Technická zpráva číslo 475/2020

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

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Autoři: Polák M.

a kolektiv

PROGEO, s.r.o.

Roztoky, 2020

SÚRAO

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 ČIHADLO

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: SURAO-475-2020

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2020-ZZ-S3183-043-Hodnoceni2_HGM_Pasport_Cihadlo

ŘEŠITELÉ:

PROGEO, s.r.o.

Autor: Michal Polák

Autorský kolektiv: Černý M, Gvoždík L, Uhlík J, Milický M, Jankovec J

Obsah

1 Úvod 7

2 Charakteristika zájmového území 8

3 Model proudění podzemní vody lokality Čihadlo 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 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 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 0 m n. m. 13

Obr. 4 Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody v modelu lokality Čihadlo (MODFLOW-USG) 15

Obr. 5 Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev 16

Obr. 6 Výsledné drénované množství podzemní vody do příslušných toků 17

Obr. 6 Modelové hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě – model MODFLOW-USG 18

Obr. 7 Modelové hladiny podzemní vody v předpokládané úrovni HÚ - 27. modelová vrstva aktualizovaného detailního modelu (úroveň 0 až 25 m n. m.) - model MODFLOW-USG 19

Obr. 8 Hydraulický gradient v úrovni podzemní části HÚ (8 m n. m.) 20

Obr. 9 Vypočtená místa drenáže pro podzemní vodu z úrovně projektovaného HÚ 21

Obr. 10 Rozložení průměrných modelových rychlostí proudění z prostoru HÚ do míst drenáže [$m \cdot rok^{-1}$] 23

Obr. 11 Doba dotoku a délka trajektorie částic z prostor HÚ do míst drenáže s vyznačenými $Q_{0,1}$ a $Q_{0,9}$ 24

Obr. 12 Rozložení relativních modelových koncentrací v úrovni HÚ (8 m n. m.) a v přípovrchové vrstvě.....26

Seznam tabulek:

Tab. 1 Tabulka horninových typů dle podkladů ČGS, parametry K_0 pro výpočet K(z).....13

Seznam použitých zkratek:

3D	trojrozměrný
AV ČR	Akademie věd České republiky
ČGS	Česká geologická služba
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DIBAVOD	digitální databáze vodohospodářských dat
HG	hydrogeologický
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

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.

Prezentované práce jsou součásti projektu „Aktualizace hodnocení lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti“ (zakázkový list PB-2019-ZL-U3183-043-Hodnoceni2).

Předkládaná zpráva dokumentuje aktualizaci detailního hydrogeologického modelu a schematizovaného transportního modelu pro lokalitu Čihadlo, která navazuje na zpracování regionálního modelu (Uhlík et al. 2016) a detailního modelu lokality Čihadlo (Polák et al. 2018).

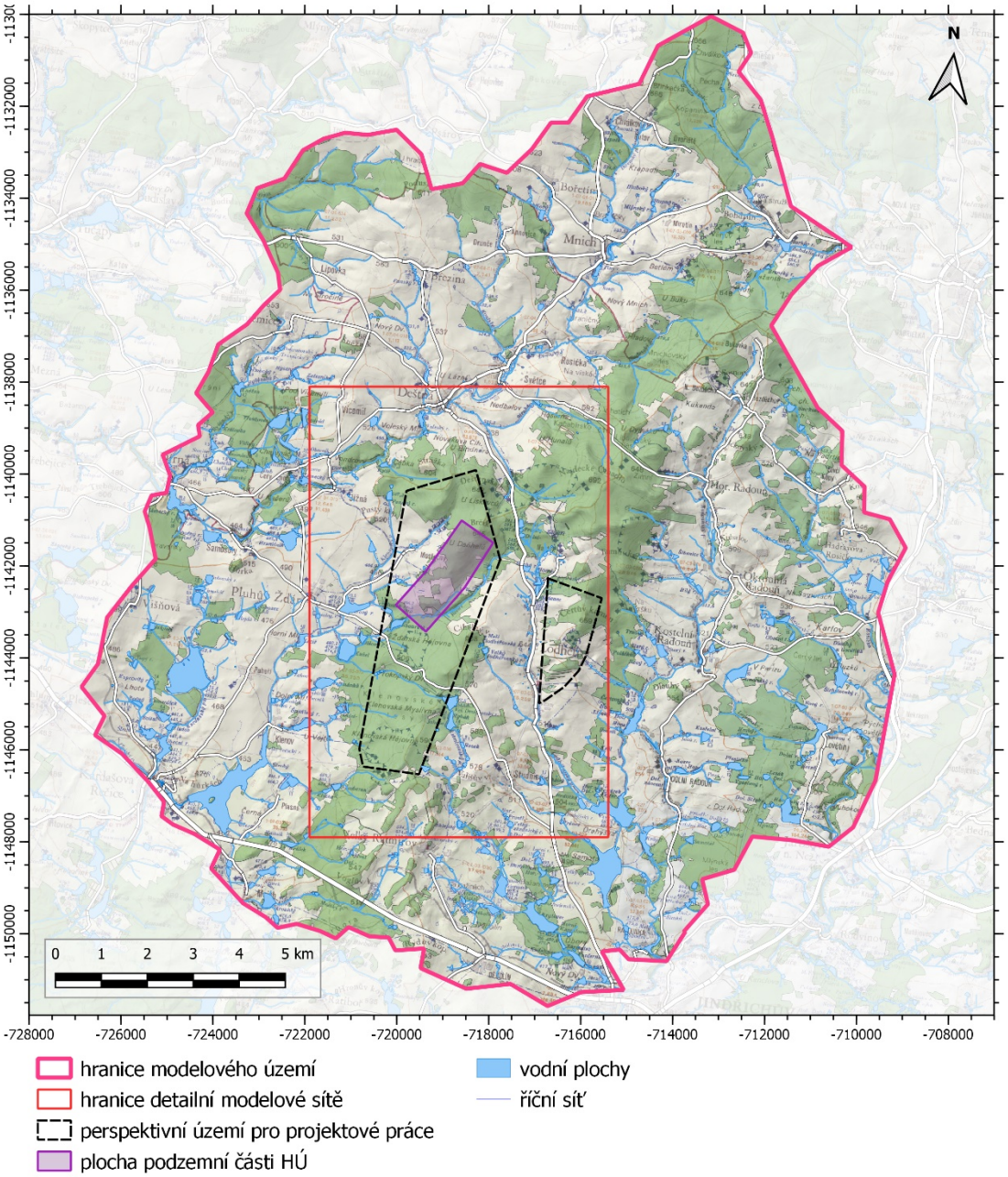
Metodika zpracování detailních hydrogeologických modelů, je popsána v Uhlík et al. (2018). Pro posloupnost vzniklých hydrogeologických modelů lokality regionální, detailní a aktualizovaný detailní je zavedeno označení verze 1.1, 1.2 a 1.3. Aktualizace detailního modelu proudění spočívá ve zpracování a zadání dat z nového strukturního schématu (Mixa et al. 2019) a proběhla na pracovišti PROGEO s.r.o. za využití softwaru MODFLOW-USG. Při aktualizaci modelu transportu je HÚ situováno 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).

Aktualizovaný detailní hydrogeologický model lokality reprezentuje aktuálně platnou verzi popisu proudění podzemí vody v masivu s projektovaným HÚ.

2 Charakteristika zájmového území

Oblast modelového řešení lokality Čihadlo (Obr. 1) byla zvolena tak, aby z hlediska proudění podzemní vody představovala uzavřený bilanční celek. Hranice modelové oblasti byly vedeny po hydrologických rozvodnicích. Aktivní plocha hydrogeologického modelu lokality Čihadlo (s výpočtem proudění podzemní vody) zaujímá rozlohu 256,6 km^2.



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

V roce 2019 byla na základě sestavení nového tektonického schématu (Mixa et al. 2019) stanovena nová perspektivní území pro projektové práce na situování HÚ a následně vymezena oblast umístění podzemní části HÚ (Zahradník et al. 2019). Českou geologickou službou (ČGS) byla vymezena dvě perspektivní území o rozloze 11,8 km^2 (západní blok) a 2,2 km^2 (východní blok). Úložné prostory pro HÚ o celkové rozloze 2,1 km^2 jsou projektovány

v severní polovině západního bloku perspektivního území v hloubce cca 500 m pod terénem (v přibližné úrovni 8 m n. m.). Hranice příslušných polygonů jsou vyneseny na Obr. 1.

