
**HYDROGEOLOGICKÉ MODELY
HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ
PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ,
PASPORT AKTUALIZOVANÉHO
DETAILNÍHO MODELU
– LOKALITA HORKA**

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Autoři: Uhlík J.
a kolektiv

PROGEO, s.r.o.
Roztoky, 2020

Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Název dílčího projektu: HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ

Název dílčí etapové zprávy: HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT AKTUALIZOVANÉHO DETAILNÍHO MODELU – LOKALITA HORKA

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: SURAO-476-2020

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2020-ZZ-S3183-043-Hodnoceni2_HGM_Pasport_Horka

ŘEŠITELÉ:

PROGEO, s.r.o.

Autor: Jan Uhlík

Autorský kolektiv: Gvoždík L, Baier J, Milický M, Jankovec J, Polák M

Obsah

1	Úvod	7
2	Charakteristika zájmového území	8
3	Model proudění podzemní vody lokality Horka	11
3.1	Geometrie modelu	11
3.2	Modelové hydraulické charakteristiky horninového prostředí	11
3.3	Okrajové podmínky a srážková infiltrace	14
3.4	Kalibrace modelu	14
3.5	Výsledky hydraulického modelu.....	15
3.5.1	Bilance modelového řešení	15
3.5.2	Hladiny a směry proudění podzemní vody	17
3.5.3	Vymezení oblastí drenáže a infiltrace z prostor HÚ.....	20
3.5.4	Rychlosti a doby zdržení podzemní vody	21
4	Transportní model.....	23
5	Závěr	25
6	Literatura	26

Seznam obrázků:

Obr. 1	Rozsah oblasti modelu a projektovaného HÚ, zájmové polygony	8
Obr. 2	Hydrogeologické údaje v databázi vrtné prozkoumanosti ČGS	10
Obr. 3	Vodorovný řez z 3D SG modelu - rozložení horninových typů a dokumentace aktualizovaného průběhu zlomových pásem v úrovni HÚ.....	13
Obr. 4	Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody (MODFLOW-USG)	15
Obr. 5	Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev	16
Obr. 6	Drénované množství podzemní vody na zvolených povodích	16
Obr. 7	Modelové hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě – model MODFLOW-USG ..	17
Obr. 8	Modelové hladiny podzemní vody v předpokládané úrovni HÚ - 23. modelová vrstva aktualizovaného detailního modelu (úroveň -25 až -50 m n. m.) - model MODFLOW-USG ..	18
Obr. 9	Hydraulický gradient v úrovni podzemní části HÚ (-34.5 m n. m.)	19
Obr. 10	Vypočtená místa drenáže pro podzemní vodu z úrovně projektovaného HÚ	20
Obr. 11	Rozložení průměrných modelových rychlostí proudění z prostoru HÚ do míst drenáže [$\text{m} \cdot \text{rok}^{-1}$]	22
Obr. 12	Doba dotoku a délka trajektorie částic z prostor HÚ do míst drenáže s vyznačenými $Q_{0,1}$ a $Q_{0,9}$	22

Obr. 13 Rozložení relativních modelových koncentrací v úrovni HÚ (-34,5 m n. m.) a v přípovrchové vrstvě	24
---	----

Seznam tabulek:

Tab. 1 Tabulka horninových typů dle podkladů ČGS, parametry K_0 pro výpočet $K(z)$	12
--	----

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SURAO TZ 476/2020

Seznam použitých zkratk:

3D	trojrozměrný
AV ČR	Akademie věd České republiky
ČGS	Česká geologická služba
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DIBAVOD	digitální databáze vodohospodářských dat
HÚ	hlubinné úložiště
ISVS	Informační systém veřejné správy
RAO	radioaktivní odpad
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
UOS	ukládací obalový soubor
VJP	vyhořelé jaderné palivo

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení: SÚRAO TZ 476/2020
--	--	--

1 Úvod

Tato zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu je získat vybraná data, modely, argumenty a další informace potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Praze; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v. v. i.; a společnostmi Arcadis CZ a. s.; PROGEO, s. r. o.; Chemcomex Praha, a. s. a Centrum výzkumu Řež s. r. o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

- i. Chování VJP a forem RAO, nepříjemných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště;
- ii. Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště;
- iii. Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště;
- iv. Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- v. Chování horninového prostředí;
- vi. Transport radionuklidů z úložiště;
- vii. Další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.

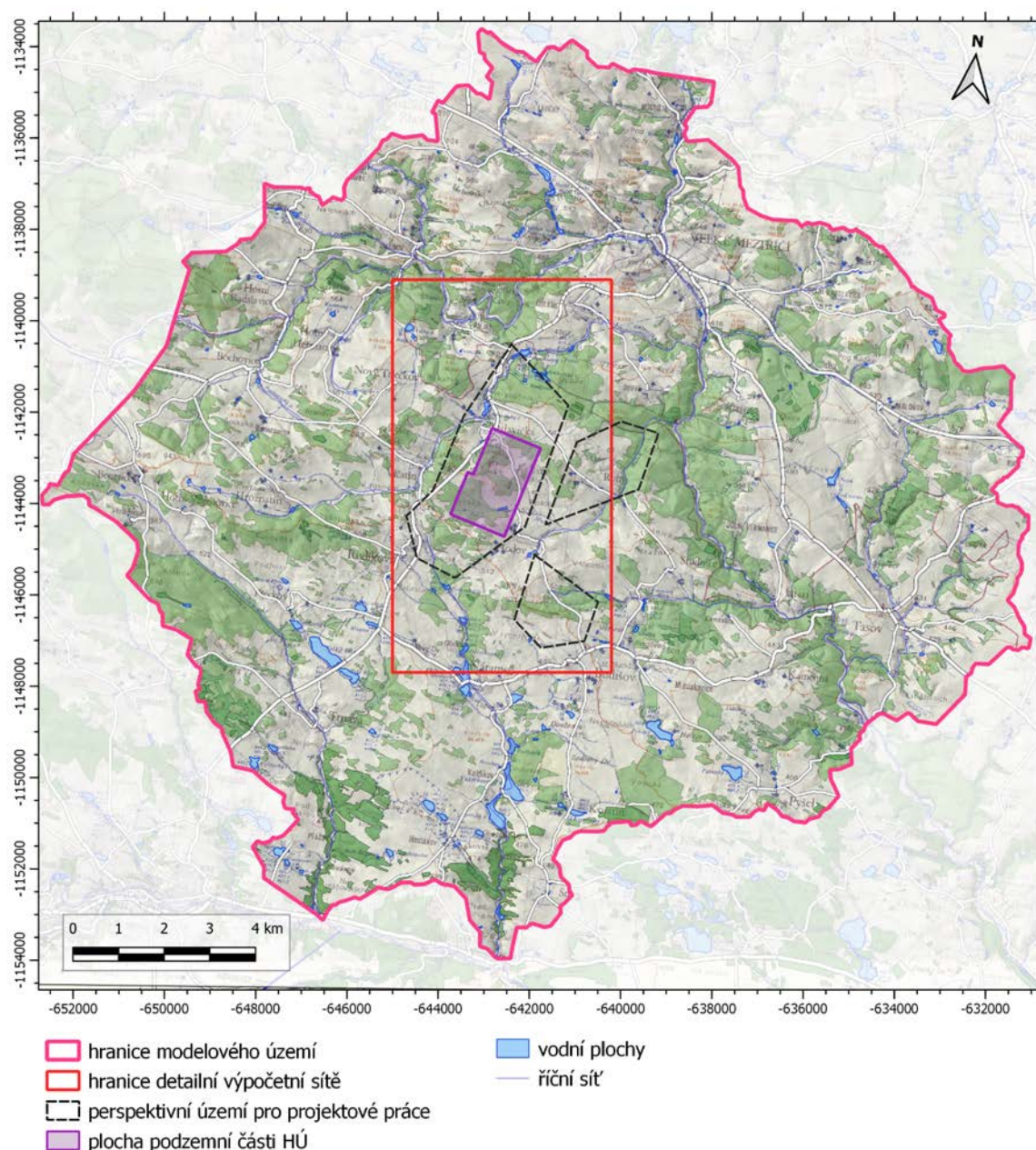
Tato práce vznikla na podkladě projektu „Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti“ (zakázkový list PB-2019-ZL-U3183-043-Hodnoceni2). Předkládaný pasport dokumentuje aktualizaci detailního hydrogeologického modelu a schematizovaného transportního modelu pro lokalitu Horka, která navazuje na zpracování regionálního hydrogeologického modelu lokality (Uhlík et al. 2016) a detailního modelu lokality Horka (Uhlík et al. 2018b).

Metodika zpracování detailních hydrogeologických modelů, je popsána v Uhlík et al. (2018a). Posloupnost vzniklých hydrogeologických modelů lokality je označována pomocí verzí. Verze 1.1 – regionální, 1.2 – detailní a 1.3 – současný zaktualizovaný detailní hydrogeologický model. Aktualizace detailního modelu proudění spočívá ve zpracování a zadání dat z nového strukturního schématu (Mixa et al. 2019). Aktualizace byla provedena na pracovišti PROGEO s využitím softwaru MODFLOW-USG. Aktualizace modelu transportu zohledňuje aktualizované umístění HÚ podle doplňku ke studii umístitelnosti (Zahradník et al. 2019) v polygonu perspektivního území pro projektové práce.

Výsledky hydraulického a transportního modelu jsou využity pro hodnocení potenciálních lokalit HÚ z hlediska klíčových kritérií dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al. 2020).

2 Charakteristika zájmového území

Aktivní oblast modelu pro lokalitu Horka (Obr. 1) byla zvolena tak, aby z hlediska proudění podzemní vody představovala uzavřený bilanční celek. Hranice modelové oblasti byly vedeny po výrazných hydrologických (a hydrogeologických) rozvodnicích. Aktivní modelová plocha (s výpočtem proudění podzemní vody) zaujímá rozlohu 264 km².



