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

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 KRAVÍ HORA

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: SURAO-477-2020

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2020-ZZ-S3183-043-Hodnoceni2_HGM_Pasport_KraviHora

ŘEŠITELÉ:

PROGEO, s.r.o.

Autor: Jan Uhlík

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



SÚRAO

Obsah

1	Úvod	7
2	Charakteristika zájmového území	8
3	Model proudění podzemní vody lokality Kraví hora	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	15
3.5	Výsledky hydraulického modelu.....	16
3.5.1	Bilance modelového řešení	16
3.5.2	Hladiny a směry proudění podzemní vody	17
3.5.3	Vymezení oblastí drenáže a infiltrace z prostor HÚ.....	21
3.5.4	Rychlosti a doby zdržení podzemní vody	22
4	Transportní model.....	25
5	Závěr	27
6	Literatura	28

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)	16
Obr. 5 Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev	16
Obr. 6 Drénované množství podzemní vody na zvolených povodích	17
Obr. 7 Modelové hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě – model MODFLOW-USG ..	18
Obr. 8 Modelové hladiny podzemní vody v předpokládané úrovni HÚ - 26. modelová vrstva aktualizovaného detailního modelu (úroveň -100 až -125 m n. m.) - model MODFLOW-USG	19
Obr. 9 Hydraulický gradient v úrovni podzemní části HÚ (-124.5 m n. m.)	20
Obr. 10 Vypočtená místa drenáže pro podzemní vodu z úrovně projektovaného HÚ	21
Obr. 11 Rozložení průměrných modelových rychlostí proudění z prostoru HÚ do míst drenáže [$\text{m} \cdot \text{rok}^{-1}$]	23
Obr. 12 Doba dotoku a délka trajektorie částic z prostor HÚ do míst drenáže s vyznačenými $Q_{0,1}$ a $Q_{0,9}$	24
Obr. 13 Rozložení relativních modelových koncentrací v úrovni HÚ (-124,5 m n. m.) a v přípovrchové vrstvě	26

Seznam tabulek:

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

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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, nepřijatelných 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 Kraví hora, která navazuje na zpracování regionálního hydrogeologického modelu lokality (Uhlík et al. 2016) a detailního modelu lokality (Uhlík et al. 2018b).

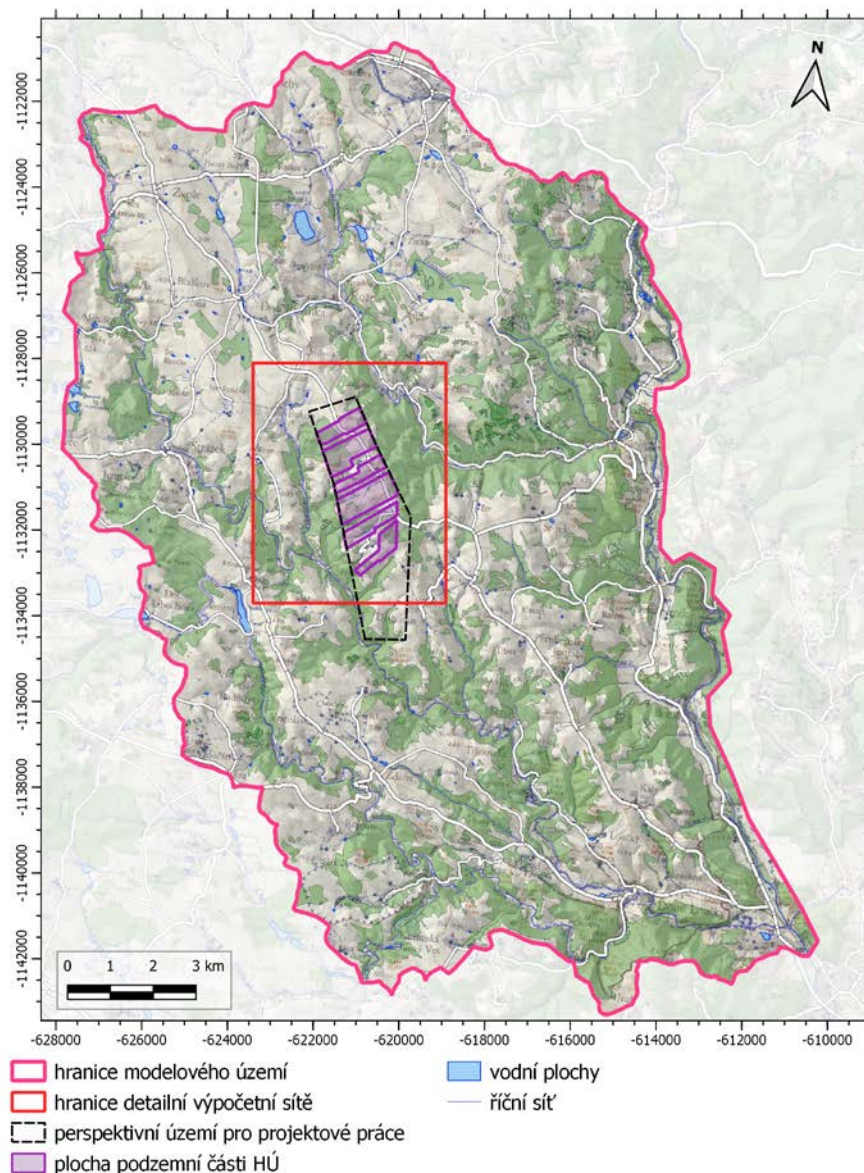
Metodika zpracování detailních hydrogeologických modelů, je popsána v Uhlík et al. (2018a). Posloupnost vzniklých hydrogeologických modelů lokality je označována pomocí verzí. Verze 1.1 – regionální, 1.2 – detailní a 1.3 – současný zaktualizovaný detailní hydrogeologický model. Aktualizace detailního 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).

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

2 Charakteristika zájmového území

Aktivní oblast modelu pro lokalitu Kraví hora (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 263,5 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 nově stanoveném polygonu perspektivního území pro projektové práce dle Zahradník et al. 2019 (Obr. 1). Vzhledem k podkladům České geologické služby (ČGS) je podzemní část HÚ nově vymezena pomocí šesti polygonů oddělených zlomy druhé kategorie převládající orientace VSV–ZJZ (Obr. 2). Podzemní část úložiště zaujímá rozlohu 3,07 km². Úložné prostory pro HÚ jsou projektovány v hloubce cca 500 m pod terénem v průměrné úrovni -124,5 m n. m. Hranice všech uvedených oblastí a polygonů jsou vykresleny na Obr. 1.

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

Nejvyšší elevací perspektivního území je Kraví hora (611 m n. m.). Je součástí tzv. Střítežského hřbetu s orientací SSZ-JJV, budovaného převážně granulity (vhodné horninové prostředí pro situování úložiště). Další dominantou hřbetu je vrchol Dejmarka (600 m n. m.). S malou výjimkou (oblast mezi Býškovcem, Pernštejnskými Janovicemi a Věžnou) dosahuje terén v celém modelovém území maximální výšku právě v polygonu perspektivního území.

Nejnižší úroveň má terén v nivách větších toků (Svratka, Nedvědička a Bobrůvka). Soutok Svatky a Bobrůvky při JV okraji modelového území (nejnižší oblast modelu) je v úrovni 254 m n. m. V blízkosti polygonu perspektivního území (mezi Strážkem a Skryjemi) hladina Bobrůvky klesá z úrovně 430 na 330 m n. m. Hladina Nedvědičky mezi Jablonovem a Pernštejnem klesá z úrovně 445 m n. m. na 355 m n. m. Tok Bobrůvky a Nedvědičky nejvýznamněji ovlivňuje hlubinný oběh podzemní vody v horninovém masivu s projektovaným HÚ. Rozdíl nejvyšších a nejnižších míst terénu v okolí projektovaného HÚ přesahuje 200 m.

Lokalita Kraví hora náleží do hydrogeologického rajonu 6560 Krystalinikum v povodí Svatky budovaného horninami moldanubika a svrateckého krystalinika. Perspektivní území je primárně situováno v tělese felsických granulitů a granulitových rul označované jako drahonínský masiv. Po obvodu se vyskytují migmatizované amfibolické ruly a amfibolity.

Různá intenzita zvětrání a zejména rozpukání masivu generuje rozdíly v propustnosti. V přípovrchové vrstvě, ovlivněné procesy zvětrání, se uplatňuje porozita puklinová i průlinová. Ve vlastním hydrogeologickém masivu převládá porozita puklinová, která vznikla sekundárně následkem tektonické expozice.