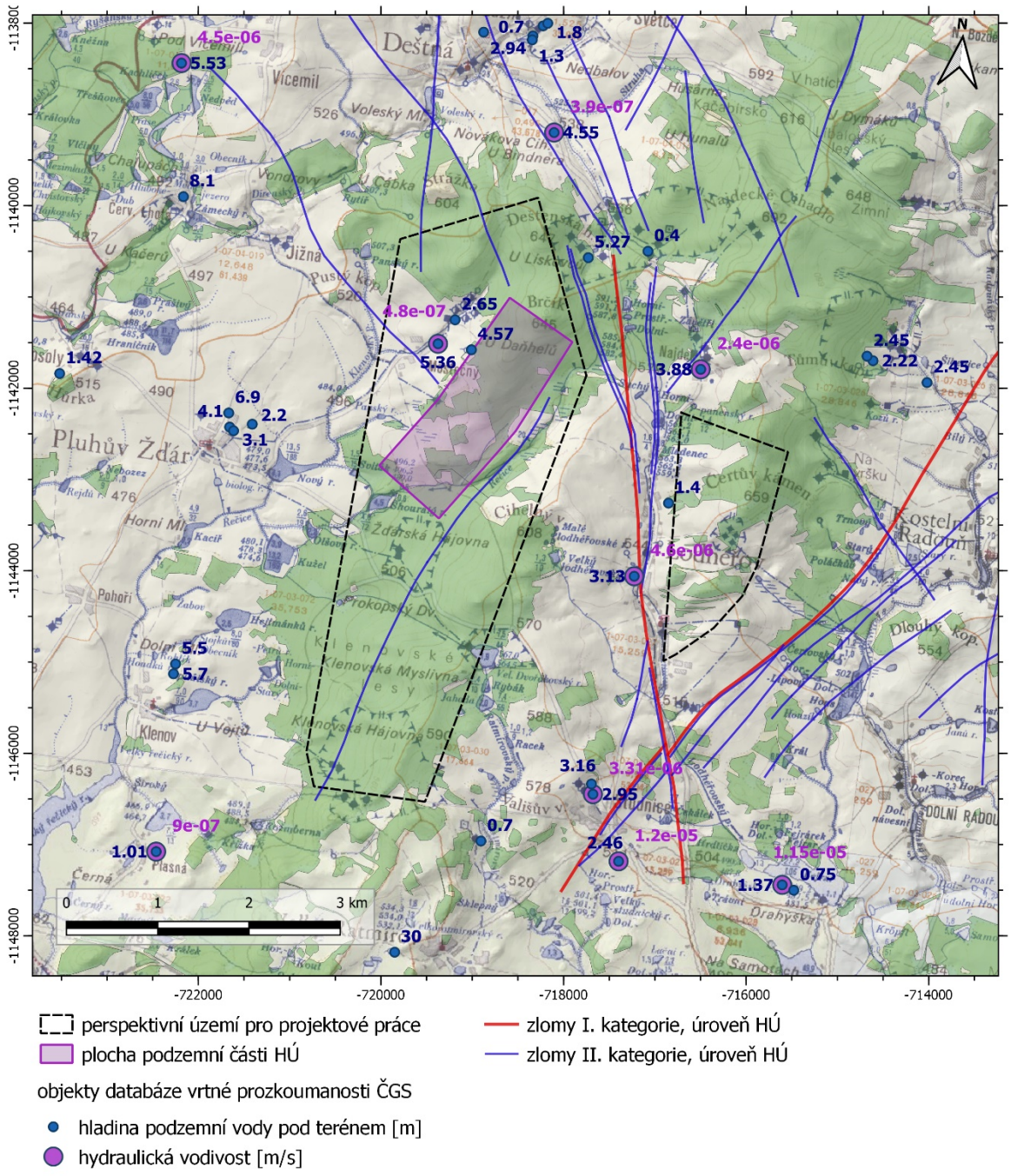
Nejvyšší úrovně terénu v modelovém území dosahuje vrchol Najdecké Čihadlo (692 m n. m.) v severovýchodní části průzkumného území. Nejnižší úroveň (438 m n. m.) má soutok Řečice a Kardašského potoka na jihozápadní hranici modelového území. Úroveň terénu nad projektovanou plochou podzemní části HÚ je v rozmezí 495 a 640 m n. m.

Zájmová oblast lokality Čihadlo je budována dvěma litotektonickými jednotkami krystalinika. V centrální části se do starší jednotky drosendorfského jihočeského moldanubika intrudovaly granitoidy klenovského plutonu, ve kterých je situováno projektované HÚ. Třetí litologickou jednotkou, kterou lze v oblasti vymezit, jsou dílčí pokryvné útvary neogenního a kvarterního stáří ve formě fluviálních, deluviálních a antropogenních sedimentů. V širším okolí projektovaného HÚ byla zjištěna dvě zlomová pásma prvního řádu (lodhéřovský zlom a zlomové pásmo vyvinuté podél východního okraje klenovského plutonu) a několik zlomů druhého řádu (dle kategorizace SKB).

Území lokality Čihadlo je součástí hydrogeologického rajonu 6510 Krystalinikum v povodí Lužnice (vyhláška č. 5/2011 Sb.). Pro širší zájmovou oblast granitoidního masivu jsou k dispozici pouze omezené bodové informace do hloubky max. prvních desítek metrů. Hydrogeologické vrty jsou většinou situovány v údolích vodních toků nebo v lokálních sníženinách v přípovrchové zóně rozvolnění puklin s aktivním oběhem podzemních vod a s výrazně vyšší hydraulickou vodivostí (ve srovnání s horninovým prostředím v úrovni HÚ). Hladina podzemní vody se ve většině vrtů nachází mělce pod terénem, hydraulické vodivosti se pohybují v rozmezí řádu 10^{-5} m·s^{-1} do 10^{-7} m·s^{-1} (Obr. 2).

Zdrojem podzemní vody na lokalitě je srážková infiltrace, ke které dochází v celé ploše území. Rozložení efektivní infiltrace je prostorově variabilní, průměrná velikost je 3,25 l·s^{-1}·km^{-2} (Krásný et al. 1982). Drenáž podzemní vody je zprostředkována především povrchovými toky.

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



Obr. 2 Hydrogeologické údaje v databázi vrtné prozkoumanosti ČGS

3 Model proudění podzemní vody lokality Čihadlo

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 geometrie modelu - zahuštění výpočetní sítě v závislosti na nově vymezené poloze HU (Zahradník 2019) a zadání hydraulických parametrů horninového prostředí na základě vyhodnocení nového tektonického schématu (Mixa et al. 2019).

3.1 Geometrie modelu

Oblast výpočetní sítě modelu je obdélníkového tvaru s počátkem (levý dolní roh) na souřadnicích X_{Kr} = −728 000, Y_{Kr} = −1 152 500 v systému S-JTSK. Oblast pokrytá výpočetní sítí má rozměry 21×22,5 km.

Modelové území je v horizontálním směru diskretizováno pravidelnou čtvercovou sítí se stranou elementu 100 m. Základní výpočetní síť sestává z 225 řádek a 210 sloupců. Síť detailního modelu je v oblasti okolí polygonu HÚ (zahrnující celou oblast obou perspektivních území pro lokalizaci HÚ) zahuštěna elementy s velikostí strany 25 m. Oblast zahuštěné výpočetní sítě detailního modelu (6,5×9,8 km) je vykreslena na Obr. 1. Detailní model sestává celkem ze 4 512 690 výpočetních buněk, přičemž výpočet proudění podzemní vody je zadán ve 4 226 521 buňkách.

Ve vertikálním směru je doména modelu v celé ploše rozdělena do 13 průběžných modelových vrstev. V prostoru zahuštěné výpočetní sítě je ve vertikálním směru druhá až desátá průběžná vrstva rozdělena na čtyři dílčí vrstvy. Ve vertikálním směru je výpočetní síť aktualizovaného detailního modelu rozdělena do 40 modelových vrstev. První modelová vrstva reprezentuje oblast přípovrchového rozvětrání shora omezenou terénem a maximální mocností 70 m. Báze modelu je v úrovni 1000 m pod hladinou moře a 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 popisuje Uhlík et al. (2018). Přijatá modelová koncepce popisu proudění podzemní vody uvažuje v prostoru hydrogeologického masivu přítomnost pásem zvýšených hydraulických vodivostí vázaných na všechny aktuálně známé tektonické poruchové zóny. Průběh poruchových pásem zadaných podle nového tektonického schématu (Mixa et al. 2019) do modelu je pro úroveň podzemní části HÚ dokumentován v Obr. 3.