Obr. 1 Rozsah oblasti modelu a projektovaného HÚ, zájmové polygony

V roce 2019 bylo na základě aktualizace tektonického schématu (Mixa et al. 2019) aktualizováno umístění podzemní části HÚ. Úložiště je situováno v největším ze tří polygonů perspektivního území pro projektové práce dle Zahradník et al. 2019 (Obr. 1). S přihlédnutím k podkladům České geologické služby (ČGS) je podzemní část HÚ nově vymezena pomocí jediného polygonu o rozloze 2.53 km². Úložné prostory pro HÚ jsou projektovány

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

v hloubce cca 500 m pod terénem v průměrné úrovni -34,5 m n. m. Hranice všech uváděných oblastí a polygonů jsou vykresleny na Obr. 1.

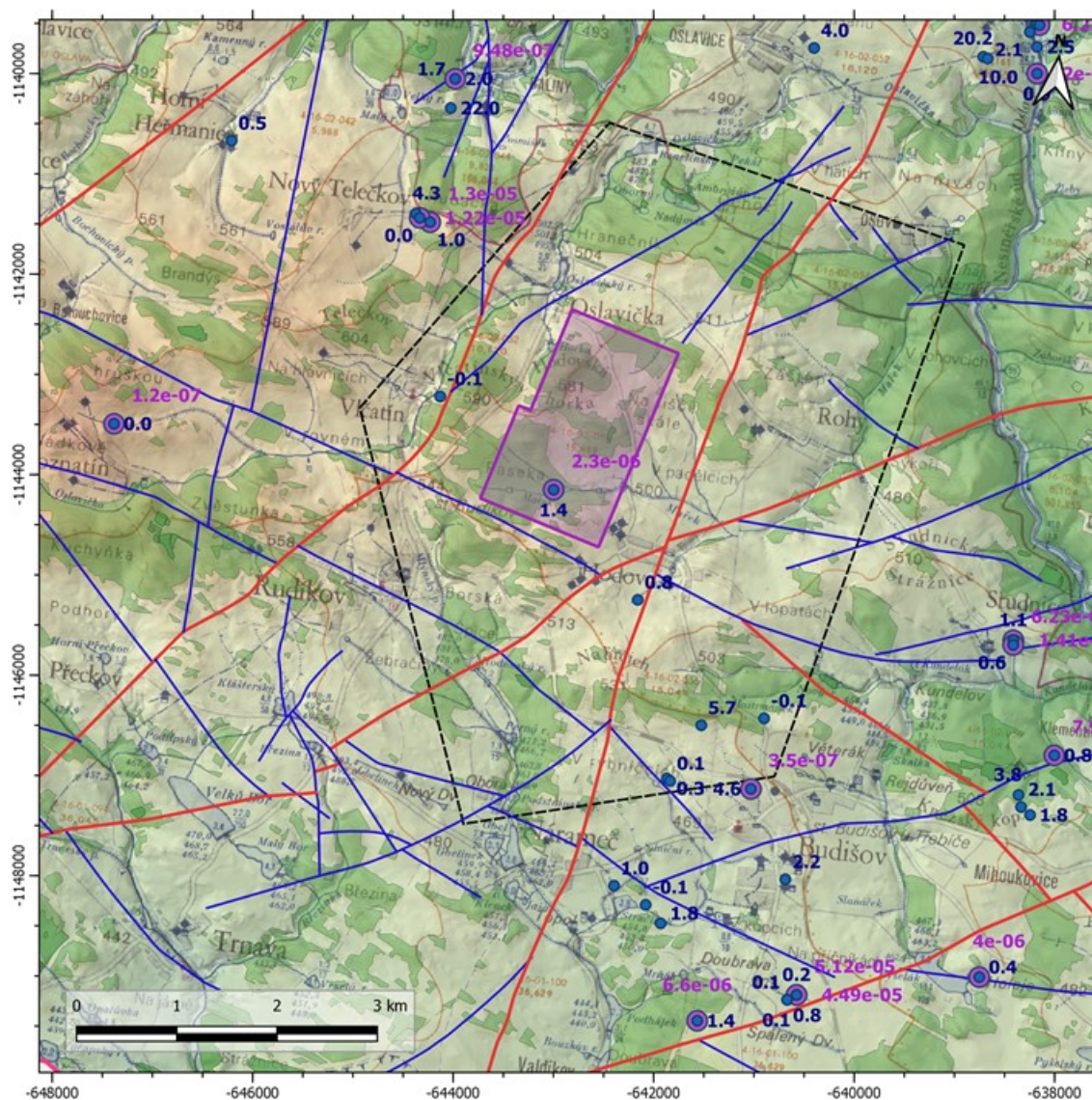
Největší nadmořskou výšku (přesahující 640 m n. m.) mají v modelovém území vrchy Posekání na SZ a Ambrožný na SV. Oba vrcholy leží mimo oblast durbachitového masivu s projektovaným HÚ. Perspektivní území pro projektové práce se nachází v oblasti přírodního parku Třebíčsko s elevacemi Hodovská horka a Vlčatínský vrch. Soutok Klapovského potoka a Jihlavy při J okraji modelového území má výšku 390 m n. m. Minimální nadmořská výška se v modelovém území vyskytuje v údolí Oslavy při JV hranici aktivního modelového území (přibližně 375 m n. m.).

Území lokality Horka spadá do hydrogeologického rajonu 6550 Krystalinikum v povodí Jihlavy. Horninové podloží je tvořeno dominantně amfibol-biotitickými melagranity až melasyenity (durbachity) třebíčského plutonu.

Pro širší zájmovou oblast třebíčského masivu jsou k dispozici pouze omezené bodové hydrogeologické informace do hloubky max. prvních desítek metrů. Vrtý s hydrogeologickými údaji jsou většinou situovány poblíž lidských sídel, konkrétně největší počet z nich je v okolí obce Budišov (Obr. 2). V databázi ČGS – Geofond je v perspektivním území pro projektové práce zaznamenáno pouze 9 hydrogeologických vrtů s maximální hloubkou 69 m. Hladina podzemní vody byla ve vrtech zjištěna obvykle mělce pod úrovní terénu. Hydraulické vodivosti prostředí jsou nejčastěji vyhodnoceny v rozmezí dvou řádů 10^{-5} až 10^{-7} m.s⁻¹ (Obr. 2). Tyto relativně mělké vrtý, které zastihly přípovrchovou zónu rozvolnění puklin s aktivním oběhem podzemních vod ale mají řádově vyšší hydraulickou vodivost ve srovnání s horninovým prostředím v hloubce projektovaného HÚ.

Zdrojem podzemní vody na lokalitě je srážková infiltrace, ke které dochází v celé ploše území. Rozložení efektivní infiltrace je prostorově variabilní. Základní odtok je pro zájmovou oblast udáván velikostí 2,5 l.s⁻¹.km⁻² (Krásný et al. 1982). Drenáž podzemní vody je zprostředkována především povrchovými toky.

Podrobná dokumentace geologických poměrů je uvedena ve zprávě Fraňka (2018) a Mixy et al. (2019), hlavní morfologické, hydrologické a klimatické charakteristiky území uplatněné při realizaci detailního modelu jsou dokumentovány ve zprávě Uhlík et al. (2018b).



hranice modelového území

perspektivní území po projektové práci

plocha podzemní části HÚ

zlomy I. kategorie, úroveň HÚ

zlomy II. kategorie, úroveň HÚ

objekty databáze vrtné prozkoumanosti ČGS

hladina podzemní vody pod terénem [m]

hydraulická vodivost [m/s]

Obr. 2 Hydrogeologické údaje v databázi vrtné prozkoumanosti ČGS

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

3 Model proudění podzemní vody lokality Horka

Aktualizovaný detailní hydrogeologický model lokality je zpracován v softwaru MODFLOW-USG (Panday et al. 2013). Pro přípravu, vyhodnocení, vizualizaci a export výsledků byl aplikován software Groundwater Vistas verze 7 (Rumbaugh a Rumbaugh, 2017). Simulace šíření částic v proudovém poli (particle tracking) byla provedena v programu mod-PATH3DU (Muffels et al. 2014).

Hydrogeologický model je zaměřen na popis proudění podzemní vody vzdáleným polem (od okraje inženýrských bariér do drenážních úseků říční sítě). Aktualizace hydrogeologického modelu spočívá především ve změně rozložení hydraulických parametrů horninového prostředí na základě aktualizovaného tektonického schématu (Mixa et al. 2019).

3.1 Geometrie modelu

Výpočetní síť modelu má obdélníkový tvar s počátkem (levý dolní roh) na souřadnicích $X_{Kr} = -653\,000$, $Y_{Kr} = -1\,154\,000$ v systému S-JTSK. Ve směru os X a Y má výpočetní síť rozměry $22,7 \times 20,8$ km.

Základní výpočetní síť (s pravidelnými elementy 100×100 m) sestává z 208 řádek a 227 sloupců. V okolí projektovaného HÚ je výpočetní síť v ploše $4,8 \times 8,6$ km zahuštěna pravidelnými elementy s velikostí strany 25 m (Obr. 1). Tj. každá výpočetní buňka regionálního modelu je v ploše nahrazena 16 buňkami detailního modelu.

Ve vertikálním směru je doména modelu rozdělena do 13 průběžných (regionálních) modelových vrstev. V prostoru zjemněné výpočetní sítě je ve vertikálním směru druhá až desátá vrstva rozdělena vždy na čtyři dílčí vrstvy. Celkově tak je v prostoru detailní výpočetní sítě v oblasti HÚ vymezeno 40 modelových vrstev. První modelová vrstva reprezentuje oblast přípoверхového zvětrání a rozpojení puklin. Maximální mocnost této vrstvy je 70 m. Báze modelu je v úrovni -1000 m pod hladinou moře a odpovídá bázi zpracovaného 3D strukturně-geologickému modelu (Franěk et al. 2018).