Hydrogeologická prozkoumanost zájmové oblasti je vzhledem k malému vodárenskému významu přítomných hornin malá a značně nerovnoměrná. K dispozici jsou pouze omezené bodové informace reprezentující poměry přípovrchové zóny – obvykle do hloubky max. prvních desítek metrů. Rozložení vrtů s hydrogeologickými údaji dle vrtné databáze ČGS na lokalitě Kraví hora znázorňuje Obr. 2. Vrtů s hydrogeologickými údaji jsou obvykle situovány poblíž vodních toků, nebo v lokálních sníženinách terénu. Hladina podzemní vody se vyskytuje převážně velmi mělce pod terénem. Hydraulické vodivosti byly stanoveny v rozmezí čtyř řádů (10^{-5} m.s⁻¹ až 10^{-8} m.s⁻¹) v závislosti na hydrogeologické pozici vrtu (drenážní, resp. infiltrační oblast) a tektonickém postižení oblasti. Tyto relativně mělké vrtů, 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.

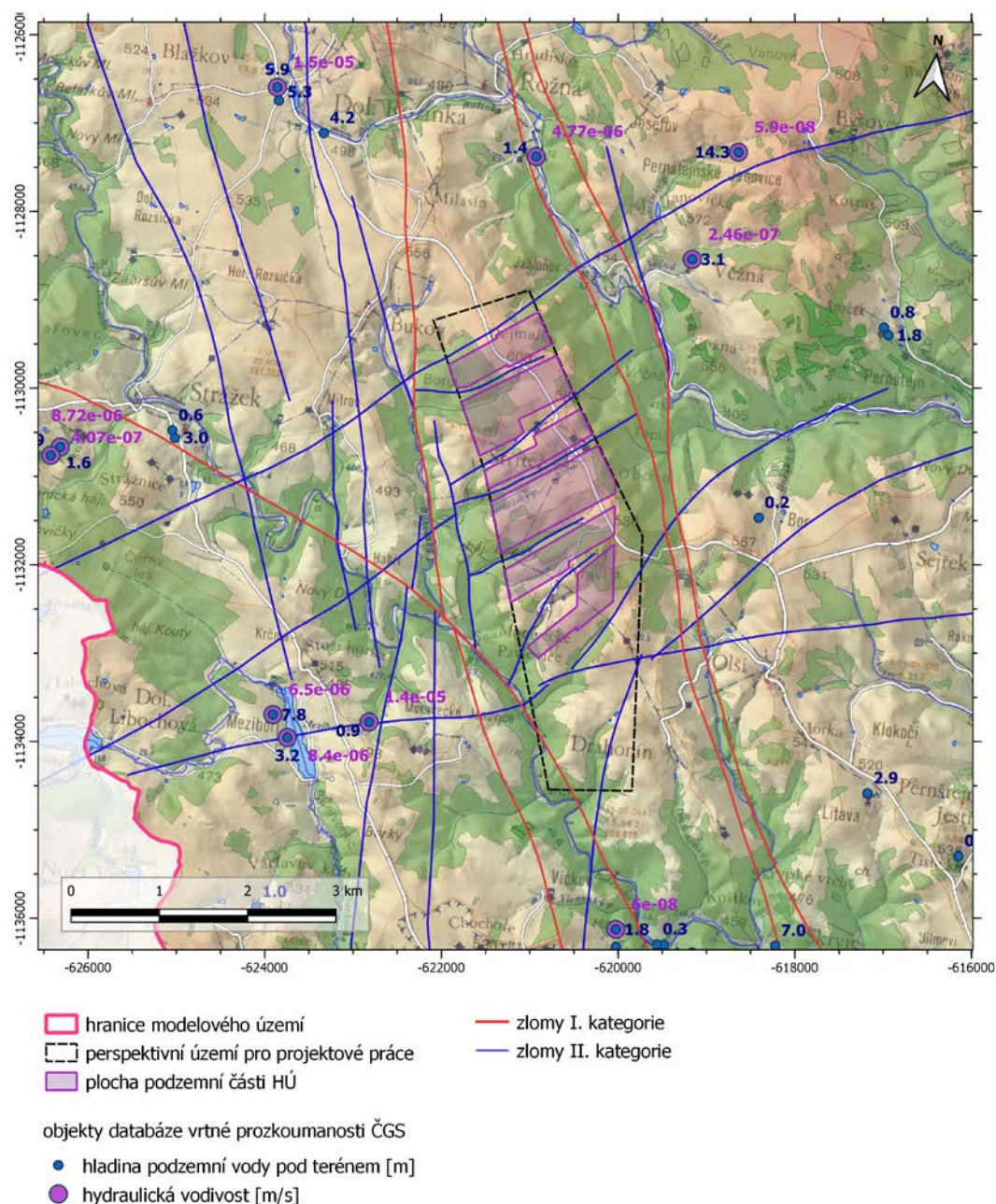
Zdrojem podzemní vody na lokalitě je srážková infiltrace, ke které dochází v celé ploše území. Rozložení efektivní infiltrace je prostorově variabilní, průměrná velikost byla v detailním hydrogeologickém modelu zadána $1,36 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ na základě analýzy podzemního odtoku v povodí Nedvědičky. Krásný et al. (1982) pro širší zájmovou oblast uvádí specifický podzemní odtok $2,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

Lokalita Kraví hora je jedinou z devíti posuzovaných lokalit z hlediska situování HÚ, kde byly k dispozici hydrogeologické informace o horninovém masivu v úrovni projektovaného úložiště, ovšem pouze po obvodu drahonínského masivu. Tato výjimečná situace souvisí s existencí důlních děl Rožná a Olší, určených k těžbě uranu. Ložisko Olší je od roku 1996 zaplavené. Důlní dílo Rožná postupně projde změnami systému odvodnění a tím i změnami hydrogeologických poměrů. Těžba uranu v něm byla ukončena v dubnu 2017.

Vybrané hydrogeologické charakteristiky lokality Kraví hora, zcela neznámé v ostatních lokalitách, byly získány v rámci detailní kalibrace modelu podle přítoků do důlních děl.

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

Následně byly shodné hydraulické charakteristiky (pokles vodivosti s hloubkou, proporcionální změny základní vodivosti litotypů K_0) zadány v hydrogeologických modelech ostatních lokalit. Tento postup umožňuje srovnávat a posuzovat vhodnost hydrogeologických poměrů lokalit na základě výsledků zpracovaných hydrogeologických modelů (Uhlík et al. 2018a).



Obr. 2 Hydrogeologické údaje v databázi vrtné prozkoumanosti ČGS

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

3 Model proudění podzemní vody lokality Kraví hora

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 parametrů propustnosti 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 $X_{Kr} = -628\,500$, $Y_{Kr} = -1\,143\,500$ v systému S-JTSK. Ve směru os X a Y má výpočetní síť rozměry 19,5 km × 23,5 km.

Základní výpočetní síť (s pravidelnými elementy 100x100 m) sestává z 235 řádek a 195 sloupců. V rámci detailního hydrogeologického modelu došlo v oblasti HÚ k zahuštění výpočetní sítě pravidelnými elementy s velikostí strany 25 m. Tj. každá výpočetní buňka regionálního modelu je v ploše nahrazena 16 buňkami detailního modelu. Modelová síť je zahuštěna v ploše 5,6 × 4,5 km. Celkem modelová výpočetní síť detailního hydrogeologického modelu sestává z 2137965 buněk (z toho 1871621 aktivních).

Ve vertikálním směru je celý prostor modelu rozdělen do 13 regionálně průběžných modelových vrstev. Zjemnění výpočetní sítě ve vertikálním směru je provedeno při uplatnění následujícího schématu:

- první modelová vrstva - bez vertikálního zjemnění,
- druhá až desátá modelová vrstva - ve vertikálním směru zjemněny pomocí 4 vrstev,
- jedenáctá až třináctá modelová vrstva - bez vertikálního zjemnění.

Celkem tak oblast detailního hydrogeologického modelu v okolí HÚ obsahuje 40 vrstev. Vertikální zjemnění výpočetní sítě je provedeno pouze v ploše horizontálního zjemnění. Báze modelu (1000 m pod hladinou moře) odpovídá bázi zpracovaného 3D strukturně-geologického modelu (Franěk et al. 2018).