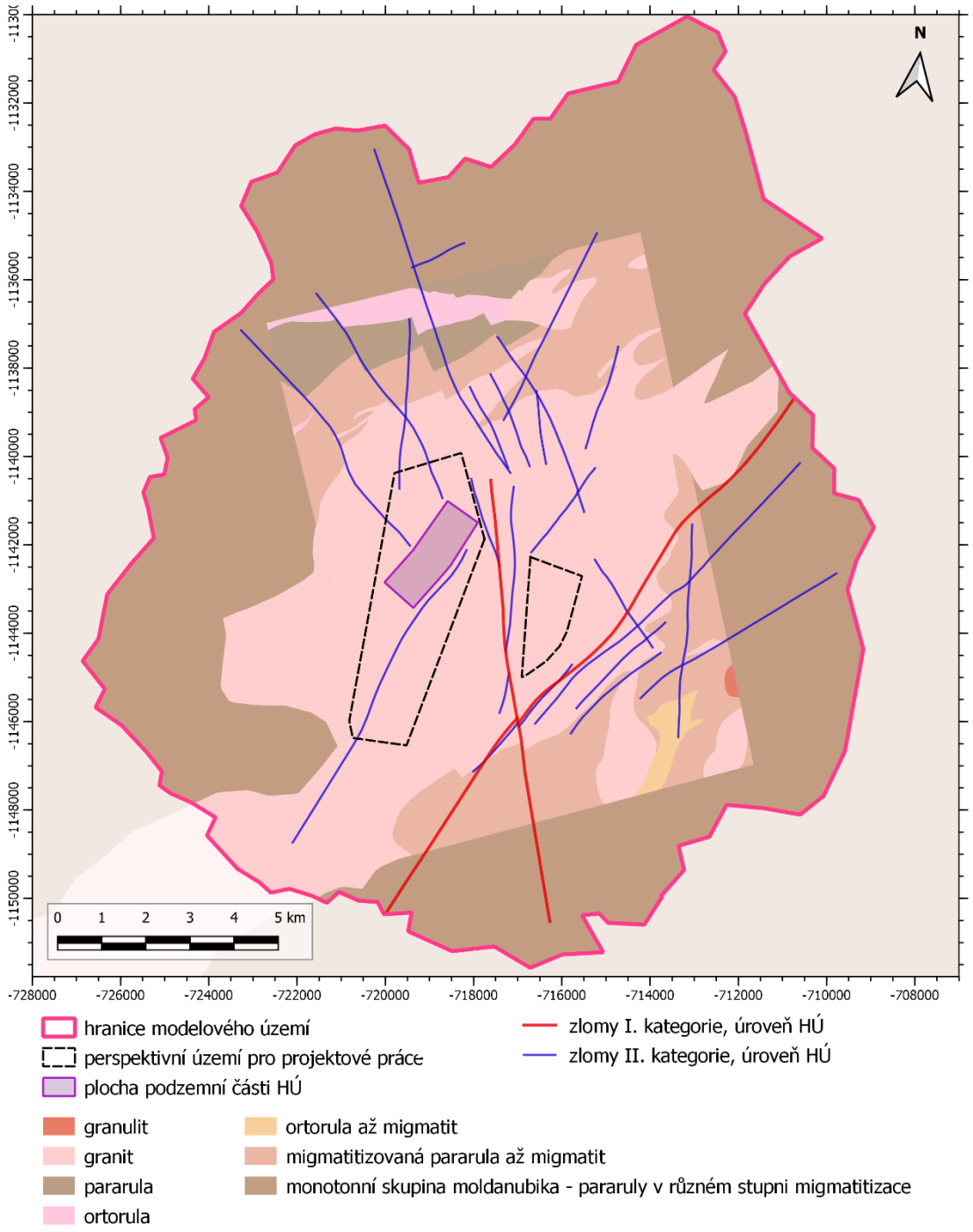
Geometrie těles a hodnoty hydraulické vodivosti *K* v oblasti přirozeně rozpukaného horninového masivu jsou zadány podle horninových typů zdokumentovaných v 3D SG modelu lokality (Franěk et al. 2018). Horizontální řez strukturně-geologickým modelem v rovině

0 m n. m. (přibližná projektová úroveň 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).

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

K_0 je základní hydraulická vodivost bez ovlivnění procesy přípovrchového zvětrání, která vstupuje do hydrogeologických modelů. Výchozí hodnoty parametrů K_0 pro výpočet *K(z)* jsou uvedeny v Tab. 1. Hodnoty K_0 byly stanoveny expertním odhadem ČGS v rozpětí dvou řádů. Hodnoty K_0 použité v detailním modelu lokality Čihadlo byly z tohoto intervalu vybrány na základě analogie s kalibrovanými hodnotami hydraulické vodivosti pro model lokality Kraví hora, který byl realizován pro potřeby bezpečnostního rozboru (Trpkošová et al. 2017).

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, Trpkošová et al. 2017).



Obr. 3 Vodorovný řez z 3D SG modelu - rozložení horninových typů a dokumentace aktualizovaného průběhu zlomových pásem v úrovni 0 m n. m.

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 šířku (1, 10 a 100 m pro zlomy 3., 2., a 1. kategorie) a jejich příspěvek k celkové propustnosti modelových buněk je tedy rozdílný. V přípovrchové zóně nejsou poruchová pásma simulována.

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

Litotyp / poruchová zóna	**K_0 [m·s^{-1}]**
Granulit	$1{,}10 \cdot 10^{-8}$
Migmatitizovaná pararula až migmatit	$3{,}85 \cdot 10^{-9}$
Monotónní skupina moldanubika - pararuly v různém stupni migmatitizace	$3{,}85 \cdot 10^{-9}$
Ortorula	$5{,}50 \cdot 10^{-9}$
Ortorula až migmatit	$5{,}50 \cdot 10^{-9}$
Pararula	$2{,}75 \cdot 10^{-9}$
Granit	$1{,}10 \cdot 10^{-8}$
zlom I. kategorie	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$
zlom II. kategorie	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$
zlom III. kategorie	$1{,}00 \cdot 10^{-7}$

Pro území Čihadlo a zvolené umístění HÚ je významný lodhéřovský zlom (porucha 1. řádu), který probíhá v severo-jižním směru cca 500 m východně od projektovaného HÚ. Zlom představuje potenciální preferenční cestu proudění z infiltrační oblasti ve vrcholových partiích granitového masivu do drenážních partií jižně od HÚ a zároveň potenciálně propojuje hlubší a mělčí partie masivu. Z dalších poruch detekovaných v blízkém okolí HÚ může být významná poruchová zóna 2. řádu, která je lokalizována v pramenní oblasti toku Řečice a směřuje k jihozápadu. Lze předpokládat, že síť současně uvažovaných poruchových zón není zcela kompletní a průběh a charakter zón v hloubce HÚ není možné v současnosti ověřit. Zlomová pásma mají, na základě přijaté koncepce poklesu hydraulické vodivosti porušených pásem s hloubkou, v úrovni projektovaného HÚ předpokládanou hydraulickou vodivost v řádu 10^{-8} m·s^{-1} pro pásma 1. řádu a 10^{-9} m·s^{-1} pro pásma 2. řádu. Maximální hydraulická vodivost v prostoru identifikovaných zlomových zón ve vzdálenosti do 500 m od hranice projektového HÚ v modelu lokality Čihadlo je $1{,}6 \cdot 10^{-8}$ m·s^{-1}.

3.3 Okrajové podmínky a srážková infiltrace

Výpočet modelu proudění je podmíněn zadáním okrajových podmínek výpočtu. V aktualizovaném detailním modelu je vertikální a spodní (báze) hranice modelové domény popsána homogenní okrajovou podmínkou druhého typu (nulového průtoku kolmo na hranici modelu). Na horní hranici (terén) modelu je předepsána v celé ploše okrajová podmínka druhého typu (konstantního toku ve směru kolmém na hranici) představující srážkovou infiltraci. V liniích vodních toků je tato podmínka doplněna ještě drenážní okrajovou podmínkou třetího typu (toku závislého na úrovni hladiny vypočtené a zadané na hranici a hydraulickém odporu hranice).

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 (dotace povrchové vody do horninového prostředí není simulován).