Z celkových 3 140 144 buněk výpočetní sítě modelu je 2 869 133 aktivních (probíhá v nich výpočet proudění podzemní vody).

3.2 Modelové hydraulické charakteristiky horninového prostředí

Metodiku výpočtu a zadání hydraulických charakteristik do modelu detailně popisují Uhlík et al. (2018). Přijátá modelová koncepce popisu proudění podzemní vody uvažuje v prostoru hydrogeologického masivu přítomnost pásem zvýšených hydraulických vodivostí vázaných na všechny aktuálně známé poruchové zóny. Průběh všech poruchových zón zadáných do modelu podle nového tektonického schématu (Mixa et al. 2019) je dokumentován v Obr. 3.

Geometrie těles a hodnoty hydraulické vodivosti K v oblasti přirozeně rozpukaného horninového masivu jsou zadány podle horninových typů zdokumentovaných v 3D SG modelu lokality (Franěk et al. 2018). Horizontální řez strukturně-geologickým modelem v úrovni HÚ je na Obr. 3. Závislost hydraulické vodivosti $K(z)$ [$m \cdot s^{-1}$] na hloubce pod terénem (z) je popsána vztahem (1) převzatým z Gustafson a Liedholm (1989).

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

$$K(z) = K_0 \cdot 10^{\frac{-z}{c}} \quad (1)$$

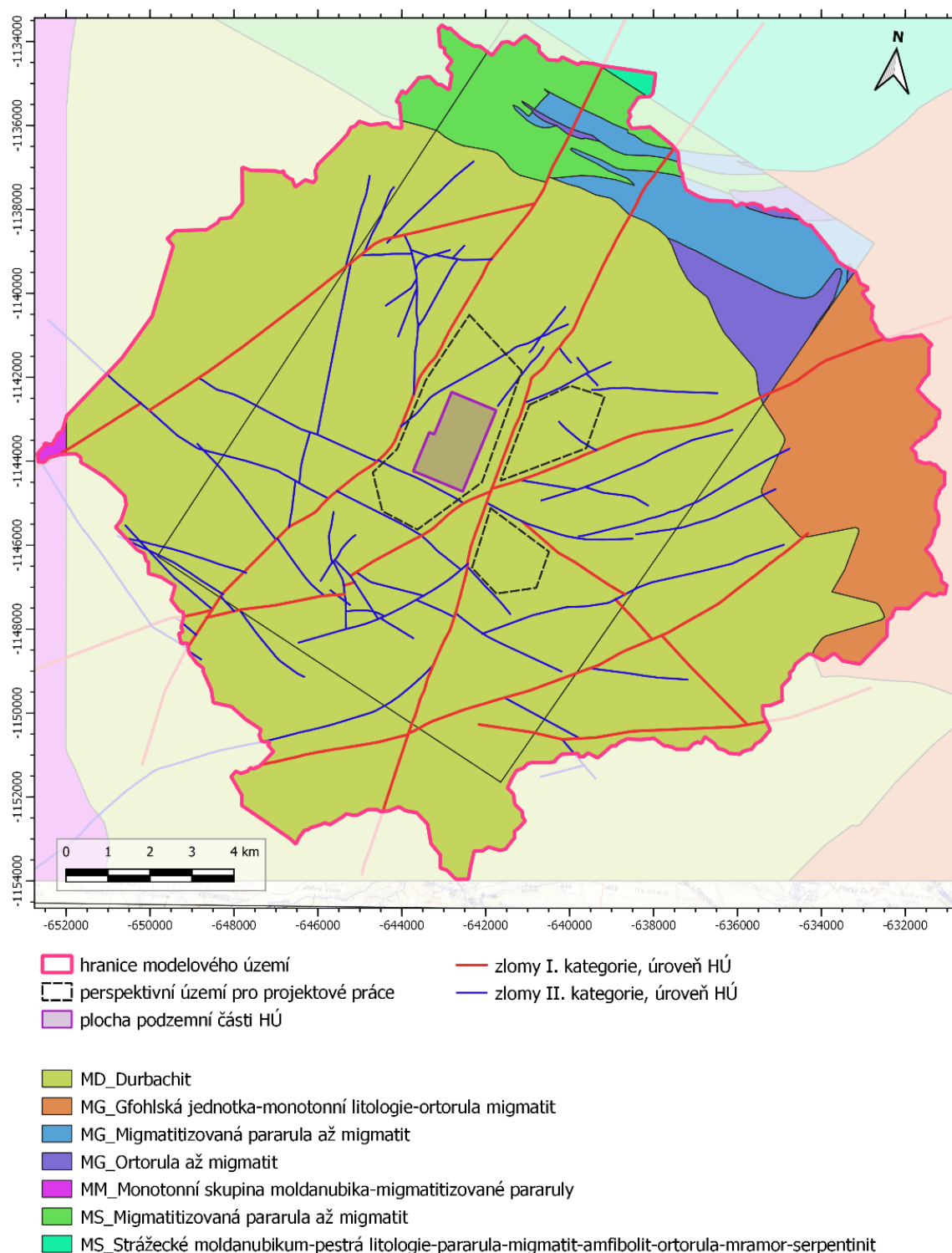
K_0 je tzv. základní hydraulická vodivost bez ovlivnění procesy přípovrchového zvětrání, která vstupuje do hydrogeologických modelů. Výchozí hodnoty parametrů K_0 pro výpočet $K(z)$ aktualizovaného detailního modelu jsou pro jednotlivé horninové typy uvedeny v Tab 1.

Hodnoty K_0 byly ve fázi zpracování regionálních hydrogeologických modelů stanoveny expertním odhadem ČGS s nejistotou dva řády. Do regionálních modelů (Uhlík et al. 2016) vstoupily střední hodnoty zlogaritmovaného rozpětí hydraulické vodivosti K_0 dané výhradně expertním odhadem. Při zpracování detailních hydrogeologických modelů došlo ke snížení hydraulické vodivosti K_0 všech horninových typů u všech lokalit. Podkladem byly změny vodivosti provedené pro lokalitu Kraví hora, docílené v rámci detailní kalibrace pro potřeby bezpečnostního rozboru (Trpková et al. 2017). Daný postup umožnil zachovat vzájemné porovnání výsledků hydrogeologických modelů.

Parametr c (koeficient poklesu K o jeden řád) byl shodně s dalšími posuzovanými lokalitami zadán 675 m. Tato hodnota odpovídá výsledkům modelu pro bezpečnostní rozbor lokality Kraví hora (jediná lokalita s dostupnými hydrogeologickými daty z hloubek projektovaného HÚ, Trpková et al. 2017).

Tab. 1 Tabulka horninových typů, parametry K_0 pro výpočet $K(z)$

Litologická položka 3D SG modelu	K_0 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
MG_Vapenec	1,10E-07
MD_Durbachit	2,20E-08
MD_Aplit	1,10E-08
MD_Granit	1,10E-08
MG_Gfohlska_jednotka-monotonni_litologie-ortorula_migmatit	5,50E-09
MG_Ortorula_az_migmatit	5,50E-09
MG_Serpentinit	4,40E-09
MS_Amfibolit	4,40E-09
MG_Migmatitizovana_pararula_az_migmatit	3,85E-09
MM_migmatitizovane_pararuly	3,85E-09
MS_Migmatitizovana_pararula_az_migmatit	3,85E-09
MS_Strazecke_moldanubikum-pestra_litologie-pararula-migmatit-amfibolit-ortorula-mramor-serpentinit	3,85E-09
zlom I. kategorie	1,00E-07
zlom II. kategorie	1,00E-07
zlom III. kategorie	1,00E-07



Obr. 3 Vodorovný řez z 3D SG modelu - rozložení horninových typů a dokumentace aktualizovaného průběhu zlomových pásem v úrovni HÚ

Hydraulická vodivost aktualizovaných poruchových zón (zlomy I. - III. kategorie dle klasifikace SKB; Andersson et al. 2000) se stejně jako v případě masivu snižuje s hloubkou pod terénem dle vzorce (1). Jednotlivé kategorie zlomů jsou uvažovány s rozdílnou šířkou (1, 10 a 100 m pro zlomy 3., 2., a 1. kategorie) a jejich příspěvek k celkové propustnosti modelových buněk

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

(transmisivité horninového prostředí) je tedy rozdílný. V přípovrchové zóně nejsou poruchová pásma simulována.

Poruchová pásma představují potenciální preferenční cestu - mohou efektivně (z hlediska proudění a transportu) propojovat hlubší a mělké partie horninového masivu. Západní a východní omezení HÚ je dáno zlomy první kategorie (vlčatínský, velkomeziříčský a vidonínský). Význam menších bezejmenných poruchových zón může vzrůstat v místech křížení s dalšími zlomy, nebo s úseky říční sítě (např. pramenní oblastí Mařku).

Do 500 m od okraje HÚ se největší propustnosti zlomových zón mohou vyskytovat na linii vidonínského zlomu, kde tato porucha vstupuje do 500 m obálky úložiště. Maximální modelová hydraulická vodivost v prostoru identifikovaných zlomových zón ve vzdálenosti do 500 m od hranice projektového HÚ v modelu lokality Horka je $1,9 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Modelové hydraulické vodivosti durbachitového masivu bez přítomnosti poruchových zón jsou řádově nižší.