3.2 Modelové hydraulické charakteristiky horninového prostředí

Metodiku výpočtu a zadání hydraulických charakteristik do modelu detailně popisují Uhlík et al. (2018a). Přijatá modelová koncepce popisu proudění podzemní vody uvažuje v prostoru hydrogeologického masivu přítomnost pásem zvýšených hydraulických vodivosti 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

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

lokality (Franěk et al. 2018). Horizontální řez strukturně-geologickým modelem v úrovni HÚ je na Obr. 3. Závislost hydraulické vodivosti $K(z)$ [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] na hloubce pod terénem (z) je popsána vztahem (1) převzatým z Gustafson a Liedholm (1989).

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

K_0 je tzv. základní hydraulická vodivost bez ovlivnění procesy připovrchového 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 všech lokalit. Podkladem byla detailní kalibrace modelu lokality Kraví hora podle přítoků do důlních děl pro potřeby bezpečnostního rozboru (Trpková et al. 2017). Parametr c (koeficient poklesu K o jeden řád) byl zadán 675 m.

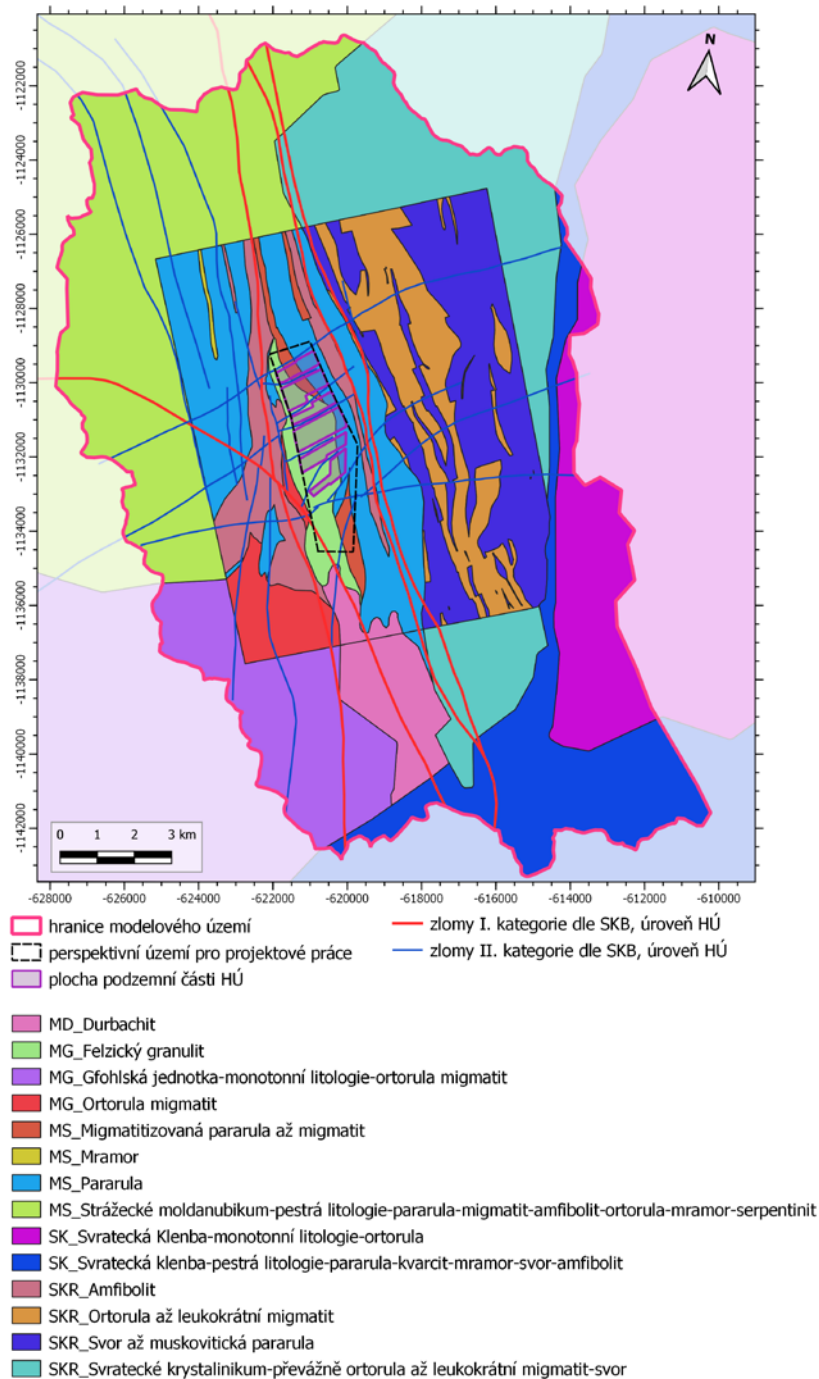
Tab. 1 Tabulka horninových typů, parametry K_0 pro výpočet $K(z)$

Litologie dle 3D SG modelu	K_0 [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
MD_Durbachit	2,20E-08
MG_Felzicky_granulit	3,30E-08
MG_Gfohlska_jednotka-monotonni_litologie-ortorula_migmatit	5,50E-09
MG_Ortorula_migmatit	5,50E-09
MG_Peridotit_Serpentinit	4,40E-09
MS_Amfibolit	4,40E-09
MS_Apliticky_granit	1,10E-08
MS_Migmatitizovana_pararula_az_migmatit	3,85E-09
MS_Mramor	1,10E-07
MS_Ortorula	5,50E-09
MS_Pararula	3,85E-09
MS_Peridotit_Serpentinit	4,40E-09
MS_Strazeecke_moldanubikum-pestra_litologie-pararula-migmatit-amfibolit-ortorula-mramor-serpentinit	4,13E-09
SK_Svratecka_Klenba-monotonni_litologie-ortorula	5,50E-09
SK_Svratecka_klenba-pestra_litologie-pararula-kvarcit-mramor-svor-amfibolit	4,13E-09
SKR_Amfibolit	4,40E-09
SKR_Kvarcit	4,95E-08
SKR_Mramor	1,10E-07
SKR_Ortorula_az_leukokratni_migmatit	5,50E-09
SKR_Peridotit_Serpentinit	4,40E-09
SKR_Svor_az_muskoviticka_pararula	3,85E-09
SKR_Svratecke_krystalinikum-prevazne_ortorula_az_leukokratni_migmatit-svor	5,50E-09
zlomové pásmo I. kategorie	5,00E-09
zlomové pásmo II. kategorie	5,00E-09

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

zlomové pásmo III. kategorie

5,00E-09



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 Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

(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 mělčí partie horninového masivu. Západní a východní omezení HÚ je do značné míry určeno relativně malým rozsahem drahonínského masivu. Dále po obvodu ze západu i východu drahonínský masiv lemují zlomy první kategorie orientace SSZ-JJV (Obr. 3). Význam příčných zlomů druhé kategorie (orientovány převážně VSV - ZJZ) může vzrůstat v místech křížení s dalšími zlomy, nebo s úseky říční sítě (Bukovský potok, Bobrůvka, Nedvědička – viz Obr. 2).

Realizací uranových důlních děl Rožná a Olší na poruchách první kategorie (orientace SSZ-JJV) a následně i modelovými pracemi bylo na základě pozorovaných přítoků důlních vod ověřeno, že propustnost poruchových zón se zlomy první kategorie (orientace SSZ-JJV) významněji nepřevyšuje okolní horninové prostředí. Maximální propustnost granulitu v úrovni úložiště je uvažována $7,0 \cdot 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$.

Nejpropustnějšími strukturami do vzdálenosti 500 m od okraje podzemních prostor projektovaného úložiště trvale zůstanou opuštěná důlní díla. V širším prostoru opuštěných zaplavených důlních děl se bude z hydrogeologického hlediska dlouhodobě uplatňovat oživený (až preferenční) oběh podzemí vody. Minimálně ve výhledu prvních stovek let budou obě opuštěná důlní díla přirozeně odvodněna přelivem do vyražených dědičných štol se zaústěním do povodí Nedvědičky.

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, nebo důlních děl 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. Velikost efektivní srážkové infiltrace byla předmětem kalibrace s cílem dosáhnout shodu pozorovaného a modelového odtoku podzemní vody z povodí Nedvědičky (Uhlík et al. 2018b). Distribuce plošné infiltrace v modelu koreluje s rozložením srážkového normálu (poskytnutého ČHMÚ). Průměrná zadaná infiltrace pro celý model odpovídá specifiku $1,36 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.

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. Důlní díla jsou rovněž zadána pomocí okrajové podmínky třetího typu. Model byl kalibrován na shodu přítoků podzemní vody do jednotlivých etází důlních děl Rožná a Olší.

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

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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).

