

Technická zpráva číslo 323/2018

**DETAILNÍ HYDROGEOLOGICKÉ
MODELY LOKALIT –
ZÁVĚREČNÁ ZPRAVA**

Autor: Uhlík J.
a kolektiv

PROGEO, s.r.o.

Roztoky, říjen 2018

Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Název dílčího projektu: Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště

Název etapové zprávy: Detailní hydrogeologické modely lokalit

Závěrečná zpráva

Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 323/2018

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2018-ZZ-S2393-011-HGModelyMetodika

ŘEŠITELÉ:

PROGEO, s.r.o.¹, Technická univerzita Liberec², ÚJV Řež, a.s.³, Česká geologická služba⁴

Autoři: Uhlík J¹,

Autorský kolektiv: Milický M¹, Gvoždík L¹, Polák M¹, Černý M¹, Královcová J², Grecká M³, Rukavičková L⁴,

Obsah

Obsah	5
Seznam obrázků:	6
Seznam použitých zkratk:	7
1 Úvod	10
2 Metodika zpracování hydrogeologických modelů	11
2.1 Cíle	11
2.2 Harmonogram prací	11
2.3 Řešitelský tým	11
2.4 Software.....	12
2.5 Úložný koncept.....	14
2.6 Vstupní okruhy dat	15
2.6.1 Geometrické údaje, diskretizace	16
2.6.2 Hydraulické charakteristiky.....	18
2.6.3 Okrajové podmínky	21
2.6.4 Kalibrační data	23
2.7 Metodika modelových prací.....	24
2.8 Přehled vstupních dat a podkladů	25
2.9 Archivace a označení modelových prací	26
3 Zpracování modelových informací	27
4 Výhled modelových prací	29
4.1 Vstupní data modelových prací	29
4.2 Výhled aplikace modelů	31
5 Závěr	36
6 Citace a seznam literatury	38

Seznam obrázků:

Obr. 1 Hydrogeologický model – vstupní okruhy dat.....	15
Obr. 2 Schéma rozdělení modelové domény (SKB 2008).....	18
Obr. 3 Intervaly koeficientu hydraulické vodivosti K_0 pro horniny zastižené v posuzovaných lokalitách (expertní odhad pracovníků ČGS)	20
Obr. 4 Rozložení elementů s okrajovou podmínkou říční sítě (zelené buňky), lokalita Kraví Hora, software MODFLOW-USG, hydroizohypsy v připovrchové vrstvě	23
Obr. 5 Schéma postupu modelových prací	25

Seznam tabulek:

Tab. 1 Modelové hodnocení lokalit účastníky řešitelského týmu.....	12
Tab. 2 Vybrané informace k softwaru pro zpracování hydrogeologických modelů	13
Tab. 3 Rozloha detailních hydrogeologických modelů	16
Tab. 4 Počet všech litotypů horninového masivu uvažovaných v detailních hydrogeologických modelech.....	19
Tab. 5 Průměrná modelová infiltrace v území posuzovaných lokalit HÚ	21

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

Seznam použitých zkratk:

3D SG	prostorový strukturně-geologický model
ČGS	Česká geologická služba
DFN	Discrete fracture network; síť diskretních puklin
DMR 5G	digitální model terénu 5. generace
EPM	equivalent porous medium; ekvivalentní pórové prostředí
EDU	jaderná elektrárna Dukovany
ETE	jaderná elektrárna Temelín
HGM	hydrogeologický model
HÚ	hlubinné úložiště
ISVS	informační systém veřejné správy („o odběrech podzemní vody“)
K	koeficient hydraulické vodivosti
RAO	radioaktivní odpad
SC	stochastic continuum (model); model s využitím stochastického přístupu
TUL	Technická univerzita v Liberci
ÚJV	Ústav jaderného výzkumu v Řeži
VAO	vysoce radioaktivní odpad
VJP	vyhořelé jaderné palivo
UOS	ukládací obalový soubor
ZL	zakázkový list
VTZ	vodní tlakové zkoušky

Abstrakt

Výběr finální lokality pro hlubinné úložiště radioaktivních odpadů probíhá v etapách. Počet uvažovaných lokalit bude postupně zúžen na dvě (finální a záložní). Cílem aktuální fáze projektu „Bezpečnost HÚ“ je zúžit před zahájením podrobných průzkumných prací počet posuzovaných lokalit ze současných devíti na čtyři.

Hodnocení bezpečnosti lokalit probíhá v několika okruzích (kap. 1). Intenzita a směr proudění podzemní vody ovlivňuje parametry šíření radionuklidů do biosféry a tím i bezpečnost lokality. Zrealizované hydrogeologické modely (okruh V) pro jednotlivé kandidátní lokality slouží pro popis nasyceného proudění podzemní vody v horninových masivech s projektovaným HÚ. Modely jsou zpracovány s využitím aktuálních dat (aktuální velikost srážek, úroveň toků a terénu). Simulovány jsou hydrogeologické poměry po uzavření HÚ.

Modelování poměrů proudění podzemní vody posuzovaných lokalit je v širším expertním týmu realizováno pomocí softwarů MODFLOW, Flow123d a FEFLOW. Prostřednictvím hydrogeologických modelů jednotlivých lokalit jsou (při využití shodné metodiky modelování) formulovány závěry o směru, velikosti a rychlosti proudění podzemní vody z prostor HÚ do drenážních oblastí. Získané informace jsou využity při posuzování vhodnosti kandidátních lokalit (Havlová et al., 2018a,b).