3.3 Okrajové podmínky a srážková infiltrace

Modelový výpočet proudění podzemní vody je podmíněn zadáním okrajových podmínek. V aktualizovaném detailním modelu je vertikální a spodní (báze) hranice modelové domény popsána homogenní okrajovou podmínkou druhého typu (nulového průtoku kolmo na hranici modelu). Model je tak koncipován jako bilančně uzavřený. Všechna infiltrovaná voda je v ploše modelu drénována do říční sítě a nedochází k přetokům podzemní vody přes vnější hranice modelové domény. Zadání okrajových podmínek nedoznalo oproti předchozí verzi modelu změn.

Na horní hranici modelu (terén) je předepsána v celé ploše okrajová podmínka druhého typu (konstantní tok ve směru kolmém k hranici) představující efektivní srážkovou infiltraci. V liniích vodních toků je zadána okrajová podmínka třetího typu. Simulována je tak drenáž podzemní vody z horninového prostředí do říční sítě. Velikost drenáže závisí na velikosti rozdílu zadané hladiny v okrajové podmínce a vypočtené hladiny v horninovém prostředí i na zadaném hydraulickém odporu.

Geometrie modelové sítě vodních toků vychází z digitální databáze vodohospodářských dat (DIBAVOD, VÚV TGM, v.v.i.). Nadmořská výška hladiny toků byla zadána na základě modelu terénu DMR 4G a na základě údajů vodohospodářských map (1:50 000). Toky jsou zadány pouze jako drenážní (vceť povrchové vody do horninového prostředí není simulován).

Distribuce plošné infiltrace v modelu koreluje s rozložením srážkového normálu (poskytnutého ČHMÚ) tak, aby průměrná zadaná infiltrace pro celý model odpovídala infiltraci zadané v regionálním modelu ($2,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$).

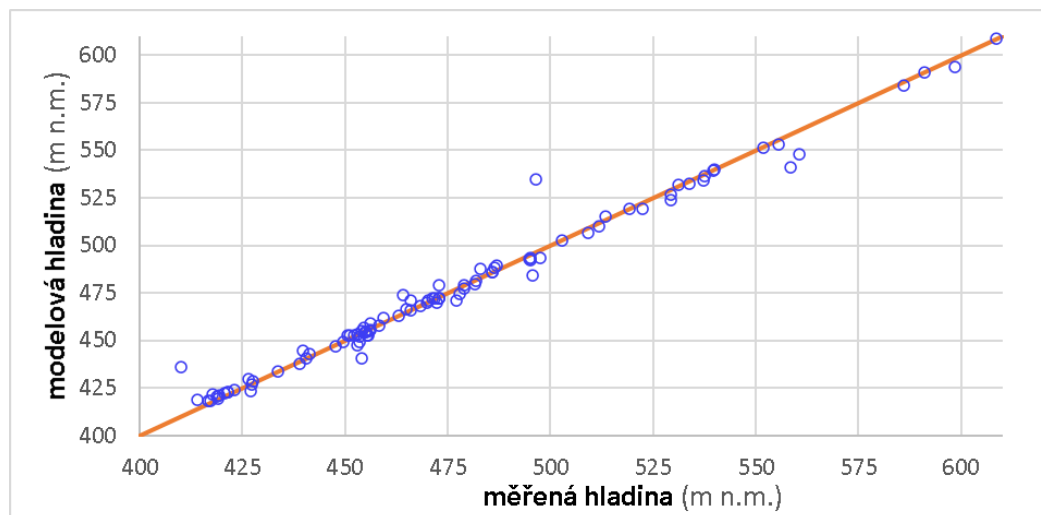
3.4 Kalibrace modelu

Kalibrační data úrovně hladin podzemní vody byla získána z archivních údajů hydrogeologických vrtů databáze ČGS. Pro kalibraci modelové úrovně hladiny podzemní vody bylo vybráno 97 objektů (studny a vrty) s kompletními údaji o měření hladiny podzemní vody. Oproti předchozí verzi modelu (Uhlík et al. 2018b) nedošlo k žádné změně v množství kalibračních dat, ani v metodice kalibrace.

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

Většina měřených údajů reprezentuje úroveň hladiny v přípovrchové vrstvě - v modelu jsou kalibrační údaje hladin zadány především do první, minoritně do druhé modelové vrstvy – v závislosti na hloubce otevřeného úseku vrtu pod terénem.

Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody je znázorněno v grafu na Obr. 4. Dosaženou shodu lze s ohledem na časovou nesouslednost měření i regionální měřítko modelu považovat za velmi dobrou. Celkem u 84 kalibračních bodů byl dosažen rozdíl modelové a měřené hladiny podzemní vody do 5 m, 6 kalibračních bodů má tento rozdíl v rozmezí 5 až 10 m, u 7 kalibračních údajů modelová odchylka od měření přesahuje 10 m.



Obr. 4 Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody (MODFLOW-USG)

3.5 Výsledky hydraulického modelu

3.5.1 Balance modelového řešení

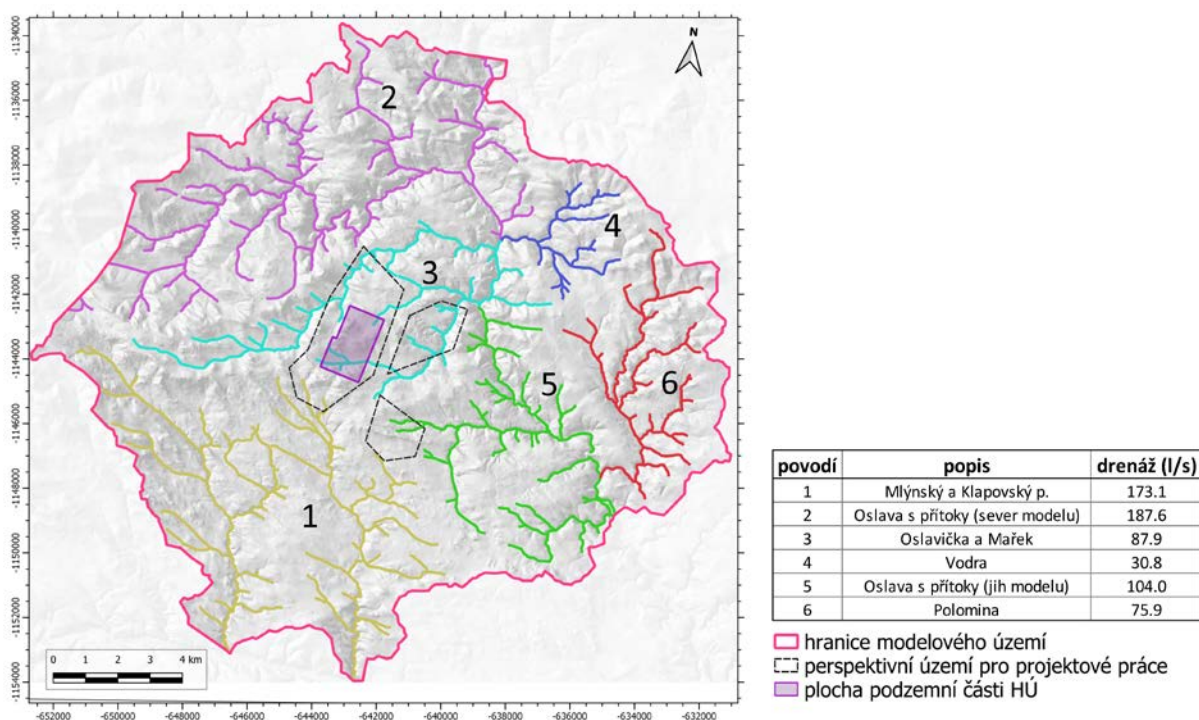
Z celkově infiltrovaného množství $659 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ proudí 89 % infiltrovaného objemu ($588 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) pouze v přípovrchové vrstvě. Z přípovrchové vrstvy do hlubších partií horninového masivu (resp. druhé modelové vrstvy) přetéká $70 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (11%) podzemní vody (Obr. 5).

Množství podzemní vody proudící v prostoru modelu v jednotlivých modelových vrstvách (průběžných v celé ploše modelu i mimo oblast detailního zahuštění sítě) je zobrazeno v grafu na Obr. 5. Pro každou vrstvu je uveden přetok přes její bázi do hlubší modelové vrstvy. Do modelové vrstvy, odpovídající projektové úrovni hlubinného úložiště (7. průběžná vrstva), přetéká přes bázi šesté modelové vrstvy $4,41 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ podzemní vody. Specifický průtok přes půdorysnou plochu HÚ vychází $2,3\cdot 10^{-2} \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$.