3.4 Kalibrace modelu

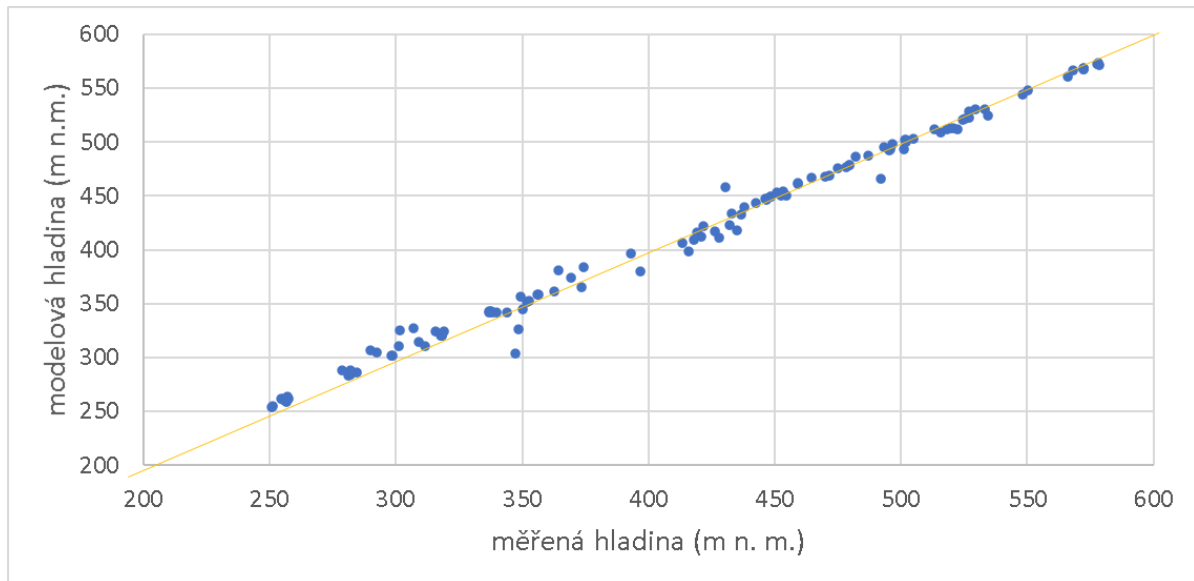
Pomocí kalibrace detailního hydrogeologického modelu (Uhlík et al. 2018b) byly stanoveny základní parametry pro zadání hydraulické vodivosti horninového prostředí lokality pod úrovní přípovrchové vrstvy (pokles propustnosti s hloubkou i základní hodnoty hydraulické vodivosti pro horninové typy K_0). Model byl nakalibrován s využitím hladinového a bilančního kritéria (porovnání měřených a modelových hladin podzemní vody; porovnání měřených a modelových přítoků do etáží důlních děl a do Nedvědičky) pro tři různé hydraulické stavy lokality:

- bez antropogenních vlivů (přirozený stav),
- při provozu obou důlních děl Rožná a Olší,
- poměry proudění po zaplavení důlního komplexu Olší a po hydraulickém oddělení průzkumných úseků důlního komplexu Rožná tlakovými hrázemi (úseky Rozsochy, Zlatkov a Habří).

V rámci aktualizace je dokumentována shoda hladinového kritéria (Obr. 4), hydraulické parametry horninového prostředí pod úrovní přípovrchové vrstvy zůstaly zafixovány. Kalibrační data úrovně hladin podzemní vody (hladinové kritérium) byla získána z archivních údajů hydrogeologických vrtů databáze ČGS a jsou shodná s předchozím zpracováním modelu. Pro kalibraci modelové úrovně hladiny podzemní vody bylo vybráno 119 objektů (studny a vrty) s kompletními údaji o měření hladiny podzemní vody. 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 75 kalibračních bodů byl dosažen rozdíl modelové a měřené hladiny podzemní vody do 5 m, 30 kalibračních bodů má tento rozdíl v rozmezí 5 až 10 m, u 14 kalibračních údajů modelová odchylka od měření přesahuje 10 m.

Vypočtený přítok do obou zaplavených důlních děl Rožná a Olší v rámci aktualizace dosahuje $6,7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ a je tak velmi blízký hodnotě $6,2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ z předchozí verze modelu (Uhlík et al. 2018b).



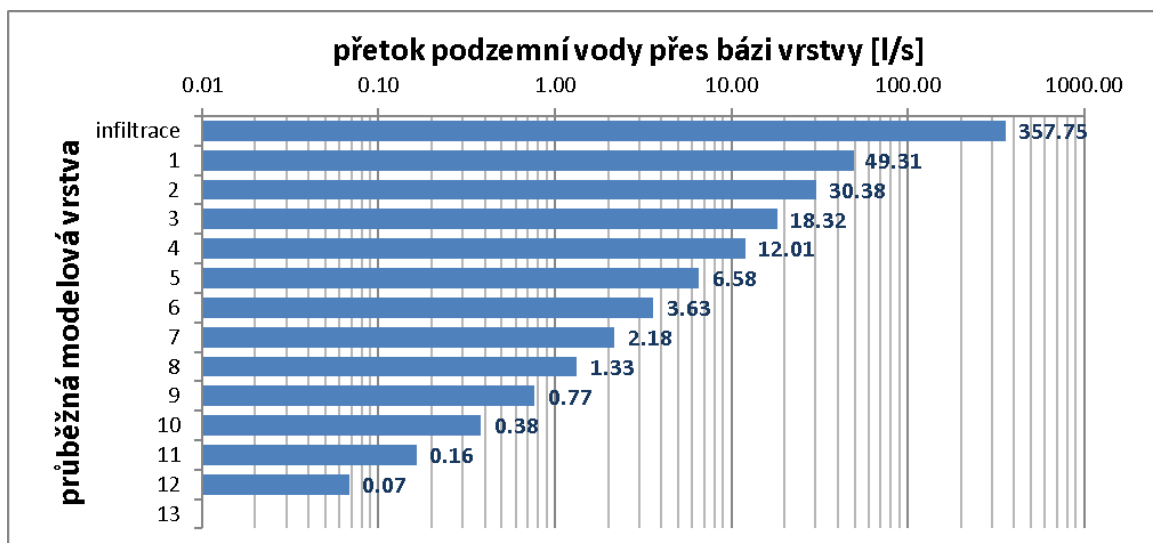
Obr. 4 Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody (MODFLOW-USG)

3.5 Výsledky hydraulického modelu

3.5.1 Bilance modelového řešení

Z celkově infiltrovaného množství $357,8 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ se dle výsledku modelu $308,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ (86 %) účastní pouze přípoверхového oběhu podzemní vody. Pouze ($49,3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$; 14%) přetéká přes bázi první (přípoверхové) vrstvy do hlubších partií horninového masivu (Obr. 5).

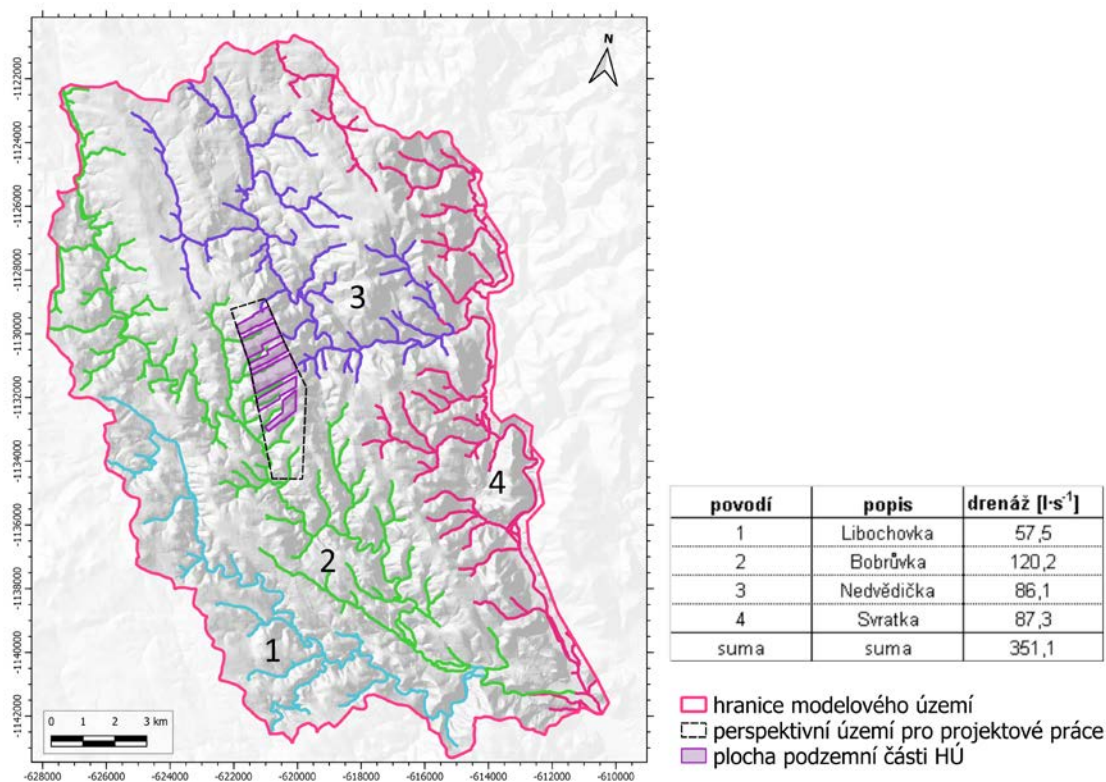
Přetok podzemní vody v celé ploše modelu ($263,5 \text{ km}^2$) přes rozhraní jednotlivých průběžných vrstev zobrazuje graf na Obr. 5. Pro každou vrstvu je uveden přetok přes její bázi do hlubší modelové vrstvy. Do modelové vrstvy, odpovídající projektové úrovni hlubinného úložiště (8. průběžná vrstva), přetéká přes bázi sedmé modelové vrstvy $2,2 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ podzemní vody. Specifický průtok přes půdorysnou plochu HÚ vychází $4,2 \cdot 10^{-2} \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$.



