinu termominerálnych vôd sklenoteplického ostrova (model testuje prienik studenej podzemnej vody v cirkulačných plytkých systémoch prúdenia) a konduktívneho modelu chalcedónového geotermometra [7] (FOURNIER, 1991) pre II. skupinu (model vychádza z predpokladu nariedovania podzemnými geotermálnymi vodami aspoň plytkého alebo intermediárneho obehu bez ohľadu na ich primárne prostredie; GSC3 geotermometer bol vybraný podľa hodnotenia rovnovážnych funkcií I. skupiny):

$$h_{(W)} = 0,006_x T^2 + 4,1258_x T + 1,1927 \quad [6]$$

$$T = \frac{1112}{(4,91 - \log(CS))} - 273,15 \quad [7]$$

$$T = \frac{1498}{(5,7 - \log(CS))} - 273,15 \quad [8]$$

$$T = \frac{731}{(4,52 - \log(CS))} - 273,15 \quad [9].$$

Rovnovážny stav členov CW a TW je vyjadrený bilančnou rovnicou [10], kde frakciu geotermálnych členov vyjadrujú funkcie [6] až [8] a sekundárneho zmiešavania tvar [9] (FOURNIER – TRUESDELL, 1974), kde X(H) je frakčný podiel rezervoárovej entalpie, a X(CS) je frakčný podiel rezervoárového SiO₂ (SHERIDAN ET AL., 1980):

$$X(H) = \frac{(H_{(GW)} - T_{(CW)})}{(H_{(GW)} - T_{(TW)})} \wedge X(CS) = \frac{(CS_{(GW)} - CS_{(CW)})}{(CS_{(GW)} - CS_{(TW)})} \quad [10].$$

VÝSTUPY ZMIEŠAVACIEHO MODELU, I. SKUPINA (Obrázok 3.19):

- bod konverencie X(H) a X(CS): X_(GW1) = 0,51, T_(GW1) = 77 °C, SC_(GW1) = 54 mg.l⁻¹
- pásmo konverencie: nariedované vody; frakčný pomer 51 %
- kontrolná funkcia amorfným SiO₂ nepretína frakčné krivky X(H) a X(CS).

IMPLIKÁCIE ZMIEŠAVACIEHO MODELU, I. SKUPINA

Konvergenciou získaná teplota rovnovážneho stavu koncového člena GW1 v čase zmiešavania – T_(GW1) = 77 °C zodpovedá pásmu očakávaných teplôt sklenoteplického ostrova pre hlbokú rezervoárovú jednotku T_(RES2) = 50 – 80 °C (Obrázok 3.11) podľa stacionárneho geotermického modelu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). Zároveň je vyššia, ako modely odhadu rezervoárovej teploty podľa chalcedónových geotermometrických funkcií, vrátane modelu GSC3 (Tabuľka 3.9), t.j. T_(GW1) = 77 °C, T_(GSC3) = 42 – 68 °C. Sekundárne zmiešavanie nie je potvrdené. Rovnovážna

koncentrácia $\text{SiO}_2 - \text{SC}_{(\text{GW1})} = 54 \text{ mg.l}^{-1}$ prakticky zodpovedá rozsahu jeho koncentrácií vo vzorkách II. skupiny $c_{(\text{SiO}_2)} = 40 - 56 \text{ mg.l}^{-1}$, s najväčšou presnosťou vo vzťahu k vzorke z vrtu ST-4 (Tabuľka 3.9), ktorú považujeme za obraz stavu termominerálnych vôd pred finálnou fázou výstupu vo výverovej oblasti.

ZÁVER ZMIEŠAVACIEHO MODELU, I. SKUPINA

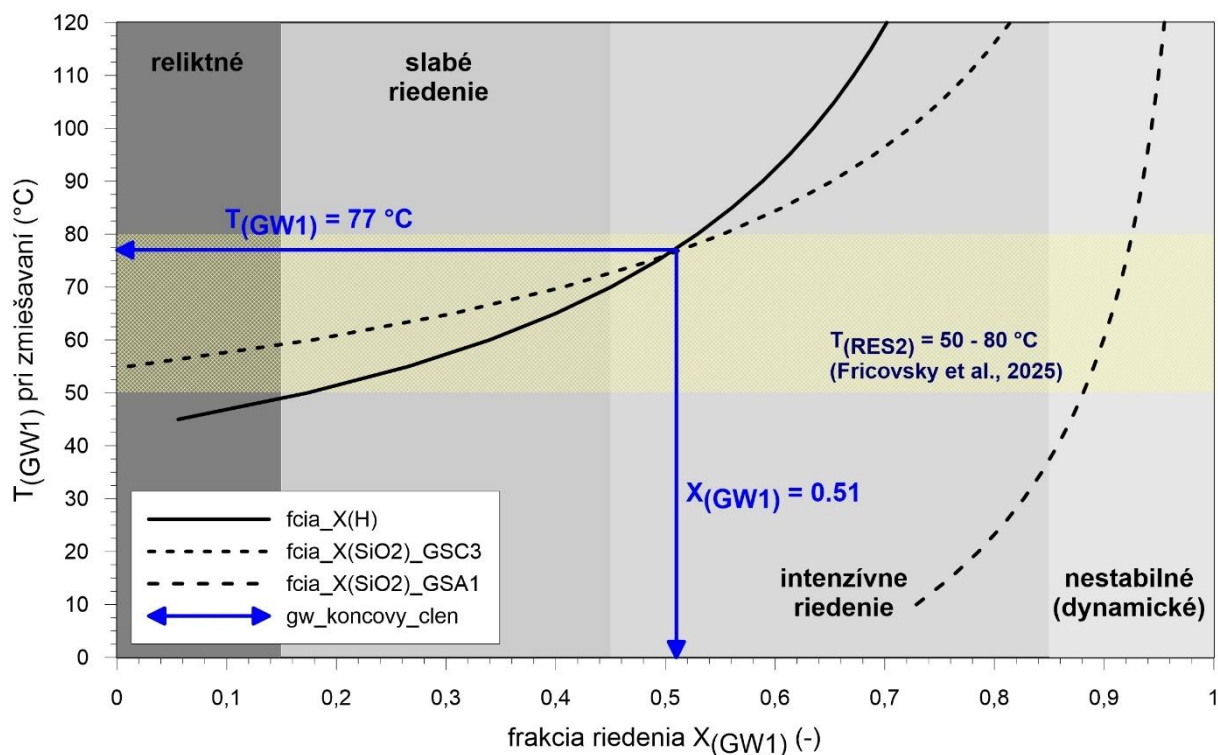
Zmiešavacím modelom je indikované, že prírodné liečivé zdroje v Sklených Tepliciach sú sekundárne zmiešavané. **K zmiešavaniu dochádza pravdepodobne mimo rezervoárového prostredia, vo výstupnej časti zlomových systémov a pri-zlomových porúch, na ktorých tieto vody vyvierajú. Z praktického hľadiska preto nestačí, v rámci monitorovacích prác, sledovanie kvantitatívnych parametrov na prírodných, alebo zachytených zdrojoch, nakoľko tie nie sú schopné zachytiť zmeny v dynamike rezervoárového prostredia, ako napríklad zmeny v intenzite zmiešavania, alebo zmeny v intenzite a kvalite dotovania „primárneho“ rezervoárového prostredia sklenoteplického ostrova.**

VÝSTUPY ZMIEŠAVACIEHO MODELU, II. SKUPINA (Obrázok 3.20):

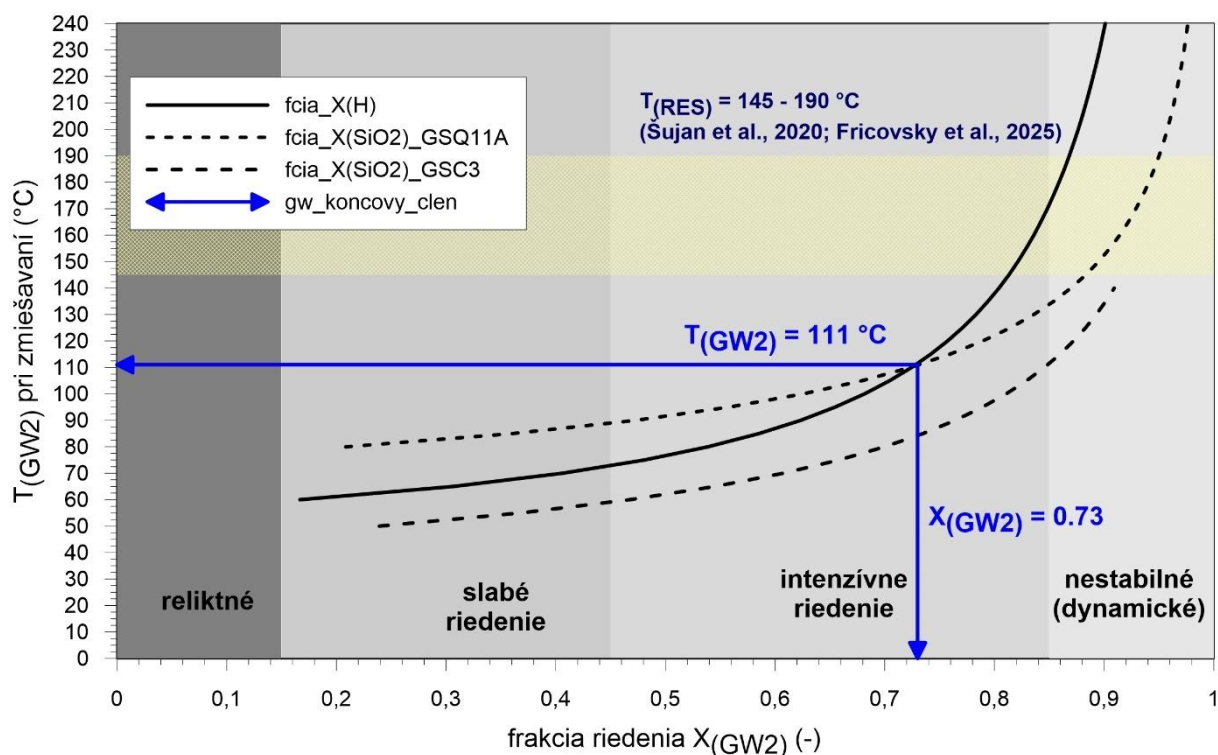
- bod konvergencie X(H) a X(CS): $X_{(\text{GW2})} = 0,73$, $T_{(\text{GW2})} = 111 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{SC}_{(\text{GW2})} = 63 \text{ mg.l}^{-1}$
- pásmo konvergencie: nariedované vody; frakčný pomer 73 %
- kontrolná funkcia chalcedónom podľa GSC3nepretína frakčné krivky X(H) a X(CS).

IMPLIKÁCIE ZMIEŠAVACIEHO MODELU, II. SKUPINA

Zmiešavací model je založený na využití GSQ11A geotermometra (ARNÓRSSON ET AL., 1983) pre adiabatické ochladzovanie, ktoré (v kombinácii so zmiešavacím modelom) predpokladá, že zdroje geotermálnej energie prešli stratou parnej frakcie pred samotným procesom zmiešavania. Konvergenciou získaná teplota geotermálneho člena (pred zmiešavaním) $T_{(\text{GW2})} = 111 \text{ }^\circ\text{C}$ je významne pod očakávanými intervalmi stacionárneho geotermického (Obrázok 3.11) a stochastického (Obrázok 3.14) modelu (Obrázok 3.18). Zároveň však teplota zmiešavacieho modelu presahuje modely odhadu rovnovážneho stavu teploty podľa GSQ11A geotermometra (Tabuľka 3.9), $T_{(\text{GW2})} > T_{(\text{GSQ11A})} = 75 - 89 \text{ }^\circ\text{C}$. Keďže tie sú odvodené z koncentrácií SiO_2 v čase vzorkovania $c_{(\text{SiO}_2)\text{_{wh}}} = 25 \text{ mg.l}^{-1}$ pre ST-4, a rovnovážna koncentrácia SiO_2 pred zmiešavaním dosahuje $\text{SC}_{(\text{GW2})} = 63 \text{ mg.l}^{-1}$, je možné predpokladať, že oba procesy, ako strata parnej frakcie, tak aj zmiešavanie (nariedovaním) prebiehajú pred dosiahnutím efektívneho



Obrázok 3.19: Silikátový zmiešavací model X-Si-H pre I. skupinu termominerálnych vôd sklenotepického ostrova



Obrázok 3.20: Silikátový zmiešavací model X-Si-H pre II. skupinu termominerálnych vôd sklenotepického ostrova

prostredia vrtu ST-4; definitívne pred finálnou fázou výstupu. V porovnaní so stacionárnymi hodnotami geotermického poľa oboch modelov (ŠUJAN ET AL., 2020; FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) stratu SiO₂ nie je možné vysvetliť len jednoduchou stratou SiO₂ zmiešavaním, ale jeho sekundárnou stratou pred dosiahnutím sklenoteplického ostrova. Sekundárne zmiešavanie nebolo preukázané.

ZÁVER ZMIEŠAVACIEHO MODELU, II. SKUPINA

Zmiešavací model indikuje hydraulickú (prúdením) a eventuálne aj termickú spojitosť termominerálnych vôd sklenoteplíckej štruktúry s oblasťou žiarskej hydrogeotermálnej štruktúry. **Ide o nepriamy indikátor možnej komunikácie, ktorá však bezprostredne neznamená závislosť jednotkovú.** Segmentácia cirkulačných / filtračných profilov je pri systémoch bazénovej segmentácie a vertikálnej / laterálnej evázie charakteristická. **Model definuje, že spojitosť nie je možné vylúčiť.** Preto z princípu predbežnej opatrnosti odporúčame počas realizácie vrtania, a následnej dlhodobej produkcie, aj zabezpečenie komplexného, a udržateľného monitorovania kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov vybraných dokumentačných bodov v Sklených Tepliciach. Opakujeme, že ani možná hydraulická a termická spojitosť nie je dôvodom na negatívne stanovisko, detto, keď sú v tejto situácii indikácie nepriame. **Overenie skutočných podmienok komunikácie je možné jedine v prípade realizácie hlbokého vrtu v uvedenej oblasti, a následného monitoringu podľa nižšie navrhovaných štandardov globálnej aplikačnej praxe.** Rezervoárový manažment počas dlhodobej produkcie, v prípade jeho správnej aplikácie a správneho vyhodnocovania dát monitoringu, má dostatok možností na to, aby nedošlo k ohrozeniu prírodných liečivých zdrojov v Sklených Tepliciach.

3.5.4 Implikácie adiabatického varu v žiarskej hydrogeotermálnej štruktúre

Vychádzajúc zo zmiešavacieho modelu pre II. skupinu termominerálnych vôd sklenoteplického ostrova (Obrázok 3.20), je stav pred zmiešavaním možné vyjadriť koordinátami $T_{(GW2)} = 111\text{ °C}$ a $SC_{(GW2)} = 63\text{ mg.l}^{-1}$ na základe rovnovážnej funkcie GSQ11A (ARNÓRSSON ET AL., 1983). Podľa koncepčného a stacionárneho geotermického modelu potom stav vyjadruje:

- stav rezervoárového média ako produkt adiabatického varu
- stav rezervoárového média ako koncového člena voči indikovanému zmiešavaniu; ale
- neoznačuje stav možného koncového člena v hlbokých obehových systémoch kotliny.

Keďže adiabatický var vedie k nárastu absolútnej koncentrácie SiO_2 v reziduálnej vodnej zložke vplyvom straty jej jednotkového množstva odparením, pri ktorom SiO_2 je vzhľadom na var konzervatívny element, je pravdepodobné, že skutočná, pôvodná koncentrácia SiO_2 v hlbokých častiach žiarskej kotliny je vyššia. Tento vzťah je možné vyjadriť ako [11]:

$$c_{(BOIL)} = \frac{c_{(GW2)}}{1-f_{(boil)}} \quad [11]$$

kde $c_{(BOIL)}$ – koncentrácia SiO_2 pred začiatkom adiabatického varu (mg.l^{-1}), $c_{(GW2)}$ – koncentrácia SiO_2 pred začiatkom zmiešavania, $f_{(boil)}$ – podiel oddelenej parnej frakcie.

Teplotu hlbokého člena $T_{(BOIL)}$ pred začiatkom odparovania, vyjadrujeme jednoduchým vzťahom rozdielu v latentnom teple odparovania [12 - 13], pri $c_{(w)} = f(T_{(GW2)})$ (WANG – SHI, 1990; MORAN – SHAPIRO, 2006):

$$\Delta H_{(vap)}(T_{(GW2)}) = \Delta H_{(vap)}(T_{(100^\circ\text{C})}) \times \left(\frac{T_{(374^\circ\text{C})} - T_{(GW2)}}{T_{(374^\circ\text{C})} - T_{(100^\circ\text{C})}} \right)^{0.38} \quad [12]$$

$$T_{(BOIL)} = T_{(GW2)} + \frac{f_{(boil)} \times \Delta H_{(vap)}(T_{(GW2)})}{c_{(w)}} \quad [13]$$

kde: $\Delta H_{(vap)}(T_{(GW2)})$ – latentné teplo odparovania pre geotermálny člen (kJ.kg^{-1}); $\Delta H_{(vap)}(T_{(100^\circ\text{C})})$ – latentné teplo odparovania pri $T = 100^\circ\text{C}$, $T_{(374^\circ\text{C})}$ – teplota kritického bodu vody (K), $T_{(100^\circ\text{C})}$ – teplota bodu varu pri atmosférickom tlaku (K), konštanta „0,38“ – Watsonov exponent.

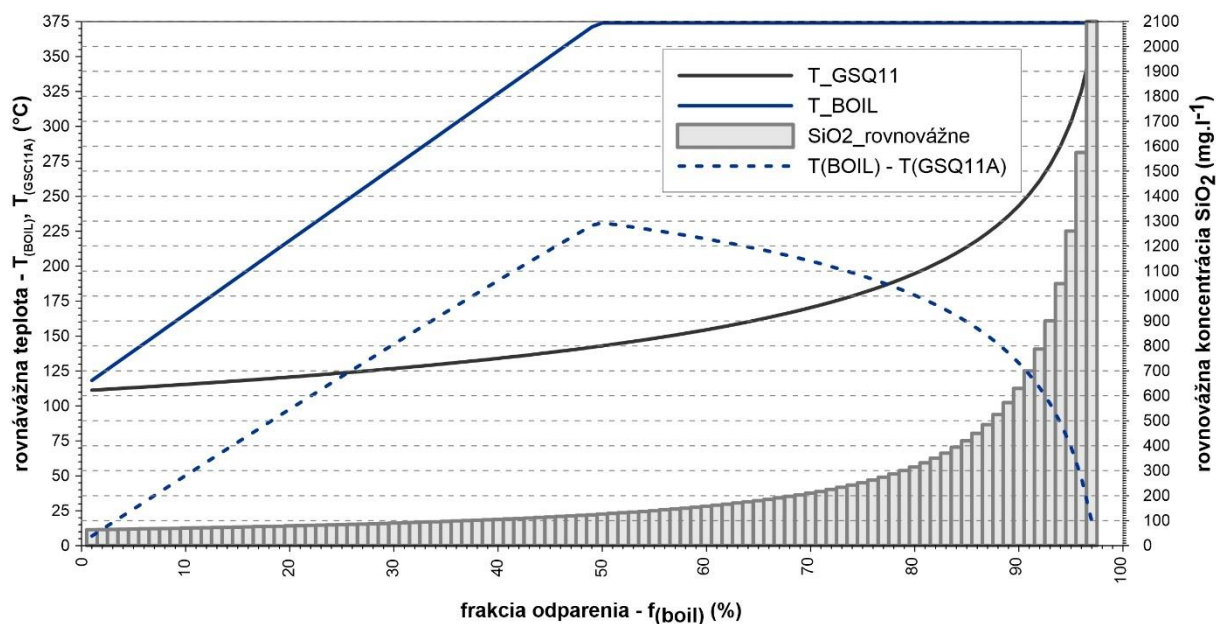
Jednoduchý regresný model rekonštrukcie potom s využitím GSQ11A geotermometra (Tabuľka 3.10) simuluje stav odparovania pri $f_{(boil)} = 1 - 99\%$, podľa čoho $c_{(\text{SiO}_2)} = 63 - 2\,100 \text{ mg.l}^{-1}$ hlbokého člena pred začiatkom odparovania. Pri geometrii a teplote stacionárneho geotermického poľa v Žiarskej kotline, kde je možné predpokladať izolovaný adiabatický var viazaný na izolované konvekčné bunky, zrejme stabilnej geometrie (KIMURA ET AL., 1986; SEZAI, 2005), ktorého výsledkom je pravdepodobne okamžitá kondenzácia parnej frakcie vo vodnej zložke (RAMESH – TORRANCE, 1990; SAHLI ET AL., 2009) a rekalibrácia rovnovážnych stavov, ale intenzita varu nad 15 % prakticky neprichádza do úvahy. V rovnakom rozsahu odparovania sú modelované aj výsledky teploty hlbokého člena $T_{(BOIL)} = 118 - 374^\circ\text{C}$. V intervale $f_{(boil)} = 1 - 15\%$ dosahuje model odhadu $T_{(BOIL)} = 118 - 192^\circ\text{C}$. Ak zvážime stacionárne geotermické modely (napr. Obrázok 3.14) v celkovom rozpätí $T_{(RES)} = 145 - 190$

°C pre okolie Lovče, potom minimálna miera straty parnej frakcie adiabatickým varom by musela dosiahnuť $f_{(BOIL)} = 7 \%$, čomu zodpovedajú modelované koncentrácie geotermálneho člena $c_{(SiO_2)} = 67 - 75 \text{ mg.l}^{-1}$. Skutočnosť, že tieto výsledky nie sú v súlade s výsledkami geotermometrickej funkcie (Obrázok 3.21) – $T_{(GSQ11A)} = 111 - 356 \text{ °C}$ pre $f_{(boil)} = 1 - 99 \%$ a $T_{(GSQ11A)} = 111 - 118 \text{ °C}$, ktorých odhady teplôt sú výrazne nižšie, ako očakávaná teplota na začiatku adiabatického varu indikuje:

- v hlbokom rezervoárovom prostredí (okolie Lovče) je možné očakávať vývoj izolovanej konvekcie a na nej viazaný adiabatický var, pravdepodobne v režime spontánnej kondenzácie a rekalibrácie rovnovážneho stavu voči minerálnym fázam, pričom tieto bunky sú mimoriadne citlivé na pozitívne, alebo negatívne zmeny tlakových a teplotných pomerov a náchylné na zánik (rezervoárové riziko z pohľadu reinjektáže aj dlhodobej produkcie) s nateraz neznámym dopadom na termominerálne vody sklenoteplíckej štruktúry
- zmena rezervoárovej dynamiky a fázových pomerov môže vyvolávať zásadné zmeny v lokálnych podmienkach produkcie, vrátane produktivity, chemizmu zdrojov geotermálnej energie, ako aj technologických parametrov produkovaného média a ich vplyvu na povrchovú, produkčnú infraštruktúru
- nevyhnutnou súčasťou monitorovania zdrojov geotermálnej energie na lokalite Lovča, ako aj na lokalite Sklené Teplice, potom musí byť silikátová analýza, respektíve komplexný systém (Ca, Na, Mg, K, HCO_3 , Cl, SO_4 , Al, B, Br, Cr, H_2S , CO_2 , PO_4 , F, I, Li) tak, aby bolo možné kontinuálne vyhodnocovať výsledky zmiešavacích modelov a silikátovej geotermometrie ako indikátory potenciálnych prienikov chemického, termického, alebo hydraulického frontu zo susediacej štruktúry
- proces prestupu medzi žiarskou a sklenoteplickou hydrogeotermálnou štruktúrou nie je zložený z jednoduchého odparovania a následného zmiešavania – je veľmi pravdepodobné, že súčasťou tohto pohybu v prípade, ak dochádza k takémuto prestupu medzi štruktúrami, je aj konduktívna strata SiO_2 (vysoké rozdiely medzi geotermálnym a hlbokým členom a výverovou oblasťou), ktorá môže poukazovať na rozdielne rýchlosti cirkulácie, respektíve rozdielne cirkulačné kanály (napríklad čiastočné využívanie okrajových zlomových systémov a ich alteráciu s puklinami v okolitých zónach štruktúrnej poruchy), pri ktorej dochádza k ráznej strate SiO_2 , pravdepodobne pred samotným nariadením

Výsledky rekonštrukcie adiabatického varu v rezervoárovom prostredí nevyvrátili súvislosť medzi zdrojmi geotermálnej energie v sklenoteplíckej a žiarskej štruktúre.

Nemusi ale ísť o rovnaké filtračné kanály. Situácia v sklenoteplickej štruktúre môže odrážať tranzitnú až tranzitnú akumuláciu štruktúru v grábenovej časti kotliny, avšak rozdielne filtračné prostredie než na lokalite Lovča, čo je typické pre indikované systémy prúdenia.



Obrázok 3.21: Model adiabatického varu v hlbokom rezervoárovom prostredí Žiarskej kotliny na základe výsledkov silikátovej geotermometrie

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

4.1 Koncept rezervoárovej odozvy v rezervoárovom manažmente

Rezervoárové prostredie a zdroje geotermálnej energie je možné definovať troma systémovými stavmi (MORAN – SHAPIRO, 2006; KJARAN – ELIASSON, 2008; O’SULLIVAN ET AL., 2010; GRANT – BIXLEY, 2011; EPELBAUM ET AL., 2014; ZARROUK – MCLEAN, 2019):

- **iniciálny stav:** zodpovedá času pred otvorením produkcie – v rezervoárovom systéme platí rovnováha medzi množstvom a kvalitou energie a hmoty vstupujúcich a vystupujúcich zo systému v dôsledku jeho geologického, tektono-termického, hydrogeologického a geotermického vývoja; z termodynamického hľadiska ide o uzavretý systém bez ohľadu na hydraulickú otvorenosť rezervoáru
- **prechodný stav:** vyjadruje čas krátko po otvorení produkcie (bez ohľadu na zámer), kedy zmenou p-T podmienok dochádza k narušeniu iniciálneho (syn. ustáleného) stavu, s trvaním, ktoré závisí na miere zásahu do rezervoárového prostredia a parametrov rezervoárového prostredia, respektíve rezervoárového média; z termodynamického hľadiska ide o otvorený systém bez ohľadu na hydraulickú otvorenosť rezervoáru
- **pseudo-ustálený stav:** stav, pri ktorom dochádza k ustáleniu p-T-c podmienok zdrojov geotermálnej energie v rezervoárovom prostredí vzhľadom na rekalibráciu hydraulickej, termickej a termodynamickej rovnováhy formovaním príslušných gradientov medzi efektívnou oblasťou produkčného alebo reinjektážneho vrtu a ich okolím; z termodynamického hľadiska ide o otvorený systém bez ohľadu na hydraulickú otvorenosť rezervoáru

Z uvedeného vyplýva: **každé narušenie termodynamickej rovnováhy (p-T podmienok) systému (rezervoár, zdroje geotermálnej energie) s okolím (rezervoárové prostredie) vedie k prirodzeným, respektíve indukovaným zmenám v jeho kvalitatívnych a kvantitatívnych parametroch, ako aj k zmenám v kvalitatívnych a kvantitatívnych parametroch okolia – rezervoárovej odozve** (GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON, 2022).

Z pohľadu rezervoárového manažmentu / rezervoárového inžinierstva, ako multidisciplinárneho oboru, ktorého hlavným predmetom je štúdium a manažment aktívne produkovaných / neprodukovaných geotermálnych polí, neexistuje spôsob produkcie zdrojov geotermálnej energie, ktorý by nevyvolal prejavy rezervoárovej odozvy s rôznou intenzitou. Primárnym cieľom (udržateľného) rezervoárového manažmentu je však zabezpečenie stavu, v ktorom by prejavy, procesy, alebo produkty rezervoárovej odozvy boli (RYBACH ET AL., 1999; AXELSSON ET AL., 2001; AXELSSON, 2010, 2022; AXELSSON – STEINGRÍMSSON, 2018; JOLIE ET AL., 2021; RYBACH, 2022):

- (chemicky, termicky, hydraulicky) zvrátne / reverzibilné: t.j. **obnoviteľné** – simultánne sa obnovujúce podmienky počas produkcie, alebo v čase po ukončení produkcie, ktorý by nepresiahol trvanie samotnej produkcie;
- **udržateľné** – svojim hydraulickým, termickým, alebo chemickým zásahom do iniciálnych podmienok nepresahuje udržateľnú rezervoárovú kapacitu rezervoárového prostredia a v rámci aktívnej fázy využívania zdrojov geotermálnej energie je možné zabezpečiť jeho dlhodobú produkciu bez predčasného odstavenia alebo utlmenia produkcie v dôsledku depletácie rezervoárového prostredia (extrémnymi prejavmi rezervoárovej odozvy)
- **lokálne** – aktívna fáza využívania zdrojov geotermálnej energie a jej dosahy na rezervoárové prostredie neobmedzujú využívanie zdrojov geotermálnej energie na iných lokalitách v okolí v prípade, ak nie je prekročená udržateľná rezervoárová kapacita
- **tolerovateľné** – počas produkcie zdrojov geotermálnej energie, alebo využívania rezervoárového prostredia nedochádza k ohrozovaniu bezpečnosti obyvateľstva, povrchovej infraštruktúry, alebo povrchové / podpovrchové prírodné systémy.

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; XUJUN ET AL., 2026): 1) subsidencia alebo lokálny diapirizmus reliéfu; 2) zmeny v rezervoárovej produktivite a tlakovom poli rezervoáru; 3) zmeny v rezervoárovej entalpii a termodynamickej kvalite zdrojov geotermálnej energie; 4) zmeny v rezervoárovej teplote; 5) zmeny v rezervoárovej dynamike 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 parametrov; 7) zmeny v množstve parnej frakcie alebo termodynamicknej forme viazanosti parnej frakcie; 8) zmeny v seizmicite územia; 9) ovplyvňovanie povrchových prejavov zdrojov geotermálnej energie; 10) zmeny v rozložení pôdných 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 v okolí produkčného dubletu definovaného Zámerom;**
- **posudzujú vplyv produkcie alebo reinjektáže na okolie, vrátane možností ovplyvňovania sklenoteplickej hydrogeotermálnej štruktúry.**

4.2 Špecifikácia produkčného systému

4.2.1 Technická špecifikácia produkčnej schémy

Špecifikácia produkcie a produkčnej schémy vychádza na základe (limitovaných) údajov dostupných v Zámere, na základe ktorého je zhotovovaný predmetný Posudok. Technické špecifikácie vrtu GTŽ-1 sú uvedené v Zámere a sumarizované v Tabuľke 4.1 a 4.2. Reinjektážny vrt Zámerom špecifikovaný nie je:

- produkčná teplota v čase $t = 0 - T_{wh} = T_{(RES)} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

- teplota reinjektáže – $T_{(INJ)} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- produkčné množstvá – $Q_{(PROD)} = Q_{(INJ)} = f(T, P_{(TH)})$
- produkčná stratégia – $Q_{(PROD)} = \text{konšt.}$
- produkčná schéma – $P:I = 1:1$, $Q_{(PROD)} = Q_{(INJ)} = 1:1$
- požadovaný energetický výkon produkčnej sústavy – $P_{(TH)} = 20\text{ MWt}$
- vzdialenosť ústia vrtov – $D_{(S)} = 8\text{ m}$
- vzdialenosť otvorených úsekov – $D_{(Z)} = 1\text{ 500 m}$
- záujmový horizont – spoločný pre produkčný a reinjektážny vrt
- prevádzka – celoročná
- prevádzkový režim / produkčná stratégia – nešpecifikovaný
- pozícia GTŽ-1 v súradnicovom S-JTSK systéme: $[X] = -441\text{ 801 m}$; $[Y] = -1\text{ 245 339 m}$
- pozícia GTŽ-1 v súradnicovom systéme STRS89: $[\varphi] = 48^{\circ}34'05,6''$; $[Y] = -18^{\circ}50'17,0''$
- pozícia GTŽ-2 - nešpecifikovaná
- testovaný čas produkcie – $t_{(PROD)} = 30\text{ rokov}$ (podľa Zámeru), $t_{(PROD)} = 100\text{ rokov}$ podľa Koncepcie trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie (AXELSSON ET AL., 2001)

Tabuľka 4.1: Schéma produkčného dubletu vrtov GTŽ-1 a GTŽ definovaná Zámerom

hydrogeotermálny vrt	funkcia	prevedenie	ťažobná kolóna		vertikálna hrúbka v karbonátoch (m)
			od	do	
GTŽ-1	produkčný	priamy	3 150	4 000	850
GTŽ-2	reinjektážny	orientovaný	nešpecifikované	nešpecifikované	nešpecifikované

Tabuľka 4.2: Technická špecifikácia vrtu GTŽ-1 Lovča definovaná Zámerom

vrtná kolóna	priemer pažníc	interval paženia	materiál	cementácia
riadiaca kolóna	Ø 30"	0 – 50 m	oceľ J-55	pätou na povrch
úvodná kolóna	Ø 20"	0 – 300 m	oceľ N-80	pätou na povrch
I. technická kolóna	Ø 13 ¾ "	0 – 1 700 m	oceľ N-80	pätou na povrch
II. technická kolóna	Ø 9 5/8 "	1 650 – 3 200 m	oceľ P-110	pätou po záves lineru
ťažobná kolóna	Ø 7"	3 150 – 4 000 m	oceľ P-110	bez cementácie

4.2.2 Hodnotenie reinjektážnej sústavy vzhľadom na princípy rezervoárového manažmentu

Keďže presné technické a technologické parametre produkčného dubletu nie sú z pochopiteľných dôvodov k dispozícii, pri charakteristike konfigurácie a funkcií produkčnej schémy vychádzame z jej opisu v predložennom Zámere. Navrhovaná sústava P:I = 1:1 je v Zámere špecifikovaná tak, aby zabezpečila celoročnú prevádzku a rovnovážny stav medzi jednotkovou produkciou zdrojov geotermálnej energie a jednotkovou reinjektážou bez vonkajších strát rezervoárového média. Reinjektážny systém je možné podľa uvedenej špecifikácie charakterizovať nasledovne (AXELSSON, 2012; GRANT – BIXLEY, 2011; KAYA ET AL., 2011; DIAZ ET AL., 2016; KAMILA ET AL., 2021).