Obr. 5 Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev

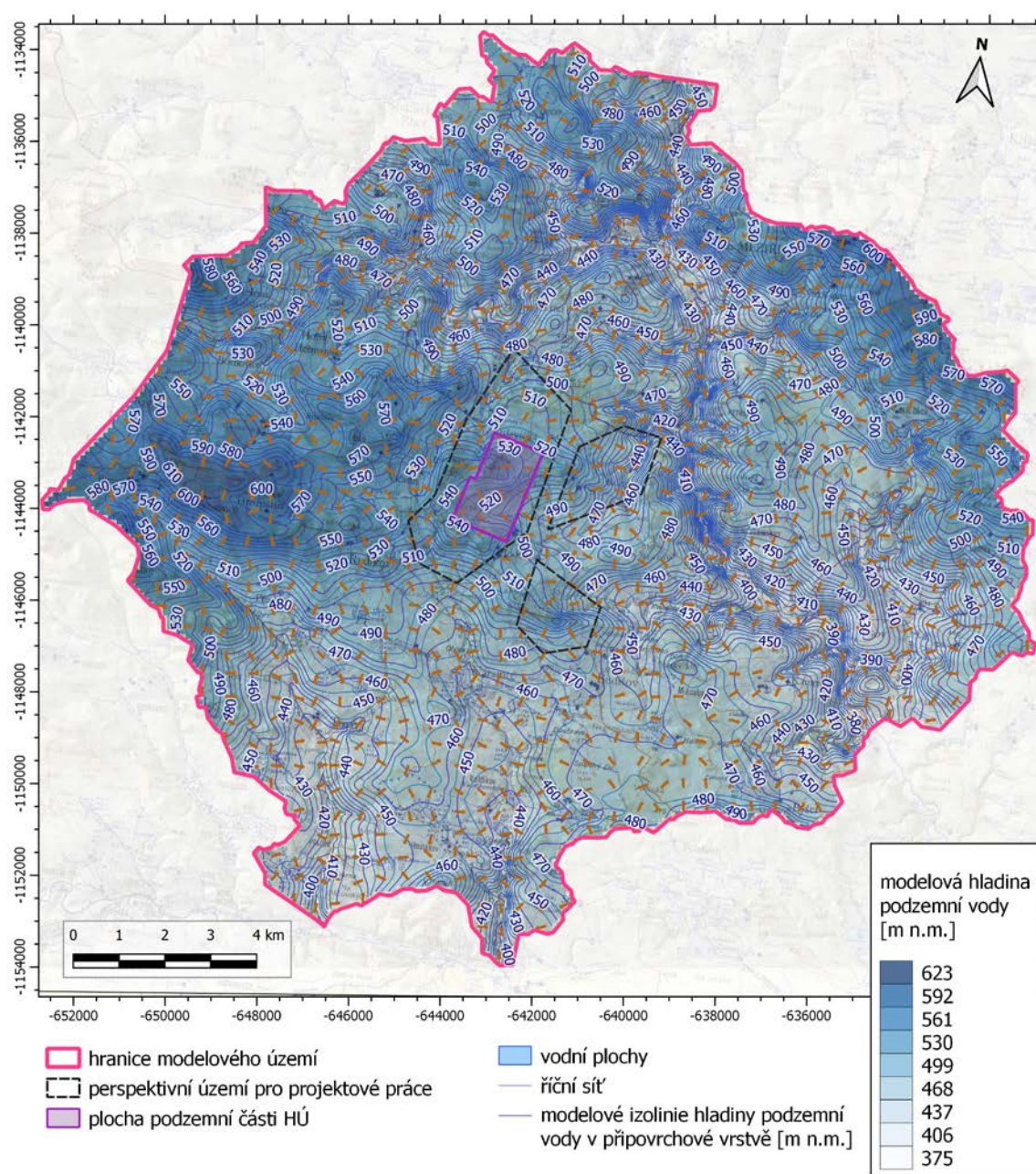
Podzemní voda je v prostoru modelu drénována výhradně do říční sítě. Na Obr. 6 jsou znázorněna a očíslována jednotlivá hlavní povodí v modelové oblasti. V povodí Mlýnského a Klapovského potoka (povodí 1) je drénováno $173 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Na severu modelového území v povodí Oslavy (povodí 2) je drénováno $188 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. V centrální části modelového území s projektovaným HÚ je do toků Mařek a Oslavička (povodí 3) drénováno $88 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. V povodí Vodry (č. 4) je dle výsledků modelu drénováno $31 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Ve zbylé části povodí Oslavy a jejích přítoků (povodí 5) je drénováno $104 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ podzemní vody. Pro povodí Polominy (povodí 6) vychází z modelu drenáž $76 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 6 Drénované množství podzemní vody na zvolených povodích

3.5.2 Hladiny a směry proudění podzemní vody

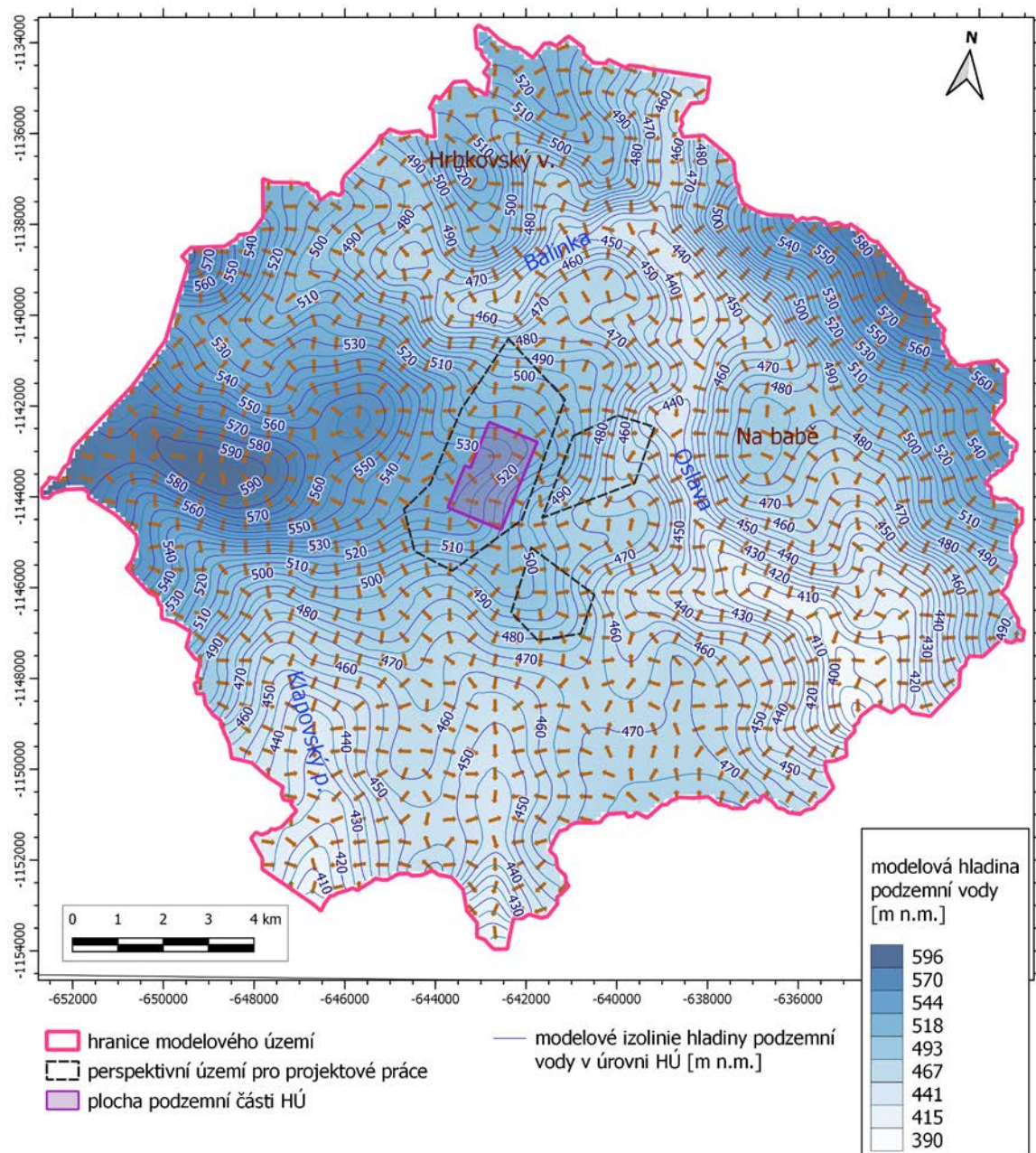
Modelové izolinie hladiny podzemní vody a směry proudění v přípoверхové vrstvě (první modelová vrstva) jsou vykresleny na Obr. 7. Úroveň volné hladiny podzemní vody v přípoверхové vrstvě je ve shodě s kalibračním kritériem generelně konformní s terénem. Nejvyšší úroveň - přes 620 m n. m. dosahuje hladina podzemní vody v oblasti Bukovského kopce při Z okraji modelového území. Nejnižší (přibližně 370 m n. m.) je hladina podzemní vody na modelovém území v prostoru údolí Oslavy - při JV okraji modelového území. Pod 400 m n. m. zaklesá hladina podzemní vody rovněž v povodí Mlýnského potoka (jižní partie modelu). Rozsáhlejší elevace terénu v kombinaci s drenážními úseky říční sítě vytváří v horninovém masivu dílčí uzavřené subsystémy proudění podzemí vody.



Obr. 7 Modelové hladiny podzemní vody v přípoверхové vrstvě – model MODFLOW-USG

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

V projektové úrovni HÚ (Obr. 8) se již neprojevuje vliv jednotlivých elevací a nevýznamných vodních toků, jak je tomu v přípovrchové vrstvě. Úroveň hladiny podzemní vody a poloha rozvodnic obecně koresponduje s průběhem výraznějších elevací, resp. hlavních drenážních vodních toků. Dobře patrná je regionální drenážní funkce Oslavy ve východních partiích modelové plochy. Z izolinií hladiny podzemní vody a směř proudění je zřejmé, že v prostoru projektovaného HÚ se uplatňuje drenážní vliv Oslavičky a Mařku. Tlaková úroveň hladiny podzemní vody v prostoru HÚ dle modelu vychází přibližně 505 – 535 m n. m. (Obr. 8).