Obr. 5 Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

Podzemní voda je v prostoru modelu drénována do říční sítě a do zaplavených etází důlních děl. Na Obr. 6 jsou znázorněna a očíslována jednotlivá hlavní povodí v modelové oblasti. Na JZ modelového území v povodí Libochovky (povodí 1) je drénováno $58 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Do Svratky (východní okraj modelového území; povodí 4) je z prostoru modelu drénováno $87 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$. Do Bobrůvky (povodí 2) a Nedvědičky (povodí 3) je v rámci modelového území drénováno $120 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ a $86 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.



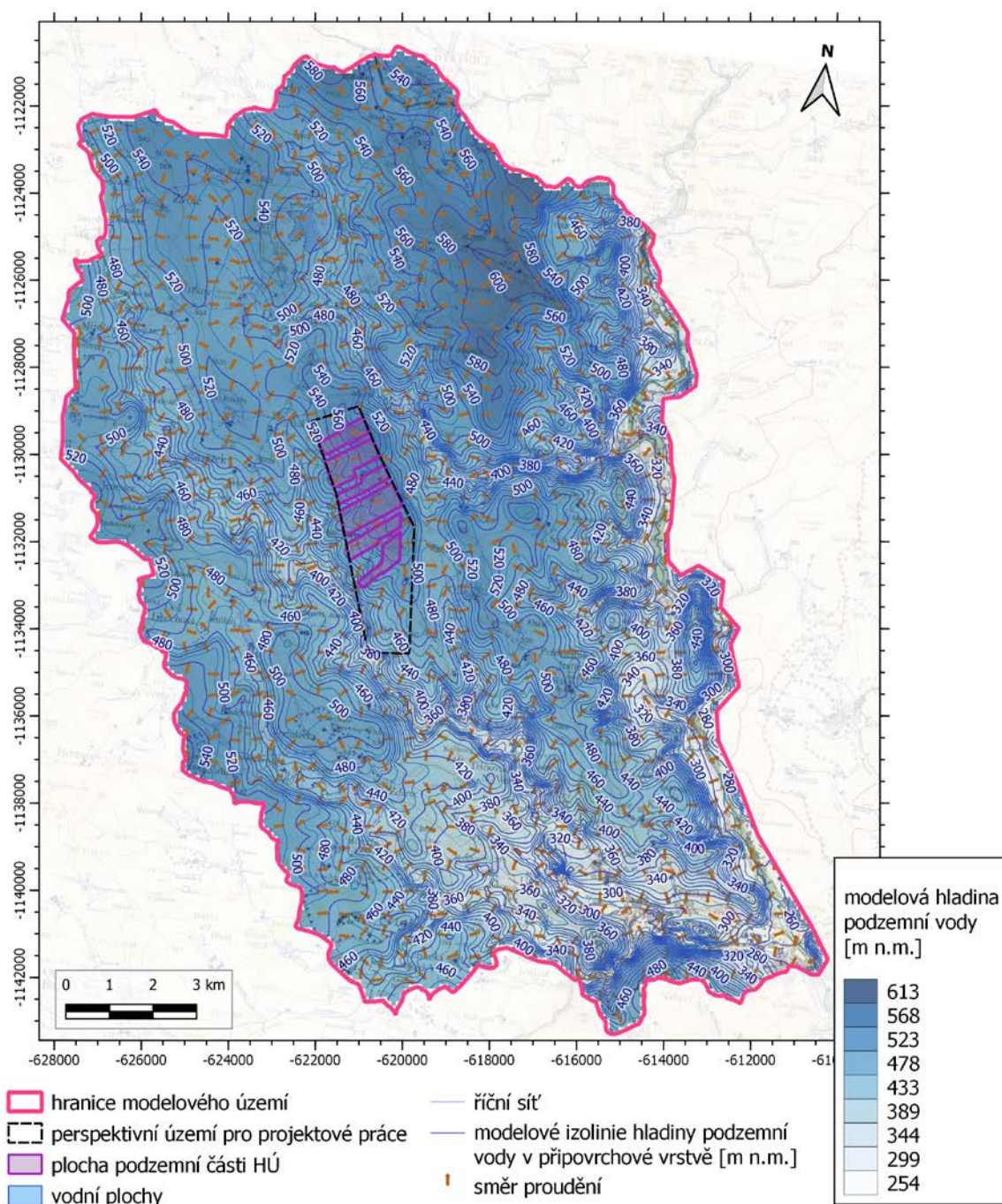
Obr. 6 Drénované množství podzemní vody na zvolených povodích

3.5.2 Hladiny a směry proudění podzemní vody

Modelové izolinie hladiny podzemní vody a směry proudění v přípořchové vrstvě (první modelová vrstva) jsou vykresleny na Obr. 7. Úroveň volné hladiny podzemní vody v přípořchové vrstvě je ve shodě s kalibračním kritériem generelně konformní s terénem.

V polygonu perspektivního území se v oblasti Střítežského hřbetu vyskytuje orografické a hydrogeologické rozvodí mezi Bobrůvkou a Nedvědičkou. Modelová hladina podzemní vody v oblasti hřbetu v přípořchové vrstvě dosahuje 540 - 570 m n. m. Nejnížší úroveň má hladina podzemní vody v údolích Bobrůvky a Nedvědičky. Mezi Moraveckými Janovicemi a Pavlovicemi v úrovni jižního polygonu úložiště hladina podzemní vody v údolí Bobrůvky zaklesá k úrovni 390 m n. m. (Obr. 7). V ohbí Nedvědičky severně od Boru je hladina podzemní vody v přípořchové vrstvě přibližně v úrovni 400 m n. m.