1) podľa priestorovej pozície produkčných a reinjektážnych vrtov: periférna reinjektáž

- opis: pozícia produkčných vrtov viazaná na rovnakú tektonickú štruktúru (žiarska depresia), pravdepodobne mimo dosahu efektívnej zóny produkcie, vzhľadom na $D_{(z)} = 1\,500\text{ m}$
- funkcia: redukcia rizík predčasného prieniku frontov rezervoárovej odozvy medzi produkčnou a reinjektážnou časťou rezervoárového prostredia, udržiavanie generálnych trendov prúdenia tlakovou okrajovou podmienkou mimo efektívnej produkčnej časti
- riziká: znižovanie tlakovej / hydraulickej účinnosti reinjektáže (vzdialenosť, možné vetvenie vektorov cirkulácie), sekundárne efekty na fázovú (procesy formovania parnej frakcie, stupeň voľnosti, vlhkosti a termodynamickej viazanosti parnej frakcie) a lineárnu (charakteristika konvekcie / advekcie a geometrie konvekčných buniek) stabilitu

2) podľa vertikálnej pozície produkčných a reinjektážnych vrtov vo vzťahu k rezervoárovému prostrediu: priama reinjektáž

- opis: pozícia efektívnych úsekov v približne rovnakej vertikálnej úrovni rezervoárového prostredia
- funkcia: priama kontrola tlakových pomerov, udržiavanie produktivity, efektívne dopĺňanie rezervoárového média
- riziká: podpora rýchlejšieho prieniku frontov rezervoárovej odozvy medzi reinjektážnou a produkčnou sústavou; v porovnaní s hlbokou reinjektážou pomalšia intenzita konduktívneho zahrievania reinjektátu v rezervoárovom prostredí; nárast intenzity rizikových prejavov rezervoárovej odozvy

- poznámka: vzhľadom na očakávanú tektonickú členitosť a štruktúrno-tektonické porušenie rezervoárového prostredia plytkú reinjektáž nedoporučujeme (rýchle smerné zostupy)

3) podľa vzťahu produkovaných a reinjektážnych množstiev geotermálnych vôd: **plná reinjektáž**

- opis: Zámerom je definovaný princíp pomeru produkovaných a reinjektovaných množstiev $P:I = 1:1$, $Q_{(PROD)} = Q_{(INJ)} = 1:1$
- funkcia: maximalizovaná tlaková podpora rezervoárového prostredia, minimalizácia environmentálnych vplyvov zdrojov geotermálnej energie na povrchové zložky životného prostredia, minimalizácia povrchovej infraštruktúry (zdrže, nádrže, precipitačné lagúny)
- riziká: vyššie ekonomické náklady a zvýšená intenzita ochladzovania rezervoárového prostredia vo vzťahu medzi advektívnym ochladením a konduktívnym zahrievaním (retardáciou)

4) podľa teploty reinjektáže: **studená reinjektáž**

- opis: predpokladaná teplota reinjektáže $T_{(INJ)} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ je pod štandardizovaným limitom $T_{(INJ)} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ globálnej aplikačnej praxe
- funkcia: 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: 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 a redukcia difúznej termickej retardácie postupu teplotného frontu

V súvislosti s globálnou dobrou aplikačnou praxou (GRANT – BIXLEY, 2011; KAYA ET AL., 2011; DIAZ ET AL., 2016; KAMILA ET AL., 2021) je možné navrhovanú sústavu pre analogické podmienky v rámci rezervoárového prostredia na lokalite Lovča – a to vzhľadom na ich podobnosť v súvislosti s geotermickou a fázovou situáciou aj bez ohľadu na rozdielne názory o jeho geologickej stavbe (nízkoentalpické zdroje geotermálnej energie do 150 – 200 °C s termodynamicky saturovanou vlhkom parou, prevažne-konduktívne prostredie, podľa produktivity potenciálne až vysoko-potenciálne rezervoárové prostredie) vyhodnotiť nasledovne (Tabuľka 4.3):

Tabuľka 4.3: Porovnanie dizajnu lokálnej reinjektážnej sústavy s dobrou aplikačnou praxou

kritérium	Zámer	aplikačná prax	vyhodnotenie
horizontálna pozícia	periférna reinjektáž	blízka reinjektáž	nehoda
vertikálna pozícia	priama reinjektáž	priama reinjektáž	zhoda
reinjektované množstvá	plná reinjektáž	plná reinjektáž	zhoda
teplota reinjektáže	studená reinjektáž	studená reinjektáž	zhoda
schéma	P : I = 1 : 1	P : I = 1 : 2 až 1 : X	individuálne

- **plánovaná konfigurácia spĺňa štandardy aplikované v analogických podmienkach** (riziká a prípadne negatívne účinky periférnej reinjektáže najmä z pohľadu účinnosti reinjektážneho manažmentu sú zvrätne, a možné efektívne riešiť doplnujúcim reinjektážnym vrtom)
- **z technického hľadiska rezervoárového manažmentu je navrhovaná konfigurácia štandardná** (významným predmetom neistoty ostáva pomer medzi produkčnou a reinjektážnou sústavou; princíp $P : I = 1 : 1$ považujeme predbežne za optimistický, a existuje dôvodný predpoklad domnievať sa, že bude nevyhnutné realizovať aj ďalší reinjektážny vrt)
- **plánovaná konfigurácia nepredstavuje svojim návrhom významnejšie riziko pre rezervoárové prostredie alebo jeho udržateľnú dlhodobú produkciu v porovnaní s globálnou aplikačnou praxou.**

4.3 Modely rezervoárovej odozvy

Možnosti hypotetického posúdenia vplyvu produkcie zdrojov geotermálnej energie na kvantitatívne parametre rezervoárového prostredia vychádzajú z kvality dostupných údajov, ktoré sú analyzované vyššie v texte. Tieto údaje je možné charakterizovať ako nedostatočné, nakoľko neexistujú hydrodynamické skúšky, ktorými by bolo možné kalibrovať modely rezervoárovej odozvy, podobne, ako neexistuje aktuálna jednoznačnosť ohľadom geometrie a vertikálnej stavby rezervoárového prostredia, jeho tektonickej príslušnosti, jeho nadložia, detto jeho upresnená hydraulická, termická, alebo termochemická komunikácia s okolím, alebo, naopak, izolovanosť. Priestorové vzťahy modelov rezervoárovej odozvy vo vzťahu k vrtu GTŽ-1 Lovča udáva Obrázok 4.1.

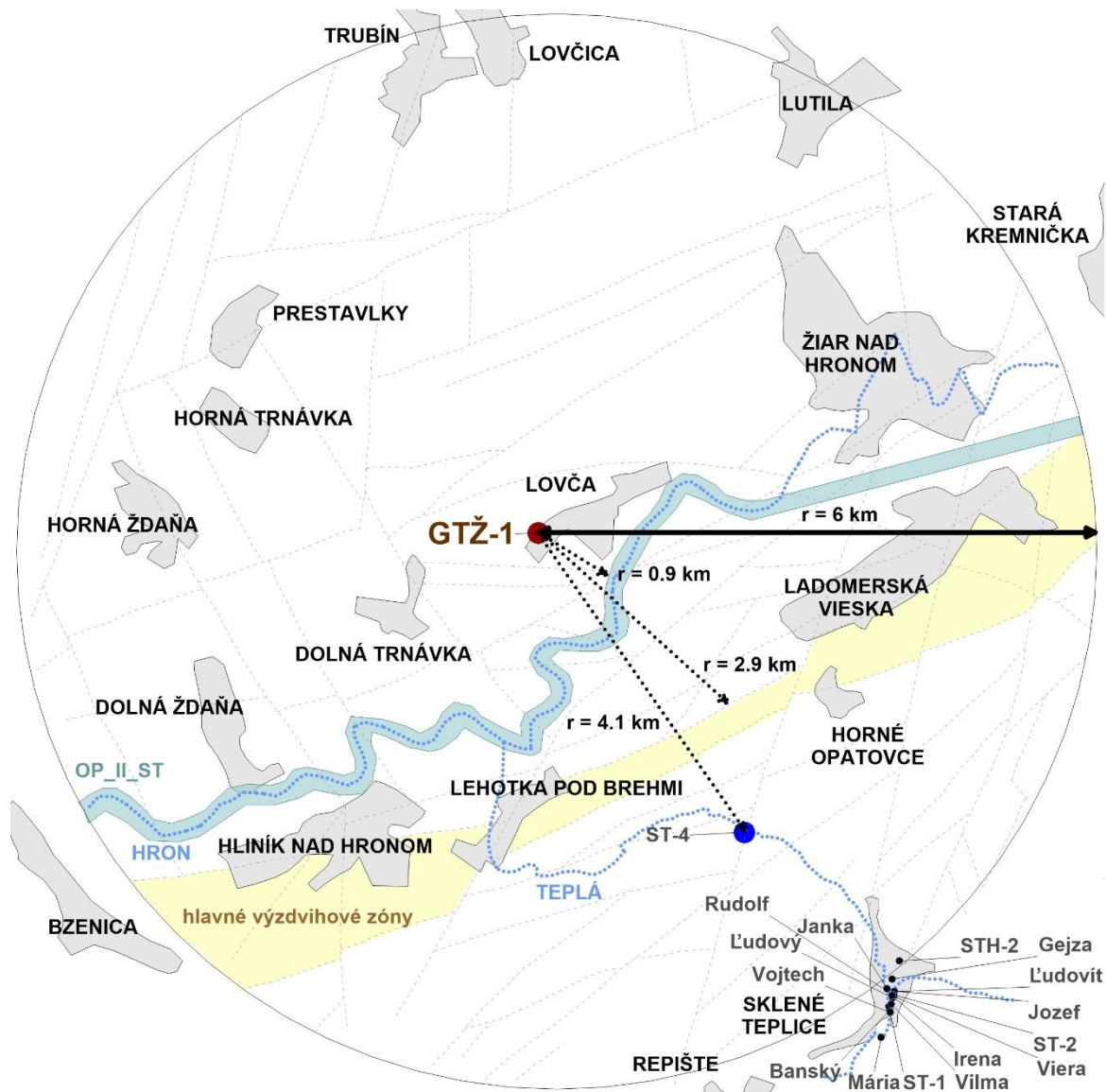
Modelovanie rezervoárovej odozvy je preto realizované systémom pravdepodobnostných Monte Carlo simulácií šírenia a separácie frontov rezervoárovej odozvy vo variantoch geologického a geotermického prostredia okolia lokality Lovča:

- variant RO1: definovaný podmienkami stacionárneho geologického a geotermického modelu rezervoárového prostredia na lokalite Lovča podľa výstupov Katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie v Žiarskej kotline (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025)
- variant RO2: definovaný modelovanými podmienkami stacionárneho geologického a geotermického prostredia (viď 3.3.2) opísanými v Zámere (ŠUJAN ET AL., 2020)

Modely sú postavené na úprave skriptu modulu **@ALUMP-Ex** (nepublikované), ktorý bol pôvodne zostrojený pre dynamické / nelineárne anizotermálne modelovanie d'urkovskej depresie v rámci geologickej úlohy „*Hydrogeotermálne hodnotenie d'urkovskej depresie: aplikácia princípov trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu*“ riešenej na ŠGÚDŠ v období 2018 – 2020 (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020A,B), a ktorý bol pre účely posúdenia vplyvu dlhodobej produkcie na rezervoárové prostredie aplikovaný aj v hydrogeologickom posudku pre účely EIA „*Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline: geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného Zámeru vo vzťahu ku útvaru geotermálnych vôd SK300170FK Košická kotlina*“ (FRIČOVSKÝ – ČERNÁK, 2024), s analógiou vo vzťahu k spôsobu exploatacie zdrojov geotermálnej dubletami v karbonátovom prostredí a nízko- až strednoentalpických podmienkach.

Keďže na rozdiel od diskretných / empirických modelov, ktoré sú prezentované v referencovanom HG posudku pre stredisko Svinica – Ďurkov, ide o pravdepodobnostné, stochastické modely, je nevyhnutné ich závery vnímať ako:

- modely vychádzajúce z charakteristík rezervoárového prostredia (neexistujú relevantné vrty s finálnym vystrojením)
- nekalibrované modely (neexistujú relevantné výsledky hydrodynamických skúšok, ktorými by modely odhadu bolo možné kalibrovať, alebo transponovať stochastické modely odhadu na diskretné modely)
- podklady pre budúcu kalibráciu v prípade realizovaného produkčného dubletu, a zároveň podklady pre kalibráciu podľa výsledkov navrhovaného pred-produkčného, produkčného, a po-produkčného komplexného monitorovacieho systému a systému vyhodnocovania / mitigácie rizík negatívnych prejavov rezervoárovej odozvy



Obrázok 4.1: Priestorové vymedzenie vrtu GTŽ-1 Lovča voči kritickým prvkom okolia

4.3.1 Špecifikácie variantov modelu

Varianty RO1 a RO2 vychádzajú z geometrie a geotermických parametrov Katalógu (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) a Zámeru (ŠUJAN ET AL., 2020). Rozhodnutie o posudzovaní oboch variantov vychádza jednak z ich rozdielnosti, a zároveň zo situácie, v ktorej nebolo (s výnimkou geofyzikálnych prác) overené, respektíve potvrdené geologické prostredie okolia lokality Lovča; a zároveň z potreby aspoň predbežného modelovania vývoja vplyvov produkcie vo vzťahu k termominerálnym vodám sklenoteplického ostrova. Varianty sú špecifikované vstupnými parametrami v Tabuľke 4.4.

Tabuľka 4.4a: Vstupné parametre modelov odhadu rezervoárovej odozvy; variant RO2

	$t_{(PROD)}$	$T_{(INJ)}$	$\rho_{(INJ)}$	$c_{(INJ)}$	$T_{(RES)}$	$\rho_{(RES)}$	$c_{(RES)}$	$Z_{(T,RES)}$	$\Delta Z_{(RES)}$	$\Phi_{(z)}$	$\rho_{(M)}$	$c_{(M)}$	$Q_{(PROD)}$
parameter	s	°C	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	°C	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	m	m	-	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	kg.s ⁻¹
	-	rovnom.	fcia	fcia	Δ vľavo	fcia	fcia	Δ stred	Δ vľavo	fcia	fcia	fcia	fcia
minimum	0	40	-	-	140	-	-	3 400	200	-	-	-	-
maximum	100	60	-	-	165	-	-	3 800	400	-	-	-	-
priemer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
št.odchýlka	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ML	-	-	-	-	156	-	-	3 600	350	-	-	-	-

Tabuľka 4.4b: Vstupné parametre modelov odhadu rezervoárovej odozvy; variant RO2

	$t_{(PROD)}$	$T_{(INJ)}$	$\rho_{(INJ)}$	$c_{(INJ)}$	$T_{(RES)}$	$\rho_{(RES)}$	$c_{(RES)}$	$Z_{(T,RES)}$	$\Delta Z_{(RES)}$	$\Phi_{(z)}$	$\rho_{(M)}$	$c_{(M)}$	$Q_{(PROD)}$
parameter	s	°C	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	°C	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	m	m	-	kg.m ⁻³	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	kg.s ⁻¹
	-	rovnom.	fcia	fcia	Δ stred	fcia	fcia	Δ vpravo	Δ stred	fcia	fcia	fcia	fcia
minimum	0	40	-	-	156	-	-	2880	600	-	-	-	-
maximum	100	60	-	-	187	-	-	3400	1000	-	-	-	-
priemer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
št.odchýlka	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ML	-	-	-	-	170	-	-	3150	700	-	-	-	-

4.3.2 Analytické modely rezervoárovej odozvy

Modelovanie rezervoárovej odozvy je riešené analytickými alebo pseudo-lumpfitovými metódami, ktorých náročnosť na vstupné dáta je neporovnateľne menšia v porovnaní s komplexnými numerickými modelmi odhadu (O'SULLIVAN ET AL., 2001). Modely sú realizované v dvoch rovinách:

- **modelovanie vplyvu reinjektáže** nie je možné umiestniť do konkrétneho bodu, keďže jeho pozícia nie je Zámerom definovaná – preto je využívané ako okrajová podmienka definujúca v rovine pravdepodobnosti potrebné vzdialenosti umiestnenia reinjektážneho vrtu GTŽ-2 voči produkčnému vrtu GTŽ-1; respektíve aj voči hlavným štruktúrnym prvkom kontaktu žiarskej a sklenoteplíckej hydrogeotermálnej štruktúry, na ktorých geochemické indikátory predpokladajú výstup zdrojov geotermálnej energie z grábenovej časti kotliny do sklenoteplíckeho ostrova
- **modelovanie vplyvu produkcie** je realizované z aktuálne definovanej pozície vrtu GTŽ-1 ako jeho pravdepodobnostný dosah do okolia.

MODEL KONVEKTÍVNEHO POSTUPU TERMICKÉHO FRONTU

Zvolený analytický model [14] (LOPEZ ET AL., 2010) je štandardne využívaný ako úvodné, analytické riešenie optimalizácie pozícií reinjektážnych vrtov, pričom pracuje s predpokladom postupu frontálneho rozhrania v pseudo-ustálených podmienkach a retardáciou konvektívneho (advektívneho) prieniku studeného frontu zahrievaním z okolia efektívneho profilu filtrácie (MENJOZ – SAUTY, 1982; UNGEMACH ET AL., 2005):

$$r_{(TF)} = \sqrt{\frac{3 \times t_{(PROD)} \times \gamma_{(RES)} \times Q_{(INJ)}}{\gamma_{(INJ)} \times \Delta z_{(RES)} \times k_{(\Delta z)} \times \pi}} \quad [14]$$

kde: t_{PROD} – čas od spustenia produkcie / reinjektáže (s), $\gamma_{(a)}$ – celková tepelná kapacita rezervoáru ($J.m^3.K^{-1}$) [15], $\gamma_{(INJ)}$ – celková tepelná kapacita reinjektovanej vody ($J.m^3.K^{-1}$), $\Delta z_{(RES)}$ – hrúbka rezervoárového prostredia (m), $k_{(\Delta z)}$ – koeficient efektívneho filtračného profilu (%), $Q_{(INJ)}$ – reinjektované množstvá ($m^3.s^{-1}$); a SYMBOLY INJ – reinjektovaná voda, m – horninové prostredie, res – rezervoár

$$\gamma_{(a)} = \varphi_{(z)} \times c_{(RES)} \times \rho_{(RES)} + (1 - \varphi_{(z)}) \times \rho_{(M)} \times c_{(M)} \wedge \gamma_{(INJ)} = \varphi_{(INJ)} \times c_{(INJ)} \quad [15]$$

kde: $\varphi_{(z)}$ – model hĺbkovej funkcie pórovitosti (-), c – špecifická tepelná kapacita ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), ρ – špecifická hustota ($kg.m^{-3}$); A SYMBOLY: INJ – parametre reinjektáže, RES – parametre teploty rezervoárového média, M – parametre horninového prostredia. Parametre sú vyjadrené aproximatívnymi funkciami [16 - 19] (HOLZBECHER, 1998; PASQUALE ET AL., 2011, 2013; LIPPSEY ET AL., 2016)

- špecifická hustota vodnej zložky s teplotou $> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre T v Kelvinoch

$$\rho_{(W)} = 996.9 \times \left[1 - 3.17 \times 10^{-4} \times (T_{(res)} - 298.15) - 2.56 \times 10^{-6} \times (T_{(res)} - 298.15)^2 \right] \quad [16]$$

- špecifická tepelná kapacita vodnej zložky s teplotou $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ pre T v Kelvinoch; pre zložku $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ platí konštanta $c_{(W)} = 4,200\text{ kJ.kg}^{-1}$

$$c_{(W)} = \frac{(4\,245 - 1.841 \times T_{(res)}) \times 1000}{\rho_{(W)}} \quad [17]$$

- špecifická hustota horninovej matrix

$$\rho_{(m)} = 4806.7 \times \varphi_{(z)} + 2832 \quad [18]$$

- špecifická tepelná kapacita horninovej matrix

$$c_{(m)} = -0.026 \times [Z_{(T,RES1)} + (0.5 \times \Delta Z_{(res)})] + 889 \quad [19].$$

Keďže podľa Zámeru je možné očakávať takzvanú plnú reinjektáž (Tabuľka 4.3) a teda platí $Q_{(INJ)} = Q_{(PROD)}$, sú reinjektované množstvá vyjadrené ako funkcia závislosti na modelovanej rezervoárovej teplote, pre $T_{(wh)} = T_{(RES)} - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [20]; s referenčnou hodnotou tepelno-energetického výkonu vrtu $P_{(TH)} = 20\text{ MWt}$:

$$Q_{(INJ)} = Q_{(PROD)} = \frac{P_{(TH)}}{c_{(wh)} \times (T_{(wh)} - T_{(INJ)})} \quad [20].$$

MODEL KONVEKTÍVNEHO POSTUPU TERMOCHEMICKÉHO FRONTU

Modelovanie postupu termochémického frontu [21] je založené na rovnakom princípe prechodu reinjektátu v rezervoárovom prostredí, ako v prípade termického frontu [14]; v tomto prípade ale bez retardácie. Princíp vychádza zo skutočnosti, že čas prieniku chemického frontu $t_{(CF)}$ je kratší, ako čas prieniku teplotného frontu $t_{(TF)}$, a častokrát kratší, ako čas prieniku hydraulického frontu $t_{(HF)}$ (napr. CASTILLO ET AL., 2011; JACOBO – MONTALVO, 2013), keďže samotný kontakt frontu s cieľovou oblasťou automaticky neznamena okamžitú zmenu tlakových pomerov, a zároveň tento kontakt neznamena okamžitý pokles teploty v efektívnom okolí produkcie, nakoľko sa uplatňuje princíp konduktívnej retardácie (MENJOZ – SAUTY, 1982; RAHMAN ET AL., 1984). Z tohto dôvodu sú geochemické indikátory rezervoárovej odozvy štandardnou súčasťou udržateľného rezervoárového manažmentu:

$$r_{(CF)} = \sqrt{\frac{3 \times t_{(PROD)} \times \varphi_{(z)} \times Q_{(INJ)}}{\Delta Z_{(RES)} \times k_{(\Delta Z)} \times \pi}} \quad [21].$$

MODEL POSTUPU HYDRAULICKÉHO FRONTU S RADIÁLNYM DOSAHOM

Model hydraulického frontu [22] (LOPEZ ET AL., 2010; ASCENCIO ET AL., 2014) je analyzovaný ako samostatná zložka interakcie produkcie a reinjektáže s rezervoárovým prostredím a rezervoárovým médiom. Založený je na prieniku reinjektátu a rozširovaní (depresného) dosahu efektívnej rezervoárovej zóny v priepustnom prostredí a pseudo-ustálenom režime (BODVARSSON – TSANG, 1983; BODVARSSON – STEFANSSON, 1989):

- postup dosahu reinjektážneho frontu k okoliu
- vplyv dosahu produkčného vrtu na okolie.

$$r_{(HF)} = \sqrt{\frac{Q_{(PROD,INJ)} \times t_{(PROD)}}{\phi_{(z)} \times \pi \times \Delta z_{(RES)} \times k_{(\Delta z)}}} \quad [22].$$

VŠEOBECNÉ NASTAVENIA MODELOV REZERVOÁROVEJ ODOZVY

Pri zohľadnení limitov dostupnosti údajov definovaných jednak Zámerom, a jednak úrovňou preskúmanosti relevantnej oblasti, ako aj toho, že aktuálne neexistuje relevantný vrt v hlbkej časti Žiarskej kotliny, ktorý by predpokladané parametre rezervoárového prostredia overil, sú spoločnými znakmi modelov rezervoárovej odozvy pre variant RO1 (4.3.3) a RO2 (4.3.4) nasledovné:

- korekcia pre efektívny profil filtrácie $k(\Delta z) = 0,01 - 0,2$ s rovnomerným rozdelením v Monte Carlo simuláciách – v súčasnosti neexistuje dôvod predpokladať, že hrúbka efektívneho profilu prúdenia by presahovala 20 % pri porovnaní s analogickými podmienkami; rovnako, ako ani možnosť jeho reálneho testovania
- **keďže Zámer presne nedefinuje pozíciu reinjektážneho vrtu GTŽ-2, hodnotenia založené na prieniku frontov rezervoárovej odozvy vychádzajú z predpokladu, že efektívny úsek vrtu v rezervoárovom prostredí nepresiahne smernicu západ – východ od vrtu GTŽ-1 a vo vektore sever – juh, respektíve SZ – JV sa nepribližuje k sklenotepickému ostrovu**
- rezervoárove prostredie je homogénne definovanými parametrami (jeho variabilita je simulovaná v rámci iterácií – Tabuľka 4.4a,b); čo je charakteristickým znakom lumpfitových, pseudo-lumpfitových, alebo analytických modelov
- každý typ frontu rezervoárovej odozvy je simulovaný aplikáciou Monte Carlo simulácií s $N = 10\,000$ opakovaniami pre jednotlivé analytické modely 14], [20] a [21].

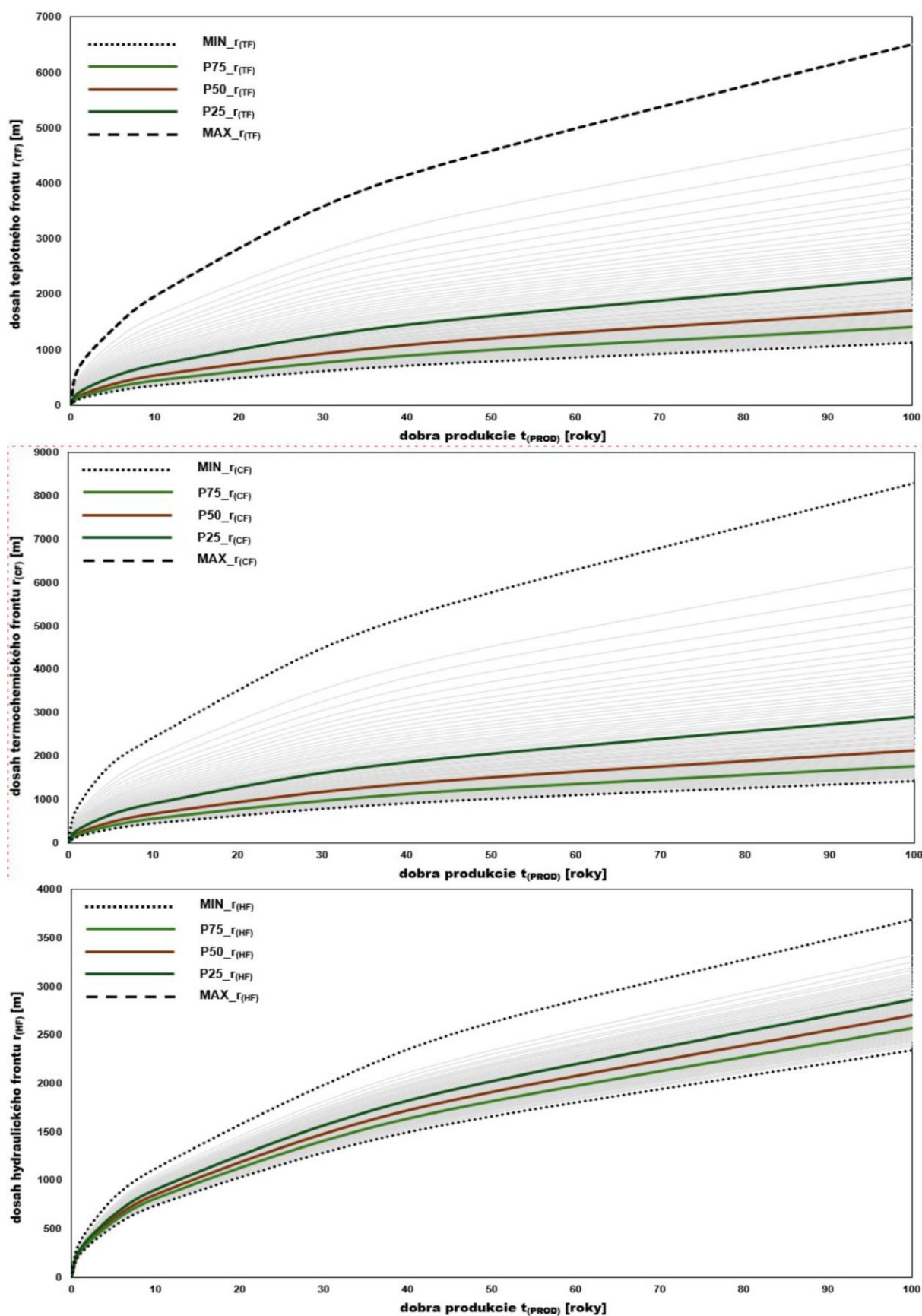
4.3.3 Implikácie variantu RO1

Podľa modelovanej odpovede postupu studeného frontu, vzhľadom na parametre rezervoárového prostredia (Tabuľka 4.4a) vyplýva:

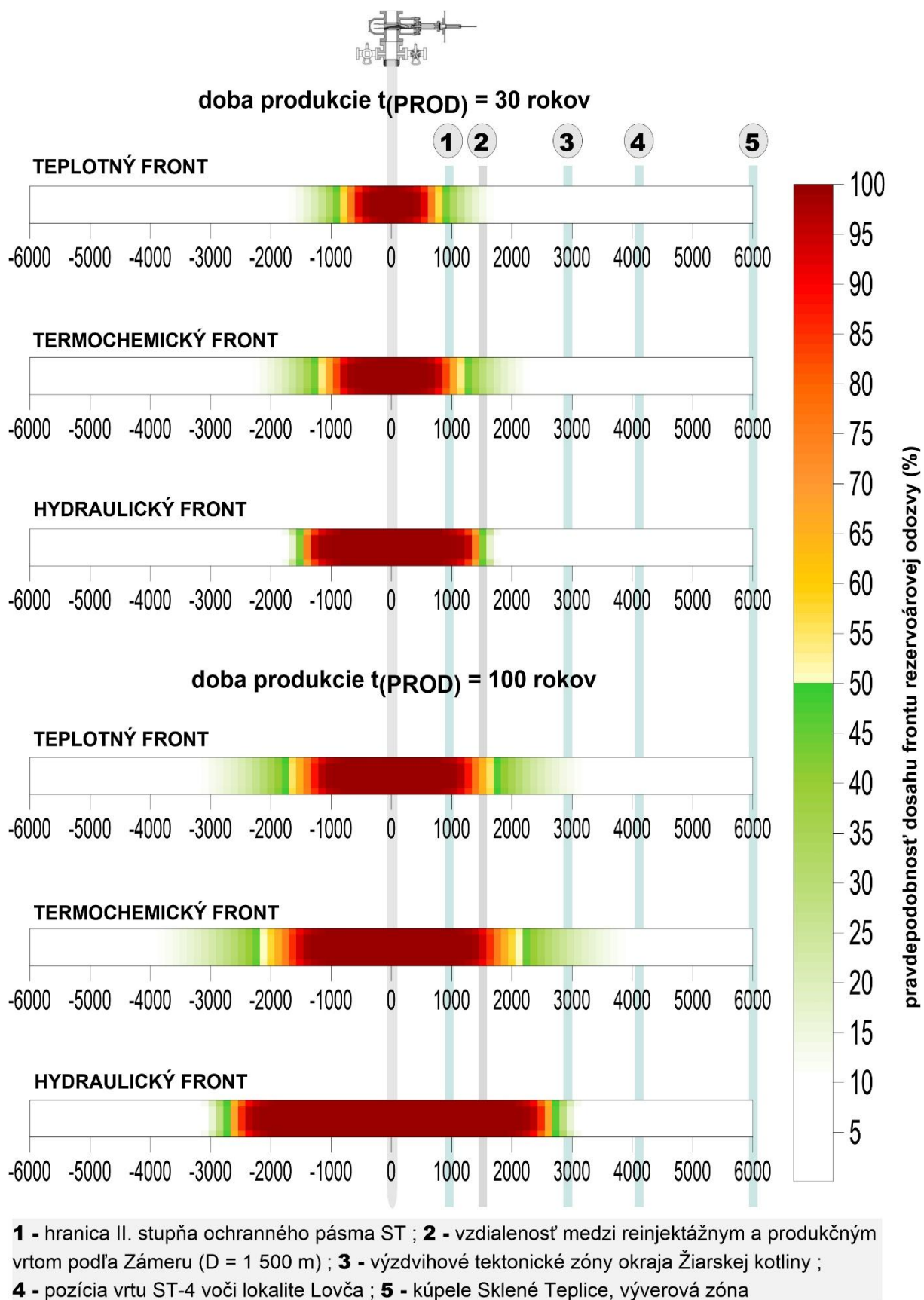
- rezervoárové prostredie sa vyznačuje pomerne vysokou hydraulickou konduktivitou, podľa čoho (Tabuľka 4.5) platí $r_{(CF)} > r_{(HF)} > r_{(TF)}$; konduktívna retardácia môže byť podporená vplyvom advekcie, respektíve konvekcie potenciálne viazanej na puklinové systémy a ich pásma štruktúrnych porúch
- modely odhadu (Obrázok 4.2 a 4.3) prieniku frontov rezervoárovej odozvy sú najmä pre termický a termochemický front výrazne zošikmené vpravo, čo najmä pre termickú a termochemickú odozvu vytvára významnú neistotu v závislosti na parametroch rezervoáru

ČAS PRODUKCIE $T_{(PROD)} = 30$ ROKOV

- **stredné vzdialenosti pre dobu produkcie $t_{(PROD)} = 30$ rokov, $r_{(HF)} = 1\,500 \pm 120$ m, $r_{(CF)} = 1\,180 \pm 610$ m a $r_{(TF)} = 930 \pm 480$ m indikujú, že už po 30 rokoch produkcie zrejme dôjde ku kontaktu frontu pravdepodobne s hranicou ochranného pásma prírodných liečivých zdrojov v Sklených Tepliciach, respektíve je možné predpokladať, že čiastočne ovplyvňovaná môže byť aj efektívna produkčná zóna okolia vrtu GTŽ-1**
- pre $t_{(PROD)} = 30$ rokov dosahuje pravdepodobnosť kontaktu hydraulického frontu s efektívnou produkčnou zónou okolia vrtu GTŽ-1 $P = 50 - 60 \%$, **je pravdepodobné, že hydraulické impulzy už v tomto období by začali ovplyvňovať režim rezervoárovej dynamiky v okolí, čo vytvára tlak na rezervoárový monitoring** (v tejto súvislosti je nevyhnutné dodať, že doba 30 rokov je Zámerom definovaná ako doba očakávanej životnosti geotermálnych vrtov)
- pravdepodobnosť dosahu termochemického, kedy by začalo dochádzať pravdepodobne k zmene chemického zloženia produkovaného rezervoárového média, alebo k indikatívnym prejavom blížiaceho sa termického frontu, dosahuje $P < 50 \%$, avšak vzhľadom na širokú odchýlku simulačného súboru ($\sigma = 610$ m) ju nie je možné úplne vylúčiť – vzhľadom na výraznú neistotu ale **predpokladáme, že s výnimkou multikomponentovej geotermometrie alebo zmiešavacích modelov by tieto zmeny mohli byť už v tomto čase pozorovateľné, a prejaviť sa významným vplyvom**