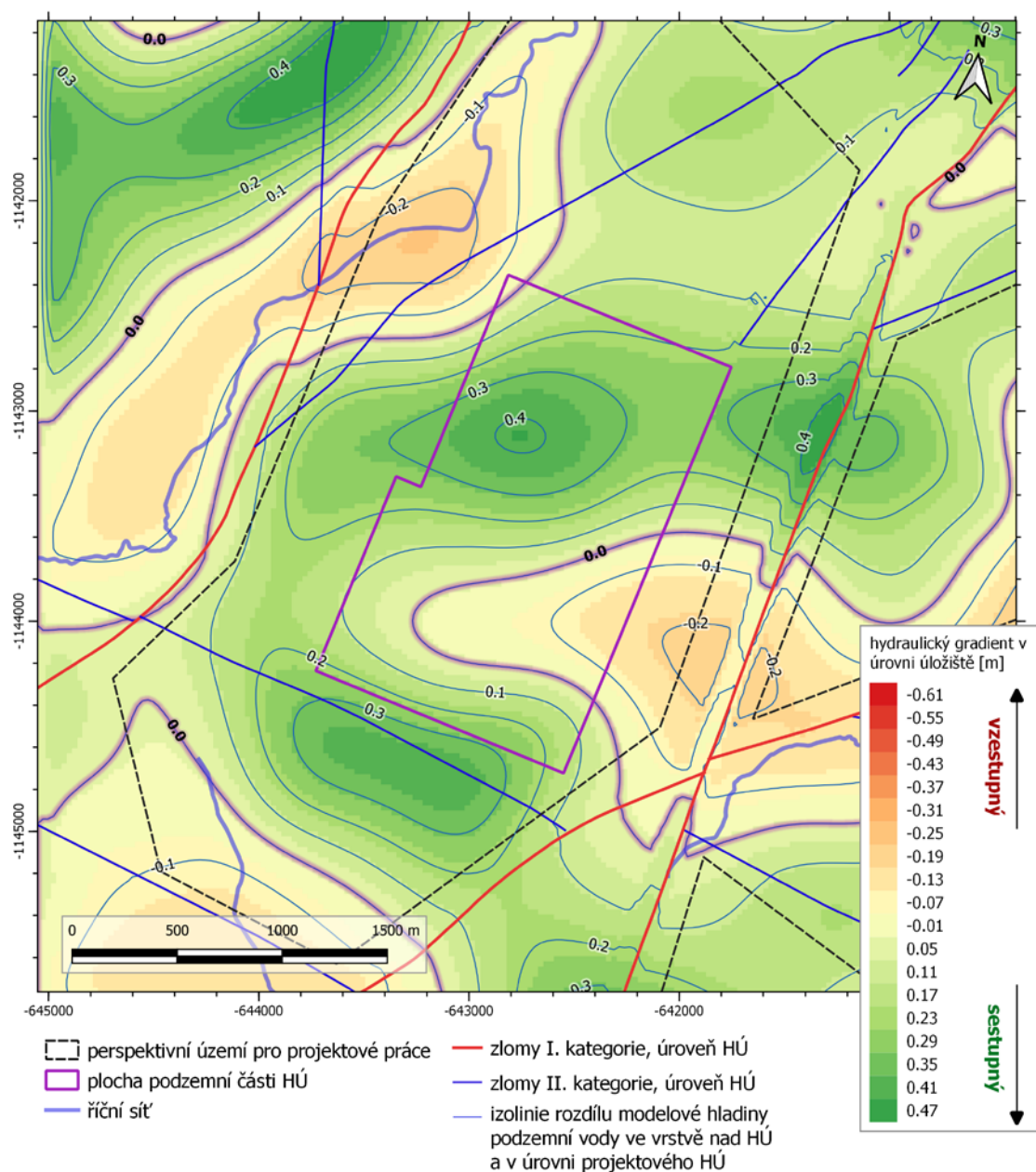


Obr. 8 Modelové hladiny podzemní vody v předpokládané úrovni HÚ - 23. modelová vrstva aktualizovaného detailního modelu (úroveň -25 až -50 m n. m.) - model MODFLOW-USG

Úroveň hladiny podzemní vody v závislosti na hloubce odráží vertikální vývoj tlakového pole. Výsledné tlakové pole v ploše modelového území je charakteristické přítomností sestupného proudění (po vertikále dochází s hloubkou k poklesu hydraulické výšky) v infiltračních

oblastech soustředěných v okolí vrcholových partií území. Vzestupné proudění (po vertikále dochází s hloubkou k nárůstu hydraulické výšky) naopak převládá v oblastech drenáže, které se nachází v prostoru vodotečí a hlubších údolí.

V prostoru HÚ dominuje oblast sestupného proudění podzemní vody (Obr. 9). Zaujímá 81% podzemní části úložiště. Výsledek je ovlivněn morfologií terénu a průběhem říční sítě. Nejintenzivnější sestupné proudění lze v okolí HÚ očekávat v oblasti elevací Hodovská horka, Vlčatínský vrch a rovněž v prostoru bezejmenné elevace při J okraji se skalním útvarem Raubířské skály. Oblast se vzestupnou vertikální složkou proudění je v ploše projektovaného úložiště vázána na pramenní oblast Mařku. Na (Obr. 9) je vykreslen rozdíl modelových hladin podzemní vody mezi nadložní vrstvou HÚ a vrstvou v úrovni úložiště.

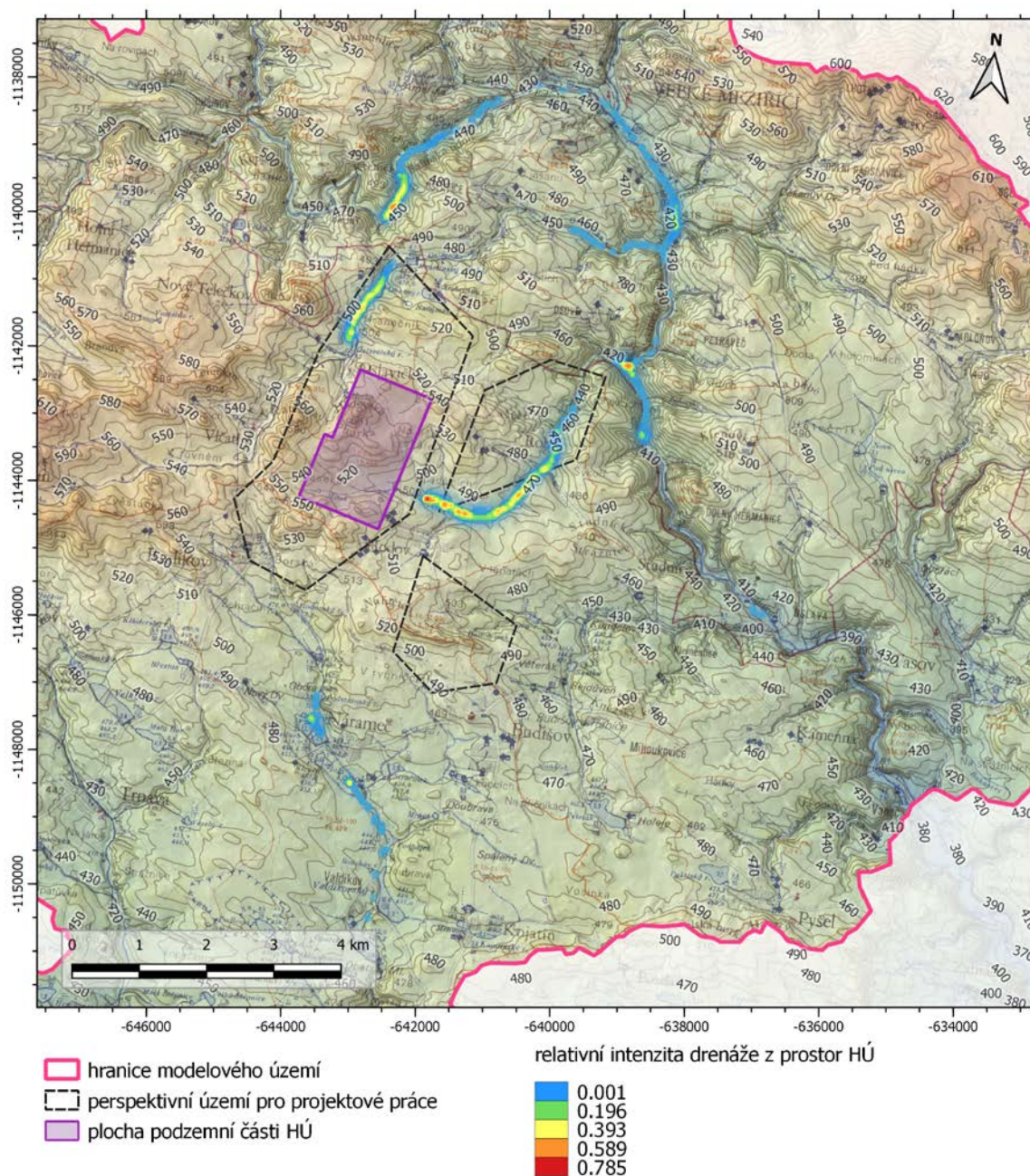


Obr. 9 Hydraulický gradient v úrovni podzemní části HÚ (-34.5 m n. m.)

3.5.3 Vymezení oblastí drenáže a infiltrace z prostor HÚ

Oblasti infiltrace a drenáže podzemní vody ve vztahu k prostoru projektovaného HÚ byly stanoveny pomocí metody particle tracking. Ta využívá trasování trajektorií částic v poli proudění podzemní vody. Do každé modelové buňky v ploše HÚ je zadáno 16 částic, celkový počet částic použitých k vyhodnocení drenážních oblastí a míst infiltrace je 64784.

Infiltrační oblasti pro prostor HÚ se nachází v oblasti elevací lemujících podzemní část úložiště ze severu, západu a jihu. Tyto elevace vytváří půlkruh, otevřený k východu, který obepíná pramenní oblast Mařku. Hlavní vrcholy v infiltrační oblasti úložiště tvoří Hodovská horka, Vlčatínský vrch a rovněž bezejmenná elevace při jižním okraji úložiště.



Obr. 10 Vypočtená místa drenáže pro podzemní vodu z úrovně projektovaného HÚ

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení: SURAO TZ 476/2020

Říční síť v lokalitě Horka náleží do povodí Jihlavy. Prostor potenciálního HÚ odvodňuje Oslava (s přítoky Oslavička, Balinka a Mařek) na západě, severu a východě zájmového území. Jižní partie HÚ odvodňuje Mlýnský potok (Obr. 10.). Podzemní voda proudící prostorem HÚ je drénována celkem do 5 toků. Z hlediska zastoupení drenáže dominuje Mařek. Do něj je podle realizovaných výpočtů odvodněno 81 % podzemní části HÚ. Zbylá část plochy HÚ je odvodněna do Balinky (9 %), Oslavičky (5 %), Oslavy (4 %) a Mlýnského p. (1 %).