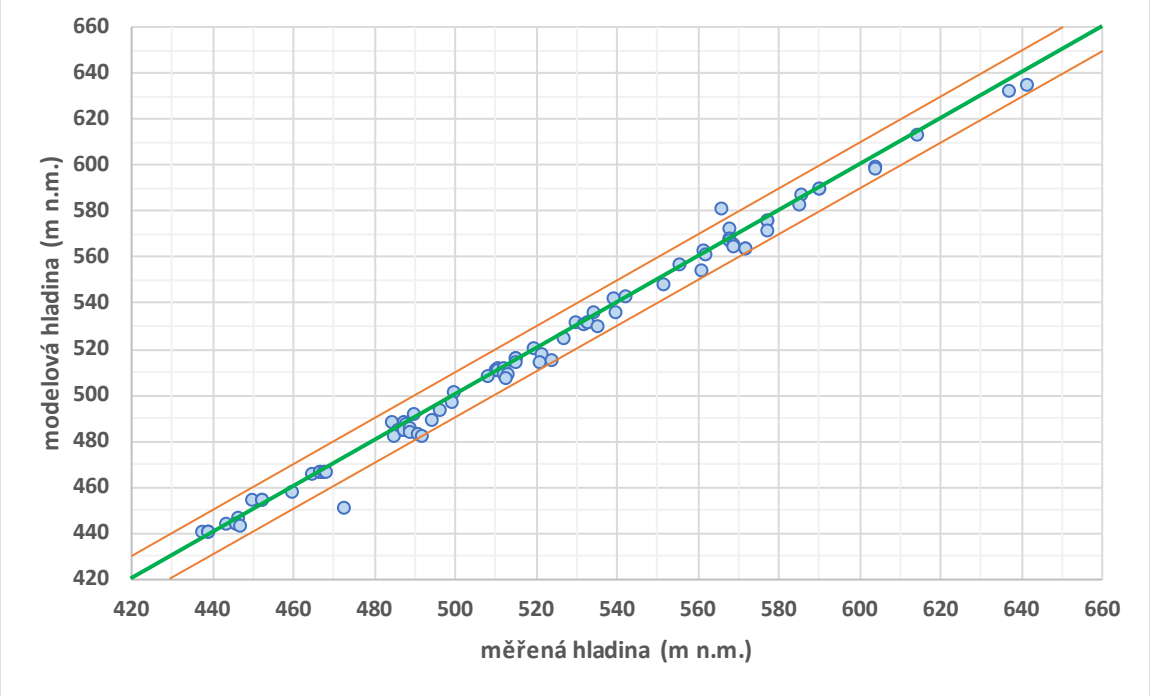
Distribuce plošné infiltrace v modelu koreluje s rozložením srážkového normálu (poskytnutého ČHMÚ) tak, aby průměrná zadaná infiltrace pro celý model odpovídala infiltraci zadané v regionálním modelu (3,25 l·s^{-1}·km^{-2}).

3.4 Kalibrace modelu

Kalibrační data úrovně hladin podzemní vody byla získána z archivních údajů hydrogeologických vrtů databáze ČGS a jsou shodná s daty v Polák et al. (2018).

Pro kalibraci modelové úrovně hladiny podzemní vody bylo využito 96 objektů (studny a vrty) s údaji o měření hladiny podzemní vody a doplňující předpoklad, že obvyklá hloubka hladiny podzemní vody pod terénem je do 10 m (v oblastech bez měřených hladin).

Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody (kalibrační kritérium) je zobrazeno v grafu na Obr. 4. Dosaženou shodu lze u modelu s regionálním rozsahem i s ohledem na časovou nesouslednost měření považovat za velmi dobrou, pouze u 10 objektů byl rozdíl modelových a měřených hladin větší než 5 m.



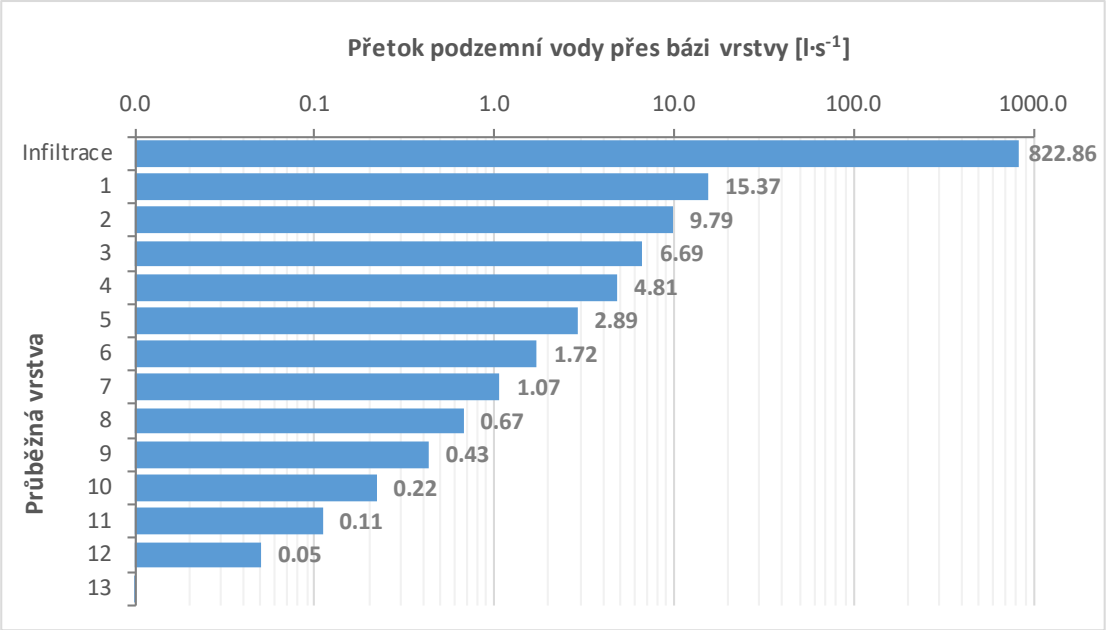
Obr. 4 Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody v modelu lokality Čihadlo (MODFLOW-USG)

3.5 Výsledky hydraulického modelu

3.5.1 Bilance modelového řešení

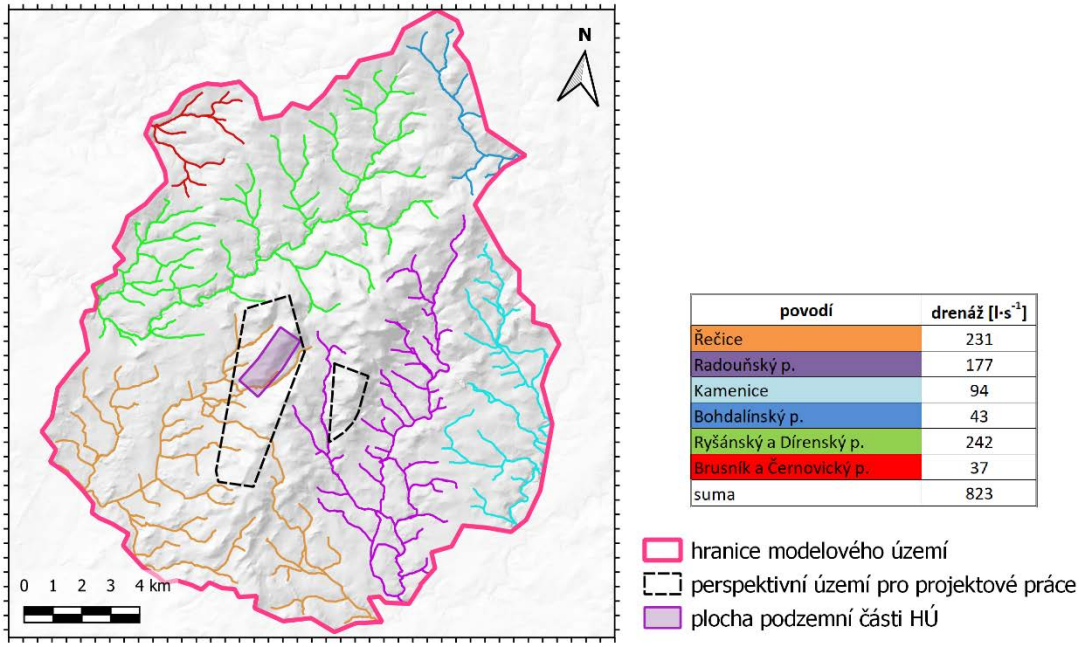
Z celkově infiltrovaného množství 823 $l \cdot s^{-1}$ proudí 98 % podzemní vody pouze v přípovrchové vrstvě. Z přípovrchové vrstvy do hlubších partií horninového masivu (resp. druhé modelové vrstvy) přetéká pouze 15,4 $l \cdot s^{-1}$. Množství podzemní vody proudící v prostoru modelu v jednotlivých 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 (8. průběžná vrstva), přetéká přes bázi sedmé modelové vrstvy 1,07 $l \cdot s^{-1}$ podzemní vody. Suma průtoků přes vymezený prostor HÚ je modelem stanovena na $3{,}78.10^{-2}$ $l \cdot s^{-1}$, specifický průtok přes půdorysnou plochu HÚ je $1{,}8.10^{-2}$ $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$. V detailním

modelu není zohledněno vertikální přetékání v prostoru zatopeného důlního díla Okrouhlá Radouň.