Obrázok 4.2: Percentilové distribúcie modelov rezervoárovej odozvy; variant RO1



Obrázok 4.3: Pravdepodobnostný model dosahov frontov rezervoárovej odozvy na lokalite Lovča; variant RO1

- distribúcia termického frontu je pomerne obmedzená – aj v rámci umelo (právne) vymedzeného ochranného pásma dosahuje pravdepodobnosť, že dôjde ku kontaktu s touto zónou, nepresahuje 50 %
- **zdôrazňujeme, že dosah frontov rezervoárovej odozvy neznamená automaticky ovplyvňovanie, ale možnosť pozorovania prejavov produkcie a reinjektáže na systémy prúdenia a zdroje geotermálnej energie (ev. termominerálne vody) – intenzita vplyvu kontaktu frontu s cieľovým prostredím je zásadne funkciou parametrov frontu, a parametrov jeho okolia, a predovšetkým trvania, počas ktorého ku kontaktu dochádza** (modelovanie vplyvov interakcie na rozhraní front – okolie je vecou dostupných dát z pred-produkčného a produkčného monitoringu a ich vyhodnocovania)
- podstatnejšou hranicou je kontakt tektonického okraja kotliny a sklenoteplického ostrova vo vzdialenosti **D = 2 900 m** od modelovaného bodu; kde – indikované podľa izotopového zloženia termominerálnych vôd (FRANKO ET AL., 2006), koncepčnými modelmi (REMŠÍK ET AL., 2000) alebo termochemickými modelmi a geotermometriou (viď. 3.5) – **pravdepodobne dochádza k prestupu medzi žiarskou a sklenoteplickou hydrogeotermálnou štruktúrou, alebo k prestupu medzi oboma morfoštruktúrami** v prípade, ak tvoria jeden systém – keďže však v rámci celej oblasti ide o systémy prúdenia laterálnych a vertikálnych prestupov, bazénovej segmentácie alebo elevovaného podlažia, je rovnako možné, že obe štruktúry sú v skutočnosti spojené s rozdielnymi profilmi, eventuálne smermi prúdenia
- analytické modely v aktuálnom stave poznania nie sú schopné identifikovať, nakoľko ide o rovnaké, alebo samostatné cirkulačno-akumulačné systémy, riešia len priestorové vzťahy definované parametrami frontu a prostredia
- z modelového riešenia (Obrázok 4.3) vyplýva, že **pravdepodobnosť dosiahnutia kontaktu frontov rezervoárovej odozvy k predpokladanému tektonickému vymedzeniu oboch štruktúr je veľmi nízka, $P < 10 \%$** ; a pravdepodobne k nemu nedôjde

ČAS PRODUKCIE $T_{(PROD)} = 100$ ROKOV

Čas produkcie $t_{(PROD)} = 100$ rokov vychádza z Koncepcie trvalo udržateľného rezervoároveho manažmentu (AXELSSON ET AL., 2001; AXELSSON, 2010). Z realizovaných modelov odhadu postupu frontov rezervoárovej odozvy vyplýva:

- stredné vzdialenosti pre dobu produkcie $t_{(PROD)} = 30$ rokov, $r_{(HF)} = 2\,700 \pm 218$ m, $r_{(CF)} = 2\,140 \pm 1\,095$ m a $r_{(TF)} = 1\,700 \pm 860$ m indikujú v tomto čase výraznejší (logický) posun v rozsahu jednotlivých frontov, a tým aj ploche, ktorú pokrývajú a v čase, ktorým jednotlivé prejavy na rezervoárové prostredie, prípadne na rezervoárové pôvodné médium, pôsobia
- v prípade, ak by sklenoteplická a žiarska štruktúra priamo komunikovali, a šlo by o totožné cirkulačno-akumulačné systémy, dochádzalo by vplyvom dlhodobej produkcie takmer s určitosťou k posunu za hranicu vymedzeného ochranného pásma ($P = 100\%$)
- **pre $D = 1\,500$ m**, ktorá predstavuje plánovanú vzdialenosť vrtov v zmysle Zámeru **model indikuje s určitosťou ovplyvňovanie efektívnej zóny produkcie vrtu GTŽ-1**, ktorá by sa v danom čase pravdepodobne prejavila hydraulickými impulzmi, zrejme vo vzťahu k rezervoárovej dynamike ($P = 100\%$), a pravdepodobne aj zvýšením produktivity vplyvom zmeny tlakových pomerov medzi reinjektážnou zónou a efektívnou zónou filtrácie
- **dosah termochemického frontu k vrtu GTŽ-1** ($P = 90 - 100\%$) môže byť, vzhľadom na rýchlosť postupu hydraulického frontu, v skutočnosti priamo s ním spojený; v tomto prípade by bolo možné očakávať aj **vplyv na chemizmus zdrojov geotermálnej energie** vyvolaný nielen rozdielnym chemizmom reinjektátu voči primárnym zdrojom geotermálnej energie, ale aj vplyvom zmeny v tlakových pomeroch, rezervoárovej dynamike, a ochladzovaním periférie efektívnej plochy produkčnej zóny
- je rovnako vysoko pravdepodobné ($P = 80 - 100\%$), že **pri dlhodobej produkcii by v modelom definovaných podmienkach dochádzalo aj k termickému vplyvu reinjektáže na okolie vrtu GTŽ-1 – predovšetkým k advektívnemu ochladzovaniu**, ktoré by sa nevyhnutne prejavilo v zmenách rezervoárovej dynamiky, alebo zmenách chemizmu a tým aj chemicko-technologických parametrov rezervoárového média
- pravdepodobnosť, že front rezervoárovej odozvy by priamo dosiahol **tektonický kontakt žiarskej a sklenoteplíckej štruktúry vo vzdialenosti $D = 2\,900$ m** od pozície reinjektážneho vrtu dosahuje $P < 40\%$ - usudzujeme, že **riziko dosahu reinjektáže je zvýšené, predovšetkým ale vo vzťahu k hydraulickým impulzom**, ktoré by (pre systémy vertikálnej a laterálnej evázie) mohli viesť k zmenám v rýchlosti pohybu podzemných geotermálnych (termominerálnych) vôd na zlomových systémoch a v zónach štruktúrnych porúch, **zatiaľ čo miera** (v porovnaní s hydraulickými parametrami) **konduktívnej retardácie postupujúceho frontu by pravdepodobne zabránila ovplyvňovaniu termických parametrov viazaných na túto oblasť kotliny**

- z modelového riešenia (Obrázok 4.3) vyplýva, že **pravdepodobnosť dosiahnutia výverovej oblasti sklenoteplickej štruktúry (vrt ST-4 a vlastná výverová zóna) je veľmi nízka, $P < 10 \%$** - a pravdepodobne k takémuto, priamemu kontaktu nedôjde

POZNÁMKY K MODELOVÉMU RIEŠENIU VARIANTU RO1

Dôležitým znakom variantu RO1 je, že v analogických podmienkach s RO2 riešením predpokladá vývoj rezervoárového prostredia v karbonátoch hronika, prakticky po okraj výverovej oblasti. Zhoda rôznych autorov (napr. REMŠÍK ET AL., 2000; FRANKO ET AL., 2003; DZÚRIK ET AL., 2023) existuje v skutočnosti, že podstatná časť formovania chemického zloženia termominerálnych vôd v Sklených Tepliciach prebieha v prostredí karbonátov fatrika / série Veľkého boku; a rovnako je touto jednotkou tvorená aj hlboká časť výverovej oblasti. **Ak teda dochádza k zmiešavaniu** (režim laterálneho prestupu, vertikálneho zostupného alebo vzostupného prestupu), **potom prípadné zmeny v rezervoárovom prostredí vplyvom dlhodobej produkcie na lokalite Lovča budú pôsobiť nepriamo:**

- zmenou chemizmu a teplotných podmienok geotermálnych vôd v hroniku (vertikálny výstup), alebo nariedujúcich geotermálnych vôd (vertikálny zostup, laterálny prestup)
- ak by zmiešavanie prebiehalo v okolí tektonického styku grábenovej časti kotliny s perifériou, je pravdepodobné, že prípadný dosah termochemického alebo termického frontu podporil ochladzovanie na vonkajšej strane výstupnej vetvy
- v prípade dosahu hydraulických impulzov do okolia tektonického limitu je možné predpokladať zmeny v režime a dynamike prúdenia vo výstupnej fáze s oboma vektormi: pokles účinnosti prestupu a prípadnej hydraulickej funkcie tektonickej oblasti (nárast tlaku na vonkajšej strane), alebo podpora účinnosti prúdenia v záverečnej fáze výstupu (nárast horizontálneho gradientu rezervoárového tlaku a zmena režimu prúdenia z vertikálneho na smerné)
- **aplikované analytické modely nie sú schopné predpokladať zmeny vo výdatnosti PLZ v Sklených Tepliciach** – indikujú pravdepodobné účinky produkcie a reinjektáže na termické, termochemické a dynamické podmienky zdrojov geotermálnej energie a rezervoárového prostredia; **ktoré vplyvom reinjektáže pri súčasnom stave poznatkov o geologickej a geotermickej charakteristike pravdepodobne priamo neovplyvnia kvalitatívne a kvantitatívne parametre PLZ** – dôrazne ale upozorňujeme na to, že **modelové riešenie je nekalibrované, a vychádza z aktuálneho status-quo poznania.**

Tabuľka 4.5: Štatistické vyhodnotenie pozície frontov rezervoárovej odozvy, lokalita Lovča, variant RO1

	t = 1 rok	t = 5 rokov	t = 10 rokov	t = 30 rokov	t = 50 rokov	t = 100 rokov
temrický front						
MIN	103	232	324	559	727	1042
MAX	683	1365	1966	3587	4592	6509
AVE	202	449	631	1097	1412	2001
MED	170	378	536	929	1204	1704
STDV	89	195	271	478	604	858
P95	121	269	381	661	851	1210
P90	127	282	398	692	893	1268
P75	140	314	445	770	997	1411
P50	170	378	536	929	1204	1704
P25	232	514	726	1255	1611	2291
P10	327	729	1010	1773	2263	3181
P5	399	884	1237	2168	2737	3889
termochemický front						
MIN	131	291	422	732	933	1312
MAX	792	1803	2428	4495	5786	8313
AVE	251	567	793	1397	1795	2526
MED	214	480	675	1180	1516	2137
STDV	108	247	337	613	784	1094
P95	153	340	482	834	1079	1523
P90	160	356	505	875	1130	1594
P75	178	396	560	970	1253	1768
P50	214	480	675	1180	1516	2137
P25	286	653	908	1612	2053	2898
P10	400	921	1266	2267	2907	4076
P5	486	1113	1533	2751	3518	4995
hydraulický front						
MIN	225	500	707	1216	1563	2227
MAX	365	816	1123	1984	2630	3689
AVE	273	610	864	1496	1931	2731
MED	270	603	853	1480	1910	2701
STDV	22	49	69	118	153	218
P95	243	543	767	1332	1718	2425
P90	248	554	784	1358	1752	2476
P75	258	575	813	1409	1818	2571
P50	270	603	853	1480	1910	2701
P25	286	640	905	1567	2022	2863
P10	303	678	960	1661	2148	3039
P5	314	701	993	1718	2217	3134

4.3.4 Implikácie variantu RO2

Podľa modelovanej odpovede postupu studeného frontu, vzhľadom na parametre rezervoárového prostredia (Tabuľka 4.4b) vyplýva:

- rezervoárové prostredie sa vyznačuje pomerne vysokou hydraulickou konduktivitou, podľa čoho (Tabuľka 4.6) platí $r_{(CF)} > r_{(HF)} > r_{(TF)}$; konduktívna retardácia môže byť potlačená vplyvom advekcie, respektíve konvekcie potenciálne viazanej na puklinové systémy a ich pásma štruktúrnych porúch; podobne; analogicky s variantom RO1 (stav očakávaný vzhľadom na vyššiu rezervoárovú teplotu)
- modely odhadu (Obrázok 4.4 a 4.5) prieniku frontov rezervoárovej odozvy sú najmä pre termický a termochemický front výrazne zošikmené vpravo, čo najmä pre termickú a termochemickú odozvu vytvára významnú neistotu v závislosti na parametroch rezervoáru, opätovne analogicky s variantom RO1
- variabilita konduktívnej, a konvekciou (advekciou) podporenej retardácie sa prejavuje predovšetkým z dlhodobého hľadiska, s významným poklesom rýchlosti prieniku termického frontu mimo bezprostrednej blízkosti reinjektážneho vrtu

ČAS PRODUKcie $T_{(PROD)} = 30$ ROKOV

- stredné vzdialenosti pre dobu produkcie $t_{(PROD)} = 30$ rokov, $r_{(HF)} = 850 \pm 50$ m, $r_{(CF)} = 700 \pm 360$ m a $r_{(TF)} = 560 \pm 290$ m indikujú výrazne konzervatívnejšie odhady rozsahu frontov rezervoárovej odozvy v porovnaní s RO1 (vplyv vyšších modelovaných teplôt (Obrázok 3.14) pre daný geologický profil (Obrázok 3.12 a 3.13) na parametre rezervoárového prostredia, a kritické $Q_{(PROD)}$ nevyhnutné pre zabezpečenie očakávaného tepelno-energetického výkonu $P_{(TH)} = 20$ MW_{th}, čo pri vzťahu $Q_{(PROD)} = Q_{(INJ)}$ vedie k znižovaniu intenzity advektívneho ochladzovania počas reinjektáže)
- **pri platnosti geotermických parametrov v definovanom geologickom profile nie je pravdepodobné ($P < 10$ %), že fronty rezervoárovej odozvy budú zaznamenateľné, respektíve významným spôsobom prispievajú k zmene kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia a zdrojov geotermálnej energie na vzdialenosť $D = 1\,500$ m, ktorá je podľa Zámeru definovaná ako horizontálna vzdialenosť medzi produkčným vrtom GTŽ-1 a GTŽ-2**

- pravdepodobnosť dosahu vytýčenej hranice ochranného pásma II. stupňa PLZ v Sklených Tepliciach dosahuje $P < 20 \%$ ($r_{(TF)}$, $r_{(HF)}$) respektíve $P < 40 \%$ ($r_{(CF)}$); čo však hodnotíme len ako priestorový dosah pozorovateľných indikátorov
- kritické prvky okolia produkčnej sústavy – tektonický styk grábenovej časti kotliny a periférie spojenej so sklenoteplickým ostrovom nebudú počas monitorovaného obdobia vymedzenými frontmi pravdepodobne zasiahnuté, nakoľko $P < 10 \%$

ČAS PRODUKCIE $t_{(PROD)} = 100$ ROKOV

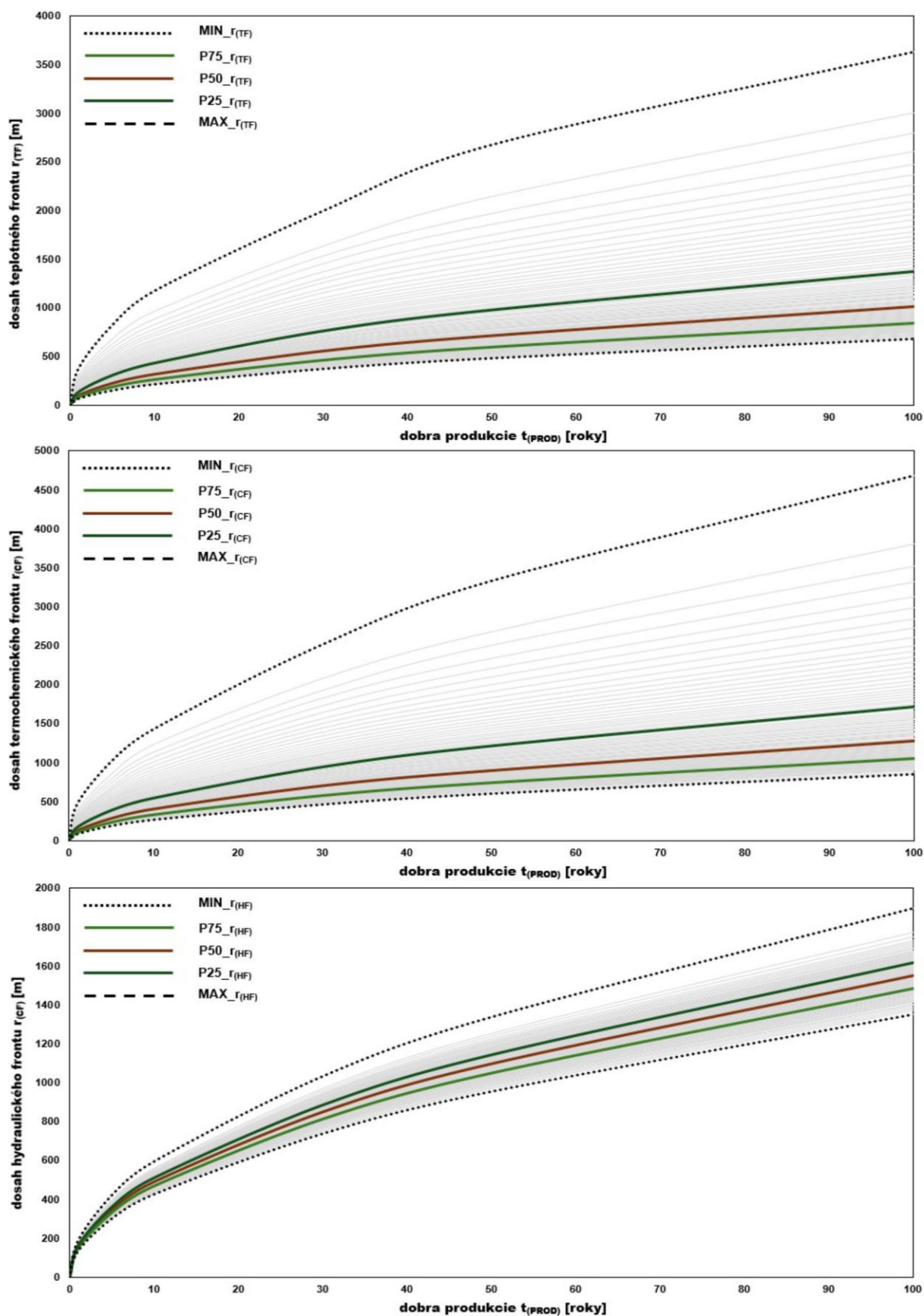
- stredné vzdialenosti pre dobu produkcie $t_{(PROD)} = 30$ rokov, $r_{(HF)} = 1\,550 \pm 100$ m, $r_{(CF)} = 1\,280 \pm 650$ m a $r_{(TF)} = 1\,020 \pm 520$ m indikujú, v porovnaní s výsledkami variantu RO1, výraznú degradáciu postupu frontov rezervoárovej odozvy v čase (pri vyšších rezervoárových teplotách a nižšom $Q_{(INJ)}$ sú účinky konduktívnej, alebo kombinovanej retardácie so zvyšujúcou sa vzdialenosťou dosahu čela frontu výraznejšie; zároveň platí vplyv nižšieho $Q_{(INJ)}$ na intenzitu advektívneho ochladzovania geologického prostredia)
- **je pravdepodobné, že v čase $t_{(PROD)} = 100$ rokov ($P = 60 - 70 \%$) budú v efektívnom okolí produkčného vrtu pozorovateľné účinky hydraulického frontu, predovšetkým vo forme hydraulických impulzov ovplyvňujúcich rezervoárovú dynamiku** (zmeny v stupni vlhkosti, alebo voľnosti saturovanej parnej frakcie, sekundárne zmeny chemizmu zdrojov geotermálnej energie na úrovni zaznamenateľných koncentrácií makroprvkov, zmeny v obrazoch multikomponentovej geotermometrie); **iniciácia produktivity nárastom tlakových pomerov na periférii efektívnej zóny produkcie GTŽ-1 nie je, vzhľadom na trvanie kontaktu hydraulického frontu s okrajovou podmienkou, pravdepodobná**
- **dosah termochemického frontu medzi dubletovou schémou ($P \%$ 35 – 45 %) pre $D = 1\,500$ m je v tomto modelovom riešení vyhodnotený ako možný** – ako potenciálny obraz môže dôjsť k zaznamenateľným zmenám v chemizme zdrojov geotermálnej energie, ktoré by pravdepodobne boli sekundárne podporené účinkami hydraulického frontu na rezervoárovú dynamiku – kombinovaný účinok hydraulického a termochemického frontu by mohol viesť zmenám chemizmu zdrojov geotermálnej energie, a pozorovateľným zmenám v ich chemicko-technologických vlastnostiach; čo zvyšuje nárok na kvalitatívne a kvantitatívne parametre komplexného a udržateľného monitoring počas testovania a produkcie geotermálnych vrtov

- **dosah termického frontu medzi reinjektážnym a produkčným vrtom pre $D = 1\,500\text{ m}$** je v modelovom riešení predpokladaný s pravdepodobnosťou $P < 20\%$ - **nie je možné vylúčiť, že pri daných parametroch by skutočne došlo k nástupu oscilačných trendov v strednej teplote zdrojov geotermálnej energie, pravdepodobne však nie k trvalému ochladzovaniu** (nižšia pravdepodobnosť znamená zároveň zvyšovanie času prieniku studeného frontu, a teda skracovanie doby kontaktu termického frontu a účinného okolia produkčného vrtu, čo znamená nižšiu intenzitu ochladzovania).

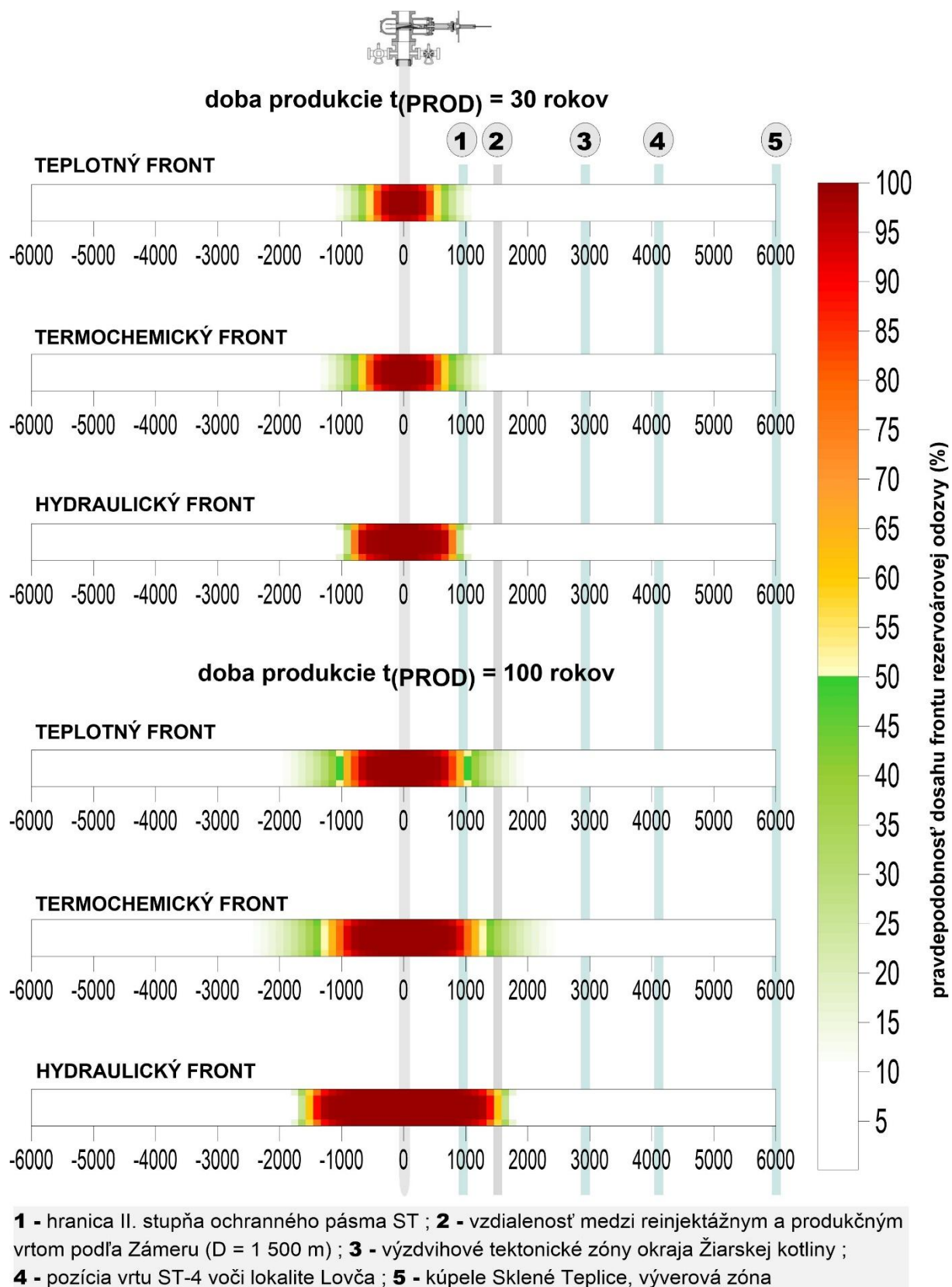
POZNÁMKY K MODELOVÉMU RIEŠENIU VARIANTU RO2

Zásadným rozdielom medzi variantmi RO1 a RO2 je rezervoárové prostredie. Keďže RO2 je založené na predpoklade vývoja karbonátov fatrika / série Veľkého boku priamo v okrajovej časti Žiarskej kotliny, v prípade, **ak by zdroje geotermálnej energie na lokalite Lovča a PLZ v Sklených Tepliciach boli založené na rovnakom cirkulačno-akumulačnom systéme, a tým aj hydraulickej a termickej spojitosti žiarskej a sklenoteplickej hydrogeotermálnej štruktúry, účinky na kvalitatívne a kvantitatívne parametre PLZ by boli priame.** Okrem iného zároveň podľa výsledkov analytických modelov usudzujeme:

- **priame účinky produkcie = dosahy frontov rezervoárovej odozvy do oblasti tektonického vymedzenia kotliny voči sklenoteplíckemu ostrovu, respektíve priamo do výverovej oblasti sú (veľmi) nepravdepodobné**
- ovplyvňovanie rezervoárového prostredia v okolí produkčného dubletu v rámci južného okraja žiarskej kotliny môžu vyvolávať kvalitatívne a kvantitatívne zmeny v zdrojoch geotermálnej energie – dosah týchto zmien, alebo ich kompenzácia medzi cirkulačno-akumulačnou zónou a výverovou zónou nie je možné kvalifikovane posúdiť pri súčasnom stave poznania, nakoľko chýbajú koncové členy tohto priestorového vzťahu
- **aplikované analytické modely nie sú schopné predpokladať zmeny vo výdatnosti PLZ v Sklených Tepliciach** – indikujú pravdepodobné účinky produkcie a reinjektáže na termické, termochemické a dynamické podmienky zdrojov geotermálnej energie a rezervoárového prostredia; **ktoré vplyvom reinjektáže pri súčasnom stave poznatkov o geologickej a geotermickej charakteristike pravdepodobne priamo neovplyvnia kvalitatívne a kvantitatívne parametre PLZ** – dôrazne ale upozorňujeme na to, že **modelové riešenie je nekalibrované, a vychádza z aktuálneho status-quo poznania** (tento záver je platný pre oba posudzované varianty).



Obrázok 4.4: Percentilové distribúcie modelov rezervoárovej odozvy; variant RO2



Obrázok 4.5: Pravdepodobnostný model dosahov frontov rezervoárovej odozvy na lokalite Lovča; variant RO2

Tabuľka 4.6: Štatistické vyhodnotenie pozície frontov rezervoárovej odozvy, lokalita Lovča, variant RO2

	t = 1 rok	t = 5 rokov	t = 10 rokov	t = 30 rokov	t = 50 rokov	t = 100 rokov
temrický front						
MIN	63	140	197	339	446	618
MAX	380	825	1178	2000	2680	3635
AVE	120	269	380	663	850	1203
MED	101	227	320	560	718	1018
STDV	52	116	165	287	366	518
P95	74	164	232	400	518	733
P90	77	171	242	419	542	766
P75	85	190	265	464	598	843
P50	101	227	320	560	718	1018
P25	137	308	434	762	978	1372
P10	192	430	614	1065	1362	1960
P5	236	528	745	1307	1676	2375
termochemický front						
MIN	78	173	253	434	546	783
MAX	470	1013	1429	2515	3330	4680
AVE	151	339	482	830	1064	1510
MED	128	285	406	704	898	1278
STDV	65	147	212	359	461	653
P95	93	206	292	503	649	920
P90	96	215	305	528	680	963
P75	106	237	335	582	748	1060
P50	128	285	406	704	898	1278
P25	173	390	548	948	1218	1722
P10	245	548	782	1347	1714	2436
P5	294	663	958	1645	2103	2991
hydraulický front						
MIN	129	284	394	688	908	1241
MAX	189	422	596	1033	1338	1896
AVE	156	348	492	851	1099	1553
MED	156	347	491	851	1098	1552
STDV	10	22	31	53	68	96
P95	140	313	443	768	988	1398
P90	143	320	453	783	1010	1428
P75	149	333	470	814	1050	1485
P50	156	347	491	851	1098	1552
P25	162	362	512	887	1146	1620
P10	168	376	531	918	1187	1676
P5	172	384	542	938	1210	1712

4.3.5 Zhodnotenie analytických modelov rezervoárovej odozvy

Na základe realizovaných stochastických modelov rezervoárovej odozvy pre varianty RO1 a RO2 je možné vysloviť nasledovné predpoklady a poznámky:

- **je pravdepodobné, že v období $t_{(PROD)} = 30 - 100$ rokov dôjde k hydraulickej, termickej, a termochemickej komunikácii medzi produkčným dubletom, ak bude dodržaná ich vzdialenosť $D = 1\,500$ m, ktorých intenzita bude závisieť na dĺžke trvania kontaktu frontov rezervoárovej odozvy s okolím produkčného vrtu (nie je možné vylúčiť zmeny v rezervoárovej dynamike s ich sekundárnymi dôsledkami pre chemizmus zdrojov geotermálnej energie a ich technicko-technologické vlastnosti geotermálnej vody; zmeny fázových pomerov a vlhkosti / stupňa termodynamickej viazanosti saturovanej parnej frakcie; zmeny v rezervoárovej teplote – ochladzovanie) – tieto zmeny = rezervoárová odozva, sú typickým a prirodzeným znakom produkcie zdrojov geotermálnej energie, a pri správnom nastavení rezervoárového manažmentu a programu mitigácie rizík môžu byť úspešne kontrolované, mitigované, alebo potlačené, bez fatálnych následkov na dlhodobosť produkcie;**
- **na základe realizovaných modelov neexistuje momentálne dôvodný predpoklad, že dôjde k priamemu ovplyvneniu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov PLZ v Sklených Tepliciach vplyvom reinjektáže, a postupu termického, termochemického alebo hydraulického frontu v smere od reinjektážnej sústavy – zároveň však trváme na zachovaní princípu predbežnej opatrnosti a dôraze na komplexný rezervoárový manažment, ktorého návrh pripíjame v poslednej časti posudku;**
- **vzhľadom na dostupnosť údajov a ich kvalitu, využité analytické modely nie sú schopné predpovedať zmeny vo výdatnosti PLZ v Sklených Tepliciach otvorením, alebo udržiavaním dlhodobej produkcie – tento stav je možné overiť len pred-produkčným, a následne produkčným dlhodobým monitoringom – k tejto téme nie je možné vysloviť kvalifikovaný predpoklad – stabilita výdatnosti PLZ v Sklených Tepliciach je preto z pohľadu vplyvu otvorenia produkcie na lokalite Lovča naďalej objektívnou neistotou**
- **bezprostredné riziká vo vzťahu k PLZ v Sklených Tepliciach spojené s prevádzkou dubletového systému, ktorej sa Zámer týka, modelovými riešeniami neboli indikované**

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

5.1 Energetická bilancia rezervoárového prostredia

5.1.1 Katalóg zdrojov a zásob geotermálnej energie

Stochastický model katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) bol vytvorený ako náhrada doteraz preferovaného Atlasu geotermálnej energie SR (FRANKO ET AL., 1995) pri rešpektovaní aktuálneho stavu vymedzenia geotermálnych koncepcií – angl. geothermal plays (FRIČOVSKÝ ET AL., 2026A,B) s využitím podmieneného nelineárneho stochastického modelovania na základe geologických, geotermických a koncepčných modelov rezervoárových prostredí.

KOEFICIENT DOSTUPNOSTI ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE V REZERVOÁROVOM PROSTREDÍ SEVERNEJ ČASTI ŽIARSKEJ KOTLINY

Koeficient dostupnosti zdrojov geotermálnej energie – R_0 (angl. recovery factor) – vyjadruje „pomer množstva geotermálnej energie odoberateľnej zo systému voči množstvu geotermálnej energie uloženej v systéme, ktoré je možné exploatovať z rezervoárového prostredia pri jeho geologických, hydrogeologických a geotermických parametroch a technicko-technologických možnostiach rezervoárovej produkcie“ (GARG - COMBS, 2015; GRANT, 2018) v logickom intervale $R_0 \in (0; 1)$. Namiesto v praxi kritizovaného využívania konštant (napr. GRANT, 2014, 2018), ale štandardného pre hydrogeotermálne hodnotenia na Slovensku v rozpätí $R_0 = 0,05$ až $0,17$ (FRANKO ET AL., 1995; FENDEK ET AL., 2005); je katalóg založený na regionalizovaní R_0 a jeho nastavení ako dynamickej premennej v simuláciách USGS objemovej metódy (MUFFLER – CATALDI, 1987; GARG – COMBS, 2015).