Drenáž z prostoru HÚ je vlivem hydrogeologických poměrů i vlivem geometrie úložiště značně rozptýlená. Největší intenzita drenáže z prostoru HÚ je modelem predikována pro počáteční úsek Mařku (Obr. 10.). Nejblíže k okraji HÚ vychází drenáž z prostoru HÚ pro povodí Oslavičky ve vzdálenosti 480 m, Drenáž do Mařku dle modelu nastává ve vzdálenosti jen o 10 m větší.

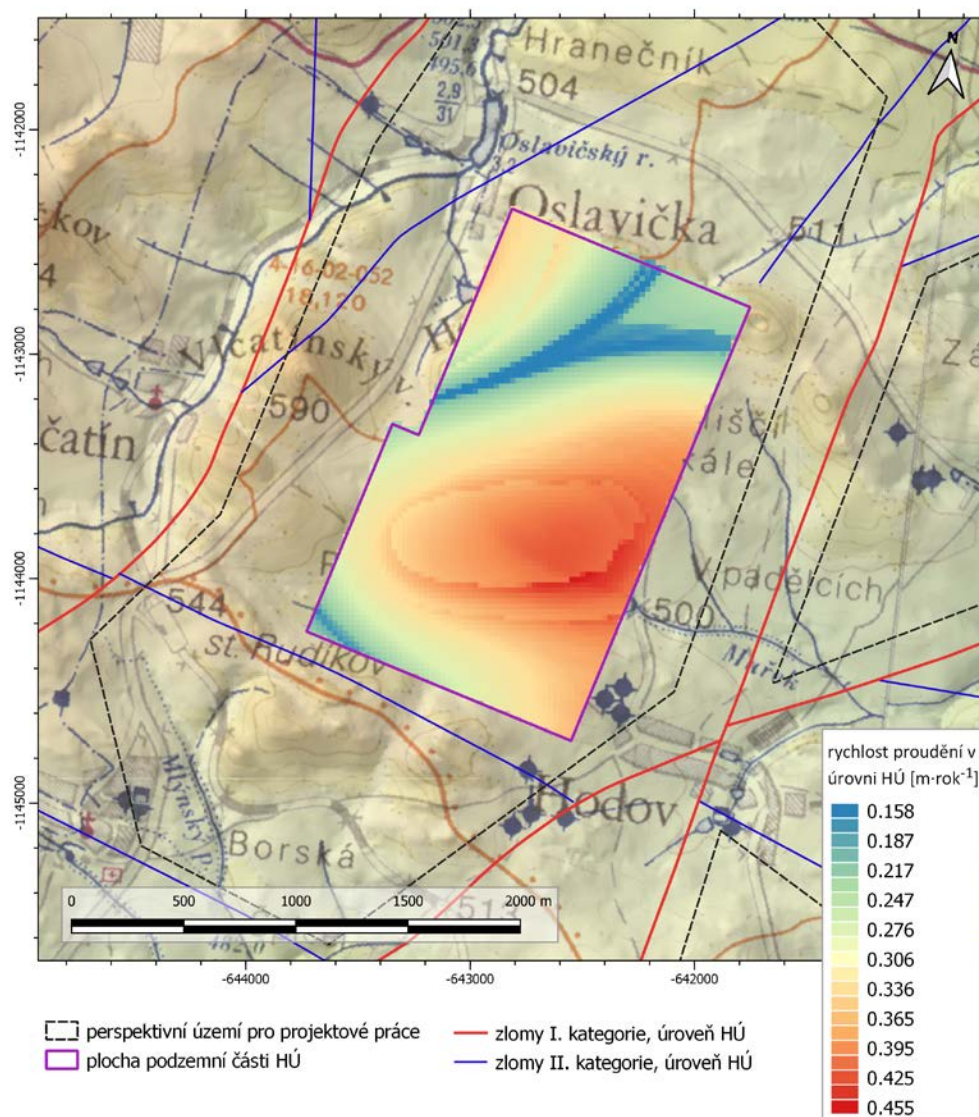
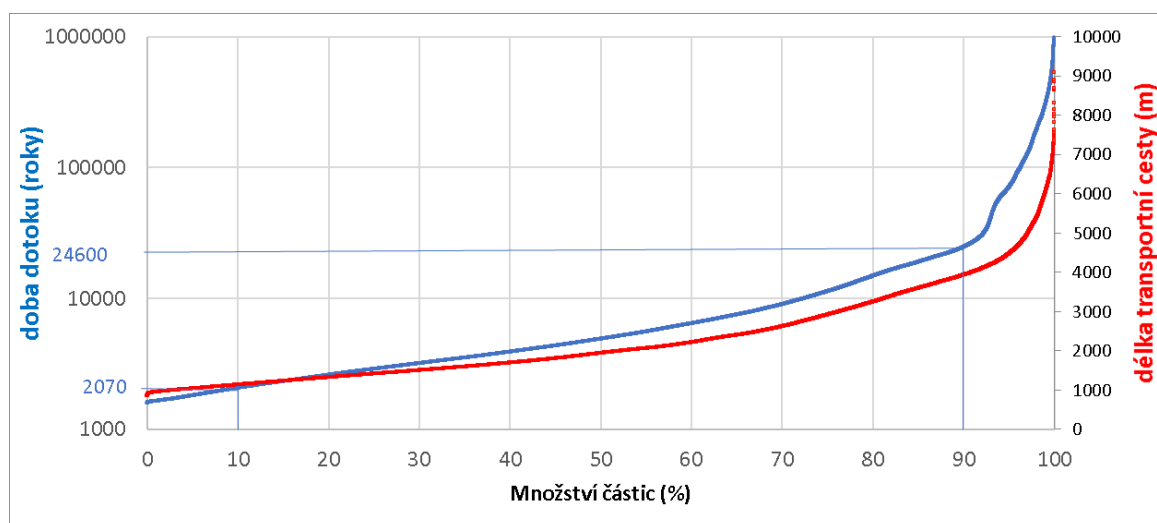
3.5.4 Rychlosti a doby zdržení podzemní vody

Doba zdržení podzemní vody v horninovém prostředí (respektive doba dotoku do drenážní oblasti) při advektivním proudění z prostoru podzemní části HÚ k místům drenáže je stanovena na základě metody particle tracking.

Rozložení průměrných vypočtených rychlostí proudění z prostoru HÚ k drenážním úsekům říční sítě je vykresleno na Obr. 11. Rychlosti proudění částečně korelují s úrovní terénu. V oblastech úložiště v blízkosti rozvodí (elevace Hodovská horka, Vlčatínský vrch a bezejmenná elevace) jsou průměrné rychlosti proudění sniženy. Vyšší průměrné rychlosti proudění ($0,45 \text{ m} \cdot \text{rok}^{-1}$) z úložiště se naopak vyskytují v pramenní oblasti Mařku.

Na výsledné průměrné rychlosti proudění má vliv kombinace hydraulického gradientu a délky proudění podzemní vody v horninovém masivu (transportní cesta). Zvýšená délka transportních cest se obvykle vyskytuje v oblastech úložiště s významnou sestupnou složkou proudění (infiltrační oblast). Nejkratší transportní cesty se obvykle vyskytují z ploch úložiště se vzestupnou vertikální složkou proudění, signalizujících blízkou drenážní oblast. Čáru překročení délky transportních cest obsahuje (Obr. 12). Zjištěné minimum je 850 m a maximum 9085 m.

Hydraulickou souvislost prostoru projektovaného HÚ s drenážními bázemi charakterizuje doba dotoku. Proudění v přípovrchové zóně dosahuje rychlostí řádově desítek až stovek metrů za rok. Pro úroveň HÚ jsou modelem stanoveny rychlosti proudění nejčastěji v řádu prvních desítek centimetrů za rok. První kvartil doby dotoku pro prostor podzemní části HÚ v lokalitě Horka byl modelem vypočten 2889 roků. Z Obr. 12 je patrné, že obvyklý rozsah doby dotoku se pro prostor HÚ v lokalitě Horka pohybuje v rozmezí 2070 až 24600 let (mezidecilové rozpětí intervalu výsledků $Q_{0,1} - Q_{0,9}$).


Obr. 11 Rozložení průměrných modelových rychlostí proudění z prostoru HÚ do míst drenáže [$\text{m} \cdot \text{rok}^{-1}$]

Obr. 12 Doba dotoku a délka trajektorie částic z prostor HÚ do míst drenáže s vyznačenými $Q_{0,1}$ a $Q_{0,9}$

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení: SURAO TZ 476/2020

4 Transportní model

Na aktualizaci hydraulického modelu proudění podzemní vody navazovalo zpracování schematizovaného transportního modelu s cílem zhodnocení poměrů naředění kontaminace z prostoru HÚ vlivem proudění podzemní vody na lokalitě.

Pomocí transportního modelu je zpracován výpočet advektivního transportu pro konzervativní (nesorbující, nereagující a nedegradující stopovač/kontaminant) při reprezentaci prostředí hydrogeologického masivu s uplatněním konceptu ekvivalentního pórového média.