Obr. 5 Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev

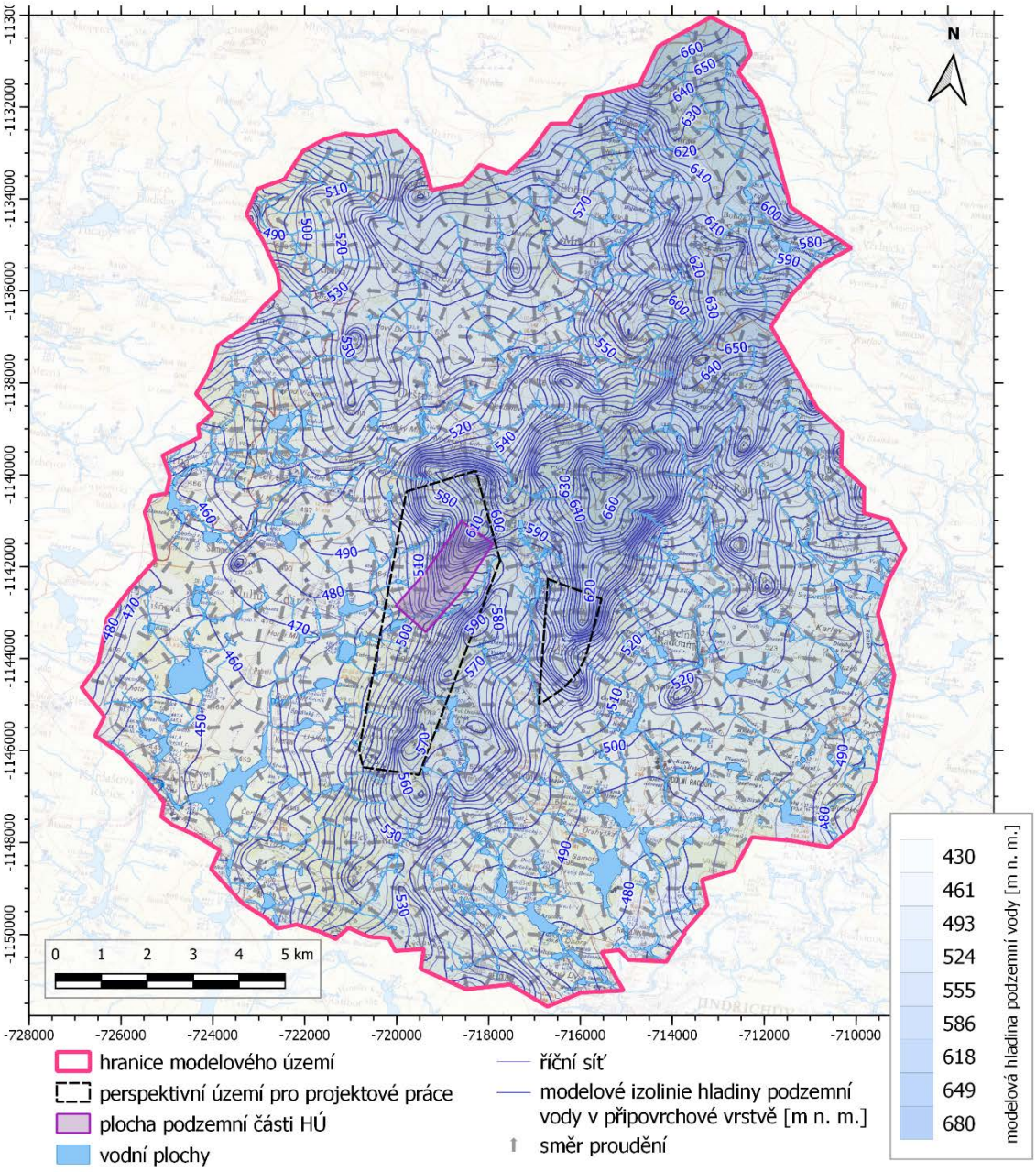
Podzemní voda je v prostoru modelu drénována výhradně do říční sítě. Na Obr. 6 jsou znázorněna jednotlivá hlavní povodí v modelové oblasti. Do povodí Dírenského potoka na severozápadě území je v modelu drénováno 242 $l \cdot s^{-1}$, v povodí Řečice (ve kterém je projektováno HÚ) na jihozápadě je drénováno 231 $l \cdot s^{-1}$. Do povodí Radouňského potoka (k němuž náleží Lodhéřovský p.) odvodňujícího k jihu centrální oblast území je drénováno 177 $l \cdot s^{-1}$. Zbylá část podzemní vody (cca 174 $l \cdot s^{-1}$) je drénována do povodí Kamenice, Bohdalínského potoka a potoka Brusník.



Obr. 6 Výsledné drénované množství podzemní vody do příslušných toků

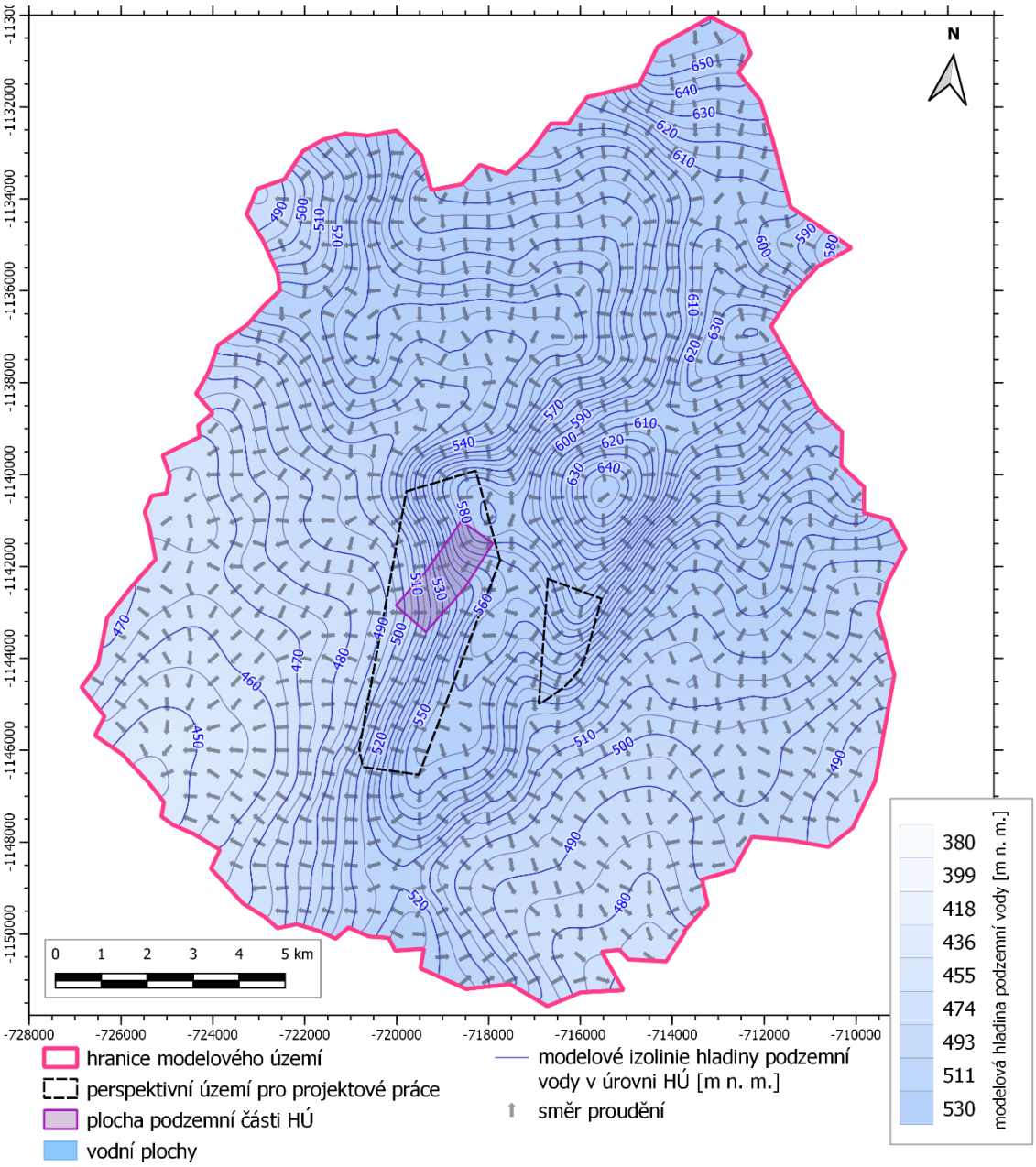
3.5.2 Hladiny a směry proudění podzemní vody