Model odhadu R_0 bol v Žiarskej kotline realizovaný samostatne pre rezervoárové prostredie hronika a rezervoárové prostredie fatrika / série Veľkého boku, nakoľko z pohľadu

konceptného modelu boli obe prostredia pre grábenovú časť vyhodnotené ako hydraulicky / termicky nekomunikujúce (stav spoľahlivo neoverený aj v súčasnosti) – a geotermálna koncepcia ako stratifikované rezervoárové prostredie. **Pre simuláciu modelu odhadu R0 bola využitá metóda účinnosti rezervoárovej produkcie** (UNGEMACH ET AL., 2005, 2009), odvodená pôvodne pre dubletové systémy s vplyvom advektívneho ochladzovania a jeho konduktívnej retardácie v rezervoárovom prostredí (MENJOZ – SAUTY, 1982; LOPEZ ET AL., 2010; LIMBERGER ET AL., 2018) [23 - 24]:

$$\eta_{(PROD)} = \frac{Q_{(INJ)}}{A_{(e)} \times \Delta Z_{(RES)}} \times \frac{\gamma_{(INJ)}}{\gamma_{(a)}} \times t_{(PROD)} \quad [23]$$

$$R0 = \eta_{(PROD)} \times \frac{(T_{(wh)} - T_{(inj)})}{(T_{(RES)} - T_{(S)})} \quad [24]$$

kde: $Q_{(INJ)}$ – reinjektované množstvá ($m^3 \cdot s^{-1}$), $A_{(e)}$ – efektívna plocha rezervoáru (m^2), $\Delta Z_{(RES)}$ – hrúbka rezervoáru (m), $\gamma_{(INJ)}$ – objemová tepelná kapacita reinjektátu ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$), $\gamma_{(a)}$ – objemová tepelná kapacita rezervoárového prostredia ($J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$), $t_{(PROD)}$ – doba produkcie / reinjektáže (s), $\eta_{(PROD)}$ – účinnosť produkcie (-), $T_{(wh)}$ – teplota zdroja na ústí ($^{\circ}C$), $T_{(inj)}$ – teplota reinjektovaného zdroja ($^{\circ}C$), $T_{(RES)}$ – teplota rezervoárového prostredia ($^{\circ}C$), $T_{(S)}$ – priemerná teplota aktívneho povrchu pôdy ($^{\circ}C$).

Na základe stochastického modelu odhadu koeficientu dostupnosti zdrojov geotermálnej energie pre severnú časť Žiarskej kotliny platí (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025):

a) pre karbonáty hronika (plytká rezervoárová jednotka):

- simulovaný rozsah: $R0 = 0,083 - 0,242$
- rozdelenie modelu – lognormálne: $AVG(R0) = -1,882$; $STD(R0) = 0,296$
- stredná hodnota dynamického modelu $R0$: $Md(R0) = 0,168$

b) pre karbonáty fatrika / série Veľkého boku (hlboká rezervoárová jednotka)

- simulovaný rozsah: $R0 = 0,054 - 0,217$
- rozdelenie modelu – lognormálne: $AVG(R0) = -2,144$; $STD(R0) = 0,385$
- stredná hodnota dynamického modelu $R0$: $Md(R0) = 0,117$

Uvedené stredné hodnoty dynamických modelov, respektíve simulačné rozsahy a distribučné funkcie sú v rámci katalógu vyhodnotené ako reprezentatívne pre obe rezervoárové jednotky **a odporúčané pre budúce hydrogeotermálne hodnotenia v rámci oboch prostredí Žiarskej kotliny za predpokladu, že nedôjde k potvrdeniu plošnej hydraulickej / termickej komunikácie medzi oboma rezervoárovými jednotkami.**

STOCHASTICKÝ MODEL McKELVEYOVEJ SCHÉMY

Stochastický model McKelveyovej schémy (Tabuľka 5.1) je založený na Monte Carlo simuláciách USGS objemovej metódy (MUFFLER – CATALDI, 1987; GARG – COMBS, 2015). Metodicky ide o analógiu ku národným katalógom zdrojov a zásob geotermálnej energie vo svete, vrátane EÚ (napr. BASEL ET AL., 2010; CIRIACO ET AL., 2020; HERMS ET AL., 2026). Pre lokálne podmienky severnej časti Žiarskej kotliny je metóda nastavená ako energetická bilancia rezervoárového prostredia (M) a rezervoárového média – geotermálnej vody (W) [25]. Keďže vzhľadom na geometriu a p-T podmienky existuje predpoklad, že prípadná parná frakcia je vo forme termodynamicky vlhkej, saturovanej pary so stredným až vysokým stupňom viazanosti, parná zložka nebola v bilancii uvažovaná:

$$H_0 = R_0 \times (H_{(W)} + H_{(M)}) \quad \left| \begin{array}{l} H_{(M)} = V_{(t)} \times \Delta T \times [(1 - \varphi_{(z)}) \times \rho_{(m)} \times c_{(m)}] \\ H_{(W)} = V_{(t)} \times \Delta T \times (\varphi_{(z)} \times \rho_{(w)} \times c_{(w)}) \\ \Delta T = T_{(RES)} - T_{(INJ)} \end{array} \right. \quad [25]$$

H_0 – dostupné množstvo geotermálnej energie (J), R_0 – koeficient dostupnosti zdrojov geotermálnej energie (-), $H_{(M)}$ – celkové množstvo geotermálnej energie viazanej na horninové prostredie (J), $H_{(W)}$ – celkové množstvo geotermálnej energie viazanej na rezervoárové médium (J), $V_{(t)}$ – rezervoárový objem (m^3) = $A \times \Delta z$, $\varphi_{(z)}$ – hĺbková funkcia pórovitosti (-), $\rho_{(m)}$ – špecifická hustota rezervoárovej horniny ($kg \cdot m^{-3}$), $c_{(m)}$ – špecifická tepelná kapacita rezervoárovej horniny ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), $\rho_{(w)}$ – špecifická hustota geotermálnej vody ($kg \cdot m^{-3}$), $c_{(w)}$ – špecifická tepelná kapacita geotermálnej vody ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), $T_{(RES)}$ – rezervoárová teplota ($^{\circ}C$), $T_{(INJ)}$ – teplota reinjektáže ($^{\circ}C$).

McKelveyova (MCK) schéma (MUFFLER - CATALDI, 1978) je v princípoch schémou založenou na analýze neistoty modelov odhadu. Konštrukcia stochastického modelu MCK sa vzťahuje na aktualizovanú definíciu kategórií zdrojov a zásob geotermálnej energie (WILLIAMS ET AL., 2010; 2011) a im zodpovedajúce percentilové kritériá (SANYAL - SARMIENTO, 2005; FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) reflektujúce zmeny v neistotách. Model odhadov zdrojov a zásob geotermálnej energie pre karbonáty hronika udáva Tabuľka 5.1. Model odhadov zdrojov a zásob geotermálnej energie pre karbonáty fatrika / série Veľkého boku udáva Tabuľka 5.2. Konštruovaná je podľa tvaru [26] pre $t_{(PROD)} = 40$ rokov a $t_{(PROD)} = 100$ rokov, ktoré predstavujú kritéria krátkodobého (amortizovaná životnosť geotermálnych projektov – SANYAL – MORROW, 2010) a udržateľného horizontu produkcie na základe definícií v Konceptii trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie (AXELSSON ET AL., 2001):

$$E_0 = \frac{H_0}{t_{prod}} \quad [26].$$

Aktuálny stav overených množstiev zdrojov geotermálnej energie pre karbonáty oboch rezervoárových jednotiek severnej časti Žiarskej kotliny predstavuje $R_{(PV)} = 9,8$ MWt (FRIČOVSKÝ ET AL., 2026A); z čoho $R_{(PV)} = 1,2$ MWt pripadá na karbonáty hronika (lokalita Vyhne) a $R_{(PV)} = 8,6$ MWt pripadá na karbonáty fatrika / série Veľkého boku (lokalita Sklené Teplice).

Pravdepodobný tepelno-energetický potenciál – TTP(p) „predstavuje tú časť geotermálnej energie v rezervoárovom prostredí, ktorú je možné overiť s pravdepodobnosťou 50 %“ (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). Na základe percentilových selekčných kritérií (SANYAL - SARMIENTO, 2005) v kombinácii s definíciou tried MCK predstavuje kritickú hranicu rizika odhadu P50(E0).

Tabuľka 5.1: Model McKelveyovej schémy zdrojov a zásob geotermálnej energie: Žiarska kotlina, severná časť, plytká rezervoárová jednotka, karbonáty hronika

triedy McKelveyovej schémy	symbol	$t_{\text{prod}} = 100$ rokov	$t_{\text{prod}} = 40$ rokov	škálovanie P(E0)
		MWt	MWt	
Zdroje geotermálnej energie	$R_{(ST)}$	408	1 020	P5(E0)
Zásoby geotermálnej energie	$R_{(ET)}$	326	815	P10(E0)
Predpokladané zásoby GTE	$R_{(INF)}$	212	529	P10(E0) – P50(E0)
Pravdepodobný potenciál	TTP(p)	115	286	P50(E0)
Pravdepodobné zásoby GTE	$R_{(PB)}$	90	224	P90(E0) – P50(E0)
Overené zásoby GTE	$R_{(PV)}$	1,2		-
Koeficient dostupnosti	R0	0,083 – 0,242		

Tabuľka 5.2: Model McKelveyovej schémy zdrojov a zásob geotermálnej energie: Žiarska kotlina, severná časť, plytká rezervoárová jednotka, karbonáty fatrika / série Veľkého boku

triedy McKelveyovej schémy	symbol	$t_{\text{prod}} = 100$ rokov	$t_{\text{prod}} = 40$ rokov	škálovanie P(E0)
		MWt	MWt	
Zdroje geotermálnej energie	$R_{(ST)}$	340	850	P5(E0)
Zásoby geotermálnej energie	$R_{(ET)}$	273	680	P10(E0)
Predpokladané zásoby GTE	$R_{(INF)}$	165	413	P10(E0) – P50(E0)
Pravdepodobný potenciál	TTP(p)	108	270	P50(E0)
Pravdepodobné zásoby GTE	$R_{(PB)}$	77	192	P90(E0) – P50(E0)
Overené zásoby GTE	$R_{(PV)}$	8,6		-
Koeficient dostupnosti	R0	0,054 – 0,217		

Podľa jednoduchej bilancie už overených – $R_{(PV)}$ a plánovaných $P_{(TH)}$ množstiev odoberanej geotermálnej energie [27] potom okrajová podmienka energetického odberu z rezervoárového prostredia $P_{(OUT)} < TTP_{(p)}$ pre dlhodobý a krátkodobý horizont produkcie, a rovnako tak pre obe rezervoárové jednotky:

$$P_{(OUT)} = R_{(PV)} + P_{(TH)} \quad \left| \begin{array}{l} P_{(OUT)} = 20 + 1,2 = 22 \text{ MWt} \\ P_{(OUT)} = 20 + 8,6 = 29 \text{ MWt} \end{array} \right. \quad [27].$$

Ak $TTP(p) = 286 / 115 \text{ MWt}$ pre karbonáty hronika, respektíve $TTP(p) = 270 / 108 \text{ MWt}$ pre karbonáty fatrika / série Veľkého Boku, potom:

- **pre karbonáty hronika** (podmienky definované Katalógom zodpovedajú hĺbkovej úrovni predpokladaného geologického vrtu v karbonátoch fatrika) je možné predpokladať, že **energetická kapacita vyjadrená $TTP(p)$ je energeticky schopná pokryť požadovaný / očakávaný tepelno-energetický výkon na lokalite Lovča aj v prípade spoločnej produkcie na lokalitách Lovča a Vyhne**; pravdepodobnosť overenia $P_{(OUT)} = 22 \text{ MWt}$ dosahuje podľa energetickej bilancie rezervoárového prostredia $P(E0) > 90 \%$, t.j. s nízkou hladinou rizika neúspechu pre $t_{(PROD)} = 40$ rokov a $t_{(PROD)} = 100$ rokov
- **pre karbonáty fatrika** (hodnotené na základe predpokladu variantu RO2 a geologického profilu vrtu GTŽ-1; ŠUJAN ET AL., 2020) je možné predpokladať, že **energetická kapacita vyjadrená $TTP(p)$ je energeticky schopná pokryť požadovaný / očakávaný tepelno-energetický výkon na lokalite Lovča aj v prípade spoločnej produkcie na lokalitách Lovča a Sklené Teplice**; pravdepodobnosť overenia $P_{(OUT)} = 29 \text{ MWt}$ dosahuje podľa energetickej bilancie $P(E0) \geq 90 \%$, t.j. s nízkou hladinou rizika neúspechu pre $t_{(PROD)} = 40$ rokov a $t_{(PROD)} = 100$ rokov;
- **zdôrazňujeme ale, že energetická bilancia rezervoárového prostredia sa vzťahuje na jeho absolútnu energetickú kapacitu, a nevyjadruje hydraulické vzťahy v rezervoári, respektíve medzi lokalitami.**

5.1.2 Udržateľná rezervoárová kapacita

Podľa definície v Katalógu, je udržateľná rezervoárová kapacita – $P_{th(S)}$ vyjadrená ako „maximálne množstvo tej časti geotermálnej energie dostupnej v rezervoárovom prostredí, ktorej využívanie neprinesie výrazné riziko rozvoja, alebo podpory intenzity procesov rezervoárovej odozvy vplyvom jeho energetickej depletácie“ (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025). Nakoľko vychádza z princípu koeficientu kapacity zásob (viď nižšie), podľa ktorého je ako udržateľne produkované množstvo geotermálnej energie množstvo, ktoré nepresahuje 50 % energetickej kapacity rezervoáru, podľa vzťahu [28] vyjadruje 50 % jeho $TTP(p)$:

$$r_{cap(U)} = \frac{P_{th(REF)} - TTP(p)}{TTP(p)} \rightarrow P_{th(s)} = (1 - \zeta_{(rcap)}) \times TTP(p) \rightarrow P_{th(s)} = 0,5 \times TTP(p) \quad [28]$$

kde: $r_{cap(U)}$ – koeficient kapacity zásob aktuálneho využívania zdrojov geotermálnej energie (-), $P_{th(REF)}$ – referenčný tepelno-energetický výkon (MWt), $TTP(p)$ – pravdepodobný tepelno-energetický potenciál (MWt), $P_{th(s)}$ – kritická hranica produkcie zdrojov geotermálnej energie (MWt), $\zeta_{(rcap)}$ – kritická hranica koeficientu kapacity zásob (-).

Na základe energetickej bilancie rezervoárových prostredí, je Katalógom definovaný odhad udržateľnej rezervoárovej kapacity:

- pre karbonáty hronika: $P_{th(s)} = 143 / 57$ MWt pre $t_{(PROD)} = 40$ rokov a $t_{(PROD)} = 100$ rokov
- pre karbonáty fatrika: $P_{th(s)} = 135 / 54$ MWt pre $t_{(PROD)} = 40$ rokov a $t_{(PROD)} = 100$ rokov.

Za predpokladu, že z energetického hľadiska sa obe rezervoárové prostredia prejavujú ako kontinuum (MORAN – SHAPIRO, 2006; GRANT – BIXLEY, 2011; WATSON, 2013; AXELSSON, 2022), takže dochádza k hydraulickej a/alebo termickej komunikácii medzi jeho jednotlivými časťami a zmena v jednej oblasti rezervoáru vyvolá zmeny, vrátane pozitívneho gradientu teploty a energetického toku v druhej časti, potom pre $P_{(OUT)} = 22$ MWt (variant pre hronikum) a $P_{(OUT)} = 29$ MWt (variant pre fatrikum) platí:

- **pre karbonáty hronika: $P_{(OUT)} < P_{th(s)}$ – rozšírenie produkcie zdrojov geotermálnej energie neprekročí modelom odhadovanú udržateľnú rezervoárovú kapacitu;** a to pre krátkodobý, aj dlhodobý horizont produkcie
- **pre karbonáty fatrika / série Veľkého boku: $P_{(OUT)} < P_{th(s)}$ – rozšírenie produkcie zdrojov geotermálnej energie neprekročí modelom odhadovanú udržateľnú rezervoárovú kapacitu;** a to pre krátkodobý, aj dlhodobý horizont produkcie

Podľa výsledkov vzťahu medzi aktuálne odhadovanou udržateľnou rezervoárovou kapacitou v oboch tektonických / rezervoárových jednotkách je možné predpokladať, že produkcia geotermálnej energie (zmena energetickej bilancie rezervoárového prostredia jej kontinuálnym a koncentrovaným odberom) pri rešpektovaní udržateľnej rezervoárovej kapacity nebude podporovať nástup, a rozvoj intenzity (negatívnych) aspektov rezervoárovej odozvy, ktoré je možné predpokladať predovšetkým vplyvom reinjektáže. Energetická bilancia sa nevzťahuje na hydraulické parametre rezervoárového prostredia a na prípadné zmeny v produktivite narušením hydraulickej bilancie.

5.1.3 Parametre udržateľnosti rezervoárovej produkcie

UDRŽATEĽNOSŤ 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., 2025) [29 - 32]:

a) pre karbonáty **hronika**:

$$rcap_{(U,40)} = \frac{TTP(p) - P_{(OUT)}}{TTP(p)} = \frac{286 - 22 [MWt]}{286 [MWt]} = \frac{264}{286} = \mathbf{0,92} \quad [29]$$

$$rcap_{(U,100)} = \frac{TTP(p) - P_{(OUT)}}{TTP(p)} = \frac{115 - 22 [MWt]}{115 [MWt]} = \frac{93}{115} = \mathbf{0,81} \quad [30]$$

b) pre karbonáty **fatrika / série Veľkého boku**

$$rcap_{(U,40)} = \frac{TTP(p) - P_{(OUT)}}{TTP(p)} = \frac{269 - 29 [MWt]}{269 [MWt]} = \frac{240}{269} = \mathbf{0,89} \quad [31]$$

$$rcap_{(U,100)} = \frac{TTP(p) - P_{(OUT)}}{TTP(p)} = \frac{108 - 29 [MWt]}{108 [MWt]} = \frac{79}{108} = \mathbf{0,73} \quad [32].$$

Na základe tejto bilancie je možné predpokladať, že z energetického hľadiska, otvorením produkcie v oboch sledovaných časových horizontoch je možné v rezervoári naďalej očakávať potenciál na úrovni 81 – 92 % pre hronikum, respektíve 73 – 89 % odhadovaného energetického potenciálu podľa stochastického modelu. Okrajové podmienky a klasifikácia Zámeru v zmysle energetickej udržateľnosti sú prezentované v Tabuľke 5.3.

Podľa klasifikačnej schémy (BJARNADOTTIR, 2010; FRIČOVSKÝ ET AL., 2020C, 2025) následne existuje predpoklad, že **z energetického hľadiska by zvýšenie produkcie zdrojov geotermálnej energie** pre oba varianty geologického prostredia a súbežnú aktivitu lokality Lovča s okolím (Vyhne, Sklené Teplice) **bolo možné klasifikovať ako udržateľnú a veľmi-udržateľnú rezervoárovú produkciu. Vplyv produkcie na riziká energetickej bilancie rezervoárového prostredia je možné následne charakterizovať**, za predpokladu modelu energetického kontinua, **ako nízke**. Tento stav presúva dopady produkcie zdrojov geotermálnej energie z rezervoárového prostredia na stranu reinjektážneho manažmentu.

Tabuľka 5.3. Udržateľnosť produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa Zámeru voči stochastickému modelu energetickej bilancie rezervoárového prostredia

charakteristika koeficientu zásob geotermálnej energie	klasifikácia udržateľnosti produkcie podľa Zámeru	kritické hranice produkcie zdrojov geotermálnej energie pre $t_{\text{prod}} = 40$ rokov (MWt)	kritické hranice produkcie zdrojov geotermálnej energie pre $t_{\text{prod}} = 100$ rokov (MWt)
strednotriasové karbonáty hronika			
$r_{\text{cap}} < 0$	kritická depletácia	$P_{\text{th}} > 286 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} > 115 \text{ MWt}$
$r_{\text{cap}} = 0 - 0,49$	depletácia	$P_{\text{th}} = 216 - 286 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} = 58 - 116 \text{ MWt}$
$r_{\text{cap}} = 0,5 - 0,74$	udržateľná produkcia	$P_{\text{th}} = 215 - 72 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} = 115 - 29 \text{ MWt}$
$r_{\text{cap}} = 0,75 - 1,0$	veľmi udržateľná produkcia	$P_{\text{th}} < 72 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} < 29 \text{ MWt}$
strednotriasové karbonáty fatrika / série Veľkého boku			
$r_{\text{cap}} < 0$	kritická depletácia	$P_{\text{th}} > 269 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} > 108 \text{ MWt}$
$r_{\text{cap}} = 0 - 0,49$	depletácia	$P_{\text{th}} = 136 - 269 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} = 55 - 108 \text{ MWt}$
$r_{\text{cap}} = 0,5 - 0,74$	udržateľná produkcia	$P_{\text{th}} = 135 - 67 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} = 27 - 54 \text{ MWt}$
$r_{\text{cap}} = 0,75 - 1,0$	veľmi udržateľná produkcia	$P_{\text{th}} < 67 \text{ MWt}$	$P_{\text{th}} < 27 \text{ MWt}$

POTENCIÁL UDRŽATEĽNÉHO ROZVOJA PRODUKCIE ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

Potenciál udržateľného rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie $P_{\text{th(D)}}$ je definovaný ako „časť energie dostupnej v rezervoárovom prostredí, ktorá pri súčasnom stave produkcie zabezpečí udržateľnosť existujúcej a budúcej produkcie pri nízkom riziku narušenia energetickej bilancie rezervoáru, rezervoárovej dynamiky, a magnitúdy rezervoárovej odozvy, ktorá by ohrozila existujúce a budúce projekty“ (FRÍČOVSKÝ ET AL., 2025, 2026B).

Pre Žiarsku kotlinu je vyhodnocovaný v dvoch variantoch:

- pre hronikum v spojitosti lokalít Lovča – Vyhne, za predpokladu, že rezervoárové prostredie zodpovedá predpokladu definovanému v Katalógu; podľa produkčnej histórie v období 2011 – 2025: $P_{\text{th(REF)}} = 0,01 - 0,63 \text{ MWt}$
- pre fatrikum v spojitosti lokalít Lovča – Sklené Teplice a Kremnica, za predpokladu, že karbonáty fatrika / série Veľkého boku, predstavujú primárne, a geotermicky spojené rezervoárové prostredie pre hlbokú časť kotliny a jej perifériu sklenoteplického ostrova; podľa produkčnej histórie 2011 – 2025: $P_{\text{th(REF)}} = 4,6 - 5,3 \text{ MWt}$

Keďže aktuálny stav rezervoáru nie je len obrazom súčasnej exploatácie, ale historickej produkcie, model odhadu $P_{\text{th(D)}}$ sa vzťahuje k normalizovanému reprezentatívne tepelnému výkonu $P_{\text{th(REF*)}}$ [33], nakoľko, najmä pri cyklickej, útlmovej, alebo oscilačnej stratégii, je časť odoberanej energie kontinuálne nahradzovaná. Harmonizovanie $P_{\text{th(D)}}$ voči $P_{\text{th(S)}}$ [34 - 35]

zároveň umožňuje zachovanie vzťahu $P_{th(REF*)} + P_{th(D)} \rightarrow r_{cap(U)} > 0,5 \pm 0,05$ (FRIČOVSKÝ ET AL., 2026B).

$$P_{th(REF*)} = MIN(P_{th(REF)}) + 0,5 \times (MAX(P_{th(REF)}) - MIN(P_{th(REF)})) \quad [33]$$

$$P_{th(D)} = P_{th(S)} - P_{th(REF*)} + a \times [LQ(P_{th(REF)}) - b \times (Q3(P_{th(REF)}) - Q1(P_{th(REF)}))] \quad [34]$$

$$LQ(P_{th(REF)}) = Q1(P_{th(REF)}) - 1,5 \times (Q3(P_{th(REF)}) - Q1(P_{th(REF)})) \quad [35]$$

kde: $P_{th(REF*)}$ – normalizovaný tepelno-energetický výkon rezervoárového prostredia (MWt), $P_{th(REF)}$ – kumulatívny tepelno-energetický výkon vrtov produkujúcich v konkrétnom rezervoárovom prostredí (MWt), $P_{th(D)}$ – potenciál udržateľného rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie (MWt), $P_{th(S)}$ – udržateľná rezervoárová kapacita (MWt), parametre „a“ a „b“ – iteračné parametre normalizovania pre spätná projekcia $P_{th(REF)} + P_{th(D)}$ na krivku produkčnej histórie dosahuje $r_{cap(U)} > 0,5$ resp. $r_{cap(U)} = 0,45$ až $0,5$ pre menej ako 10 % mesačných záznamov iteráciou parametrov

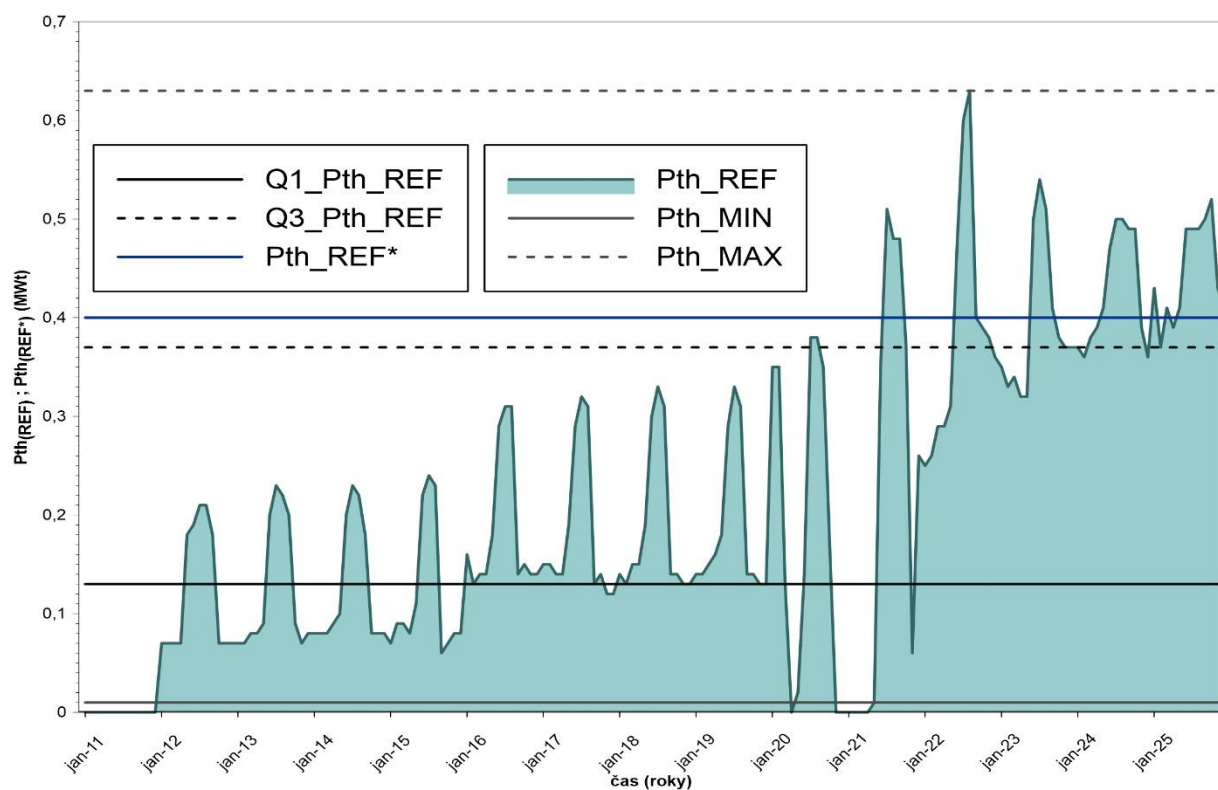
Modelovanie $P_{th(D)}$ pre **hronikum** indikuje (Tabuľka 5.4):

- kumulatívny trend produkcie geotermálnej energie z rezervoárového prostredia je **rastový**
- normalizovaný tepelno-energetický potenciál: $P_{th(REF*)} = 0,4$ MWt (lokalita Vyhne)
- potenciál udržateľného rozvoja produkcie: **$P_{th(D)} = 143 / 57$ MWt** pre $t_{(PROD)} = 40$ rokov / $t_{(PROD)} = 100$ rokov
- projekcia $r_{cap(U,100)} = 0,49 - 0,50$; $r_{cap(U,100)} < 0,5$ pre 3 % krivky produkčnej histórie
- projekcia $r_{cap(U,100)} = 0,49 - 0,50$; $r_{cap(U,40)} < 0,5$ pre 8 % krivky produkčnej histórie

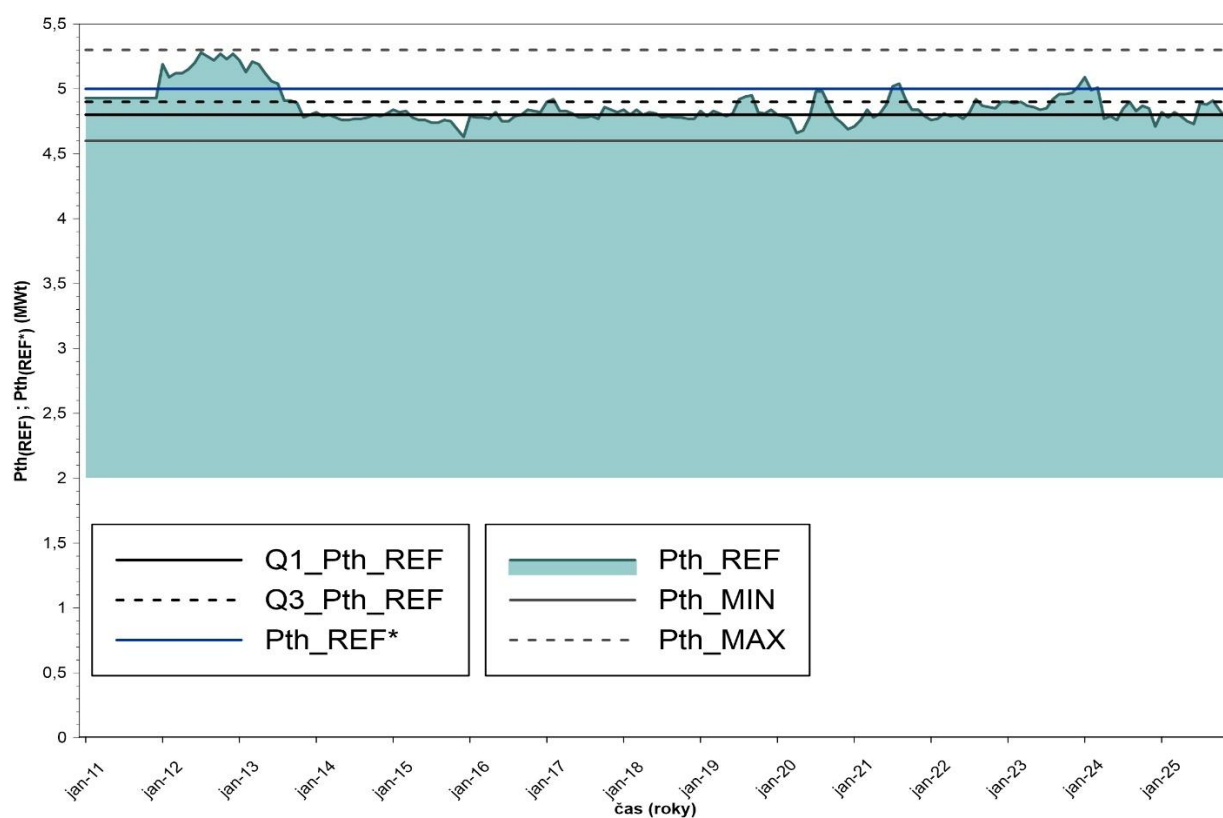
Modelovanie $P_{th(D)}$ pre **fatrikum / sériu Veľkého boku** indikuje (Tabuľka 5.4):

- kumulatívny trend produkcie geotermálnej energie z rezervoárového prostredia je **oscilačný**
- normalizovaný tepelno-energetický potenciál: $P_{th(REF*)} = 5$ MWt (lokalita Vyhne)
- potenciál udržateľného rozvoja produkcie: **$P_{th(D)} = 121 / 40$ MWt** pre $t_{(PROD)} = 40$ rokov / $t_{(PROD)} = 100$ rokov
- projekcia $r_{cap(U,100)} = 0,58 - 0,59$; $r_{cap(U,100)} < 0,5$ pre 0 % krivky produkčnej histórie
- projekcia $r_{cap(U,100)} = 0,53 - 0,54$; $r_{cap(U,40)} < 0,5$ pre 0 % krivky produkčnej histórie

Z bilančného hľadiska energetického potenciálu zdrojov geotermálnej energie, potom pre zámer produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa Zámeru $P_{(TH)} = 20$ MWt platí $P_{(TH)} < P_{th(D)}$ pre obe varianty rezervoárových prostredí a **Zámer rozšírenia produkcie zdrojov geotermálnej energie nepresahuje modelovaný potenciál udržateľného rozvoja.**



Obrázok 5.1: Analýza krivky produkčnej histórie 2011 - 2025; karbonáty hronika



Obrázok 5.2: Analýza krivky produkčnej histórie 2011 - 2025; karbonáty fatrika / série Veľkého boku

Tabuľka 5.4: Potenciál udržateľného rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie v Žiarskej kotline

jednotka	MIN	MAX	Q1	Q3	Pth _(REF*)	Pth _(D)	Pth _(D)
	Pth _(REF)	Pth _(REF)	Pth _(REF)	Pth _(REF)		t = 40 rokov	t = 100 rokov
	MWt	MWt	MWt	MWt		MWt	MWt
hronikum	0,01	0,7	0,13	0,37	0,4	143	57
fatrikum	4,6	5,3	4,8	4,9	5	121	40

PERSPEKTIVITA UDRŽATEĽNÉHO ROZVOJA PRODUKCIE ZDROJOV GEOTERMÁLNEJ ENERGIE

Perspektivita udržateľného rozvoja produkcie vyjadruje mieru dostupnej energie, ktorú je možné využívať pri zachovaní udržateľnej kapacity rezervoárového prostredia s ohľadom na aktuálnu produkciu geotermálnej energie, alebo jej očakávaný rozvoj. 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. Metodika koeficientu perspektívnosti udržateľného rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie $r_{cap(S)}$, vychádza z koeficientu kapacity zásob (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025) [36 - 39]:

a) pre karbonáty **hronika**:

$$r_{cap(S,40)} = \frac{P_{th(S)} - P_{(OUT)}}{P_{th(S)}} = \frac{143 - 22 \text{ [MWt]}}{143 \text{ [MWt]}} = \frac{121}{143} = \mathbf{0,85} \quad [36]$$

$$r_{cap(S,100)} = \frac{P_{th(S)} - P_{(OUT)}}{P_{th(S)}} = \frac{54 - 22 \text{ [MWt]}}{54 \text{ [MWt]}} = \frac{32}{54} = \mathbf{0,59} \quad [37]$$

b) pre karbonáty **fatrika / série Veľkého boku**

$$r_{cap(S,40)} = \frac{P_{th(S)} - P_{(OUT)}}{P_{th(S)}} = \frac{135 - 29 \text{ [MWt]}}{135 \text{ [MWt]}} = \frac{106}{135} = \mathbf{0,79} \quad [38]$$

$$r_{cap(S,100)} = \frac{P_{th(S)} - P_{(OUT)}}{P_{th(S)}} = \frac{54 - 29 \text{ [MWt]}}{54 \text{ [MWt]}} = \frac{25}{54} = \mathbf{0,46} \quad [39].$$

Podľa priloženej klasifikačnej schémy (Tabuľka 5.5) očakávaná produkcia zdrojov geotermálnej energie (Tabuľka 5.6):

- pre krátkodobý horizont produkcie a obe rezervoárové jednotky Zámer nepredstavuje významné riziko z pohľadu energetickej depletácie rezervoárového prostredia; a realizácia geotermálneho strediska na predpokladanej úrovni významným spôsobom nelimituje možnosti budúceho rozvoja produkcie geotermálnej energie

- pre dlhodobý, udržateľný horizont produkcie v rámci rezervoárového prostredia hronika, je z energetického hľadiska aj po realizácii Zámeru indikované veľmi nízke riziko energetickej depletácie rezervoárového prostredia, a zachovaná jeho perspektivita
- pre dlhodobý, udržateľný horizont produkcie v rámci rezervoárového prostredia fatrika / série Veľkého boku, riziko ďalšieho rozvoja produkcie po realizácii Zámeru narastá a perspektívnosť rezervoárového prostredia pre ďalší rozvoj produkcie analogicky klesá (udržateľný, málo perspektívny stav); samotný Zámer je však naďalej možné z pohľadu energetickej bilancie rezervoárového prostredia hodnotiť ako udržateľný.