Aktualizovaný transportní model je realizován pro podmínky stacionárního proudění podzemní vody. Pórovitosti jsou zadány v souladu s přijatým členěním modelové domény:

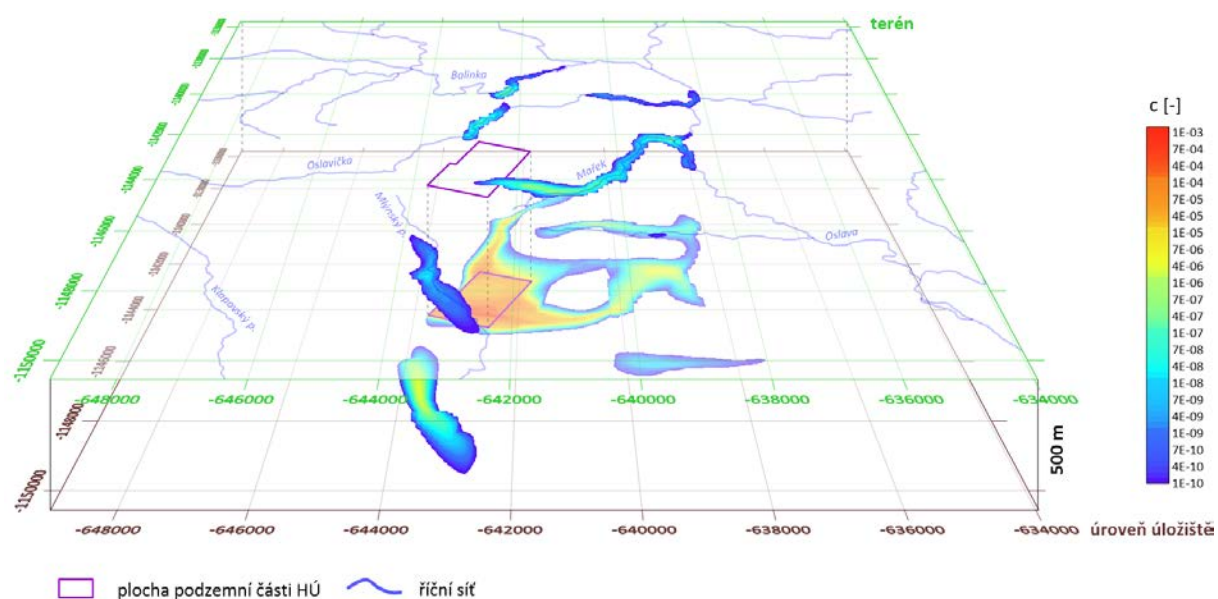
- přípovrchová zóna (v modelu proudění reprezentovaná 1. modelovou vrstvou) má všude zadánu shodnou hodnotu pórovitosti 5 %,
- horninový masiv (pod úrovní první modelové vrstvy) má pórovitost zadánu proměnlivou v závislosti na:
 - o hloubce každé modelové buňky pod terénem, zadán je lineární pokles pórovitosti s hloubkou pod terénem;
 - o průniku modelových buněk a zlomových zón; na základě předpokladu podrcení je v pásmech zlomových zón zadána zvýšená pórovitost.

Modelové pórovitosti přirozeně rozpukaného horninového masivu jsou zadány v rozmezí 0,3 - 1,0 %. Modelové pórovitosti na zlomových zónách se pohybují v rozsahu 0,5 - 3,9 %.

Uvedené rozpětí pórovitosti horninového prostředí bylo uplatněno i při výpočtech rychlostí a dob zdržení podzemní vody podél transportních cest z HÚ do drenážních bází (kap. 3.5.4).

Transport z úložných prostor HÚ je vypočten z jediné úrovně – odpovídající střední hodnotě projektové úrovně úložných prostor (orientačně 500 m pod nejnižší úrovní terénu). V každé modelové buňce v oblasti úložných prostor HÚ je zadán shodný konstantní hmotnostní tok představující stabilní zdroj potenciální kontaminace (zdrojový člen). Transportní proces byl simulován do navození kvaziustáleného stavu mezi prostorem úložiště a drenážními bázemi (Obr. 13).

V přípovrchové vrstvě jsou maximální koncentrace vypočteny v povodí Mařku. Do toku je odvozněna dominantní část hlubinného úložiště. Poměr ředění byl vyčíslen v procentech z podílu maximální koncentrace v přípovrchové vrstvě a v prostoru podzemní části HÚ. Lokalitu Horka charakterizuje hodnota 0,1 %. Rozsahy kontaminačního mraku a vypočtené relativní koncentrace v úrovni úložiště a v přípovrchové vrstvě jsou vykresleny na Obr. 13.



Obr. 13 Rozložení relativních modelových koncentrací v úrovni HÚ (-34,5 m n. m.) a v přípovrchové vrstvě

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

5 Závěr

Aktualizovaný model pro lokalitu Horka poskytuje nejnovější verzi (1.3) popisu poměrů hlubinného proudění podzemní vody v durbachitovém masivu, uvažovaném jako vhodné prostředí pro situování hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Model reflektuje přepracované tektonické schéma, které vedlo k upřesnění polohy perspektivních území pro projektové práce a rovněž i polohy prostoru podzemní části HÚ. Zaktualizováno je rozložení hydraulických parametrů horninového prostředí. V návaznosti na to byly popsány tlakové poměry, bilance, směry a rychlosti proudění, doby dotoku do drenážních bází i míra naředění kontaminace z prostor hlubinného úložiště vlivem mísení proudu podzemní vody.

Výsledky modelu jsou zatíženy nejistotou, vzniklou zejména v souvislosti s absencí měřených dat propustnosti horninového masivu v úrovni HÚ. Zhotovený model poskytuje aktuální kvantifikaci vybraných hydrogeologických a transportních charakteristik lokality ve vazbě na dostupná data. Snižování nejistot získaného popisu závisí na pokračování průzkumných prací v lokalitě.

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení: SURAO TZ 476/2020
--	--	--

6 Literatura

ANDERSSON J., STRÖM A., SVEMAR C., ALMÉ K. E., ERICSSON L. E. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. – SKB TR-00-12, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company, Stockholm, Sweden, 148 p.

Evidence ISVS - Voda: Evidence odběrů podzemní vody [online], dostupné z www.voda.gov.cz

FRANĚK J., BUKOVSKÁ Z., BURIÁNEK D., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., GRUNDLOCH J., HOLEČEK J., JELÍNEK J., JELÍNEK J., KLOMÍNSKÝ J., KRYŠTOFOVÁ E., KUČERA R., KUNCEOVÁ E., KŮRKOVÁ I., NAHODILOVÁ R., PACHEROVÁ P., PERTOLDOVÁ J., PEŘESTÝ V., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VERNER K., ŽÁČEK V. (2018): Závěrečná zpráva 3D strukturně – geologické modely potenciálních lokalit HÚ. – TZ 229/2018, SÚRAO, Praha, 594 s.

GUSTAFSON G., LIEDHOLM M. (1989): Groudwater Flow Calculation on a Regional Scale at The Swedish Hard Rock Laboratory. SKB Progress Report 25-88-17, Stockholm

HAVLOVÁ, V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., MILICKÝ M., ŘÍHA J., ČERVINKA R., TRTÍLEK R., RATAJ J. (2020): Hodnocení vhodnosti lokalit pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Technická zpráva v přípravě. UJV Řež,

KRÁSNÝ J., KNĚŽEK M., ŠUMOVÁ A., DAŇKOVÁ H., MATUŠKA M., HANZEL V. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. Český hydrometeorologický ústav.

MIXA, P., SKÁCELOVÁ, Z., PERTOLDOVÁ, J., BUKOVSKÁ, Z., BURIÁNEK, D., DUDÍKOVÁ, B., FRANĚK, J., HRDLIČKOVÁ, K., JELÍNEK, J., NAHODILOVÁ, R., SOEJONO, I., VERNER, K., ŽÁČEK, V. (2019): Shrnutí výsledků geologických a geofyzikálních výzkumných prací provedených v období 9/2017–6/2019 pro aktualizaci hodnocení potenciálních lokalit hlubinného úložiště RAO. SÚRAO TZ 412/2019, 427 s.

MUFFELS C., WANG X., TONKIN M., NEVILLE C. (2014): User's Guide for mod-PATH3DU. S.S. Papadopoulos & Associates Inc., Bethesda, Ontario, USA.

PANDAY SORAB, LANGEVIN C.D., NISWONGER R.G., IBARAKI MOTOMU, HUGHES J.D. (2013): MODFLOW–USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulating groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A45, 66 p.

RUMBAUGH J. O., RUMBAUGH D. B. (2017): Guide to Using Groundwter Vistas version 7. Environmental Simulations, Inc. Leesport, PA. USA.

TRPKOŠOVÁ, D., HAVLOVÁ, V., Bukovská, Z., Franěk, J., Rataj, J., Frýbort, J., Kobylka, D., Losa, E., Fejt, F., Vopálka, D., Baborová, L., Štamberg, K., Vetešník, A., Vaněček, V., Jan Uhlík, Gvoždík, L., Milický, M., Polák, M., Královcová, J., Říha, J., Jiří Maryška, J. (2017): Transport radionuklidů z úložiště / Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora. Shrnutí procesních modelů lokality Kraví hora a aktualizace parametrů komplexního modelu, zpráva SÚRAO 200/2017, Listopad 2017

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Horka Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 476/2020

UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2016): Regionální hydrogeologické modely lokalit. Technická zpráva číslo 100/2017. PROGEO, s.r.o., Roztoky

UHLÍK J., ČERNÝ M., BAIER J., MILICKÝ M., POLÁK M., GVOŽDÍK L., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., RUKAVIČKOVÁ L. (2018a): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.

UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., TRPKOŠOVÁ D., RUKAVIČKOVÁ L. (2018b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště - pasport detailního modelu – lokalita HORKA. Technická zpráva číslo 337/2018. PROGEO, s.r.o., Roztoky

ZAHRADNÍK, O.: Doplněk ke studiím umístitelnosti HÚ v kandidátních lokalitách, Závěrečná zpráva, TZ SÚRAO 442/2019

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: info@surao.cz

www.surao.cz