Izolinie modelové hladiny podzemní vody a směry proudění v přípovrchové (první modelové) vrstvě jsou zobrazeny na Obr. 7. Úroveň volné hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě je ve shodě s kalibračním kritériem generelně konformní s terénem. Oblast s nejvyšší úrovní hladiny podzemní vody v oblasti vrcholu Najdecké Čihadlo je součástí hydrogeologické rozvodnice, která v severní části území odděluje drenážní oblast Nežárky a Lužnice (rozvodnice povodí Radouňského a Dírenského potoka) a v jižní polovině území drenážní oblast Nežárky u Jindřichova Hradce a dolního toku Nežárky před soutokem z Lužnicí. Méně výrazná je z hlediska hladiny podzemní vody rozvodnice mezi Řečicí a Dírenským potokem. Polohy rozvodnic spolu s polohami drenážních bází na okraji zájmového území definují generelní směry proudění podzemní vody v zájmovém území. V centrální části tělesa granitů se hydraulická výška pohybuje v rozmezí 500 až 650 m n. m. V nadloží projektovaného HÚ se hladina podzemní vody v přípovrchové vrstvě pohybuje v intervalu 488-620 m n. m.



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

V projektové úrovni HÚ není v průběhu hydroizohyps patrný vliv menších toků ani lokálních terénních elevací (Obr. 8). V základních rysech však zůstává plošný charakter hladin podzemní vody zachován a hydraulická výška v úrovni úložiště je predisponována hlavně lokalizací hlavních rozvodnic a významnějších drenážních bází. Oblast projektovaného HÚ lokalizovaná na západním úbočí granitového masivu je odvodňována do povodí Řečice směrem k jihozápadu. V prostoru projektovaného HÚ je modelová tlaková úroveň hladiny vypočtena v rozsahu 495-585 m n. m.

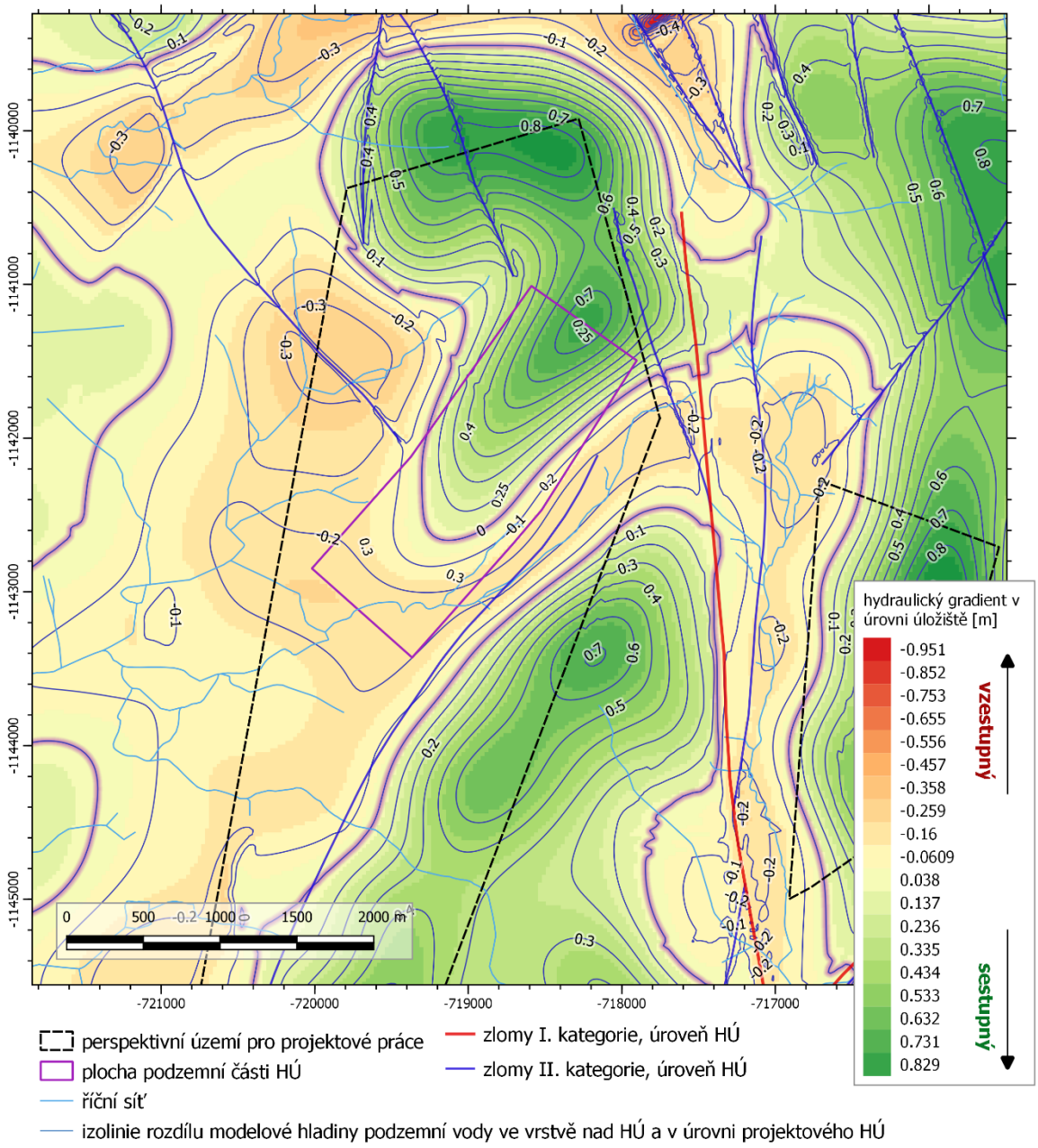


Obr. 8 Modelové hladiny podzemní vody v předpokládané úrovni HÚ - 27. modelová vrstva aktualizovaného detailního modelu (úroveň 0 až 25 m n. m.) - model MODFLOW-USG

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

V prostoru HÚ jsou oblasti s převládající vertikální složkou sestupného proudění situovány pod oblastmi vyšších úrovní terénu v severovýchodní části plochy projektovaného HÚ (58 %). Nejvýraznější sestupný gradient se nachází v prostoru pod jihozápadním úbočím vrchu Brčík. Oblasti s převládající vertikální složkou vzestupného proudění jsou soustředěny v jihozápadní

části HÚ, kde úroveň terénu nad prostorem HÚ klesá k toku Řečice, Klenovského potoka a jejich soutoku. Hydraulický gradient v úrovni HÚ je dokumentován na (Obr. 9), kde je vynesen rozdíl hladin mezi modelovou vrstvou v nadloží HÚ a vrstvou v úrovni úložných prostor.