Tabuľka 5.5. Klasifikačná schéma perspektívnosti rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie v rezervoárovom prostredí. Zdroj: Fričovský et al. (2025).

charakteristika koeficientu zásob geotermálnej energie	definícia potenciálu rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie	charakteristika rizika pre rezervoárové prostredie v prípade ďalšieho rozvoja produkcie geotermálnej energie
$r_{cap(S)} < 0$	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

Tabuľka 5.6. Udržateľnosť rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa Zámeru voči stochastickému modelu energetickej bilancie rezervoárového prostredia

charakteristika koeficientu zásob geotermálnej energie	klasifikácia perspektívnosti	klasifikácia rizika rozvoja produkcie	kritické hranice produkcie zdrojov geotermálnej energie pre $t_{prod} = 40$ rokov (MWt)	kritické hranice produkcie zdrojov geotermálnej energie pre $t_{prod} = 100$ rokov (MWt)
strednotriasové karbonáty hronika				
$r_{cap(S)} < 0$	neperspektívny	stredné až vysoké	$P_{th} > 143$ MWt	$P_{th} > 57$ MWt
$r_{cap(S)} = 0 - 0,49$	málo perspektívny	veľmi nízke až nízke	$P_{th} = 142 - 73$ MWt	$P_{th} = 29 - 58$ MWt
$r_{cap(S)} = 0,5 - 0,74$	perspektívny	veľmi nízke	$P_{th} = 72 - 36$ MWt	$P_{th} = 14 - 28$ MWt
$r_{cap(S)} = 0,75 - 1,0$	veľmi-perspektívny	bez rizika	$P_{th} < 35$ MWt	$P_{th} < 13$ MWt
strednotriasové karbonáty fatrika / série Veľkého boku				
$r_{cap(S)} < 0$	neperspektívny	stredné až vysoké	$P_{th} > 269$ MWt	$P_{th} > 135$ MWt
$r_{cap(S)} = 0 - 0,49$	málo perspektívny	veľmi nízke až nízke	$P_{th} = 136 - 269$ MWt	$P_{th} = 68 - 134$ MWt
$r_{cap(S)} = 0,5 - 0,74$	perspektívny	veľmi nízke	$P_{th} = 135 - 67$ MWt	$P_{th} = 35 - 67$ MWt
$r_{cap(S)} = 0,75 - 1,0$	veľmi-perspektívny	bez rizika	$P_{th} < 67$ MWt	$P_{th} < 34$ MWt

5.1.4 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, 2022). 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 Lovča je zrejmé, že **zvolená produkčná stratégia vyjadrená v Zámere** odberom množstiev geotermálnej energie na úrovni 20 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**.

Uvedené hodnotenie sa vzťahuje na energetickú bilanciu rezervoárového prostredia **za predpokladu jeho charakteru ako energetického kontinua**. Nevzťahuje sa na účinky produkcie zdrojov geotermálnej energie vplyvom reinjektážneho manažmentu, vývoj prienikov frontov rezervoárovej odozvy, ani hydraulický zásah do aktuálneho stavu rezervoárového prostredia. **Zdôrazňujeme, že ďalší indikátor prejavov účinkov rezervoárovej produkcie – obnovovacia a regeneračná kapacita rezervoárového prostredia – hodnotený v aktuálnom posudku nebol.**

5.2 Vyjadrenie k termochemickej odozve rezervoárového prostredia

Z pohľadu objektívneho vyjadrenia k možnej termochemickej odozve rezervoárového prostredia podľa požiadaviek 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) – 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; je nevyhnutné zdôrazniť, že pre modelovanie vývoja chemického zloženia geotermálnych vôd nie sú aktuálne k dispozícii žiadne relevantné údaje z grábenovej časti Žiarskej kotliny. **Objektívne preto nie je možné kvantifikovať zachovanie dobrého kvalitatívneho stavu útvaru geotermálnych vôd, alebo zlepšenie / zhoršenie aktuálneho stavu** v dôsledku realizácie geologických prác definovaných v Zámere, respektíve samotným otvorením produkcie. V tejto súvislosti následne je nevyhnutné zdôrazniť:

- súčasný kvalitatívny stav útvaru geotermálnych vôd Žiarska kotlina vychádza z doteraz overených zdrojov geotermálnej energie a termominerálnych, prírodných liečivých zdrojov na lokalitách Vyhne, Sklené Teplice, Lukavica, Voznica a Kremnica (KORDÍK – FRIČOVSKÁ, 2025)
- predmetné lokality sú súčasťou morfoštruktúrnych okrajov a periférie Žiarskej kotliny, pričom existujú nepriame indikátory skutočnosti, že tieto geotermálne vody sú pravdepodobne významne narietované v rámci ich cirkulačno-akumulačných obehových systémov, pravdepodobne v okolí výverových zón; a zároveň, že samotný proces narietovania môže prebiehať vo viacerých štádiách lokálnych systémov prúdenia, vrátane adiabatického varu v rezervoárovom prostredí
- v takejto pozícii je teda spracovanie kvalitatívneho stavu útvarov geotermálnych vôd založené na sekundárnych zdrojoch, keďže primárne (koncové členy) zdroje geotermálnej energie overené v hlbokjej časti Žiarskej kotliny nie sú nateraz k dispozícii
- táto skutočnosť výrazne ovplyvňuje vnímanie aktuálneho kvalitatívneho stavu útvaru geotermálnych vôd
- hoci je chemizmus zdrojov geotermálnej energie v okolí lokality Lovča nateraz nejasný, vzhľadom na geologické, hydrogeotermické, termodynamické a termické pomery je

zrejme, že zloženie bude výrazne odlišné od výverovej oblasti, a pravdepodobne dynamické, čo však nebude nevyhnutne možné vyhodnotiť ako zmenu dobrého stavu útvaru geotermálnych vôd podľa RSV – s výnimkou preukázateľnej zmeny vplyvom prieniku termochemického frontu s reinjektážnej oblasti.

Koncový, geotermálny člen v hlbokom rezervoárovom prostredí nie je možné v súčasnosti objektívne predpokladať. Predchádzajúce práce (ŠUJAN ET AL., 2020; DZÚRIK ET AL., 2023) uvádzajú nasledovné očakávané parametre:

- chemický typ: zmiešaný
- chemizmus: Ca-Mg-Na-HCO₃-Cl-SO₄ typ s prevahou Ca-Mg zložky
- očakávaná mineralizácia: 5 – 10 g.l⁻¹
- výrazné preplynenie CO₂, možná prímes H₂S
- plynový faktor na úrovni 5 Nm³.m⁻³;

čo považujeme za objektívne možné. Referencie neuvádzajú vyjadrenie k podielu a povahe saturovanej parnej frakcie.

Ak by skutočne malo ísť o zmiešaný typ geotermálnej vody, znamenalo by to z pohľadu vývoja jej chemického zloženia o kontakt aspoň dvoch rozdielnych typov geotermálnych vôd, vrátane ich vzťahu k nadložnému neogénu. V zmysle aspoň čiastočnej analógie s podmienkami na Slovensku by **takýto typ vznikol pri degradácii primárneho rezervoárového média halogénneho alebo (hydro)silikátogénneho pôvodu v kontakte s neogénnymi evaporitovými pozíciami (Na-HCO₃-Cl-SO₄ zložka) mladšími karbonátogénnymi (Ca-Mg-HCO₃ zložka) alebo prechodnými (Ca-Mg-HCO₃-SO₄ a Ca-Mg-SO₄-HCO₃ zložka) až sulfátogénnymi (Ca-SO₄ až Ca-Mg-SO₄ zložka) typmi podzemnej geotermálnej vody.** Zmiešaný typ chemizmu nie je tak citlivý na mieru degradácie, preto očakávaná celková mineralizácia by dávala zmysel.

V prípade, ak by očakávaný chemizmus predstavoval polygenetický typ geotermálnej vody (Na-Cl zložka), situácia by bola výrazne odlišná. Očakávaná mineralizácia na úrovni 5 – 10 g.l⁻¹ by znamenala predovšetkým významnú mieru degradácie pôvodných marínogénnych vôd nariadením mladšími, už vyššie spomínanými typmi podzemných geotermálnych vôd. Táto situácia by následne indikovala, že zdroje geotermálnej energie teraz identifikované na lokalite Sklené Teplice (v prípade ich súvisu s lokalitou Lovča) by podliehali nariadeniu v aspoň dvoch rôznych štádiách, odlišných intenzitou, aj priestorom realizácie.

Bez ohľadu na pôvod zdrojov geotermálnej energie v Žiarskej kotline, je pravdepodobné, že chemizmus geotermálnych vôd je v okolí lokality Lovča výsledkom čiastkovej, alebo úplnej termodynamickej rovnováhy na rozhraní voda – hornina – minerálna fáza, a aktuálnym stavom parciálnych systémov geotermálna voda – CO₂ – geotermálna para. Povaha parnej frakcie zrejme zodpovedá termodynamicky saturovanej, vlhkej pare so zvýšeným až vysokým stupňom viazanosti na vodnú zložku a schopnosťou spontánnej separácie pri tlakovej strate blízkej atmosférickému tlaku. Jej pôvod je pravdepodobne v termochemicky indikovaných konvekčných bunkách, s ktorými je spojený adiabatický var. Je ale pravdepodobné, že samotný únik parnej zložky pri prudkej strate tlaku počas vzostupných konvekčných prúdov nevedie k formovaniu samostatnej parnej fázy (mobilná zložka), ale jej kondenzácii a zahrievaniu nadložného konduktívneho, alebo advektívneho regiónu s vodnou zložkou. Analogická situácia bola identifikovaná v Košickej kotline, respektíve v Ďurkovej depresii (FRIČOVSKÝ ET AL., 2020A, 2025, 2028?; FRIČOVSKÝ – ČERNÁK, 2024; VIZI – FRIČOVSKÝ, 2023).

Dlhodobá produkcia zdrojov geotermálnej energie na stredisku Lovča s určitou vyvolá zmeny v chemickom zložení zdrojov geotermálnej vody / rezervoárového média, ktoré budú vyvolané jednotlivými faktormi, alebo aj ich kombináciou, najpravdepodobnejšie:

- zmiešavaním reinjektátu a pôvodného rezervoárového média v okolí reinjektážneho vrtu
- rekalibráciou rovnovážneho stavu na rozhraní voda – hornina – minerálna fáza ochladzovaním (a potenciálnou kondenzáciou v prípade, ak bude reinjektážny vrt zasahovať konvektívne bunky spojené s adiabatickým varom)
- postupom termického a termochemického frontu rezervoárovej odozvy do okolia, vrátane produkčného vrtu, spojeného s postupnou zmenou rezervoárovej teploty (účinky zodpovedajúce namiešavaniu a rekalibrácii advektívnym ochladzovaním, precipitáciou a zmenou reakčných časov a vektoru chemických reakcií na rozhraní voda - hornina)
- zmenami tlakového režimu v rezervoári – hydraulickými impulzmi znižujúcimi mieru adiabatického varu v konvekčných bunkách (zmena saturačných stavov karbonátového a silikátového systému); respektíve premenou termodynamického stavu parnej frakcie pri poklese tlakových podmienok (napríklad znížená účinnosť reinjektáže)
- zmenou podielu parnej frakcie a rekalibráciou termodynamickej rovnováhy na rozhraní voda – hornina – minerálna fáza

- zmenou systému voda – CO₂ – para aktiváciou a reaktiváciou viacerých prítokových profilov (typické pre očakávané systémy prúdenia laterálneho / vertikálneho prestupu a bazénovej segmentácie).

Je nevyhnutné zdôrazniť, že uvedené zmeny sú typické pre dlhodobú produkciu zdrojov geotermálnej energie spojenú s analogickými podmienkami nízko- až stredno-entplických zdrojov geotermálnej energie s prítomnosťou viazanej parnej frakcie v karbonátoch (KAYA ET AL., 2011; DIAZ ET AL., 2016; KAMILA ET AL., 2021). V tomto štádiu nie je možné objektívne hodnotiť zvratnosť týchto procesov, ktorá bude kontrolovaná najmä (ale nie len; AXELSSON – KRISTMANSDÓTTIR, 2009; KRISTMANSDÓTTIR, 2009; O’SULLIVAN ET AL., 2010):

- reinjektovanými množstvami a chemickým zložením reinjektátu (vplyv advektívneho ochladzovania a nariedovania) a pomerom medzi dopĺňaním tranzitno-akumulačnej a akumuláciej oblasti v efektívnych profiloch prúdenia voči reinjektovaným množstvám
- dobou produkcie (doba pôsobenia reinjektáže na rezervoárové prostredie)
- dosahom a časom prieniku termického a termochemického, respektíve hydraulického frontu (doba trvania zmien v rezervoárovom prostredí)
- termickou regeneračnou kapacitou rezervoárového prostredia (prechod do podmienok prvého pseudo-ustáleného p-T a chemického režimu v rezervoárovom prostredí a rezervoárovom médiu) počas a po ukončení produkcie
- reakciami rezervoárového manažmentu na indikácie dosahov a vplyvu prieniku frontov rezervoárovej odozvy a zvolenými produkčnými stratégiami

Keďže existuje dôvodný predpoklad vyššej celkovej mineralizácie zdrojov geotermálnej energie viazaných na rezervoárové prostredie v okolí lokality Lovča, ktorých chemizmus je predmetom neistoty, a zároveň nie je možné vylúčiť zvýšené koncentrácie kovov, považujeme Zámer, ktorý počíta s reinjektážnym manažmentom ako aktívnou zložkou zabezpečovania tlakovej stability rezervoárového prostredia a zneškodňovania produkovaných zdrojov geotermálnej energie za vhodný. **Z tohto pohľadu Zámer dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie na geotermálnom stredisku Lovča 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).**

6 POSÚDENIE PRODUKČNEJ SCHÉMY VO VZŤAHU K ZÁSADĚ DNSH

Predkladaný hydrogeologický posudok je vypracovávaný pre 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 na výrobu tepla v stredisku Lovča.*“, a v súlade s Podmienkami pre zabezpečenie súladu projektu so zásadou nespôsobovať významnú škodu – DNSH 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 zosúladi Zámery 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 4 a Kapitole 5 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 vlhkom parnou fázou.

V kapitole 6 je preto pozornosť zameraná na **posúdenie súladu produkčnej schémy uzavretého (closed-loop) dubletového systému v schéme produkčný : reinjektážny vrt P:I = 1:1 so zásadami DNSH** tak, ako sú špecifikované v Nariadení, s pozornosťou venovanou predovšetkým **funkčnému prínosu realizácie dubletu** a jeho dôvodnosti na geotermálnom stredisku Lovča k plánovanému dlhodobému zásobovaniu teplom z využívania zdrojov geotermálnej energie, všeobecne považovaných za „obnoviteľné zdroje energie“.

6.1 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.

Zdroje geotermálnej energie v útvare geotermálnych vôd SK300190FK Žiarska kotlina (MARCIN ET AL., 2016, 2020) sú viazané na rezervoárové prostredie strednotriasových karbonátov fatrika / série Veľkého boku, respektíve strednotriasových karbonátov hronika; s ich otáznou geologickou stavbou v okolí strediska Lovča. Kritickým faktorom je ich doteraz nejasná hydraulická, respektíve termická komunikácia s PLZ v Sklených Tepliciach. Identifikovanú neistotu je však možné odstrániť jedine realizáciou hlbokého vrtu / hlbokých vrtov a ich výskumu v grábenovej časti kotliny. Napriek nedostatku vstupných informácií, je podľa princípov analógie možné všeobecne charakterizovať očakávané zdroje geotermálnej energie v okolí strediska Lovča, viazané na morfoštruktúru žiarskeho bloku (žiarska hydrogeotermálna štruktúra sensu REMŠÍK ET AL., 2000; FRANKO ET AL., 2003) nasledovne:

- rezervoárové prostredie: polo-otvorené až otvorené (uzatvorenosť primárneho rezervoárového prostredia nie je nateraz možné úplne vylúčiť)
 - zdroj geotermálnej energie: nízko- až stredno-entalpické zdroje geotermálnej energie, s mobilnou fázou – geotermálnou vodou, a vlhkou, termodynamicky viazanou saturovanou parnou frakciou s vysokým stupňom viazanosti a potenciálom spontánnej separácie v podmienkach kvázi-atmosférického tlaku
 - odhadovaná celková mineralizácia: aspoň 10 g.l⁻¹ (ŠUJAN ET AL., 2020; tento Posudok)
- obsah ekotoxických prvkov viazaných na vulkanické a vulkanosedimentárne prostredie: možný.

Forma a charakteristika produkcie zdrojov geotermálnej energie podľa Zámeru:

- produkčná schéma: dublet, P:I = 1:1
- očakávaný tepelno-energetický výkon dubletu: $P_{(TH)} = 20 \text{ MWt}$
- cieľ zásobovania teplom: tepelné využitie v priemysle (energeticky náročné využitie)
- odhad ročnej produkcie: 4 500 h
- charakter produkcie: sezónne cyklická.

6.1.1 Prínos k zmierneniu zmien klímy

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 definovaná Zámerom, postavená na reinjektážnom systéme jediným možným spôsobom produkcie zdrojov geotermálnej energie.** Nakoľko je produktom Zámeru rozvoj dodávok tepla z obnoviteľných zdrojov energie **pre priemyselné využitie** (aktuálne založené na využívaní zemného plynu pri dodávkach tepla) **s vysokou energetickou náročnosťou, je substitúcia konvenčných zdrojov možná len pri náhrade so schopnosťou pokrytia špičkových alebo základných výkonov, ktorú predstavujú zdroje geotermálnej energie.**

MODEL ODHADU REDUKOVANÉHO CO₂

Pre orientačné kvantifikovanie prínosu k zmierneniu klímy vychádzame z jednoduchého substitučného modelu úspory CO₂ – CO_{2(s)} založeného na Monte Carlo simuláciách skutočného energetického výkonu zdroja geotermálnej energie, ktorý nahrádza aktuálne existujúce zásobovanie zemným plynom [40]. Vstupné parametre do modelového riešenia udáva Tabuľka 6.1. Model je možné charakterizovať nasledovne:

- produkcia geotermálneho zdroja $P_{(TH)}$: $20 \text{ MWt} \pm 25 \%$ (variant RO1 pre túto úroveň predpokladá produkciu $Q_{(PROD)} = 37 - 57 \text{ kg.s}^{-1}$, variant RO2 $Q_{(PROD)} = 31 - 48 \text{ kg.s}^{-1}$; pri teplotnom spáde na $T_{(INJ)} = 40 - 60 \text{ °C}$; čo považujeme na jeden vrt za veľmi optimistickú produktivitu)

- odhad ročnej produkcie zdroja $t_{(WORK)}$: 4 200 – 8 760 MWt v závislosti na prevádzkovom režime a energetickej záťaži
- účinnosť kotla na fosílnej strane $\eta_{(GAS)}$: 90 – 98 %
- emisný faktor zemného plynu $EF_{(CO_2)}$: 202 - 277 % kg CO₂.MWh⁻¹:

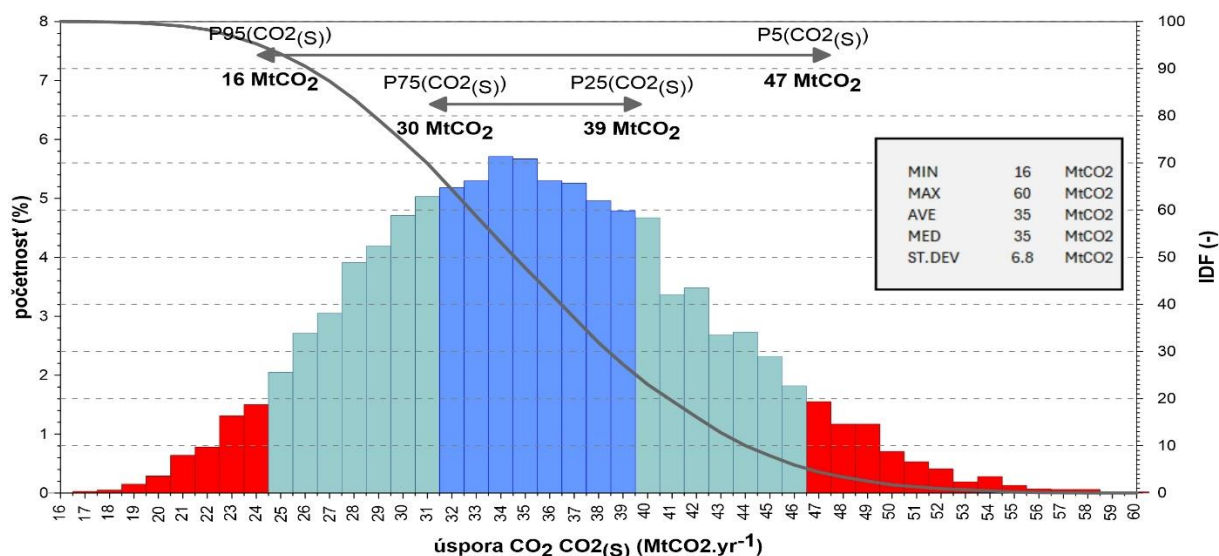
$$CO_{2(s)} = \frac{P_{(TH)} \times t_{(WORK)}}{\eta_{(GAS)}} \times EF_{(CO_2)} \quad [40]$$

Orientačný model (Obrázok 6.1) hrubej úspory CO₂ substitúciou fosílného zdroja za produkované zdroje geotermálnej energie udáva odhady $CO_{2(s)} = 27 - 45$ Mt CO₂ ročne, respektíve $Md(CO_{2(s)}) = 35 \pm 7$ Mt CO₂ za rok, čo za predpokladu plánovanej, 30-ročnej produkcie predstavuje približne $Md(CO_{2(s)}) = 1,1 \pm 0,21$ Gt CO₂ hrubo ušetreného CO₂, respektíve $Md(CO_{2(s)}) = 3,5 \pm 0,69$ Gt CO₂ po dobu produkcie 100 rokov.

Zdôrazňujeme, že v tomto prípade ide o takzvanú hrubú úsporu, ktorá sa vzťahuje len na nahradenie fosílného zdroja obnoviteľným, čo považujeme pre potreby hodnotenia za dostačujúce. Skutočná úspora CO₂ je následne výsledkom redukcie hrubej úspory o vlastnú produkciu zdroja geotermálnej energie – CO₂ spotrebované pre produkčné alebo reinjektážne čerpadlá, produkciu výmenníkovej stanice, náklady CO₂ spojené s realizovaním vŕtania, CO₂ generované počas produkcie a uvoľňované do atmosféry, a ďalšie náklady spojené s LCA technického vybavenia a povrchovej infraštruktúry (MAJOROWICZ – MOORE, 2014; TOMASINI-MONTENEGRO ET AL., 2017; MCKAY ET AL., 2019).

Tabuľka 6.1: Vstupné údaje a výsledky pre model odhadu redukovaného CO₂ v podmienkach indikovaných Zámerom

litostratigrafický komplex	$P_{(TH)}$ MWt	$t_{(WORK)}$ h	$\eta_{(GAS)}$ -	$EF_{(CO_2)}$ CO ₂ .MWh ⁻¹	$CO_{2(s)}$ Mt CO ₂ .yr ⁻¹
minimum	15	4 200	90	202	16
maximum	25	8 760	98	277	60
priemer	-	-	93	-	35
medián	-	-	-	-	35
št.odchýlka	20	4 500	-	-	7
P95	-	-	-	-	25
P90	-	-	-	-	27
P75	-	-	-	-	30
P50	-	-	-	-	35
P25	-	-	-	-	40
P10	-	-	-	-	45
P5	-	-	-	-	48



Obrázok 6.1: Model odhadu hrubej úspory CO₂ pre geotermálne stredisko Lovča a produkciu geotermálnej energie

VYJADRENIE K PRÍNOSU K ZMIERNENIU ZMIEN KLÍMY

Okrem možných dopadov na rezervoárové prostredie a rezervoárové médium, ktoré sú charakterizované v Kapitole 4 a Kapitole 5, z dlhodobého hľadiska realizácia dubletu na stredisku Lovča v jeho konfigurácii definovanej Zámerom, a to aj pri možných, krátkodobých negatívnych prejavov súvisiacich s otváraním a testovaním 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.**

6.1.2 Adaptácia na zmeny klímy

Podľa predloženého Zámeru je plánovaný inštalovaný výkon geotermálneho strediska Lovča 20 MWt, s plánovanou ročnou produkciou $t_{(WORK)} = 4\,500$ h. Rovnako, ako celé územie Slovenskej republiky, aj región Žiaru nad Hronom, s významnou priemyselnou aktivitou a potrebami vykurovania, respektíve chladenia, podlieha akútnym, alebo chronickým zmenám klímy v zmysle Oddielu II dodatku A Nariadenia. Prevádzka geotermálneho strediska s produkciou zdrojov geotermálnej energie s nízkou až strednou špecifickou entalpiou, a zámer primárneho využívania zdrojov geotermálnej energie na energeticky náročné účely, je vhodným adaptačným riešením voči zmene klímy nielen redukciou využívania vysokoemisných fosílnych zdrojov za nízkoemisné OZE.

Ak berieme do úvahy modelované distribúcie teploty v oboch variantoch RO1 a RO2 špecifikované v Kapitole 4 (Tabuľka 4.4) a očakávanú variabilitu hranice reinjektáže $T_{(INJ)} = 40 - 60$ °C, potom z termodynamického hľadiska je pre ústie vrtu možné očakávať rozpätie špecifickej exergie $e_{(WH)} = 61 - 217$ kJ.kg⁻¹; čo pri porovnaní s Tabuľkou 6.2 (KJARAN – ELIASSON, 2008; VALDIMARSSON, 2009; WATSON, 2013; DINCER – ROSEN, 2013; DI FRAIA ET AL., 2019; DINCER – OZTURK, 2021) vytvára predpoklady pre **primárne** (samostatne, alebo na prvom stupni kaskádového systému) využívanie očakávaných zdrojov geotermálnej energie najmä pre účely (termodynamické hodnotenie nie je súčasťou tohto Posudku, avšak vie byť doplnené na vyžiadanie pre účely ďalšieho posudzovania Zámeru a ako súčasť žiadosti o NFP):

- binárne a autonómne-binárne kogeneračné jednotky
- 3- a viacstupňové kaskádové systémy
- systémy centralizovaného zásobovania teplom, alebo ako súčasť kaskádových systémov
- priemysel, a tepelná podpora priemyslu
- sekundárne poľnohospodárstvo;

vrátane ďalších spôsobov využívania zdrojov geotermálnej energie s nízkou energetickou náročnosťou. **Vzhľadom na definície Zámeru, účel využívania zdrojov geotermálnej energie zodpovedá termodynamickému potenciálu zdrojov.**

Keďže potenciálne využívanie zdrojov geotermálnej energie na lokalite Lovča môže priniesť v kaskádovom riešení viacero spôsobov úspory emisií CO₂, GHGs a AHSs, vytvára vhodné podmienky pre podporu adaptácie a adaptačných riešení na zmeny klímy; keďže s využitím reinjektáže, a pri vhodnom rezervoárovom manažmente, vzniká energeticky autonómny zdroj s nízkymi emisiami. 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.**

6.1.3 Udržateľné využívanie a ochrana vodných a morských zdrojov

Pre vyššie špecifikované zdroje geotermálnej energie očakávané na lokalite Lovča (nízko- až stredno- entalpické; mobilná fáza: geotermálna voda; parná frakcia: saturovaná, vlhká, s vysokým stupňom viazanosti; spontánna separácia pary pri kvázi-atmosférickom tlaku) **a očakávané rezervoárové prostredie** (polo-otvorené, cirkulačno-akumulačné až akumulčné systémy, prevažne-konduktívne s potenciálom izolovaných konvekčných buniek spojených

s adiabatickým varom bez vývoja regiónu separovanej pary; konduktívne, respektíve prevažne-konduktívny transport tepla) **je v zmysle globálnej praxe udržateľného rezervoárového manažmentu nevyhnutné zabezpečiť hydraulicky a termicky účinnú reinjektáž** (KJARAN – ELIASSEN, 2008; GRANT – BIXLEY, 2011; AXELSSON, 2012; DINCER – OZTURK, 2023), primárne konfigurovanú ako priamu, blízku, plnú a studenú (KAYA ET AL. 2011; DIAZ ET AL. 2016; KAMILA ET AL. 2021). **Porovnaním parametrov reinjektáže v Tabuľke 4.3 s uvedenými princípmi je zrejmá zhoda Zámeru s dobrou aplikačnou praxou**, s výnimkou horizontálnej pozície reinjektážneho vrtu (GTŽ-2) voči očakávanej efektívnej oblasti produkčného vrtu (GTŽ-1) pri vzdialenosti $D = 1\,500$ m pre pozíciu ťažobnej kolóny. Napriek zrejmej nezhode, predbežné modely rezervoárovej odozvy poukazujú na očakávané prieniky RO frontov aj na túto vzdialenosť s rozdielnou pravdepodobnosťou v závislosti na charaktere (viď 4.3). Z tohto hľadiska považujeme túto vzdialenosť za opodstatnenú, aj pri jej špecifikovaných rizikách.

Základnými funkciami reinjektáže v rezervoárovom manažmente pre analogické geologické, geotermické, hydraulické a hydrogeotermické podmienky sú (AXELSSON, 2008, 2012; GRANT – BIXLEY, 2011; DIAZ ET AL., 2016; ZARROUK – MCLEAN, 2019):

- 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 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 4 a Kapitoly 5. Analytické modely (Kapitola 4) v tejto fáze poznania geologických, štruktúrno-tektonických, hydrogeotermických a geotermických podmienok nepreukázali bezprostredné ohrozenie prírodných liečivých zdrojov v Sklených Tepliciach, ktorých hydraulický a termický vzťah k rezervoárovému prostrediu v okolí Lovče je nateraz predmetom neistoty. Neriešenou otázkou ostáva vplyv samotnej produkcie zdrojov geotermálnej energie na stredisku Lovča na produktivitu PLZ. Tieto vzťahy nie je možné ani odhadovať bez realizácie samotného hlbokého vrtu. V Kapitole 3 zreteľne zdôrazňujeme, že komunikáciu nie je možné vylúčiť, ale zároveň ovplyvňovanie nemusí nastať – dôvodom, okrem iného, môže byť práve charakter cirkulačno-akumulačných hydrogeotermálnych štruktúr a ich (sub)systémov prúdenia (systémy laterálnej a vertikálnej evázie, bazénovej segmentácie a elevovaného podlažia), podobne, ako zrejmy tektonický kontakt periférie (sklenoteplický ostrov) s grábenovou časťou kotliny, ktorého hydraulická funkcia je nejasná, vytvárajú vhodné podmienky pre vetvenie efektívnych filtračných profilov a ich vzájomnú izoláciu.

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 Konceptie trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu (TURP) respektíve Konceptie trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie (TURM).**

6.1.4 Prechod na obehové hospodárstvo

Neuplatňuje sa.

6.1.5 Prevencia a kontrola znečisťovania

Na základe predkladaného Zámeru, a podľa predchádzajúcich častí Posudku, realizácia predmetného dubletu a otvorenie prevádzky (produkcie a reinjektáže) na geotermálnom

stredisku Lovča, pri udržiateľnom, obnoviteľnom, a termodynamicky účinnom využívaní zdrojov geotermálnej energie výrazne prispeje k redukcii podielu využívaných fosílnych palív v regióne, čo v priamom dôsledku vytvára značný predpoklad redukcie znečisťovania ovzdušia pri zásobovaní obyvateľstva, priemyslu, poľnohospodárstva, alebo služieb teplom.