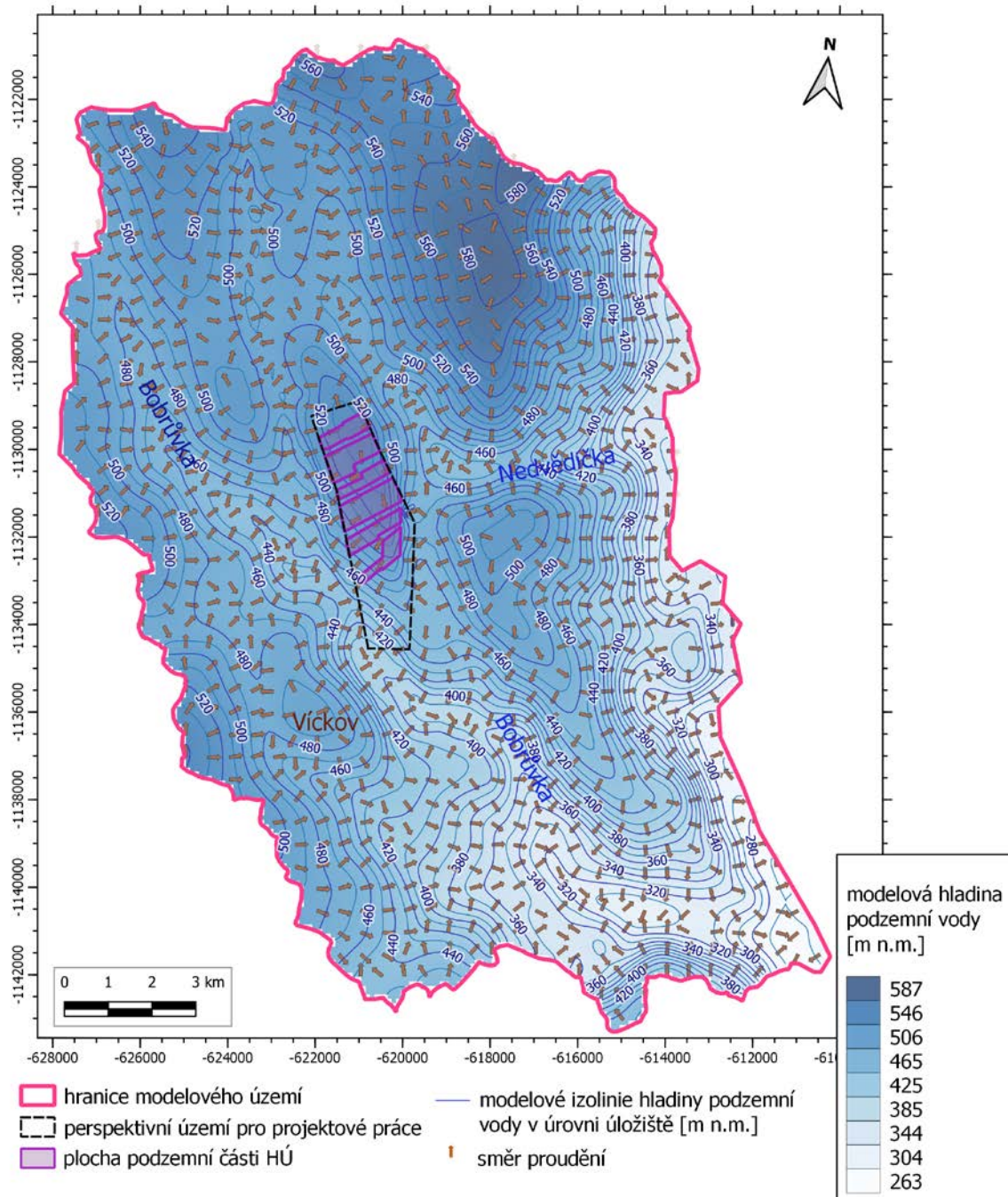
Rozsáhlejší elevace terénu v kombinaci s drenážními úseky říční sítě vytváří v horninovém masivu dílčí uzavřené subsystémy proudění podzemí vody.



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

V projektové úrovni HÚ 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 (Obr. 8). V úrovni projektovaného HÚ se dominantně projevuje regionální drenážní funkce Bobrůvky a Nedvědičky. Méně výrazně se projevuje drenážní účinek Bukovského potoka a návazně zaplaveného důlního díla Rožná (SSZ od polygonu perspektivního území). Rovněž méně zřetelně se projevuje drenážní funkce Hadůvky a zaplaveného důlního díla Olší v oblasti Drahonína (na JV od polygonu perspektivního území).

Vzhledem k průběhu terénu tlaková úroveň hladiny podzemní vody v prostoru HÚ dle modelu vychází přibližně 460 – 530 m n. m. (Obr. 8). Z hlediska vývoje potenciálu proudění tak v lokalitě existují podmínky pro oživený oběh podzemní vody.



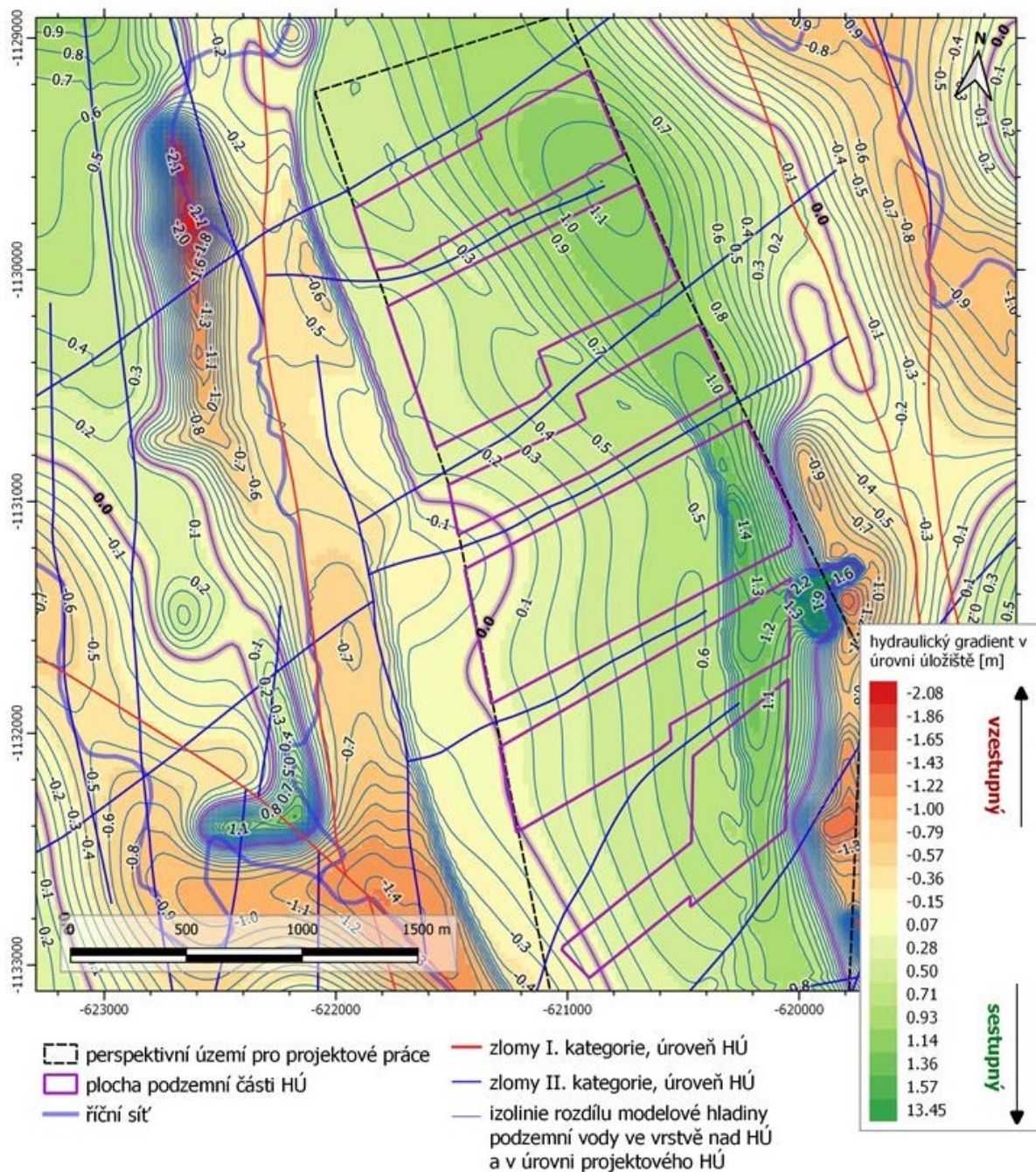
Obr. 8 Modelové hladiny podzemní vody v předpokládané úrovni HÚ - 26. modelová vrstva aktualizovaného detailního modelu (úroveň -100 až -125 m n. m.) - model MODFLOW-USG

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

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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), která zaujímá 98% podzemní části úložiště. Výsledek je ovlivněn morfologií terénu a průběhem říční sítě. Nejintenzivnější sestupné proudění lze očekávat podél osní partie Střítežského hřbetu, se kterou přibližně koresponduje východní okraj HÚ. Při západním okraji HÚ by se již lokálně mohlo vyskytovat vzestupné proudění vlivem blízké regionální drenážní báze Bobruvky.