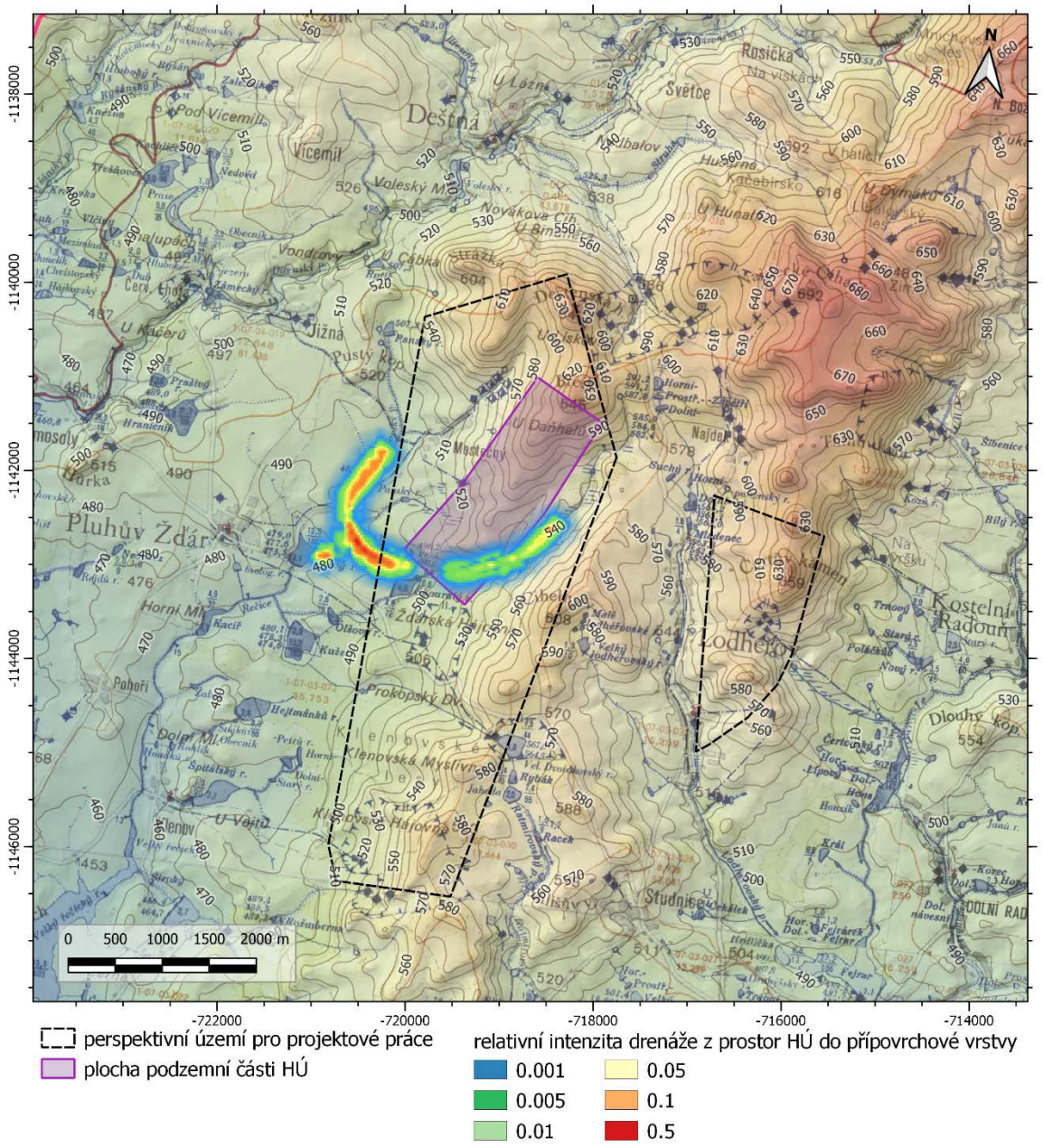


Obr. 9 Hydraulický gradient v úrovni podzemní části HÚ (8 m n. m.)

3.5.3 Vymezení oblastí drenáže a infiltrace z prostor HÚ

Oblasti infiltrace a drenáže podzemní vody ve vztahu k prostoru projektovaného HÚ (protékající prostorem HÚ) byly stanoveny s využitím metody particle tracking. Ta využívá trasovacích částic z prostoru HÚ. Do každé modelové buňky v ploše HÚ je zadáno 16 částic, celkový počet částic použitých k vyhodnocení je 53 184.

Infiltrační oblasti pro prostor HÚ se nachází dominantně v bezprostřední blízkosti polygonu vymezujícího plochu podzemní části HÚ. Jedná se o oblast vrcholu a jihozápadního úbočí vrchu Brčík společně se hřbetem a vrcholovými partiemi Cihelného vrchu (východně od polygonu HÚ). Menší měrou může k dotaci podzemní vody do prostor HÚ docházet i z oblasti vrchu Najdecké čihadlo.



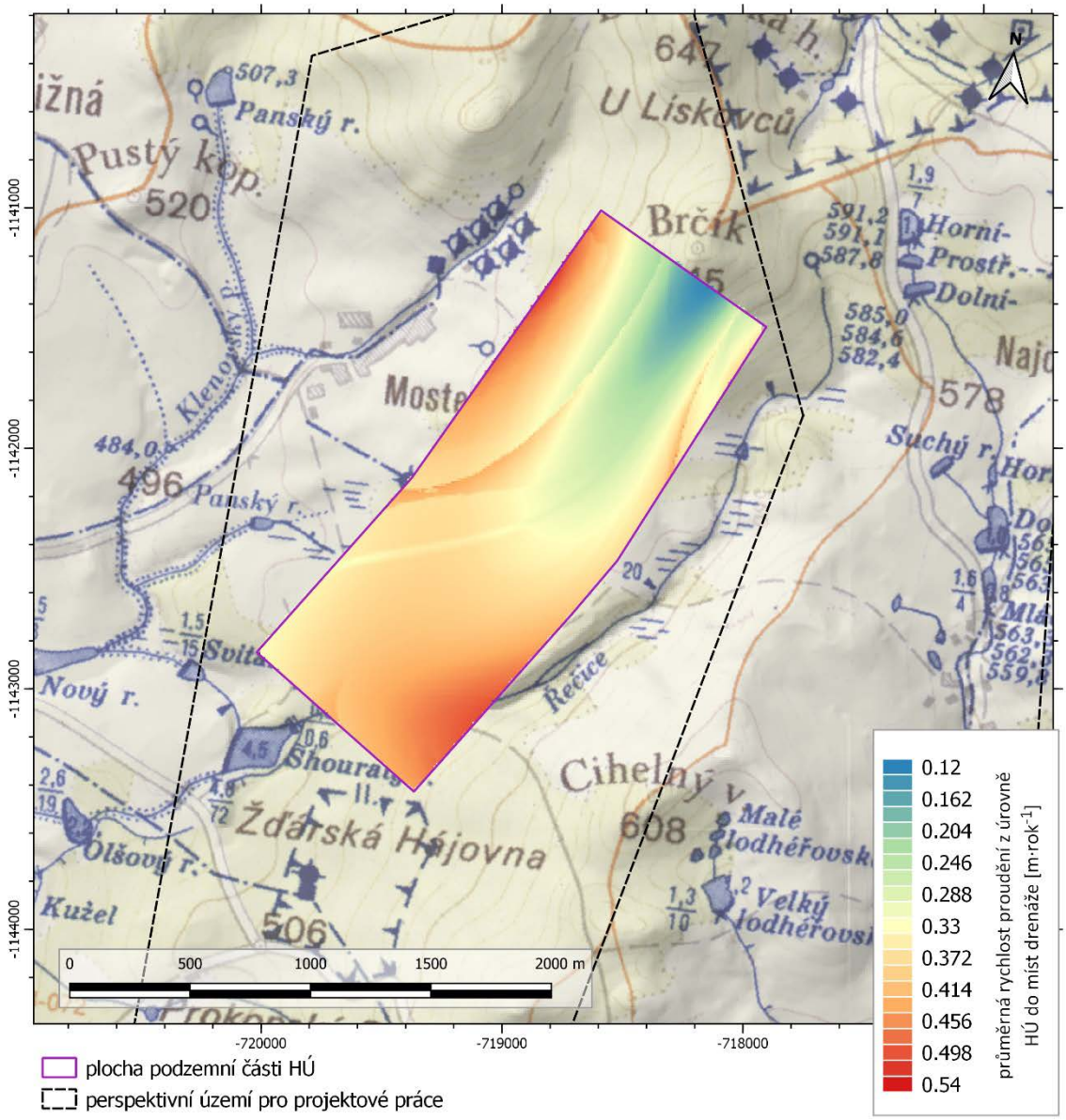
Obr. 10 Vypočtená místa drenáže pro podzemní vodu z úrovně projektovaného HÚ

Místa drenáže z úrovně a prostoru HÚ do drenážních bází jsou znázorněna na Obr. 10. K drenáži podzemní vody protékající prostorem projektového HÚ dochází do dvou toků - Řečice a Klenovského potoka. K částečné drenáži (cca 3 % plochy HÚ) dochází v linii toku Řečice blízko pod její pramenní oblastí v nadmořské výšce 500 až 540 m n. m. Dominantní drenáž byla modelem vypočtena do oblasti soutoku Řečice a Klenovského potoka v úrovni 490 až 478 m n. m. Nad uvedeným soutokem se do Řečice drénuje voda ze 38 % plochy HÚ, do Klenovského potoka se nad soutokem drénuje 49 % plochy HÚ a do Řečice pod soutokem se drénuje voda z cca 10 % plochy HÚ. Horizontální vzdálenost oblastí drenáže od okraje polygonu vymezujícího HÚ je v rozmezí od 0 m (část vody se drénuje přímo v nadloží podzemní plochy HÚ) do 950 m.