Zároveň, ak dôjde k dodržiavaniu platnej legislatívnej úpravy, potom znečistenia abiotických zložiek životného prostredia budú súvisieť s:

- prípravou pracoviska
- realizáciou produkčného vrtu GTŽ-1
- realizáciou produkčného vrtu GTŽ-2

pričom v tejto fáze realizácie ide o **potenciálne** riziká kontaminácie, alebo vplyvu na:

- ovzdušie (počas realizácie vrtania, zvýšením hustoty dopravy)
- vodnú zložku (predovšetkým povrchové a plytké podzemné vody, vody pôdneho horizontu, najmä v súvislosti s možným prienikom výplachu)
- pôdnu vrstvu (zóna dosahu závislá na parametroch pôdneho substrátu)
- vizuálne vplyvy (predovšetkým počas vrtania; vrtná infraštruktúra, logistika)
- hlučnosť (predovšetkým počas vrtania; proces vrtania, logistika)
- mikroseizmicita (vrtné práce, prípadná stimulácia rezervoárového prostredia)

Uvedené potenciálne riziká sú ale zároveň bodové a dočasné (napr. CHEN ET AL., 2020; GKOUSIS ET AL., 2022; ZACHORA-BULAWSKA ET AL., 2024). **Zároveň zdôrazňujeme, že dodržiavanie technológií opísaných v Zámere, štandardnej praxe realizácie hlbokých vrtov, a dôsledné dodržiavanie pracovných postupov výrazne obmedzuje environmentálne riziká realizácie vrtných prác a ich dopadov na zložky životného prostredia.** Uvedená lokalita, ani jej širšie okolie, sa nenachádza v území so špecifickým záujmom ochrany podľa Zákona NR SR č. 543/2002 Z.z. o ochrane prírody a krajiny, nie je súčasťou európskej sústavy chránených území NATURA2000, nie je súčasťou zoznamu tzv. Ramsarských lokalít, a nie je súčasťou chránenej vodohospodárskej oblasti. Vzdialenosť k OP II. stupňa PLZ v Sklených Tepliciach predstavuje približne 1 km. **Technická špecifikácia vystrojenia vrtov podľa Zámeru je zároveň navrhnutá vhodne na ochranu prípadných horizontov plytkých, alebo intermediárnych horizontov obyčajných, epitermálnych, alebo geotermálnych podzemných vôd.** Reálne posúdenie realizácie vrtov v zmysle Zámeru bude následne možné posúdiť na základe dokumentačných denníkov.

Pri hodnotení prevencie a kontroly znečisťovania je zároveň nevyhnutné zdôrazniť výhody využívania zdrojov geotermálnej energie, rovnako, ako environmentálne výhody využívania reinjektážnych sústav, ktoré sú viditeľné predovšetkým v strednodobom a dlhodobom horizonte: ochrana povrchových recipientov, ochrana pôdných horizontov, znižovanie emisií GHG a AHG, minimalizácia vplyvu interakcie zdrojov geotermálnej energie s biologicky aktívnym povrchom pôdy a povrchovými recipientmi, redukcia vizuálneho znečistenia a smogu v porovnaní s inými OZE (BROPHY, 1997; KRISTMANSDÓTTIR – ÁRMANNSSON, 2003; BAYER ET AL., 2013; SHORTALL ET AL., 2015; MANZELLA ET AL., 2018).

Za predpokladu, že počas realizácie vrtných prác, a správneho rezervoárového manažmentu, pri minimalizácii rizík produkcie a reinjektáže na rezervoárové prostredie, jeho okolie, a zdroje geotermálnej energie, predstavuje navrhovaná schéma produkčnej sústavy aktívny faktor dlhodobej ochrany a prevencie znečisťovania alebo degradácie abiotických zložiek životného prostredia. Z vyššie uvedeného následne vyplýva, že **produkčná schéma a jej prevádzka spĺňa podmienku významne nenarušiť – DNSH z pohľadu vytvorenia možností prevencie a kontroly znečisťovania.**

6.1.6 Ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémov

Podľa preštudovaného Zámeru je možné konštatovať nasledovné z pohľadu ochrany a obnovy biodiverzity, respektíve vplyvu produkcie zdrojov geotermálnej energie s využitím dubletovej sústavy na biodiverzitu:

- technické riešenie projektu nevytvára predpoklady významného zásahu do biodiverzity, alebo jej degradácie
- dodržiavanie legislatívnych a praktických zásad počas realizácie vrtov môže vo výraznej miere prispieť k mitigácii dopadov na lokálnu biodiverzitu.

Priame kvantitatívne štúdie vplyvu geotermálnej energetiky na biodiverzitu sú v porovnaní s inými environmentálnymi aspektmi stále pomerne početne obmedzené, avšak dostupná literatúra (napr. BROPHY, 1997; BAYER ET AL., 2013; GASPARATOS ET AL., 2017; CHEN ET AL., 2020; DHAR ET AL., 2020; COATES ET AL., 2023; PROCHAZKA ET AL., 2023) identifikuje viaceré mechanizmy potenciálneho vplyvu realizácie vrtných prác a prevádzky geotermálnych zariadení na biodiverzitu (Tabuľka 6.2), ktorých dĺžka vplyvu, dopad vplyvu, alebo trvanie vplyvu závisí na konkrétnych lokalitách a konkrétnej citlivosti okolitého prostredia na zmeny.

Tabuľka 6.2: Riziká a mitigácie vplyvov inštalácie a produkcie zdrojov geotermálnej energie na biodiverzitu; lokalita Lovča

zdroj vplyvu	potenciálny dopad	mitigačné opatrenia	stredisko Lovča, podľa Zámeru
príprava pracoviska a infraštruktúry	odstránenie vegetácie, pôdny ekosystém	minimalizácia záberu územia	krátkodobý, rekultivácia
doprava a logistika	fragmentácia habitatov, migračné trasy	logistika zásobovania, optimalizácia, existujúce komunikácie	krátkodobý
vrtné práce	odstránenie vegetácie, hlučnosť, svetelný smog	efektivita vŕtania	krátkodobý, R + P = 1 + 1
technologické objekty	migračné trasy, fragmentácia habitatov	minimalizácia záberu, etapizácia výstavby, rekultivácia okolia	trvalý, výmenníkové stanice, záhlavia
produktovody	migračné trasy, fragmentácia habitatov, pôda	minimalizácia záberu, rekultivácia okolia, kompenzácia	produktovody v pracovnom okruhu
prevádzka zariadení	vegetácia, migračné trasy, svetelnosť	prevádzkový režim, rezervoárový manažment, technológie	bez zvýšenia svetelnosti
úniky geotermálnej vody	akvatické systémy, kontaminácia (T, c(x))	monitoring prevádzky, údržba, reinjektáž, backup vrty	neaplikuje sa, reinjektáž
spotreba povrchovej vody	pôdne systémy a akvatické s. pôdnej vody	minimalizácia množstiev, reinjektáž, rezervoárový manažment	neaplikuje sa, reinjektáž

Pri splnení legislatívnych, praktických a technických štandardov, z ktorých značná časť je opisovaná v Zámere, nie je dôvod predpokladať, že by došlo k narušeniu biodiverzity v okolí geotermálneho strediska nad rámec „štandardov“, ktoré sú prakticky nevyhnutné pri realizácii geotermálnych projektov, ale ktoré sú vzhľadom na dopady na biotickú zložku a biodiverzitu, prítomné pri výstavbe akýchkoľvek OZE zariadení. Rovnako, ako v prípade všeobecných zložiek životného prostredia (viď 6.1.5), pre štandardné vplyvy (Tabuľka 6.2) platí (KRISTMANSDÓTTIR – ÁRMANNSSON, 2003; COATES ET AL., 2023; PROCHAZKA ET AL., 2023; ZACHORA-BULAWSKA ET AL., 2024):

- väčšina vplyvov je viazaná na realizáciu prípravných a vrtných prác
- vplyvy počas vrtných prác sú dočasné
- Zámer je plánovaný pre priame využitie geotermálnej energie, čo znamená, že vplyvy vyplývajúce z hlučnosti (separačné stanice, tlmiace stanice, ejekčné a evakuačné stanice) alebo svietivosti (komplex elektrárne) nie je možné predpokladať
- minimalizácia pôdneho záberu na nevyhnutné zariadenia výmenníkovej stanice / výmenníkových staníc umožňujú rekultiváciu, alebo realizáciu kompenzačných opatrení na obnovu lokálnej biodiverzity; a zároveň
- **lokalita nemá žiadnu spojitosť s územiaми, ktoré by boli predmetom spoločenskej, alebo legislatívnej ochrany; a zároveň**
- **lokalita je na kraji obytnej zóny a v tesnej blízkosti už existujúcich budov a pozemkov poľnohospodárskeho využitia; čo vo významnej miere znižuje absolútne efekty budúcej výstavby a produkcie strediska na biotickú zložku.**

Z dlhodobého hľadiska je možné predpokladať, že aj potenciálne negatívne dopady, spôsobené najmä prípravou a realizáciou projektu, budú kompenzované jeho ekonomickým, environmentálnym, a rovnako spoločenským prínosom. Revitalizácia, alebo kompenzácia okolia je možná.

Z vyššie uvedeného následne vyplýva, že **produkčná schéma a jej prevádzka spĺňa podmienku významne nenarušiť – DNSH z pohľadu vytvorenia možností prevencie a kontroly znečisťovania.**

6.2 Hodnotenie produkčnej schémy geotermálneho strediska z pohľadu DNSH

Výsledky preskúmania realizácie podľa zásad DNSH sú zhrnuté v Tabuľke 6.3 na základe predošlých hodnotení, a nadväzujú na výsledky prezentované v Kapitole 4 respektíve Kapitole 5. Podľa posúdenia lokality, a jej prevádzky, usudzujeme:

- realizácia Zámeru predstavuje výrazný prvok ochrany biotických a abiotických zložiek životného prostredia v strednodobom a dlhodobom horizonte
- realizácia Zámeru predstavuje prostriedok pre zvyšovanie adaptability spoločnosti na klimatické zmeny a lokálny faktor zmierňovania dopadov klimatických zmien, respektíve ich mitigácie do budúcnosti
- znížením environmentálneho dopadu existujúcich systémov zásobovania teplom, realizácia Zámeru má potenciál prispieť k ochrane ovzdušia a zdravia obyvateľstva
- realizácia Zámeru prispieva k zvyšovaniu energetickej bezpečnosti, a samostatnosti

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

Technické kritériá preskúmania	Vzťah ku zásade DNSH	Významnosť prínosu podľa taxonómie
Prínos k zmierneniu zmeny klímy	spĺňa podmienky DNSH	jediné technické riešenie produkcie geotermálnej energie pre nízkoemisné systémy výroby tepla a technická podpora výroby energie z OZE hodnotenie: významný prínos
Adaptácia na zmeny klímy	spĺňa podmienky DNSH	zdroje geotermálnej energie sú aplikovateľné v širokej škále priemyselného, alebo centralizovaného zásobovania teplom, čím zvyšujú dosah pozitívnych zmien pri redukcii vplyvov ľudskej aktivity a potrieb na zmenu klímy (viď 6.1.2) hodnotenie: významný prínos
Udržiateľné 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 (bez indikovania dosahu frontov RO) 3) udržiavanie kvalitatívne a kvantitatívne dobrého stavu útvaru geotermálnych vôd Žiarska kotlina a útvarov povrchových a podzemných vôd hodnotenie: významný prínos
Prechod na obehové hospodárstvo	neaplikuje sa	neaplikuje sa
Prevenencia a kontrola znečisťovania	spĺňa podmienky DNSH	1) technické riešenia prevencie chemického znečistenia povrchových alebo podzemných vôd 2) znížovanie emisnej záťaže ovzdušia prechodom na nízkoemisnú produkciu tepla hodnotenie: významný prínos
Ochrana a obnova biodiverzity a ekosystémov	spĺňa podmienky DNSH	1) znížovanie rizík ohrozenia biodiverzity v prípade využívania fosílnych zdrojov 2) nižšia spotreba územia v porovnaní s ostatnými OZE pri analogickom výkone; možnosť čiastočnej rekultivácie 3) nie je v prítomnosti chránenej oblasti, okraj zastavaného územia hodnotenie: bez prínosu

7 NEZÁVÄZNÉ ODPORÚČANIA PRE REZERVOÁROVÝ MANAŽMENT GEOTERMÁLNEHO STREDISKA LOVČA

Súčasnú situáciu na lokalite Lovča charakterizuje predovšetkým nedostatok údajov, čo súvisí so skutočnosťou, že v hlbokjej časti Žiarskej kotliny neexistuje doteraz realizovaný hlboký geotermálny vrt. Naopak, dostupné údaje sú jedine zo zachytených prameňov a plytkých hydrogeologických a balneologických vrtov na periférii kotliny. Napriek tomu, predkladané nezáväzné odporúčania z pohľadu rezervoárového manažmentu vychádzajú z očakávaných podmienok:

- rezervoárové prostredie: polo-otvorené až otvorené (uzatvorenosť primárneho rezervoárového prostredia nie je nateraz možné úplne vylúčiť)
- očakávané systémy prúdenia: laterálna / vertikálna evázia, bazénová segmentácia, elevované podložie
- zdroj geotermálnej energie: nízko- až stredno-entalpické zdroje geotermálnej energie, s mobilnou fázou – geotermálnou vodou, a vlhkom, termodynamicky viazanou saturovanou parnou frakciou s vysokým stupňom viazanosti a potenciálom spontánnej separácie v podmienkach kvázi-atmosférického tlaku
- konvekčné bunky, zrejme stabilnej 3D geometrie (KIMURA ET AL., 1986; SEZAI, 2005) spojené s adiabatickým varom, zrejme v okolí tektonických línií alebo ich zón štruktúrnych porúch a s vývojom regiónu prehrievanej vodnej zložky (RAMESH – TORRANCE, 1990; SAHLI ET AL., 2009), bez tvorby separovanej parnej frakcie (okamžitá kondenzácia)
- odhadovaná celková mineralizácia: aspoň 10 g.l⁻¹ (ŠUJAN ET AL., 2020; tento Posudok)
- obsah ekotoxických prvkov viazaných na vulkanické a vulkanosedimentárne prostredie: možný (na základe čiastočnej analógie s Košickou kotlinou)
- prevládajúci spôsob transportu tepla: kondukcia (FRIČOVSKÝ ET AL., 2025, 2028?)
- typ priepustnosti: puklinová až krasovo-puklinová, hlavné vektory prúdenia zrejme spojené so zlomovými systémami a ich zónami štruktúrneho porušenia.

Podľa všeobecne prijímaných zásad udržiavateľného rezervoárového manažmentu je jeho základnou úlohou (STEFANSSON ET AL., 1995; AXELSSON, 2003; JOLIE ET AL., 2021):

- minimalizovať operačné výdavky na produkciu daného rezervoáru (vrátane budúcej potreby vrtných prác)
- maximalizovať produkciu geotermálnej energie podľa limitov udržateľnosti a obnoviteľnosti rezervoárového prostredia
- minimalizovať riziká a dopady rezervoárovej odozvy na rezervoárové prostredie, zdroj geotermálnej energie, povrchovú infraštruktúru a povrchový projekt zavedením manažmentom rizík vyplývajúcich z vyhodnocovania kontinuálneho monitoringu
- minimalizovať environmentálne dopady produkcie na rezervoárové prostredie
- manažment povrchovej infraštruktúry (korózia, inkrustácia)
- prispôsobenie produkcie zdrojov geotermálnej energie globálnym koncepciám a národnej legislatíve

7.1 Stopovacie skúšky

7.1.1 Opodstatnenie stopovacích skúšok

Stopovacie skúšky nie sú štandardnou súčasťou výskumu a prieskumu rezervoárových prostredí na Slovensku, napriek ich opakovane potvrdenej úlohe pri modelovaní: konektivity; pozície a rozšírenia / prepojenia efektívnych filtračných profilov; odhadovaní objemu puklín v rezervoárovom prostredí; stanovení plochy tepelného prestupu na puklinách; kalibrácii postupu frontov rezervoárovej odozvy; stanovení hydraulických parametrov; a stanovení filtračných parametrov rezervoárového média; plánovaní pozície záložných a podporných / monitorovacích vrtov na geotermálnom poli; testovaní účinnosti reinjektáže (NOTTEBOHM ET AL., 2012; REIMUS ET AL., 2020; AXELSSON, 2022; EROL ET AL., 2022; REN ET AL., 2023).

V situácii, kedy kritickými neistotami súčasného stavu poznania sú (REMŠÍK ET AL., 2000; FRANKO ET AL., 2003, 2006; MAŤO – ŠUJAN, 2014; ŠUJAN ET AL., 2020; DZÚRIK ET AL., 2023, FRIČOVSKÝ ET AL., 2025; tento Posudok):

- permeabilita a hydraulická konektivita v rezervoárovom prostredí okolia dubletu
- hydraulické parametre a aktivita cirkulačných, filtračných kanálov
- konektivita / vzťahy medzi lokalitou Lovča a kúpeľmi Sklené Teplice

- dominantné cirkulačno-akumulačné systémy prúdenia
- vplyv zlomových systémov a zón štruktúrneho porušenia ich okolia (puklinové hniezda) na transport energie a hmoty v rezervoári
- prítomnosť adiabatického varu a regiónov produktov adiabatického varu v rezervoárovom prostredí (významný faktor ovplyvňujúci nielen chemizmus zdrojov geotermálnej energie, ale aj stabilitu ich chemicko-technologických parametrov, ktoré ovplyvňujú voľbu inhibítorov)

predstavujú stopovacie skúšky ekonomicky nákladnejšie, avšak frekvenčne málo náročný spôsob, ako tieto neistoty znížiť, respektíve v niektorých prípadoch prakticky odstrániť, a výrazne prispieť ku kalibrácii modelov rezervoárovej odozvy, na základe ktorých sa odvíja manažment rizík dlhodobej produkcie zdrojov geotermálnej energie (AXELSSON – KRISTMANSDÓTTIR, 2009; JACOBO – MONTALVO, 201; MONTERROSA – AXELSSON, 2013).

7.1.2 Selekcia stopovačov v lokálnych podmienkach

Pre definované podmienky rezervoárového prostredia: dominantná litológia: karbonáty; hrúbka rezervoárového prostredia: 300 – 800 m; očakávaná rezervoárová teplota: 145 – 190 °C; kontrolujúci typ permeability: puklinová, krasovo-puklinová; zmiešavanie a nariedovanie: áno; celková mineralizácia: 10 – 30 g.l⁻¹; vzdialenosť medzi produkčným a reinjektážnym vrtom D = 1 500 m; vzdialenosť od ST-4 D = 4 100 m; vzdialenosť od výverovej oblasti v Sklených Tepliciach D = 6 000 m; environmentálne limity: áno, PLZ v Sklených Tepliciach; ako najvhodnejšie možnosti stopovačov vystupujú (napr. ROSE ET AL., 2001; KUMAGAI ET AL., 2004; NOTTEBOHM ET AL., 2012; CAO ET AL., 2018; REIMUS ET AL., 2002; BENISCHKE, 2021; LIU ET AL., 2022, 2026; SAIKOWSKI ET AL., 2022):

- 2,7 – NDS (2,7 naftalén disulfanát)
- 2,6 – NDS (2,6 naftalén disulfanát)
- 2,5 – NS (2,5 naftalén sulfanát)
- termo-senzitívne karbamáty
- butyramidy
- bromidové soli (KBr, LiBr).

7.1.3 Realizácia stopovacích skúšok a limity

Realizácia (protokol) stopovacích skúšok sa významne odvíja od reálnych parametrov overeného rezervoárového prostredia, ktoré v súčasnosti nie sú známe, a následne od zvolených stopovačov (napr. SHOOK ET AL., 2004; AXELSSON, 2013; EROL ET AL., 2022). Vzhľadom na lokálnu situáciu, a základnú úlohu využitia stopovačov, najmä v priestorovom rozsahu, je však nevyhnutné zahrnúť v prípade prevedenia stopovacích skúšok monitorovacie body na objektoch:

- zdrojový bod: reinjektážny vrt (GTŽ-2)
- indikačný bod: produkčný vrt (GTŽ-1)
- periférny indikačný bod: vrt ST-4 Sklené Teplice
- periférny indikačný bod: vrt STH-2 Sklené Teplice
- referenčný bod: vrt ST-1 Sklené Teplice
- referenčný bod: aspoň jeden pramenný výver (pref. Banský, Ľudovít, Ľudový, Vilma).

V súvislosti s využitím organických alebo anorganických stopovačov je nevyhnutné v rámci plánovania prihliadať na kvalitatívne parametre PLZ, a dávkovanie na zdrojovom bode prispôbiť v prvej etape, na základe prvotných výsledkov z realizovaných hydrodynamických skúšok, očakávaným rýchlostiam prúdenia a rýchlostiam rozpadov stopovačov tak, aby koncentrácie produktov rozpadu neprekračovali legislatívou definované normy (napr. BEHRENS ET AL., 2000; ROSE ET AL., 2001; BENISCHKE, 2021; SAKKOWSKI ET AL., 2022).

7.2 Rezervoárový monitoring

Návrh rezervoárového monitoringu je založený na modifikácii monitorovacieho manažmentu, ktorý bol prezentovaný v správe „Vplyv využívania geotermálnej energie v stredisku E-GEO-1 na PLZ Sklené Teplice. Hydrogeologický posudok“ (DZÚRIK ET AL., 2023). Navrhovaný monitoring je postavený na definovaní kritérií reprezentatívneho ovplyvnenia hydrogeologickej štruktúry Sklené Teplice (v posudku ako časť 5.7), ktoré vychádzajú z percentuálnych zmien voči požadovým hodnotám na základe režimových údajov

predchádzajúcich etáp monitorovania výdatností a p-T parametrov na jednotlivých zdrojoch, vrátane zohľadnenia pozorovaného variačného rozpätia (Tabuľka 7.2) s nasledujúcim vymedzením a funkciou monitorovacích objektov:

- ST-1 Zipser: tlak na ústí, teplota vody na ústí
- ST-2 Born: tlak na ústí, teplota vody na ústí
- STH-2: hladina podzemnej vody, teplota vody na ústí
- zdroj Jozef: hladina podzemnej vody
- ST-4: tlak na ústí, ložiskový tlak, teplota v hĺbke $z = 1\,470$ m;

a zároveň sa v menovanom posudku, pri navrhovaní monitorovacieho systému uvádza: 1) výsledky výpočtu tepelno-energetického potenciálu geotermálnej štruktúry so zavedením odberu zemského tepla na lokalite geotermálneho strediska E-GEO-1 poukazujú na dosah teplotného ovplyvnenia štruktúry len v jej hlbinej časti; 2) rádius ovplyvnenia nedosahuje po okrajové zlomy kotliny, ktoré oddeľujú depresiu od elevácií v smere k výverovej oblasti Sklené Teplice; 3) z podstaty projektu geotermálneho strediska E-GEO-1 vyplýva praktická nemožnosť ovplyvnenia množstvej bilancie geotermálnych vôd; 4) dosah teplotného ovplyvnenia bol kvantifikovaný a nie je predpoklad jeho dosahu po okrajové zlomy depresie.

Prezentované závery vychádzajú z pomeru medzi „merným tepelno-energetickým potenciálom“ a dotáciou tepla prostredníctvom prirodzeného zemského tepelného toku za obdobie 30 rokov pri $R_0 = 0,075$ (hodnota počíta s priemernou pórovitosťou $\varphi_{(z)} = 6\%$) podľa vzťahu [41], pričom polomer dosahu ovplyvnenia bol vyčíslený pre $S = 1\,091$ m.

$$S = \frac{E_{30}}{(TEP + E_{HFD30})} \quad [41]$$

kde: S – polomer dosahu ovplyvnenia (m), $E_{(30)}$ – odber tepla zo štruktúry za dobu 30 rokov, TEP – hodnota merného tepelno-energetického potenciálu (J) a E_{HFD30} – kumulatívny príkon tepla do systému za 30 rokov (J).

Považujeme za nevyhnutné zdôrazniť, že zvolená metodika, na základe vstupných dát, môže definovať zónu energetického ovplyvnenia (aj to s výhradami, nakoľko zanedbáva tzv. retardačné faktory vplývajúce na rezervoárovú odozvu alebo obnoviteľnosť iníciaľných podmienok, či formovanie pozitívneho, aj keď dočasného termického gradientu – napr. AXELSSON, 2010; O’SULLIVAN ET AL., 2010; HÄHNLEIN ET AL., 2013; HACKSTEIN – MADLENER, 2021; RYBACH, 2022); nemôže byť ale vyjadrením možných sfér hydraulickej, alebo termickej komunikácie / zón dosahu vplyvu alebo ovplyvnenia, medzi (v tomto prípade) strediskom E-GEO-2 Horné Opatovce a Sklenými Teplicami.

Tabuľka 7.1: Kritéria úrovni zmien pre monitorované parametre za účelom definície reprezentatívneho ovplyvnenia. Zdroj: Držurík et al. (2023).

monitorované parametre	tlak na ústí MPa	hladina m.n.m.	teplota °C	protokol trvanie zmeny 60 dní
kritérium 1	5 %	0,05 %	0,5 %	povinnosť hlásenia stavu
kritérium 2	10 %	0,1 %	1 %	povinnosť hlásenia bez možnosti $\uparrow Q_{(PROD)}$
kritérium 3	15 %	0,15 %	1,5 %	povinnosť hlásenia + povinnosť $\downarrow Q_{(PROD)}$
kritérium 4	20 %	0,2 %	2 %	povinnosť hlásenia + povinnosť ukončiť HDS

Aj z vyššie uvedeného, keď zohľadníme – z pohľadu rezervoárového inžinierstva – presnejší prístup pri hodnotení možností dosahu produkcie zdrojov geotermálnej energie a reinjektáže na okolie s využitím frontov rezervoárovej odozvy (Kapitola 4), **navrhujeme pôvodný monitorovací program zásadne rozšíriť, a to vrátane monitorovacích prác na produkčnej sústave na lokalite Lovča, tak aj v jej relevantnom okolí. Zdôrazňujeme, že návrh má odporúčací charakter, a jeho cieľom je:**

- kontinuálna, komplexná, a udržateľná tvorba databázy rezervoárových údajov v pred-produkčnom, testovacom / overovacom, aj produkčnom štádiu
- tvorba podkladov pre kontinuálne vyhodnocovanie a kalibráciu modelov rezervoárovej odozvy
- manažment rizík súvisiacich s dlhodobou produkciou (a reinjektážou) zdrojov geotermálnej energie za účelom ochrany stavu udržateľnej, obnoviteľnej, termodynamicky efektívnej a ekonomicky výhodnej produkcie
- ochrana a mitigácia rizík ovplyvnenia kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov rezervoárového prostredia; a v neposlednom rade
- ochrana a mitigácia rizík ovplyvnenia kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov PLZ Sklené Teplice.

7.2.1 Geofyzikálne metódy monitoringu

Využitie geofyzikálnych metód pri monitorovaní účinkov (GFM)rezervoárovej produkcie, alebo reinjektáže, v podmienkach Slovenska je extrémne neštandardné – s výnimkou karotážnych meraní pri prehodnocovaní niektorých využívaných vrtov. Pri značnej výhode GFM, ktorá vychádza z fyzikálnej podstaty jednotlivých metód, umožňuje, v porovnaní s nepriamymi indikačnými metódami (termochémia, multikomponentová a klasická

geotermometria), predovšetkým plošné monitorovanie fyzikálnych prejavov zmien v rezervoárovom prostredí, z ktorých väčšina je funkciou zmien v teplote, respektíve hustote / salinite a nasýtení horninového prostredia. Objektívne je však nevyhnutné zdôrazniť, že GFM predstavuje rádovo vyššie náklady v porovnaní s geochemickými metódami monitorovania, najmä, ak je realizovaný s určitou frekvenciou opakovaní. Aj preto je voľba jednotlivých metód, okrem overenej situácie na geotermálnom poli, respektíve v jeho relevantnom / cieľovom okolí, závislá na stanovení cieľov, a zmysluplnosti nákladov (napr. HERSIR – BJORNSSON, 1991; AXELSSON, 2003; BJORNSSON, 2009; CUMMING, 2016). **Z tohto dôvodu ako jedínú vhodnú metódu identifikujeme gravimetrické merania založené na klasickej gravimetrii, TLM, alebo supravodivej gravimetrii.**

GRAVIMETRIA / MIKROGRAVIMETRIA

Gravimetrické merania sú jedným zo štandardných spôsobov monitorovania rezervoárovej odozvy zmenou tiažového záznamu vplyvom nárastu, respektíve poklesu hustoty horninového prostredia zmenou teploty hostujúceho rezervoárového média (napr. HUNT – BOWYER, 2007; PORTIER ET AL., 2018; GIULIANTE ET AL., 2026). Výhodami, oproti nepriamym indikátorom (termochemické modelovanie, multikomponentová geotermometria, klasická geotermometria, časové rady), je predovšetkým orientovaného plošného prieskumu. V rámci konkrétnej lokality navrhujeme nasledujúce realizácie a frekvencie:

- **produkčná sústava**

- vymedzenie: polygón medzi produkčným a reinjektážnym vrtom + 1 × 1 km od spojnice produkčného a reinjektážneho vrtu
- funkcia: postup studeného frontu medzi reinjektážnym a produkčným vrtom, účinok konduktívnej retardácie a zahrievania studeného frontu, stabilita filtračných trás
- realizácia: pred začiatkom reinjektáže, následne 1. mesiac, následne 15 rokov s cyklom 1× ročne, následne každé 2 roky

- **bezprostredné okolie lokality**

- vymedzenie: polygón vymedzený produkčnou sústavou (šírka strany) a tektonickým rozhraním grábenovej časti kotliny a sklenoteplického ostrova
- funkcia: postup studeného frontu medzi reinjektážnym vrtom a okrajom kotliny, dosah ovplyvnenia saturácie rezervoárového prostredia produkciou, aktivácia

filtračných kanálov vplyvom otvorenia produkcie, zmena hustoty rezervoárového média

- realizácia: pred začiatkom reinjektáže, následne pre 1 – 15ty rok s cyklom 1× ročne, potom podľa vyhodnotenia predchádzajúcej etapy
- **periféria – sklenoteplícky ostrov**
 - vymedzenie: údolie potoka teplá od ST-4 po výverovú oblasť prameňov v Sklených Tepliciach (podľa objektívnych možností)
 - funkcia: zmeny rezervoárového média vplyvom nárastu produkčnej záťaže, dosah frontov rezervoárovej odozvy z reinjektáže
 - realizácia: pred začiatkom reinjektáže, následne pre 1 – 15ty rok s cyklom 1× ročne, potom podľa vyhodnotenia predchádzajúcej etapy

IN-SITU (PRIAMY) MONITORING NA TECHNICKÝCH OBJEKTOCH

Všeobecný prehľad zásad (typ meraní, frekvencia) priameho monitoringu fyzikálnych parametrov na produkčných, reinjektážnych, alebo monitorovacích objektoch, v zmysle dobrej praxe rezervoárového manažmentu (AXELSSON, 2009; AXELSSON – KRISTMANSDÓTTIR, 2009), udávame v Tabuľke 7.2. **V tomto prípade navrhujeme ponechať monitorovacie objekty navrhnuté v posudku pre stredisko E-GEO-1 (DZÚRIK ET AL., 2023), s rozšírením na produkčnú sústavu lokality Lovča, pri spustení monitoringu rok pred realizáciou vrtov.**

Tabuľka 7.2 Parametre priameho monitoringu v závislosti na type geotermálneho systému. Upravené podľa: Axelsson (2009); Axelsson – Kristmansdottir (2009)

Typ monitorovacieho program / prostriedkov	odporúčaná frekvencia monitorovacieho systému (* optimálna)
individuálna produkcia geotermálnej vody a/alebo pary	1/deň – kontinuálne*
kumulatívna produkcia geotermálnej vody a/alebo pary	1/týždeň
produkovaná entalpia	1/deň – kontinuálne*
teplota produkovaného média na ústí produkčných vrtov	1/deň – kontinuálne*
tlak na ústí produkčných vrtov	1/deň – kontinuálne*
hladina geotermálnej vody v produkčných vrtov	1/deň – kontinuálne*
hladina geotermálnej vody v pozorovacích vrtov	1/mesiac – kontinuálne*
bod evázie / separácie	1/mesiac
prítokometria	1/rok - 1/týždeň*
teplotné profily a tlakové profily na produkčných vrtov	1/rok – 1/ 6 mesiacov*
teplotné a tlakové profily na monitorovacích vrtov	1/rok – 1/ 12 mesiacov*
teplota a tlak na ústí reinjektážnych vrtov	1/týždeň – 1/deň*
teplota a tlak na vstupe do rezervoárového prostredia v reinjektážnych vrtov	1/deň – kontinuálne*
fázové pomery / rozhrania reinjektovaného média	1/týždeň – 1/deň*
teplotné a tlakové profily na reinjektážnych vrtov	1/rok

7.3 Hydrogeochemický monitoring

Základnou výhodou hydrogeochemického monitoringu voči geofyzikálnym metódam je jednoduchosť jeho prevedenia, flexibilita, a predovšetkým nižšie ekonomické náklady aj pri výrazne väčšej frekvencii a počte monitorovacích objektov. Značnou nevýhodou tohto typu monitorovania je predovšetkým skutočnosť, že slúži vždy ako indikatívny monitorovací parameter, predovšetkým, ak ide o zisťovanie a interpretáciu rezervoárových procesov, dôvodu rezervoárových zmien, a prejavov rezervoárovej odozvy (AXELSSON – KRISTMANSDÓTTIR, 2009; KRISTMANSDÓTTIR, 2009; MONTEROSSA – AXELSSON, 2013). Prehľad základných princípov frekvencie hydrogeochemického monitoringu dobrej aplikačnej praxe udržateľného rezervoárového manažmentu udávame v Tabuľke 7.3.

V súvislosti s neistotami, ktoré vyplývajú zo vzťahu medzi lokalitou Lovča a lokalitou Sklené Teplice, navrhujeme v tomto prípade rozšíriť monitorovaciu sieť navrhovanú v pôvodnom posudku pre stredisko E-GEO-1 (DZÚRIK ET AL., 2023), v závislosti na technických možnostiach realizácie podľa návrhu v Tabuľke 7.4. Súčasťou navrhovanej monitorovacej siete je už aj produkčná sústava.

Zdôrazňujeme však, že aj tento rozšírený návrh má odporúčací charakter, a nepredstavuje kritickú podmienku realizácie projektu.