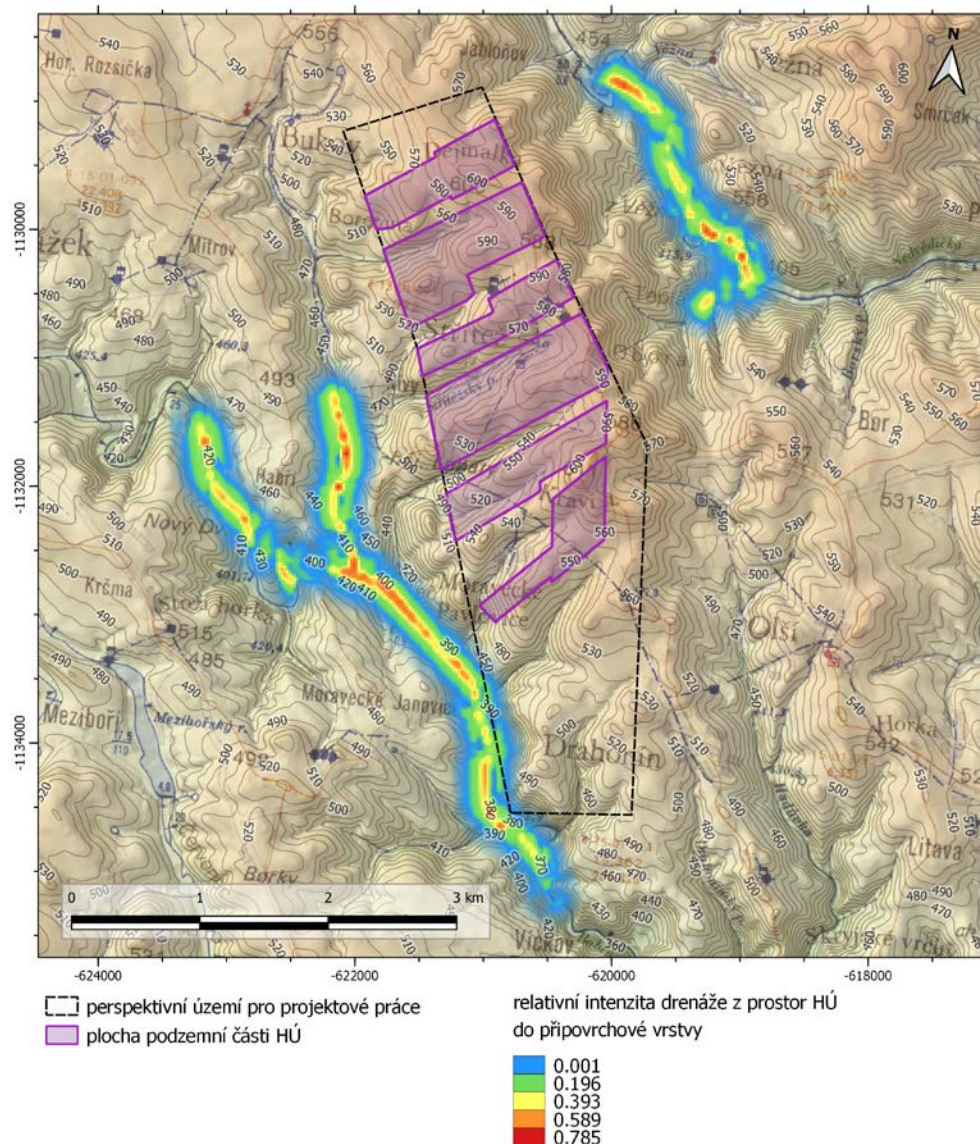
Obr. 9 Hydraulický gradient v úrovni podzemní části HÚ (-124.5 m n. m.)

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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 78848.

Infiltrační oblasti pro prostor HÚ se jednoznačně nachází v oblasti Střítežského hřbetu – přímo v nadloží projektovaného hlubinného úložiště. Nejvíce pravděpodobná je infiltrace zejména z vrcholových partií hřbetu.



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

Říční síť v lokalitě Kraví hora náleží do povodí Svratky. Prostor potenciálního HÚ odvodňuje Bobrůvka, Bukovský potok (západně od úložiště) a Nedvědička (východně od úložiště). Z hlediska zastoupení drenáže z prostor HÚ v jediném toku dominuje Bobrůvka. Do ní podle realizovaných výpočtů bude odvodněno 53% podzemní části úložiště. Zbýlá část plochy úložiště je odvodněna v povodí Bukovského potoka (12%) a Nedvědičky (35%). Uvedené

 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

procentuální údaje zastoupení drenáže z HÚ zahrnují i částice drénované do prostoru důlního díla Olší (začleněny k povodí Nedvědičky) i částice drénované do zaplaveného průzkumného úseku Habří (dolu Rožná) – částice začleněny k povodí Bobrůvky vzhledem k poměrům proudění v prostoru zaslepené části důlního díla. Aktuálně realizovaná koncepce hydrogeologických modelů lokalit neumožňuje trackování částic prostorem zaplavených důlních chodeb.

Drenáž z prostoru HÚ je vzhledem ke geometrii projektovaného úložiště i vlivem hydrogeologických poměrů rozptýlená do relativně dlouhých úseků říční sítě. Největší intenzita drenáže z prostor HÚ je modelem vypočtena pro úsek Bobrůvky pod soutokem s Bukovským potokem (Obr. 10). Nejblíže k okraji HÚ (632 m) vychází drenáž z prostor HÚ v přípovrchové vrstvě v povodí Bobrůvky. Jedná se o úsek mezi Moraveckými Janovicemi a Pavlovicemi.

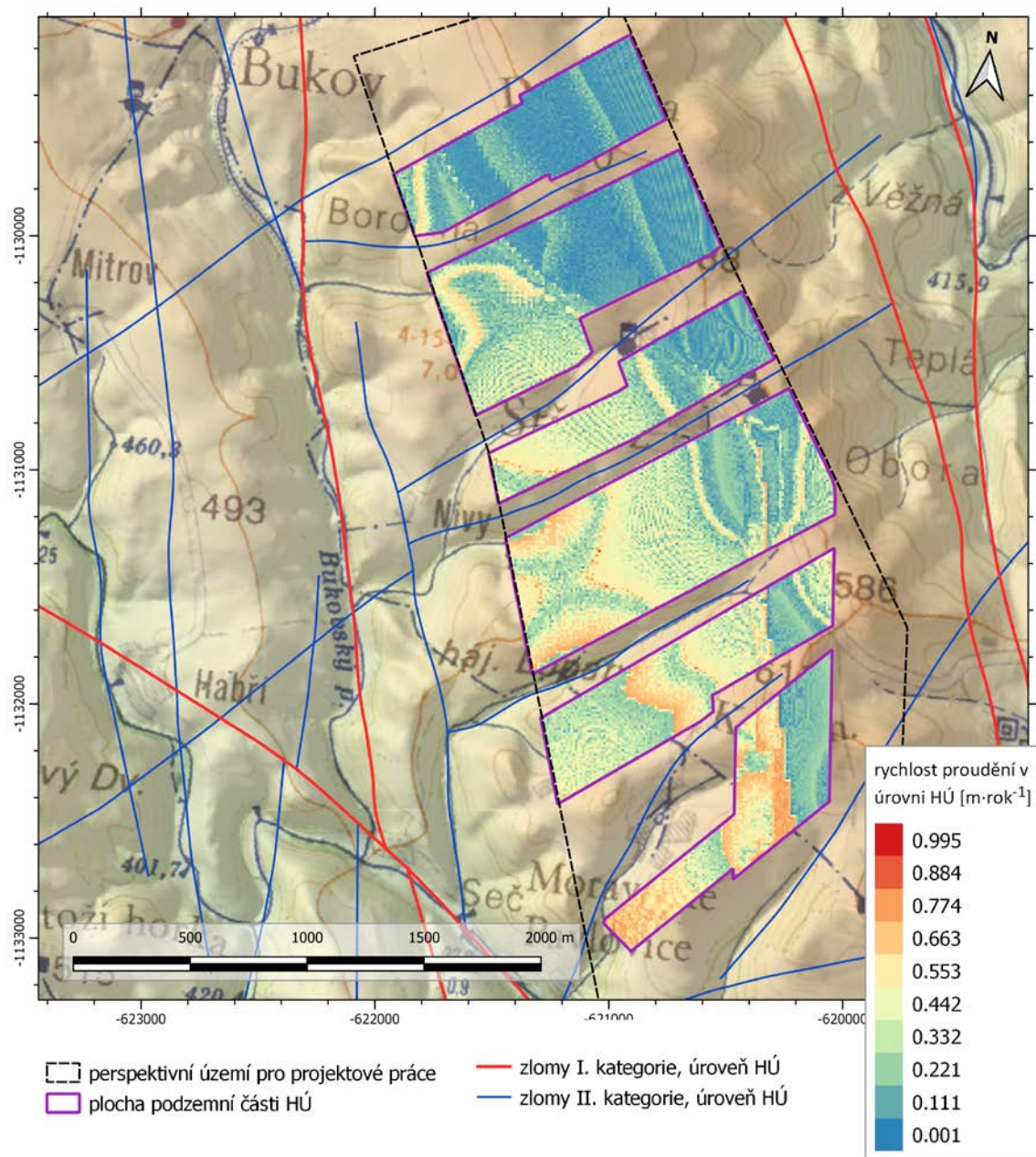
3.5.4 Rychlosti a doby zdržení podzemní vody