3.5.4 Rychlosti a doby zdržení podzemní vody

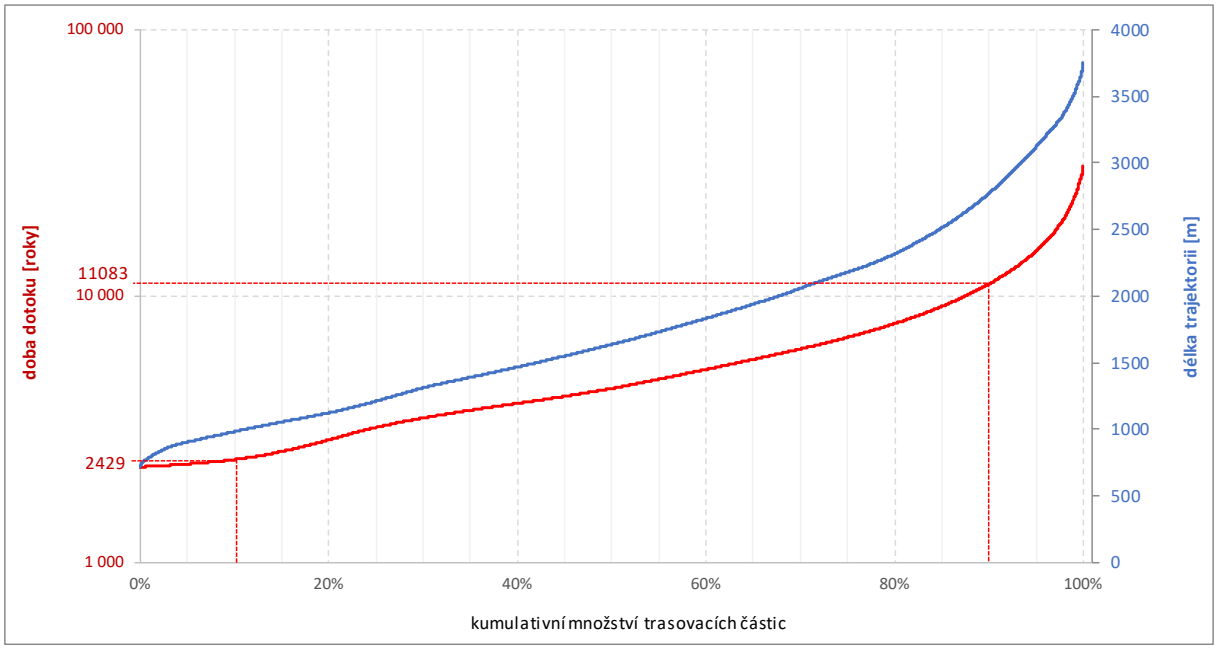
Doba zdržení podzemní vody mezi prostorem podzemní části HÚ a místy drenáže je v modelové simulaci proudění stanovena na základě výsledků výpočtu metodou particle tracking.

Rozložení průměrných rychlostí proudění z prostoru HÚ do drenážních toků v aktualizovaném detailním modelu je zobrazeno na Obr. 11. Nejvyšších průměrných rychlostí dosahuje proudění z prostoru severozápadního a jihovýchodního okraje polygonu vymezujícího projektované HÚ (0,54 $m \cdot rok^{-1}$). Jedná se o oblasti, kde je délka proudnic od HÚ k drenážním bázím (Klenovský potok a Řečice) relativně malá, a především doba zdržení podzemní vody krátká.



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

V prostoru HÚ, kde dochází k nejvýraznějšímu sestupnému proudění (jihozápadní úbočí vrchu Brčík), naopak průměrné rychlosti proudění klesají k minimálním hodnotám v řádu jednotek milimetrů ročně. Nízké průměrné rychlosti jsou následkem vertikální složky směru proudění podzemní vody do hlubších poloh s nízkou hydraulickou vodivostí. Plošná distribuce doby zdržení z prostor HÚ do drenáže je generelně nepřímo úměrná s prezentovaným rozložením rychlostí – nejkratší dobu dotoku lze očekávat podél severozápadní hranice prostoru HÚ a v jihozápadní třetině vymezeného území HÚ. Doba dotoku z prostor HÚ k drenážním bázím se pohybuje v rozmezí 2 430 až 11 100 let (mezidecilové rozpětí intervalu výsledků $Q_{0,1}$ -$Q_{0,9}$) (Obr. 12).



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

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.

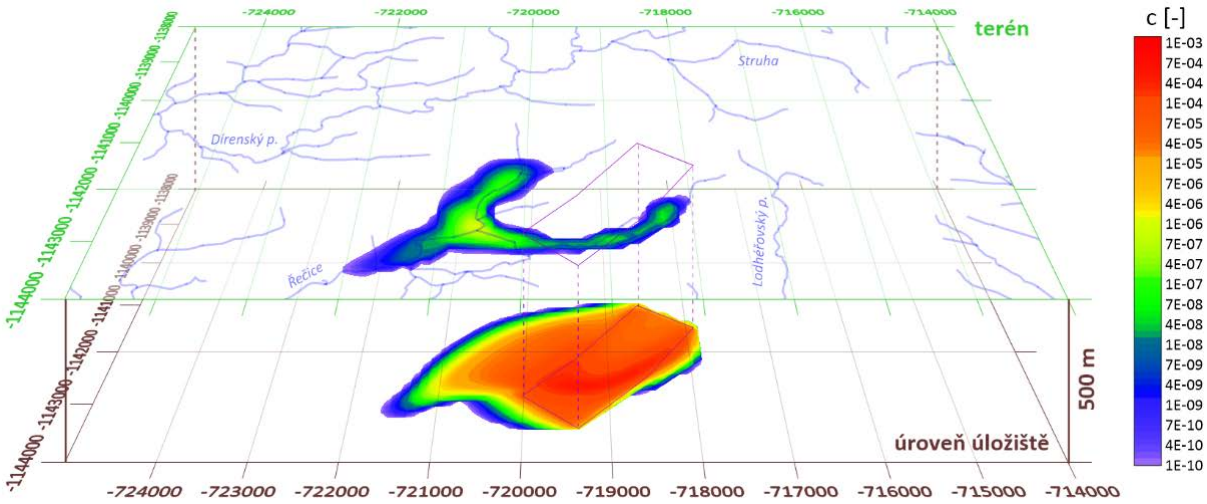
Aktualizovaný transportní model je realizován pro podmínky stacionárního proudění podzemní vody. Pórovitosti jsou zadány v souladu s přijatým členěním modelové domény:

- 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:
  - hloubce každé modelové buňky pod terénem, zadán je lineární pokles pórovitosti s hloubkou pod terénem;
  - 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 na soutoku toků Řečice a Klenovského potoka v úrovni 490 až 478 m n. m. Ředění bylo vyčísleno v procentech z podílu maximální koncentrace v přípovrchové vrstvě a v prostoru podzemní části HÚ. Pro HÚ v lokalitě Čihadlo byla míra ředění stanovena hodnotou 0,2 %.



Obr. 13 Rozložení relativních modelových koncentrací v úrovni HÚ (8 m n. m.) a v přípovrchové vrstvě

5 Závěr

Aktualizovaný detailní hydrogeologický model pro lokalitu Čihadlo poskytuje nejnovější verzi (1.3) popisu hlubinného proudění podzemní vody granitovým masivem, uvažovaným jako vhodné prostředí pro situování hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Model reflektuje přepracované tektonické schéma, které vedlo jednak ke změně polohy perspektivních území pro projektové práce a prostoru HÚ, jednak k aktualizaci hydraulických parametrů modelového prostředí. V návaznosti na to byly s využitím hydrogeologického modelu popsány tlakové poměry, bilance a směry proudění podzemní vody horninovým masivem z míst infiltrace do drenážních oblastí pro aktuální projektovanou polohu hlubinného úložiště.

Výsledky modelu jsou zatíženy nejistotou, vzniklou zejména v souvislosti s absencí měřených dat propustnosti horninového masivu v úrovni HÚ. Zhotovený detailní hydrogeologický model představuje aktuálně nejvíce pravděpodobný popis poměrů v lokalitě. Snižování nejistot popisu proudění podzemní vody závisí na pokračování průzkumných prací v lokalitě.

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., JELÉNEK 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. Papadopulos & 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.

POLÁK, M., KRÁLOVCOVÁ, J., GRECKÁ, M. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště - pasport detailního modelu – lokalita Čihadlo. Praha. Súrao. Praha. PB-ZL-U2393-011-HGModely

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

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. (2018): Detailní hydrogeologické modely lokalit. – MS SÚRAO, TZ 323/2018, Praha.

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