Tabuľka 7.3 Režim geochemického monitoringu v závislosti na type zdroja geotermálnej energie. Upravené podľa: Kristmanskottir (2009)

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

Tabuľka 7.4: Návrh monitorovacej schémy a využitia na lokalite Lovča a Sklené Teplice

monitorovací objekt	typ monitorovacieho objektu	existencia v čase Posudku	frekvencia pred HDS *1	frekvencia počas HDS / testovania vrtu	frekvencia (rok 1 – 5)	frekvencia (rok 6 – 15)	frekvencia (rok 16 – 30)	frekvencia (rok 30 – X)	časové rady	termochemické modelovanie	geotermometria
GTŽ-1	produkčný vrt	N	-	1 × 2 týždne *2	podľa T. 7.3	podľa T. 7.3	podľa T. 7.3	podľa T. 7.3	áno	áno	áno
GTŽ-2	reinjektážny vrt	N	-	*3	podľa T. 7.3 *5	podľa T. 7.3 *5	podľa T. 7.3 *5	podľa T. 7.3 *5	áno	áno	nie
Jozef	vrt	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	1 × ročne	1 × ročne	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	nie
ST-1 Zipser	vrt	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	1 × ročne	1 × ročne	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	nie
ST-2 Born	vrt	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	1 × ročne	1 × ročne	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	nie
ST-4	vrt	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	4 × ročne *6	4 × ročne *6	4 × ročne *6	2 × ročne	áno	áno	áno
ST-5	vrt	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	podľa T. 7.3	podľa T. 7.3	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	áno
STH-2	vrt	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	podľa T. 7.3	podľa T. 7.3	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	áno
Ľudový*	prameň	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	podľa T. 7.3	podľa T. 7.3	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	áno
Banský	piscina	A	4 × ročne	1 × 2 týždne *4	podľa T. 7.3	podľa T. 7.3	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	áno
Ľudovít	prameň	A	4 × ročne	1 × mesiac *4	1 × ročne	1 × ročne	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	nie
Vilma	studňa	A	4 × ročne	1 × mesiac *4	1 × ročne	1 × ročne	2 × ročne	1 × ročne	áno	áno	áno

Poznámky:

- a) podľa T. 7.3 = rozdelenie frekvencie a komplexnosti rozborov podľa definovaného štandardu
- b) *1 = cieľom je získať aktuálnu plošnú snímku situácie v priebehu obdobia zodpovedajúcemu hydrologickému roku
- c) *2 = nevyhnutné pre prvé kalibrácie prediktívnych modelov rezervoárovej odozvy a kalibráciu stopovacej skúšky
- d) *3 = pravidelné vzorkovanie počas hydraulického testovania vrtu
- e) *4 = platí v priebehu hydrodynamickej skúšky, pozadové hodnoty a akútna indikácia zmien režimov prúdenia, rezervoárovej dynamiky, a komunikácie medzi lokalitami
- f) *5 = platí pre vzorky na ústí reinjektážneho vrtu
- g) *6 = rozšírená frekvencia v ST-4 plní úlohu indikátora predčasných prejavov prieniku frontov rezervoárovej odozvy do rezervoárového prostredia vo výverovej oblasti

V rámci návrhu rozšírenia monitorovacej schémy zároveň odporúčame prednostne využívanie nasledovných metód vyhodnocovania chemického a termochemického monitoringu, ktoré sú schopné (nepriamo) indikovať procesy / zmeny v rezervoárovom prostredí vplyvom zmien v režimoch prúdenia alebo v prieniku frontov rezervoárovej odozvy. **Prednosť týchto termochemických metód spočíva predovšetkým v tom, že termochemický front prichádza zvyčajne pred samotným hydraulickým, respektíve termickým frontom**, čo poskytuje, v prípade správnej identifikácie, pomerne rozsiahly priestor pre aplikáciu opatrení mitiguujúcich, alebo znižujúcich následné účinky rezervoárovej odozvy (napr. STOPA – WOJNAROWSKI, 2006; LOPEZ ET AL., 2010; GRANT – BIXLEY, 2011; ASCENCIO ET AL., 2014; SUZUKI ET AL., 2015). V lokálnych podmienkach odporúčame:

- **sledovanie časových radov**, predovšetkým Mg^{2+} , SiO_2 , Cl^- , pomer Mg/Ca , pomer Cl/Br (MARINI, 2000; AXELSSON – KRISTMANSDÓTTIR, 2009; KRISTMANSDÓTTIR, 2009) = identifikácia zmeny rýchlosti a prúdenia, ochladzovania, zahrievania, alebo zmiešavania
- **termochemické zmiešavacie modely**: X-Si-H konduktívny (FOURNIER – TRUESDELL, 1974), X-C-S silikáty – karbonáty (ARNÓRSSON ET AL., 1983; ARNÓRSSON, 1985; 2000), X-CL-H chloridy – entalpia (FOURNIER, 1989; ARNÓRSSON, 2000) = identifikácia rezervoárovej dynamiky, stability rezervoárových procesov, prejavov zmiešavania pri prieniku frontov rezervoárovej odozvy, prieniku tepelného frontu z hlbokých rezervoárových systémov, zmeny v koncových členoch koncepčného modelu
- **klasická (silikátová a kationová) geotermometria** = stabilita rezervoárových procesov, stabilita rezervoárovej dynamiky, stabilita interakcií na rozhraní voda – minerálna fáza – hornina
- **multikomponentová geotermometria**: index celkovej saturácie – TSI, komplexná rovnovážna teplota (napr. COOPER ET AL., 2013; SPYCHER ET AL., 2014; CIONI – MARINI, 2020) = prienik termického frontu, prienik studeného frontu, zmeny vo vertikálnych režimoch prúdenia, zmeny v procesoch adiabatického varu, ochladzovanie nariedovaním.

8 VYJADRENIE

Zámer, ktorého posudzovanie vplyvu na kvalitatívne a kvantitatívne parametre zdrojov geotermálnej energie a rezervoárového prostredia na lokalite Lovča a v jej relevantnom okolí, predpokladá rozvoj geotermálneho strediska Lovča pre kontinuálnu dodávku tepla pre energeticky náročné účely využívania; s identifikovaným termodynamickým potenciálom napojenia na kaskádové systémy. Plánovaná produkcia strediska podľa Zámeru je celoročná, s cieľovým tepelno-energetickým výkonom $P_{(TH)} = 20 \text{ MWt}$. Produkčná schéma je navrhovaná ako dublet, s horizontálnou vzdialenosťou otvorených úsekov produkčného a reinjektážneho vrtu $D = 1\,500 \text{ m}$. Keďže v súčasnosti existuje pomerne významná neistota ohľadom skutočného geologického (vertikálneho) profilu a pozície rezervoárového prostredia (tieto skutočnosti sú diskutované najmä v Kapitole 3 a 4), odhady rezervoárovej teploty pre hĺbkové rozhranie $z_{(RES)} = 3\,200 - 4\,000 \text{ m}$ zodpovedajú $T_{(RES2)} = 140 - 165 \text{ }^{\circ}\text{C}$ podľa Katalógu, respektíve $T_{(z)} = 150 - 195 \text{ }^{\circ}\text{C}$ podľa Zámeru. Od toho sa následne odvíjajú aj diskutované, potrebné množstvá na overenie požadovaného tepelno-energetického výkonu $Q_{(PROD)} = 30 - 60 \text{ kg.s}^{-1}$. Tak veľkú produktivitu rezervoárového prostredia na jeden produkčný vrt považujeme (stredná hodnota overených množstiev geotermálnej vody v produkčných vrtov je podľa aktuálnej databázy približne 5 l.s^{-1} ; avšak pri výraznom vpravo-orientovanom zošíkmení) za veľmi optimistický predpoklad, aby skutočne bol naplnený plne funkčný projekt pri schéme P:I = 1:1 definovaný v Zámere. Rezervoárové prostredie je možné charakterizovať ako prevažne konduktívne. Možnosti formovania izolovanej, zrejme symetrickej 3D konvekcie, predovšetkým v okolí zlomových systémov, ich križovaní, alebo v pásmach štruktúrneho porušenia (puklinových hniezdach) nie sú vylúčené. Adiabatický var je obmedzený zrejme na konvektívne zóny, pričom vzhľadom na p-T prostredie (geometria, geotermické parametre) dochádza zrejme k okamžitej kondenzácii evakuujúcej parnej frakcie a tvorbe prehriateho – tzv. 2L regiónu – vodnej zložky nad zónami konvekcie. Následne, zdroje geotermálnej energie na lokalite Lovča sú pravdepodobne jednofázové zdroje – geotermálne vody (mobilná fáza), s termodynamicky viazanou, vlhkou saturovanou parou, s vysokým stupňom viazanosti a schopnosťou spontánnej separácie v podmienkach podobných atmosférickému tlaku, a frakčným pomerom do 7 - 15 % (indikatívne na základe silikátovej geotermometrie a zmiešavacích modelov). Systémy prúdenia sú pravdepodobne založené na laterálnych a vertikálnych prestupoch, bazénovej segmentácii a elevovanom podloží.

Kritickou neistotou, okrem samotného geologického a geotermického prostredia, je v tejto chvíli samotný vzťah medzi lokalitou Lovča – a zdrojmi geotermálnej energie – a okolitými morfoštruktúrami podložia vulkanosedimentárnej výplne v grábenovej časti kotliny; ale predovšetkým (potenciálny?) vzťah hlbokých zdrojov geotermálnej energie a PLZ v Sklených Tepliciach, viazaných na výstupnú tranzitnú, a výverovú oblasť sklenoteplickej hydrogeotermálnej štruktúry v oblasti tzv. sklenoteplického ostrova. Je nevyhnutné zdôrazniť, že túto neistotu sa nepodarilo definitívne odstrániť ani realizovanými termochémickými modelmi (Kapitola 3), ktoré zároveň ale indikujú pravdepodobne hlboký pôvod termominerálnych vôd v Sklených Tepliciach, viazaný na hĺbkové štruktúry kotliny, ktorých vývoj podlieha viacerým etapám zmiešavania, a zrejme aj adiabatického varu. Tento predpoklad automaticky neznamena, že lokalita Sklené Teplice a lokalita Lovča majú rovnaké štruktúrne prvky, predovšetkým tranzitno-akumulačnú a akumuláciu oblasť. Naopak, očakávané typy systémov prúdenia sú charakteristické vetvením filtračných ciest a efektívnych profilov filtrácie. Znamená to, že pri súčasnom stave poznania nie je možné posúdiť, nakoľko sa budú vzájomné lokality ovplyvňovať. Realizované stochastické modely rezervoárovej odozvy (Kapitola 5) preto skúmajú len možnosť rozvoja a vplyvu dosahu frontov rezervoárovej odozvy v prípade, ak k takejto hydraulikej / termickej komunikácii dochádza.

Je teda, podľa nášho názoru, logické, a evidentné, že vyriešenie v Posudku uvádzaných neistôt je možné len realizáciou hlbokých geotermálnych vrtov v grábenovej časti kotliny. Ich realizácia pritom automaticky neznamena povolenie k dlhodobej produkcii v prípade, ak preukázateľne dôjde ku ovplyvňovaniu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov PLZ, ktoré v celej oblasti predstavujú prirodzený, prednostný objekt právnej a spoločenskej ochrany. Rovnako, ich realizácia neznamena, že nebude okamžite, a bezpodmienečne nevyhnutné realizovať všetky potrebné kroky pre zastavenie, alebo efektívne zníženie ovplyvňovania v prípade, ak sa ovplyvňovanie preukáže s časovým oneskorením, čo je podstatne pravdepodobnejší scenár v porovnaní s prejavmi už počas hydrodynamickej skúšky (pravdepodobne okrem vplyvu na výdatnosť a s ňou súvisiace tlakové, sekundárne aj teplotné parametre PLZ a ich rezervoárového prostredia) tak, aby možnosti obnovenia iniciálnych, alebo kvázi-iniciálnych podmienok boli považované za zvrätne. Súčasne však fakt, že existuje možnosť hydraulikej / termickej / termochémickej komunikácie medzi lokalitami Lovča a lokalitou Sklené Teplice, za predpokladu, že nedôjde k narušeniu OP II. stupňa, nevytvára podmienky pre zamietavé stanovisko pred samotnou realizáciou produkčnej sústavy podľa Zámeru.

Z posudzovania Zámeru a plánov rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie využitím dubletovej produkčnej sústavy na lokalite Lovča vyplýva:

1) Zámer geotermálneho strediska Lovča vyhovuje požiadavke „nespôsobiť významnú škodu“ – DNSH z pohľadu návrhu, konfigurácie, funkcie a predpokladaného spôsobu využívania produkčnej sústavy 1 produkčného a 1 reinjektážneho vrtu; ktorá spĺňa podmienku významného prínosu v oblasti zmiernenia zmien klímy, adaptácie na zmenu klímy, udržateľného využívania a ochrany vodných a morských zdrojov a prevencie a kontroly znečisťovania

pričom:

- pri predpokladanej rezervoárovej teplote ($T_{(RES)} = 140 - 195 \text{ }^{\circ}\text{C}$), očakávanom chemizme (pravdepodobne Ca-Mg-Na-HCO₃-Cl-SO₄ typ), celkovej TDS = 10 – 30 g.l⁻¹, obsahu saturovanej parnej frakcie, a možnom zvýšenom podiele kovov, a pravdepodobnej konvekcie spojenej s neúplným adiabatickým varom v rezervoárovom prostredí neexistuje iná možnosť pre dlhodobú a udržateľnú produkciu zdrojov geotermálnej energie, ako využívanie reinjektáže pri plnom reinjektážnom režime, a to aj v súvislosti s ochranou povrchových a podzemných vôd
- konfigurácia dubletu prakticky vyhovuje dobrej praxi rezervoárového inžinierstva a koncipovania reinjektážnych schém (Kapitola 6) pre analogické rezervoárové prostredia a zdroje geotermálnej energie
- dubletová sústava definovaná Zámerom zároveň na základe hodnotenia funkčnosti a orientácie je schopná pokryť požadované funkcie reinjektáže v daných geologických, geotermických a hydrogeochemických podmienkach
- zároveň ale existuje predpoklad, že zabezpečenie požadovaného výkonu $P_{(TH)} = 20 \text{ MWt}$ si môže, po realizácii dubletu GTŽ-1 a GTŽ-2 vyžiada realizáciu doplnujúceho vrtania (nevyhovujúca produktivita jediného produkčného vrtu; nevyhovujúca reinjektážna / akceptačná kapacita rezervoárového prostredia podmieni pri vyhovujúcej produkcii realizáciu reinjektážnej dvojčky)

2) Zámer geotermálneho strediska Lovča 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 toto hodnotenie je podložené:

- kvantitatívnou ochranou plytkých a povrchových vôd počas testovania a prevádzky strediska využívaním plnej reinjektáže, pravdepodobne bez potreby dodatočných zdrojov z povrchového toku alebo plytkých podzemných vôd (v tomto štádiu nevidíme dôvody tvorby hydraulickej clony / bariéry)
- kvalitatívnou ochranou povrchových vôd a plytkých podzemných vôd v systéme reinjektáže, a zároveň širšieho okolia lokality, vrátane PLZ – aplikované stochastické modely postupu hydraulického, termochemického a termického frontu rezervoárovej odozvy v oboch posudzovaných variantoch indikujú pravdepodobnosť dosiahnutia tektonického styku grábenovej a periférnej časti kotliny s pravdepodobnosťou $P < 10 \%$, čo znamená veľmi nepravdepodobný scenár
- vzťahom medzi celkovou energetickou kapacitou rezervoároveho prostredia (pravdepodobný tepelno-energetický potenciál), podľa ktorej pravdepodobnosť overenia ďalších 20 MWt presahuje 90 % IDF krivky energetickej bilancie pre obe tektonické jednotky a hodnotené horizonty produkcie $t_{(PROD)} = 40$ rokov a $t_{(PROD)} = 100$ rokov definované Katalógom
- vzťahom medzi udržateľnou rezervoárovou kapacitou $P_{th(S)}$ a plánovaným rozšírením odberov produkcie zdrojov geotermálnej energie – $P_{(OUT)}$ pri súčasnej produkcii na lokalitách Lovča, Sklené Teplice a Vyhne v severnej časti Žiarskej kotliny, podľa ktorého $P_{(OUT)} < P_{th(S)}$
- vzťahom medzi potenciálom udržateľného rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie $P_{th(D)}$ a plánovaným energetickým výkonom na lokalite Lovča – $P_{(OUT)}$, podľa ktorého platí $P_{(OUT)} < P_{th(D)}$
- indikátormi a klasifikáciou rozšírenia produkcie podľa udržateľnosti a perspektivity.

Doplnenie: Uvedené hodnotenie je založené na údajoch prezentovaných v Zámere, a preto predpokladá dostatočný súlad medzi špecifikáciami v Zámere a realizáciou v čase otvorenia a prevádzky geotermálneho strediska Lovča. Uvedené hodnotenie je založené na kvalite a kvantite vstupných údajov a využití matematického (aproximatívneho) aparátu, predovšetkým s aplikovaním v stochastických Monte Carlo simuláciách. **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.

9 ZÁVER

Prieskum, a rozvoj produkcie zdrojov geotermálnej energie na stredisku Lovča pre energeticky náročné účely využitia predstavuje v kontexte ich overovania a využívania na Slovensku pomerne komplexný projekt dubletovej produkčnej sústavy; a zároveň významnú energetickú a výskumnú príležitosť v regióne Žiarskej kotliny so špecifickou geologickou stavbou s pravdepodobne významným vplyvom neogénnej vulkanickej činnosti a zvýšenej geotermickej aktivity územia. Cieľom, ktorý Zámer deklaruje, je produkcia zdrojov geotermálnej energie s očakávaným tepelno-energetickým výkonom 20 MWt, s ročnou produkciou 7 400 hodín, čo predstavuje približne 148 GWh,t energetického výkonu ročne. Produkčná sústava je navrhnutá pre celoročnú prevádzku. Reinjektáž je v Zámere definovaná ako úplná, priama, studená; podľa horizontálnej pozície periférna, pričom v porovnaní s dobrou aplikačnou praxou spĺňa štandardy vychádzajúce z jej očakávanej funkcie: zneškodňovanie odpadového tepla (zdroje geotermálnej energie na výstupe z výmenníkovej sústavy) a podpora tlakových pomerov v rezervoárovom prostredí.

Jednou zo základných otázok rozvoja produkcie zdrojov geotermálnej energie na stredisku Lovča je priestorový vzťah zdrojov geotermálnej energie v hlbokjej časti Žiarskej kotliny a termominerálnych vôd (prírodné liečivé zdroje) sklenoteplického ostrova, ktorý predstavuje jej perifériu. V tejto súvislosti predkladaný Posudok (podľa Kapitoly 3):

- **jednoznačne nepotvrdil – a zároveň nevyvrátil - priamu priestorovú, genetickú, alebo funkčnú súvislosť medzi geotermálnymi vodami na stredisku Lovča a v Sklených Tepliciach;**
- aplikovanie termochemických zmiešavacích modelov založených na silikátovej geotermometrii potvrdilo viac-štádiálny vývoj termominerálnych vôd v Sklených Tepliciach, ktorých primárne zdroje pravdepodobne predstavujú geotermálne vody hlbokého obehu v grábenovej časti kotliny, následne etapovite zmiešavané / nariedované, a to v okolí tektonického styku hlbokjej a periférnej časti kotliny, respektíve v rámci vonkajšej tranzitno-akumulačnej a výverovej oblasti sklenoteplíkovej štruktúry; s možnosťou adiabatického varu, ku ktorému dochádza pred aspoň dvoma etapami zmiešavania / nariedovania;

- odvodenie pôvodu PLZ v hlbokých častiach kotliny automaticky neznamená ich pôvod v rovnakých cirkulačno-akumulačných štruktúrach, detto nie ich založenie na rovnakých filtračných kanáloch, ktoré by definovali vzájomné funkčné ovplyvňovanie – systémy prúdenia s laterálnymi / vertikálnymi prestupmi, elevovaným podložím a bazénovou segmentáciou sú typické práve vetvením subsystémov prúdenia a preferenčných smerov;
- keďže ani silikátová geotermometria nepriniesla jednoznačné výsledky, hodnotenie Zámeru jednoznačne definuje, že potvrdenie / vylúčenie predmetnej neistoty je možné jedine realizovaním hlbokých vrtov v hlbkej časti kotliny, s ktorou sa pravdepodobne spája pozícia tzv. koncového geotermálneho člena (členov);
- **realizácia produkčnej sústavy podľa Zámeru pritom automaticky neznamená povolenie k dlhodobej produkcii zdrojov geotermálnej energie v prípade, ak preukázateľne dôjde ku ovplyvňovaniu kvalitatívnych a kvantitatívnych parametrov PLZ, ktoré predstavujú prioritný predmet právnej a spoločenskej ochrany; z čoho následne vyplýva, že neistota hydraulickéj a termickej spojitosti medzi žiarskou a sklenoteplickou štruktúrou nie je dôvodom pre odmietavé stanovisko Posudku, detto, ak budú pri realizácii projektu splnené všetky požiadavky vyplývajúce z relevantnej legislatívy.**

Predkladaný hydrogeologický posudok hodnotí Zámer z pohľadu rezervoárového manažmentu a požiadaviek Rámcovej smernice o vodách (RSV), ako aj z pohľadu zásady „nespôsobíť významnú škodu“ – DNSH. **Zdôrazňujeme, že posudok vychádza z kombinácie dostupných údajov o relevantnom prostredí, technických a technologických parametrov definovaných v Zámere (a predpokladá ich naplnenie), a dobrej aplikačnej praxe.**

V súvislosti s Koncepciou trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie / rezervoárového manažmentu a požiadaviek RSV, na základe realizovaných stochastických modelov (a pri aktuálnej dostupnosti údajov) rezervoárovej odozvy je možné predpokladať (Kapitola 4 a Kapitola 5):

- zmeny, ku ktorým v rezervoárovom prostredí pravdepodobne dôjde vplyvom produkcie a reinjektáže sú spojené s prirodzeným, respektíve štandardným rozširovaním termického, termochemického a hydraulického frontu rezervoárovej odozvy, čo je štandardný prejav a stav v súvislosti s využívaním reinjektáže; podstatným faktorom je predikovanie, a následne sledovanie a manažment týchto zmien

- modelované výrazné zmeny sa predpokladajú v bezprostrednom okolí reinjektážneho vrtu – s pravdepodobnosťou a intenzitou prejavov rezervoárovej odozvy klesajúcimi už na vzdialenosť $D = 1\,500\text{ m}$ k efektívnej zóne produkčnej časti sústavy
- zmeny v okolí efektívnej zóny produkčnej sústavy sa budú týkať hydraulických impulzov, ktoré, v prípade ovplyvňovania rezervoárovej dynamiky, môžu sekundárne vyvolať pozorovateľné (nie nevyhnutne intenzívne) zmeny v chemizme zdrojov geotermálnej energie, pri dlhodobom pôsobení aj s účinkom na zmeny v chemicko-technologických vlastnostiach produkovaných zdrojov geotermálnej energie, prípadne (pre horizont $t_{\text{(PROD)}} = 100$ rokov) nie je možné vylúčiť ani prienik samotného „studeného frontu“
- na základe distribúcie pravdepodobnosti dosahu jednotlivých frontov, ktorá je nepriamym indikátorom ich časového pôsobenia, je zároveň možné predpokladať, že tieto zmeny, predovšetkým v okolí produkčnej sústavy, budú zvrátne po ukončení produkcie (kvantifikácia zvratnosti cez obnoviteľnú a regeneračnú kapacitu rezervoárového prostredia vzhľadom na nedostatok vstupných údajov nebola realizovaná), alebo pri presunutí produkcie do iných častí rezervoárového prostredia (čo predstavuje jednu zo základných metód dlhodobej produkcie na geotermálnych poliach, a mitigačných stratégií)
- v rezervoárovom prostredí je na základe Katalógu možné počítať pre krátkodobý aj dlhodobý horizont produkcie ($TTP(p)$, $P_{th(s)}$, $P_{th(D)}$, $rcap(u)$, $rcap(s)$) s jej udržateľným rozvojom, pri ktorom bude naďalej možné produkciu geotermálnej energie v priestore severnej časti Žiarskej kotliny naďalej zvyšovať (s dodržaním ďalších zásad rezervoárového manažmentu)
- pri predpokladaných parametroch rezervoárového média, považujeme realizáciu dubletovej sústavy za jediné technologické riešenie manažmentu odpadového tepla po využití zdrojov geotermálnej energie vo výmenníkovej sústave, ktorá eliminuje rizika spojené s povrchovým vypúšťaním zvyškových zdrojov, a ktoré eliminuje riziká kontaminácie povrchových recipientov a horizontov plytkých podzemných vôd.

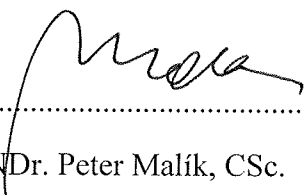
Z pohľadu zásady DNSH (Kapitola 6), t.j. „nespôsobiť významnú škodu“ predkladaný hydrogeologický Posudok hodnotí Zámer nasledovne:

- realizácia geotermálneho strediska Lovča (dubletovej sústavy) a produkcia zdrojov geotermálnej energie spĺňa podmienky zásady DNSH; pričom skutočnou realizáciou Zámeru, ak to geotermické a hydrogeotermické podmienky, a priestorové súvislosti

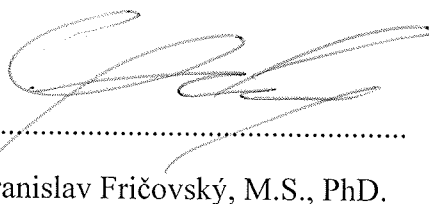
- umožnia, predstavuje významný prvok ochrany abiotických zložiek životného prostredia a ochrany ovzdušia
- produkcia zdrojov geotermálnej energie na stredisku Lovča a ich využívanie pre energeticky vysoko náročné účely (a odporúčane v kaskádových systémoch) predstavuje vzhľadom na potenciál redukcie emisií CO₂, AGS a AHS substitúciou fosílnych zdrojov významný prvok prínosu k zmierneniu klimatických zmien a adaptácie na zmenu klímy; a to vrátane lokálnej podpory energetickej bezpečnosti, energetickej samostatnosti; a nepriamo k zlepšovaniu celkového stavu (wellbeing) obyvateľstva
- dodržiavanie zásad Trvalo udržateľnej rezervoárovej produkcie, a zásad ochrany PLZ, v kombinácii s reinjektážou, vo významnej miere prispieva k ochrane vodných zdrojov minimalizovaním rizík ich depletácie, alebo kontaminácie
- vplyvy na biodiverzitu neboli v hodnotení identifikované ako mimoriadne – súvislosti s biotickými zložkami rezervoároveho prostredia sú typické pre inštaláciu a produkciu zdrojov geotermálnej energie a neprispievajú výrazne k ohrozeniu biodiverzity; predmetné územie sa zároveň nachádza na okraji obytnej a zastavanej zóny, bez priamej súvislosti k oblastiam ochrany

Predpokladaný Zámer geotermálneho strediska Lovča zodpovedá národným a medzinárodným požiadavkám na udržateľný rozvoj produkcie zdrojov geotermálnej energie, za predpokladu absolútnej ochrany PLZ v prípade preukázania ich vzájomnej súvislosti. Zmysluplná produkcia geotermálnej energie pri splnení požiadaviek termodynamickej efektívnosti a účinnosti predstavuje nielen energeticky, ale aj spoločensky dôležitý projekt s potenciálom rozvoja dobrej aplikačnej praxe na Slovensku, s príspevkom k rozvoju dobrého stavu obyvateľstva, miestnej zamestnanosti a udržateľnej ekonomike. Za predpokladu, že realizácia projektu splní všetky v Posudku definované požiadavky, projekt odporúčame realizovať.

V Bratislave, 31. 8 2026



.....
RNDr. Peter Malík, CSc.



.....
Ing. Branislav Fričovský, M.S., PhD.

10 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- Arnórsson, S., 1985: The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **23**, 299-335.
- Arnórsson, S., 2000: Mixing processes in upflow zones and mixing models. In: Arnórsson, S. (Ed.): *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 200-212.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., Svavarsson, H., 1983: The chemistry of geothermal waters in Iceland III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **47**, 567-577.
- Ascencio, F., Samaniego, F., Rivera, J., 2014: A heat loss analytical model for the thermal front displacement in naturally fractured reservoirs. *Geothermics*, **50**, 112-121.
- Axelsson, G., 2003: Essence of geothermal resource management. *Proceedings IGC2003 Short Course, UNU-GTP*, Reykjavik, Iceland, 1-23.
- Axelsson, G., 2008: Importance of geothermal reinjection. *Proceedings, UNU-GTP Workshop for Decision Makers on Direct Heating Use of Geothermal Resources in Asia*, Tianjin, China, 1-16.
- Axelsson, G., 2009: *Capacity, response, management and monitoring of geothermal systems: GEO604 coursebook*. RES The School for Renewable energy Science, Akureyri.
- Axelsson, G., 2010: Sustainable geothermal utilization – Case histories; definitions; research issues and modelling. *Geothermics*, **39** (4), 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., 2013: Tracer tests in geothermal resource management. *European Physical Journal Web of Conferences*, **50**, a. 02001.
- Axelsson, G., 2022. The physics of geothermal geothermal resources. In: Sayigh, A. (Ed.): *Comprehensive Renewable Energy, 2nd Edition*. Elsevier Ltd., s. 1-52.
- 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., Steingrímsson, B., 2018: Logging, testing and monitoring geothermal wells. *Proceedings UNU GTP /SDG Short Course III on Geothermal Reservoir Characterization: well logging, well testing and chemical analysis*, Santa Tecla, El Salvador, 1-20.
- Axelsson, G., Gudmundsson, A., Steingrímsson, B., Palmasson, G., Armannsson, H., Tilinius, H., Flovenz, O.G., Björnsson, S., Stefansson, V., 2001: Sustainable production of geothermal energy: suggested definition. *International Geothermal Association News Quarterly*, **43**, 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., 2005: Sustainable management of geothermal resources and utilization for 100-300 years. *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 1-8.
- Barletta, A., Celli, M., Nield, D.A., 2010: Unstably stratified Darcy flow with impressed horizontal temperature gradient, viscous dissipation and asymmetric thermal boundary conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **10**, 1621-1627.
- Basel, E.D.K., Serpen, U., Satman, A., 2010: Turkey geothermal resource assessment. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-8.
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., Brauchler, R., 2013: Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and sustainable energy reviews*, **26**, 446-463.
- Beardsmore, G.R., Cull, J.P., 2001: *Crustal heat flow: A guide to measurement and modelling*. Cambridge University Press, UK, 334 s.
- Behrens, H., Beims, U., Dieter, H., Dietze, G., Eikmann, T., Grummt, T., Hanisch, H., Kenseling, H., Käss, W., Kerndorff, H., Leibungut, C., Müller-Wegener, U., Rönnefart, I., Scharenberg, B., Schleyer, R., Schloz, W., Tilkes, F., 2001: Toxicological and ecotoxicological assessment of water tracers. *Hydrogeology Journal*, **9** (2001), 321-325.
- Benischke, R., 2021: Review: Advances in the methodology and application of tracing in karst aquifers. *Hydrogeology Journal*, **29**, 67-88.

- Bense, V.F., Person, M.A., 2006: Faults as conduit-barrier systems to fluid flow in siliciclastic sedimentary aquifers. *Water Resources Research*, **42**, a.05421.
- Biela, A. 1978: *Hlboké vrty v zakrytých oblastiach vnútorných Západných Karpát II*. Geologický ústav Dionýza Štúra, Bratislava, 204 s.
- Biely, A., Fusán, O., Lexa, J., Vozár, J., Kullmanová, A., Kantor, J. a Franko, O., 1977: Vyhodnotenie štruktúrneho vrtu JL-1 Jánová Lehota [manuskript - Záverečná správa]. GÚDŠ, Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 117 s.
- 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.
- Bodiš, D., Remšík, A., Černák, R., Marcin, D., Ženišová, Z., Fláková, R., 2018: Geothermal and hydrogeological conditions, geochemical properties and uses of geothermal waters in Slovakia. In: Bundschuh J. – Tomaszewska B. (Eds.), *Geothermal Water Management*, Taylor & Francis, NY, USA, 41-69.
- Bodvarsson, G.S., Tsang, C.F., 1982: Injection and thermal breakthrough in fractured geothermal reservoirs. *Journal of Geophysical Research*, **87** (B2), 1031–1048.
- Bodvarsson, G.S., Stefansson, V., 1989: Some theoretical and field aspects of reinjection in geothermal reservoirs. *Water Resources Research*, **15** (6), 1235–1248.
- Böhmer, M., Škvarka, L., 1968: Nálezová správa o výskyte termálnej vody v Kremnici, Ľudovika šachta, podzemný vrt KŠ-1 [manuskript – Nálezová správa]. GÚDŠ, Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 9 s.
- Brophy, P., 1997: Environmental advantages to the utilization of geothermal energy. *Renewable Energy*, **10** (2-3), 367-377.
- Burián, J., Smolka, J., Kúšik, R., Smolková, A., Ďurovič, E., Noghe, V., Smrek, J., Tencer, J., 1975: Zlatno - surovina: Cu, vyhladávací prieskum - dielňa záverečná správa z vrtu R-3 [manuskript – Čiastková záverečná správa]. Geologický prieskum n.p. SNV, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 126 s.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996: Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, **24**, 1025-1028.
- Cao, V., Schaffer, M., Licha, T., 2018: The feasibility of using carbamates to track the thermal state in geothermal reservoirs. *Geothermics*, **72**, 301-306.
- Castillo, C., Azaroual, M., Ignatiadis, I., Goyénche, O., 2011: Geochemical parameters as precursors to predict the decline of temperature in the Dogger Aquifer (Paris Basin, France). *Proceedings, 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1-9.
- Chen, S., Zhang, Q., Andrews-Speed, P., McLellan, B., 2020: Quantitative assessment of the environmental risks of geothermal energy: A review. *Journal of Environmental Management*, **276**, a. 111287.
- Chiodini, G., Cioni, R., Frullani, A., Guidi, M., Marini, L., Prati, F., Raco, B., 1996: Fluid geochemistry of Nontserrat Island, West Indies. *Bulletin of Volcanology*, **58**, 380-392.
- Cioni, R., Marini, L., 2020: *A thermodynamic approach to water geothermometry*. Springer Geochemistry, Cham, Switzerland, 426 s.
- Ciriaco, A.E., Zarrouk, J.J., Zakeri, G., 2020: Geothermal resource and reserve assessment methodology: overview, analysis and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **119**, 1-31.
- Coates, P.S., Prochazka, B.G., O'Neil, S.T., Webster, S.C., Espinosa, S., Ricca, M.A., Mathews, S.R., Casazza, M., Delehanty, D.J., 2023: Geothermal energy production adversely affects a sensitive indicator species within sagebrush ecosystems in western North America. *Biological Conservation*, **280**, a. 109889.
- Cooper, D.C., Palmer, C.D., Smith, R.W., McLing, T.L., 2013: Multicomponent equilibrium models for testing geothermometry approaches. *Proceedings 38th Workshop On Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, paper No. SGP-TR-198, 1-10.
- Cumming, W., 2016: Geophysics and resource conceptual models in geothermal exploration and development. In: DiPippo, R. (Ed.): *Geothermal power generation: Developments and Innovation*. Elsevier Ltd., New York, USA, 33-75.
- Činčura, J., Köhler, E., 1995: Palealpine karstification: the longest paleokarst period in the Western Carpathians (Slovakia). *Geologica Carpathica*, **46** (5), 343-347.
- di Fraia, S., Macaluso, A., Massarotti, N., Vanoli, L., 2019: Energy, exergy and economic analysis of a novel geothermal energy system for wastewater and sludge treatment. *Energy Conversion and Management*, **195**, 533-547.
- Dhar, A., Naeth, M.A., Jennings, P.D., El-Din, M.G., 2020: Geothermal energy resources: potential environmental impact and land reclamation. *Environmental Reviews*, **28** (4), 415-427.