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

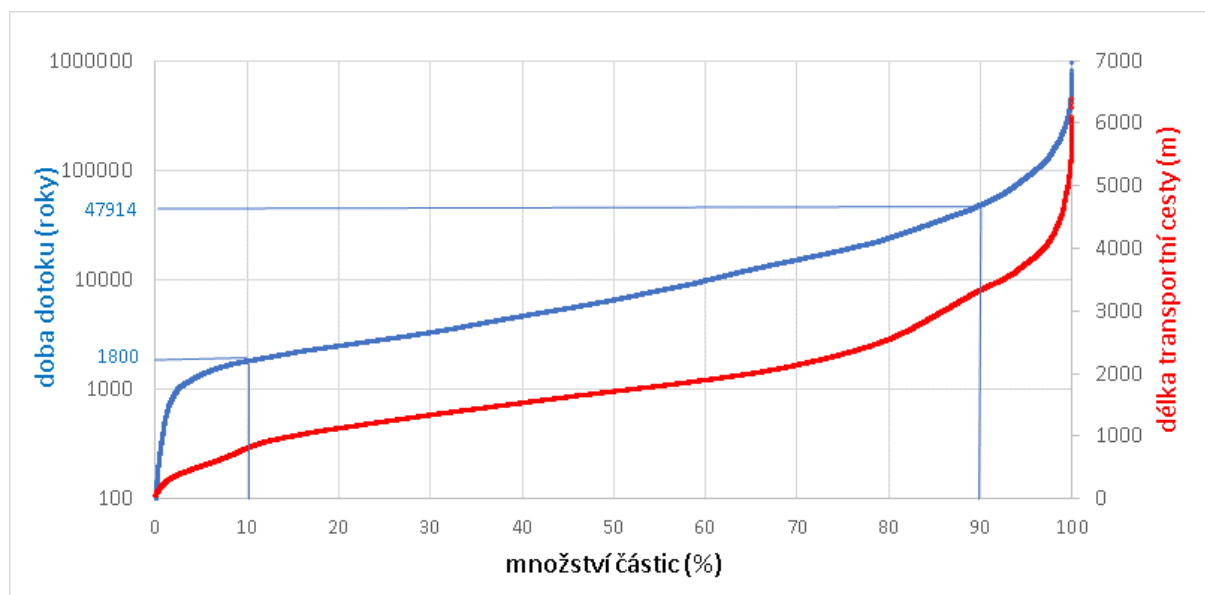
Rozložení průměrných vypočtených rychlostí proudění z prostoru HÚ k drenážním úsekům říční sítě je vykresleno na Obr. 11. Průměrné rychlosti proudění ovlivňuje morfologie terénu, poloha důlních chodeb (zejména důl Olší, ale i poloha průzkumného úseku Habří), rozložení drenážních úseků říční sítě, litotyp horniny a expertně odhadnutá propustnost i délka transportních cest do místa drenáže. Vyšší průměrné rychlosti proudění se vyskytují spíše v západních partiích HÚ s odvodněním do Bukovského potoka a Bobrůvky. Maximální vypočtená hodnota dosahuje téměř 1 m.rok⁻¹.

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, popřípadě blízká důlní díla. Čáru překročení délky transportních cest obsahuje (Obr. 12). Zjištěné minimum klesá k hodnotě 100 m a maximum dosahuje hodnotu 6400 m. Minimální hodnoty délky transportních cest jsou dány polohou úseku zaplavené etáže důlního díla Olší.

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 Kraví hora byl modelem vypočten 2846 roků. Z Obr. 12 je patrné, že obvyklý rozsah doby dotoku se pro prostor HÚ v lokalitě pohybuje v rozmezí 1800 až 47914 let (mezidecilové rozpětí intervalu výsledků $Q_{0,1}$ - $Q_{0,9}$).



Obr. 11 Rozložení průměrných modelových rychlostí proudění z prostoru HÚ do míst drenáže [m·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 Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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:

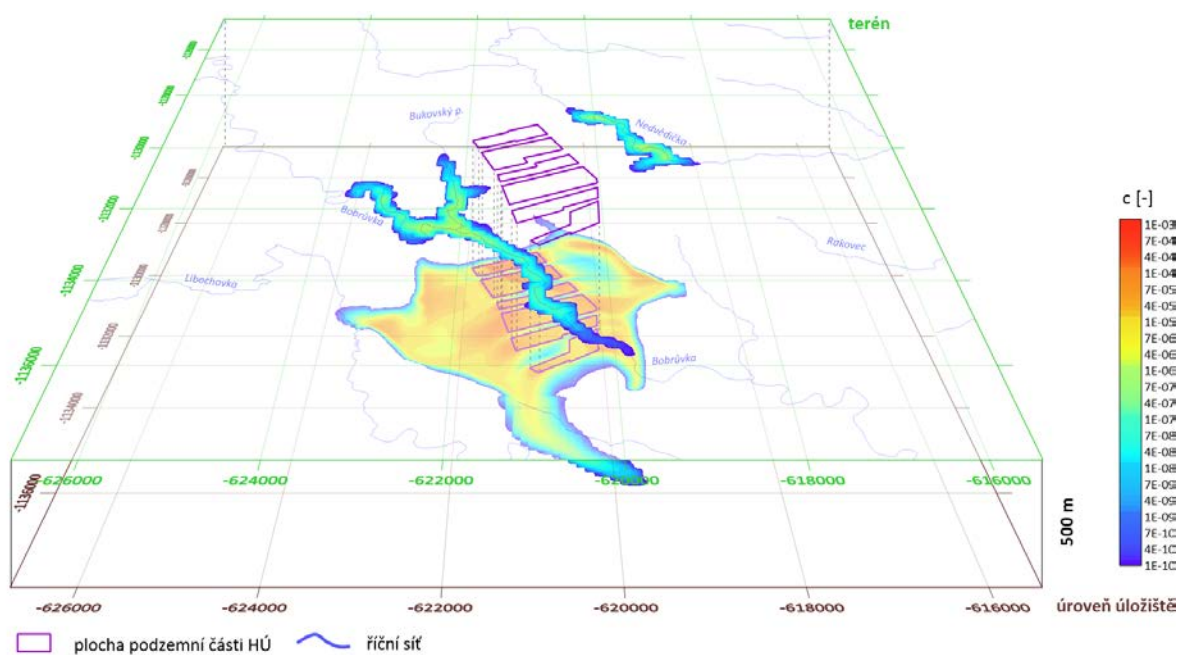
- přípovrchová zóna (v modelu proudění reprezentovaná 1. modelovou vrstvou) má všude zadánu shodnou hodnotu pórovitosti 5 %,
- horninový masiv (pod úrovní první modelové vrstvy) má pórovitost zadánu proměnlivou v závislosti na:
 - o hloubce každé modelové buňky pod terénem, zadán je lineární pokles pórovitosti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

Modelové pórovitosti přirozeně rozpukaneho 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 soutokové oblasti Bobrůvky a Bukovského potoka, kam je odvodněna větší část plochy hlubinného úložiště. Poměr ředění byl vyčíslen v procentech z podílu maximální koncentrace v přípovrchové vrstvě a v prostoru podzemní části HÚ. Lokalitu Kraví hora charakterizuje hodnota 0,7 %. Rozsahy kontaminačního mraku a vypočtené relativní koncentrace v úrovni úložiště a v přípovrchové vrstvě jsou vykresleny na Obr. 13.



 SÚRAO	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

5 Závěr

Aktualizovaný model pro lokalitu Kraví hora poskytuje nejnovější verzi (1.3) popisu poměrů hlubinného proudění podzemní vody v drahonínském masivu, uvažovaném jako vhodné prostředí pro situování hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Model reflektuje přepracované tektonické schéma, které vedlo k upřesnění polohy perspektivního 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.

	Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, pasport aktualizovaného detailního modelu – Lokalita Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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 Kraví hora Závěrečná zpráva	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 477/2020

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., BAIER J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště - pasport detailního modelu – lokalita KRAVÍ HORA. Technická zpráva číslo 336/2018. 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