- 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.
- Dincer, I., Rosen, M.A., 2013: *Exergy, 2nd Edition*. Elsevier B.V., New York, 552 s.
- Dincer, I., Ozturk, M., 2021: *Geothermal energy systems*. Elsevier Ltd, Amsterdam, NL, 518 s.
- Dunn, W.L., Shultis, K.L., 2022: *Exploring Monte Carlo Methods, Second Edition*. Elsevier Science, New York, NY, USA, 570 s.
- Dzúrik, J., Šujan, M., Král, M., Hók, J., Šipka, F., 2023: Vplyv využívania geotermálnej energie v stredisku E-GEO-1 na PLZ Sklené Teplice [manuskript – Hydrogeologický posudok]. EQUIS, s.r.o., Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 114 s.
- Đurovič, E., 2005: Zdroj prírodnej termálnej vody H-2 na lokalite Vyhne [manuskript – Záverečná správa]. NOBAGEOS a.s., Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 17 s.
- Ebigbo, A., Niederau, J., Marquart, G., Dini, I., Thorwart, M., Rabbel, W., Peching, R., Bertani, R., Clauser, Ch., 2016: Influence of depth, temperature and structure of a crustal heat source on the geothermal reservoirs of Tuscany: numerical modelling and sensitivity study. *Geothermal Energy*, **4** (5), a. 0047.
- Eldrusi, K., Branquet, Y., Gillou-Frottier, L., Marcoux, E., 2009: Numerical investigation of transient hydrothermal processes around intrusions: heat-transfer and fluid-circulation controlled mineralization patterns. *Earth and Planetary Science Letters*, **288**, 70-83.
- Eppelbaum, L., Kutaov, I., Pilchin, A., 2014: *Applied Geothermics*. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, DE, 745 s.
- Erol, S., Bayer, P., Akin, T., Akin, S., 2022: Advanced workflow for multi-well tracer test analysis in a geothermal reservoir. *Geothermics*, **101**, a. 102375.
- Fendek, M., Remšík, A., Fendeková, M., 2005: Metodika vyhľadávania, hodnotenia a bilancovania množstva geotermálnej vody a geotermálnej energie. *Mineralia Slovaca*, **37** (2), 117-123.
- Fendek, M., Grand, T., Daniel, S., Blanárová, V., Kultán, V., Bielík, M., 2017: The pre-Cainozoic basement delineation by magnetotelluric methods in the western part of the Liptovská kotlina Depression (Western Carpathians, Slovakia). *Geologica Carpathica*, **68** (4), 318-328.
- Fournier, R.O., 1977: Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, **5**, 41-50.
- Fournier, R.O., 1989: *Lectures on geochemical interpretation of hydrothermal waters*. United Nations Geothermal Training Programme, Reykjavik, Iceland, 77 s.
- Fournier, R.O., 1991: Water geothermometers applied to geothermal energy. In: D'Amore, R. (Ed.), *Application of geochemistry in Geothermal Reservoir Development*, UNITAR, Rome: 37-69.
- Fournier, R.O., Truesdell, A.H., 1974: Geochemical indicators of subsurface temperature - part II: estimation of temperature and fraction of hot water mixed with cold water. *Journal of Research of US Geol. Survey*, **2** (3), 263-270.
- Fournier R.O., Potter R.W.II., 1982: A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, **11**, 3-12.
- Franko, O., 2000: Pôvod CO₂, H₂S a SO₄ v minerálnych a termálnych vodách Západných Karpát z pohľadu stálych izotopov a horninového prostredia. *Podzemná voda*, **6** (2), 102-113.
- Franko, O., 2001: Pôvod a vývoj minerálnych a termálnych vôd Slovenska v priestore a čase z pohľadu veku travertínov a izotopov ¹⁸O, H a ¹⁴C. *Podzemná voda*, **7** (2), 26-45.
- Franko, O., Forgáč, J., Fusán, O. a Zbořil, L., 1973: Zhodnotenie Žiarskej intravulkanickej depresie vzhľadom na vyhľadávanie hypertermálnych vôd. *Geologické práce, Správy*, **61**, 15-32.
- Franko O., Remšík, A., Fendek, M., 1995: *Atlas geotermálnej energie Slovenska*. ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Franko, O., Biely, A., Maďar, D., Weiss, K., 2003: Návrh revidovaných ochranných pásiem a opatrení prírodných liečivých zdrojov hydrogeologickej štruktúry Sklené Teplice, HGP [manuskript - Záverečná správa]. ESPRIT s.r.o., Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 67 s.
- Frey, M., Bär, K., Stober, I., 2022: Assessment of deep geothermal research and development in the Upper Rhine Graben. *Geothermal Energy*, **10** (18), a. 00226.
- Fričovský, B., Tometz, L., Fendek, M., 2016: Geothermometry techniques in reservoir temperature estimation and conceptual site models construction: Principles, methods, and application for the Bešeňová elevation hydrogeothermal structure, Slovakia. *Mineralia Slovaca*, **48** (1), 1 – 60.
- Fričovský, B., Vizi, L., Surový, M., Fordinál, K., Zlocha, M., Gregor, M., Fričovská, J., 2020a: Hydrogeotermálne hodnotenie d'urkovskej depresie: Aplikácia princípov trvalo udržateľného rezervoárového manažmentu [manuskript – Čiastková záverečná správa]. Geofond – archív 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., Marcin, D., Černák, R., Blanárová, V., Ujjobbágyová, Z., Bodiš, D., Benková, K., Pelech, O., Fordinál, K., 2020c: Geothermal energy utilization in Slovakia: First insights from sustainability prospective. *Proceedings World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Iceland, 1-12.
- Fričovský, B., Černák, R., 2024: Využitie geotermálnej energie v Košickej kotline: geotermálne stredisko Svinica – Ďurkov. Vyhodnotenie vplyvu navrhovaného Zámeru vo vzťahu ku útvaru geotermálnych vôd SK300170FK Košická kotlina [manuskript – Hydrogeologický posudok pre potreby EIA]. GEOTERM KOŠICE A.S., Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 80 s.
- Fričovský, B., Černák, R., Vizi, L., Fordinál, K., Michalko, J., Bahnová, N., Benková, K., Bottlík, F. and Marcin, D., 2025a: Analýza možností trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku – I. časť. [manuskript – záverečná správa], Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 631 s.
- Fričovský, B., Benková, K., Marcin, D., Černák, R., Kalabová, M., Fričovská, M., Mižák, J., Bottlík, F., Fordinál, K., 2026a: Country Update: Slovakia (Slovak Republic). *Proceedings, World Geothermal Congress 2026*, Calgary, AL, Canada, 1-10.
- Fričovský, B., Vizi, L., Fordinál, K., Černák, R., Kalabová, M., Fričovská, J., Benková, K., Marcin, D., 2026b: Stochastický model katalógu zdrojov a zásob geotermálnej energie na Slovensku: Bánovská kotlina. *Podzemná voda*, **32** (1), 1-18.
- Fričovský, B., Vizi, L., Černák, R., Fričovská, J., Bottlík, F., Mižák, J., Fordinál, K., Benková, K., Marcin, D., Q2/2028: Analýza možností trvalo udržateľného využitia a využívania zdrojov geotermálnej energie na Slovensku – II. časť. [manuskript – Záverečná správa], Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, nepubl.
- Garg, S.K., Combs, J., 2015: A reformulation of USGS volumetric „heat in place“ resource estimation method. *Geothermics*, **55**, 150-158.
- Gasparatos, A., Doll, Ch.N.H., Esteban, M., Ahmed, A., Olang, T.A., 2017: Renewable energy and biodiversity: Implications for transitioning to a Green Economy. *Renewable and sustainable energy reviews*, **70**, 161-184.
- Giulianti, B., Riccardi, U., Hinderer, J., Jousset, P., Pivetta, T., Mortensen, A.K., Bernard, J.D., Schröder, S., Krawczyk, C.M., 2026: Subsurface mass monitoring at Theistareykir geothermal field, Iceland, using hybrid gravimetry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **472**, a. 108539.
- Gkousis, S., Welkenhuysen, K., Compennolle, T., 2022: Deep geothermal energy extraction, a review on environmental hotspots with focus on geo-technical site conditions. *Renewable and sustainable energy reviews*, **162**, a. 112430.
- Grant, M.A., 2014: Stored-heat assessments: a review in a light of field experience. *Geothermal Energy Science*, **2**, 49-54.
- Grant, M.A., 2018: Stored heat and recovery factor reviewed. *Proceedings, 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, CA, USA, 1-8.
- Grant, M.A., Bixley, P.F., 2011: *Geothermal Reservoir Engineering, 2nd Edition*. Elsevier – Academic Press, Amsterdam, NL, 359 s.
- Hackstein, F.V. & Madlener, R., 2021: Sustainable operation of geothermal power plants: why economics matters. *Geothermal Energy*, **9**, a.10:9.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. & Blum, P., 2013: Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy*, **59**, 914-925.
- Haines, T.J., Michie, E.A.H., Neilson, J.E., Healy, D., 2016: Permeability evolution across carbonate hosted normal fault zones. *Marine and Petroleum Geology*, **72**, 62-82.
- Halás Sr. O., Halás Jr. O., Drozd, V., Výboch, M., 2016: Košická kotlina – geotermálna energia: Čiastková záverečná správa a výpočet množstiev vôd [manuskript – Čiastková záverečná správa]. SLOVGEOTERM a.s., Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava ,58 s.
- Heasler, H.P., Jaworowski, C., and Foley, D., 2009, Geothermal systems and monitoring hydrothermal features. In: Young, R., - Norby, L. (Eds.): *Geological Monitoring*. Geological Society of America, 105–140.
- Herms, I. , Caldera, N. 1, Arnó, I. 1, Fernández-Canteli, P. 2, García-Crespo, J. 2, Carrión-Ocaña, E., Ramalho, E. 3, Carvalho, J.3, Nádor, A.4, Steiner, C.5, Janků, L.6, Koevoets, M.J. 7 and rest of GSEU-WP3 Team., 2025: Deep geothermal resources in the Pan-European Atlas of Sustainable GeoEnergy Capacities (GSEU project): The Play-based Exploration Pyramid concept. *Proceedings, European Geothermal Congress 2025*, Zurich, Switzerland, 1-7.
- Herms I.1, Caldera N., Arnó G., Fernández-Canteli, P., García-Crespo, J., Carrión-Ocaña, E. , Ramalho, E., Carvalho, J. , Nádor, A., Steiner, C., Janků, L., Koevoets, M.J. and rest of GSEU-WP3 Team, 2026: Mapping deep geothermal resources in Europe by European geological surveys using an adapted play-based exploration pyramid within the Horizon Europe co-founded GSEU Project. *Proceedings, World Geothermal Congress 2026*, Calgary, AL, Canada, 1-5.

- Hersir, G.P., Bjornsson, A., 1991: *Geophysical exploration for geothermal resources. Principles and application. Textbook*, UNU Geothermal Training Programme / Orkurstofnun – National Energy Authority, Reykjavik, Iceland, 95 s.
- Hók, J., Pelech, O., Slobodová, Z., 2013: Kinematická analýza horninových komplexov veporika a hronika v oblasti sklenoteplického ostrova (Stredoslovenské neovulkanity). *Acta Geologica Slovaca*, **5** (2), 141-153.
- Holzbecher, E.O., 1998: *Modeling density-driven flow in porous media*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 285 s.
- Hunt, T., Bowyer, D., 2007: Reinjection and gravity changes at Rotokawa geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, **36** (5), 421-435.
- 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.-P., 2014: *Heat generation and transport in the Earth*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 490 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.
- 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.
- Kimura S., Schubert G., Straus, J.M. 1986: Route to chaos in porous-medium thermal convection. *Journal of Fluid Mechanics*, **166**, 305-324.
- Kjaran, S.P., Eliasson, J., 2008: *Geothermal reservoir engineering, 6th Edition*. UNU Geothermal Training Programme, Reykjavik, Iceland, 248 s.
- Klago, M., Matejčeková, E., 1988: Sklené Teplice – ochranné pásma, vyhľadávacie HGP [manuskript – Záverečná správa]. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 189 s.
- Konečný, V. (ed.), Lexa, J., Halouzka, R., Hók, J., Vozár, J., Dublan, L., Nagy, A., Šimon, L., Havrila, M., Ivanička, J., Hojstričová, V., Mihaliková, A., Vozárová, A., Konečný, P., Kováčiková, M., Filo, M., Marcin, D., Klukanová, A., Liščák, P. a Žáková, E., 1998: *Vysvetlivky ku geologickej mape Štavnických vrchov a Pohronského Inovca (štiavnický stratovulkán) 1: 50 000 I, II*. Geol. služba SR, Bratislava, 473 s.
- Konečný, V., Hók, J., Lexa, J., Král, M., Remšík, A., 2000a: Žiarska kotlina - Mapa hĺbky triasových karbonátov hronika (v podloží melafýrovej série) a teploty na ich povrchu, 1 : 50 000. In: Remšík et al.: Regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie Žiarskej kotliny [manuskript – Záverečná správa]. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 94 s.
- Konečný, V., Hók, J., Lexa, J., 2000b: Žiarska kotlina - Mapa hrúbky triasových karbonátov hronika (v podloží melafýrovej série), 1 : 50 000. In: Remšík et al.: Regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie Žiarskej kotliny [manuskript – Záverečná správa]. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 94 s.
- Kordík, J., Fričovská, J., 2025: Aktualizácia prahových hodnôt vybraných ukazovateľov pre útvary podzemných vôd. Stanovenie požadovaných a prahových hodnôt pre geotermálne útvary podzemných vôd [manuskript – Geologická štúdia]. ŠGÚDŠ, Bratislava, 100 s.
- Kristmánsdóttir, H., 2009: *Chemical monitoring in low- and high- geothermal fields: GEO604 coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 97 s.
- Kristmánsdóttir, H., Ármannsson, H., 2003: Environmental impacts of geothermal energy utilization. *Geothermics*, **32**, 451-461.
- Kumagai, N., Tanaka, T., Kitao, K., 2004: Characterization of geothermal fluid flows at Sumikawa geothermal area, Japan, using two types of tracers and an improved multi-path model. *Geothermics*, **33**, 257-275.
- Lexa, J., Halouzka, R., Havrila, M., Hanzel, V., Kubeš, P., Liščák, P. a Hojstričová, V., 1998: *Vysvetlivky ku geologickej mape Kremnických vrchov 1 : 50 000*. Geol. služba SR, Vyd. D. Štúra, 308 s.
- Limberger, J., Boxem T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calgano, P., Beekman, F., Cloething, S., van Wees, J.-D., 2018: Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 961-975.
- Liu, Y., Long, X., Liu, F., 2022: Tracer test and design optimization of doublet system of carbonate geothermal reservoirs. *Geothermics*, **105**, a. 102533.
- Liu, B., Wang, J., Wang, P., Jing, Ch., Liu, Y., Jia, K., 2026: Study on the tracer monitoring method for production and injection wells in sandstone geothermal reservoirs. *Geothermics*, **140**, a. 103711.

- Lopez, S., Hamm V., Le Brun, M., Schaper, L., Boissier, F., Cotiche, C., Giuglaris, E., 2010: 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris basin, France. *Geothermics*, **39** (4), 339-356.
- Lukaj, M., Burián, J., Daubner, J., Kámen, M., Petr, K., Šuchová, M., Januš, J., 1983: Štiavnicko-hodrušský rudný obvod – hydrogeológia [manuskript – Záverečná správa]. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Maďar, D., Grand, T., Weiss, K., Šefara, J., 1999: Regionálne hydrotermálne zhodnotenie Žiarskej kotliny, etapa regiónálnej geológie – geofyzikálny prieskum [manuskript – Záverečná správa]. ESPRIT s.r.o., Banská Štiavnica, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Majorowicz, J., Moore, M., 2014: The feasibility and potential of geothermal heat in the deep Alberta foreland basin – Canada for CO2 savings. *Renewable Energy*, **66**, 541-549.
- Manzella, A., Bonciani, R., Allansdottir, A., Botteghi, S., Donato, A., Giamberini, S., Lenzi, A., Paci, M., Pellizzone, A., Scrocca, S., 2018: Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics*, **72**, 232-248.
- Marcin, D., Benková, K., Fričovský, B., 2016: Hodnotenie útvarov geotermálnych vôd Slovenska – aktualizácia [manuskript – Záverečná správa]. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 56 s.
- Marcin, D., Benková, K., Fričovský, B., Bodiš, D., Bottlík, F., Kordík, D., Stríček, I., 2020: Hodnotenie stavu geotermálnych útvarov podzemných vôd na území Slovenskej republiky [manuskript – Záverečná správa]. Geofond – archív ŠGÚDŠ Bratislava.
- Marini, L., 2000: *Geochemical techniques for the exploarion and exploitation of geothermal energy*. Universita degli Studi di Genova, Taliansko, 82 s.
- Maťo, M., Šujan, M., 2014: Žiarska kotlina – termálne podzemné vody so stavom k 30. 6 2014 [manuskript – Závečená správa]. EMX Slovakia s.r.o., Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 89 s.
- McKay, A.T., Feliks, M.E.J., Roberts, J.J., 2019: Life cycle assessment of the carbon intensity of deep geothermal heat systems: A case study from Scotland. *Science of The Total Environment*, **685**, 208-219.
- Menjoz, A., Sauty, J.P., 1982: Characteristics and effects of geothermal resource exploitation. *Journal of Hydrogeology*, **56**, 49-59.
- Milicich, S.D., Pearson-Grant, S.C., Alcaraz, S., White, P.A., Tschritter, C., 2018: 3D geological modelling of the Taupo Volcanic Zone as a foundation for a geothermal reservoir model. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, **61** (1), 79-95.
- Mitjanas, G., Walsh, J.J., Roca, E., Alías, G., Queralt, P., Ledo, J., Piña-Varas, P., 2024: The importance of structural complexity in the localization of geothermal systems: A case study along the Valles-Penedes Fault in the Catalan Coastal Ranges (NE Spain). *Geothermics*, **116**, a. 103855.
- Moeck, I.S., 2014: Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Geothermics*, **37**, 867-882.
- Moeck, I.S., Dussel, M., Weber, J., Schington, 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**, 1-10.
- Moeck, I.S., Bendall, B., Minning, Ch., Manzella, A., Yasukawa, K., 2020: Geothermal play typing – current development and future trends of a modern concept for geothermal resources assessment. *Proceedings, World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Iceland, 1-6.
- 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.
- Moran, M.J., Shapiro, H.N., 2006: *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5th Edition*. John Wiley & Sons, New York, USA, 845 s.
- Muffler, L.P.J., Cataldi, R., 1978: Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, **7**, 53-89.
- Nottebohm, M., Licha, T., Sauter, M., 2012: Tracer design for tracking thermal fronts in geothermal reservoirs. *Geothermics*, **43**, 37-44.
- O'Sullivan, M.J., Pruess, K., Lippmann, M.J., 2001: State of art of geothermal reservoir simulation. *Geothermics*, **30**, 395-429.
- O'Sullivan, M.J., Yeh, A., Mannington, W., 2010: Renewability of geothermal resources. *Geothermics*, **39** (4), 314-320.
- Orvan, J., Slovík, J., Potyš, Z., Frnčo, M., 1967: Vyhne - termálne vody - hydrogeologický štruktúrny vrt H-1, vyhľadávaci HGP [manuskript – Záverečná správa]. IGHP Žilina, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 20 s.
- Peña-Domínguez, J., Negrete-Aranda, R., Neumann, F., Contreras, J., Spelz, R.M., Vega-Ramírez, L.A., González-Fernández, A., 2022: Heat flow and 2D multichannel seismic reflection survey of the Devils Hole geothermal reservoir in Wagner basin, northern Gulf of California. *Geothermics*, **103**, a. 102415.

- Portier, N., Hinderer, J., Riccardi, U., Ferhart, G., Calvo, M., Abdelfettah, Y., Heimlich, Ch., Bernard, J.-D., 2018: Hybrid gravimetry monitoring of Soultz-sous-Forêts and Rittershoffen geothermal sites (Alsace, France). *Geothermics*, **76**, 201-219.
- Prochazka, B.G., O'Neil, S.T., Coates, P.S., 2023: A Bayesian multi-stage modelling framework to evaluate impacts of energy development on wildlife populations: an application to greater sage-grouse (*Centrocercus urophasianus*). *MethodsX*, **10**, a. 102023.
- Rahman, M., Jones, F.W., Lam, H.L., Hutchence, K., Vigrass, L.W., 1984: Temperature front progression associated with a geothermal well doublet: a numerical study. *Geothermics*, **13** (4), 319-331.
- Ramesh P.S., Torrance K.E., 1993: Boiling in a porous layer heated from below: effects of natural convection and a moving liquid/two-phase interface. *Journal of Fluid Mechanics*, **257**, 289-309.
- Rashid, F., Hussein, D., Lorinczi, P., Glover, P.W.J., 2023: The effect of fracturing on permeability in carbonate reservoir rocks. *Marine and Petroleum Geology*, **152**, a.106240.
- Reimus, P., Caporuscio, F., marina, O., Janney, D., 2020: Field demonstration of the combined use of thermally-degrading and cation-exchanging tracers to predict thermal drawdown in a geothermal reservoir. *Geothermics*, **83**, a. 101712.
- Remšík, A., Fendek, M., Lexa, J., Hók, J., 1997: Geologický projekt geotermálneho vrtu RGŽ-2 Žiar nad Hronom [manuskript – Záverečná správa]. ZSNP GEOTHERMAL s.r.o., Žiar nad Hronom, nestr.
- Remšík, A., Maďar, D., Grand, T., Konečný, V., Šefara, J., Král, M., Vrana, K., Weiss, K., Marcin, D., Helma, J., Lexa, J., 1998: Región Banská Štiavnica – prognózy minerálnych a termálnych vôd pre kúpeľníctvo, rekreáciu a cestovný ruch [manuskript – Záverečná správa]. ESPRIT s.r.o. Banská Štiavnica, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Remšík, A., Konečný, V., Fendek, M., Král, M., Lexa, J., Hók, J., Maďar, D., Vika, K., Drozd, V., 2000a: Regionálne hydrogeotermálne zhodnotenie Žiarskej kotliny [manuskript – Záverečná správa]. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 94 s.
- Remšík, A., Helma, J., Marcin, D., 2000b: Niektoré poznatky o geotermálnych a minerálnych vodách v regióne Banská Štiavnica. *Podzemná voda*, **6** (2), 93-101.
- Ren, Y., Kong, Y., Pang, Z., Wang, Y., 2023: A comprehensive review of tracer tests in enhanced geothermal systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, **128**, a. 113393.
- Rose, P.E., Benoiu, W.R., Kilbourn, P.M., 2001: The application of the polyaromatic sulfonates as tracers in geothermal reservoirs. *Geothermics*, **30**, 617-640.
- Rybach, L., 2022: Geothermal sustainability or heat mining? *International Journal of Terrestrial Heat Flow and Applied Geothermics*, **4** (1), 15-25.
- Rybach, L., Mégel, T., Eugster, W.J., 1999: How renewable are geothermal resources? *Geothermal Resources Council Transactions*, **23**, 563-567.
- Sahli A., Moyne Ch, Stemmelen D., 2009: Boiling stability in a porous medium heated from below. *Transport in Porous Medium*, **82**, 527-545.
- Sajkowski, L., Seward, T.M., Mountain, B.W., Marynowski, L., 2022: The stability of polyaromatic naphthalene sulfonates in hydrothermal solutions to 330 °C at equilibrium saturated vapour pressure. *Geothermics*, **104**, a. 102437.
- Sezai I., 2005: Flow patterns in a fluid-saturated porous cube heated from below. *Journal of Fluid Mechanics*, **523**, 393-410.
- Sanyal, S.K., Sarmiento, Z., 2005: Booking geothermal energy reserves. *Geothermal Resources Council Transactions*, **29**, 467-474.
- Sanyal, S.K., Morrow, J.W., 2010: Quantification of geothermal resource risk – a practical perspective. *Geothermal Resource Council Transactions*, **34**, 125-130.
- Sheridan, M.F., Satkin, R.L., Wohletz, K.W., 1980. Geothermal resource evaluation at Castle Hot Spring [manuscript -Final Report]. Arizona Geological Survey, Tuscon, AZ, 57 s.
- Shook, G.M., Ansley, S.L., Wylie, A., 2004: *Tracers and Tracer Testiong: Design, Implementation and Interpretation Methods*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls, Idaho, 36 s.
- Shortall, R., Davidsdottir, B., Axelsson, G., 2015: Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **44**, 391-406.
- 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**, a. 110750.
- Sorey, M.L., Nathenson, M., Smith, C., 1983: Methods for assessing low temperature geothermal resources. In: Reed, M.J (Ed): Assessment of Low-Temperature Geothermal Resources of the United States, 1982. *U.S. Geological Survey Circular* **892**, 17-30.

- Spycher, N., Peiffer, L., Sonnenthal, E.L., Saldi, G., Reed, M.H., Kennedy, B.M., 2014: Integrated multicomponent solute geothermometry. *Geothermics*, **51**, 113-123.
- Stefansson, V., Axelsson, G., Sigurdsson, Ó., Kjaran, S.P., 1995: Geothermal reservoir management in Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Florence, Italy, 1-6.
- Stopa, J., Wojnarowski, P., 2006: Analytical model of cold water front movement in a geothermal reservoir. *Geothermics*, **35** (1), 59-69.
- Struňák, V., Pavúr, K., Faltin, M., 1965: Sklené Teplice – hydrogeologický prieskum minerálnych vôd; predbežný HGP. Účel: odvíranie troch hydrogeologických vrtov ST-1, ST-2 a ST-3 [manuskript – Záverečná správa]. GÚDŠ, Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 24 s.
- Suzuki, A., Niibori, Y., Formin, S., Chugunov, V., Hashida, T., 2015: rediction of reinjection effects in fault-related subsidiary structures by using fractional derivative-based mathematical models for sustainable design of geothermal reservoirs. *Geothermics*, **57**, 196-204.
- Šarik, I., 2006: Možnosti využívania geotermálnej vody z vrtu LKC-4 Lukavica, odborný HG posudok [manuskript – Hydrogeologický posudok]. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 6 s.
- Šujan, M., Vitaloš, R., Hók, J., 2011: Žiarska kotlina: termálne podzemné vody, reinterpretácia seizmických meraní [manuskript – Čiastková záverečná správa]. EQUIS s.r.o. Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 44 s.
- Šujan, M., Rybár, S., Hók, J., Sliva, L., Král, M., Šipka, F., 2020: Žiarska kotlina: 2D seizmický prieskum. Prieskumné územie Lovča – geotermálne vody [manuskript – Čiastková záverečná správa]. EQUIS s.r.o. Bratislava.
- Tomasini-Montenegro, C., Santoyo-Castelazo E., Gujba, H., Romero, R.J., Santoyo, E., 2017: Life cycle assessment of geothermal power plant generation technologies: An updated review. *Applied Thermal Engineering*, **114**, 1119-1136.
- Ungemach, P., Antics, M., Papachristou, M., 2005: Sustainable geothermal reservoir management. *Proceedings, World Geothermal Congress 2005 Antalya*, Turkey, 1-9.
- Ungemach, P., Antics, M., Lalos, P., 2009: Sustainable geothermal reservoir management practice. *Geothermal Resources Council Transactions*, **33**, 885-891.
- Valdimarsson, P., 2009: *Direct use of geothermal resources: GEO605a coursebook*. RES The School for Renewable Energy Science, Akureyri, Island, 106 s.
- Vass, D., 2002: *Litostratigrafia Západných Karpát: neogén a budínsky paleogén*. ŠGÚDŠ, Bratislava, 202 s.
- Vizi, L., Fričovský, B., 2023: Geostatistical Simulation of Reservoir Convection Indicators in Ďurkov Hydrogeothermal Structure (Slovakia). *Proceedings, 48th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, USA, 1-10.
- Vrana, K., Skaviniak, M., 2013: Obec Vyhne – stanovenie využiteľného množstva termálnej vody v kategórii B pre vrth H-1, podrobný HGP [manuskript – Záverečná správa]. HYDEKO-KV a.s., Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 94 s.
- Vranovská, A., 2001: Ďurkov - hydrogeologické a technologické poznatky z dlhodobej skúšky GTD-1, GTD-2 a GTD-3, podrobný HGP [manuskript – Záverečná správa]. SLOVGEOTERM a.s., Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 19 s.
- Vranovská A., Bondarenková,Z., Král M., Drozd, V., 1999a Košická kotlina - štruktúra Ďurkov - hydrogeotermálne zhodnotenie, vyhl'adávací prieskum [manuscript – Záverečná správa]. SLOVGEOTERM a.s., Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 90 s.
- Walker, J.D., Sabin, A.E., Unruh, J.R., Combs, J., Monastero, F.C., 2005: Development of generic occurrence models for geothermal prospecting. *Geothermal Resources Council Transactions*, **29**, 309-313.
- Wang, R.Y., Shi, J., 1990: A reference value method of the corresponding states principle for the prediction of latent heats of vaporization of pure liquids. *Thermochimica Acta*, **169**, 293-246.
- Watson, A., 2013: *Geothermal engineering: Fundamentals and applications*. Springer Science, New York, USA, 346 s.
- Williams, A.F., Lawless, J.V., Ward, M.A., Holgate, F.L., Larking, A., 2010: A code for geothermal resources and reserves reporting. *Proceedings, World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 1-7.
- Williams, C.F., Reed, M.J., Anderson, A.F., 2011: Updating the classification of geothermal resources. *Proceedings, 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California, 1-8.
- Wu, G., Zhao, K., Qu, H., Scarselli, N., Zhang, Y., Han, J., Xu, Y., 2020: Permeability distribution and scalling in multi-stages carbonate damage zones: Insights from strike-slip fault zones in the Tarim Basin, NW China. *Marine and Petroleum Geology*, **114**, a. 104208.

- Xu, K., Yu, B., Gong, H., Ruan, Z., Pan, Y., Ren, Y., 2015: Carbonate reservoirs modified by magmatic intrusions in the Bachu area, Tarim Basin, NW China. *Geoscience Frontiers*, **6**, 779-790.
- Xujun, G., Wei, Ch., Bo, M., Mo, S., Zhen, H., Wenbin, H., Lingbao, W., 2026: Thermal depletion dynamics and heat recovery mechanisms in the medium-deep geothermal system. *Case Studies in Thermal Engineering*, **82**, a. 108034.
- Zachora-Bulawska, A., Kedzior, R., Operacz, A., 2024: Spent geothermal water discharge to rivers: Risk or environmental benefit? *Science of the Total Environment*, **954**, a. 176527.
- Zarrouk, S.J., McLean, K., 2019: *Geothermal well test analysis. Fundamentals, Applications and advanced techniques*. Elsevier – Academic Press, London, UK, 348 s.
- Zbořil, L., Filo, M., Májovský, J., Husák, L., Hricko, J., Orlický, O., Paulovičová, M., Vybíral, V., Šalanský, K., Pešák, R., Valtr, V., Forgáč, J., Franko, O., Karolus, K., Konečný, V., 1971: Geofyzikálny výskum stredoslovenských neovulkanitov v oblasti Štiavnicke vrchy, Pohronský Inovec, Vtáčnik [manuskript – Záverečná správa]. Geofyzika n.p. Brno, závod Bratislava. Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Zbořil, L., Husák, L., Kubeš, P., Lizoň, I., Šefara, J., 1983: Geofyzikálny výskum hydrogeotermálnej štruktúry Sklené Teplice – Žiar nad Hronom [manuskript – Záverečná správa]. Geofyzika n.p. Brno, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava.
- Zbořil, L., Tkáčová, H., Puchnerová, M., 1984: Geofyzikálny prieskum hydrogeotermálnych štruktúr Topoľčianky – okolie [manuskript – Záverečná správa]. GEOFYZIKA n.p. Brno, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 32 s.
- Zhang, H., Wang, G., Zhang, W., Zhao, J., 2026: Differences in geothermal fluids in sandstone and carbonate geothermal reservoirs based on isotope characteristics. *Sustainability*, **18 (2)**, a. 766.
- Zhang, L., Luo, X., Vasseur, G., Yu, Ch., Yang, W., Lei, Y., Song, Ch., Yu, L., Yan, J., 2011: Evaluation of geological factors in characterizing fault connectivity during hydrocarbon migration: Application to the Bohai Bay Basin. *Marine and Petroleum Geology*, **28 (9)**, 1634-1647.
- Zucchi, M., Tursi, F., Brogi, A., Liotta, D., Spiess, R., Caggianelli, A., Ventrucci, F., Langone, A., 2023: Syn-tectonic contact aureole and metasomatic reaction zones in carbonate and pelitic host rocks (Elba Island, Italy). *Tectonophysics*, **853**, a. 229782.
- Žitňan, M., 2009: Vyhne – vrt HGV-3 – využiteľné množstvá podzemných vôd v kategórii B, doplnkový HGP [manuskript – Záverečná správa]. AQUA-GEO s.r.o., Bratislava, Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 43 s.
- Žitňan, M., 2011: Sklené Teplice – vrt STH-2 – využiteľné množstvá podzemných vôd v kategórii B, podrobný HGP [manuskript – Záverečná správa]. AQUA-GEO s.r.o., Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 63 s.
- Žitňan, M., 2012: Vyhne – Hotel Termál – vrt H-2 – čerpacia skúška pre stanovenie využiteľných množstiev podzemných vôd v kategórii B, doplnkový HGP [manuskript – Záverečná správa]. AQUA-GEO s.r.o., Geofond – archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 46 s.