Vzhledem k absenci některých typů vstupních dat (propustnost horninového masivu, plošná distribuce drenáže podzemní vody, velikost podzemního odtoku) jsou hydrogeologické modely a jejich výsledky zatíženy nejistotou. Zadání vstupních dat modelů je provedeno s uplatněním zjištěných dat (geometrie říční sítě, morfologie terénu, průběh zlomových linií, litotypy hornin zastoupených v modelových územích) a zavedených vstupních předpokladů, reprezentujících generalizovanou znalost podpořenou průzkumy analogických lokalit v ČR a v zahraničí.

Shodný postup zpracování hydrogeologických modelů umožňuje získané výsledky pro jednotlivé posuzované lokality vzájemně porovnávat. Podrobná dokumentace a znalost metodiky zadání hydrogeologických modelů je klíčová pro:

- posuzování rozdílů výsledků proudění podzemní vody na jednotlivých modelových lokalitách,
- další návazné modelové práce v případě pokračování průzkumných a hodnotících prací.

Závěrečné pasáže této zprávy v souvislosti s nadcházejícím geologickým průzkumem 4 kandidátních lokalit obsahují přehled modelových vstupních dat. Zpracován je výhled dalšího uplatnění hydrogeologických modelů.

Klíčová slova

hlubinné úložiště, hydrogeologický model, propustnost, hodnocení vhodnosti lokalit

Abstract

A deep geological repository siting proceeds in the stages in the Czech Republic. Four sites out of present nine are to be selected at the current stage, when the more detailed geological survey will begin. Hydrogeological models are strongly involved in the site selection process, computed groundwater flow is of key importance in relation to radionuclides transport.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

Conditions after repository closure were computed in the simulations of saturated groundwater flow at each of nine assessed sites, based on the contemporary data on river stages, terrain and precipitation. A groundwater flow modelling was implemented using the software MODFLOW, Flow123d and FEFLOW by specialists of PROGEO, Technical University of Liberec and ÚJV Řež.

The same methodology was applied to construct hydrogeological models of each site to have the modelling results comparable. Insufficient information about bedrock permeability was supplemented by the adopted input assumptions. Bedrock was treated as equivalent porous medium, the hydraulic conductivity coefficients were used in the models. The hydraulic conductivity was described as depth dependent, the expression provided by Gustafson et Liedholm (1989) was applied.

Hydrogeological model data utilisation and site evaluation results with respect to safety described Havlová et al. (2018a,b). Model simulations provided information about groundwater flow direction, velocity and drainage areas for the first time, when considering part of the rock selected for repository construction in the respective projects. For all assessed sites, it can be stated, that groundwater drainage from repository especially occurs within distance 10 km of the underground facility. Often, however, on substantially shorter distances. The area where the detailed geological survey must be carried out is thus defined.

The model calibration was achieved by combination of manual and automatic methods. The agreement between modelled and existing groundwater table was attained by changes in hydraulic conductivity of the subsurface domain.

At its lowest parts the river network is the first hundreds of meters below the highest terrain in the assessed Czech repository sites. In this aspect the Czech sites differ significantly compared to the repository sites selected in the northern countries, where the terrain is flat. There may occur hydrogeological conditions, where the bedrock barrier function may be deteriorated due to the relatively fast groundwater circulation.

The existing conditions will be examined in the upcoming detailed geological survey at four selected sites. The bedrock groundwater flow is primarily under the influence of fault zones. The local groundwater flow in the intact rock is influenced by conductive fractures geometry (frequency, size distribution, dip, strike and aperture) and connectivity. A groundwater age is closely related to the rate it migrates. The distribution of groundwater age reveals aspects of the nature of a flow regime. It is necessary (among other things) to point the exploratory works to the description of the mentioned phenomena.

In the next stage the hydrogeological models of four localities will be more adapted for safety evaluation purposes. Different software, concepts and models of different scale will be applied.

Keywords

hydraulic conductivity, deep geological repository, groundwater flow modelling, calibration, safety

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

1 Úvod

Tato zpráva byla vypracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále 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 připovrchových 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.

Cílem dílčích projektů "Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště" a "Předběžné hodnocení lokalit EDU – západ a ETE-jih z hlediska dlouhodobé bezpečnosti" (zakázkové listy PB-2014-ZL-U2393-011-HGModely a PB-2018-ZL-U4076-039-HodnoceniEDU_ETE) bylo na základě dostupných informací popsat hlubinný oběh podzemní vody v horninových masivech celkem devíti posuzovaných lokalit pro situování HÚ. Oba uvedené projekty zpracování hydrogeologických modelů adresují vyhodnocení bezpečnosti v oblasti V (chování horninového prostředí).

Cílem předkládané závěrečné souhrnné zprávy je především zdokumentovat a zdůvodnit metodický postup zpracování detailních hydrogeologických modelů ve vazbě na dostupná vstupní data. Doplněn je přehled vstupních dat, které je potřeba zajistit v průběhu nadcházejících průzkumných prací návazně po zúžení počtu kandidátních lokalit. Diskutován je výhled modelových prací.

Vybrané výsledky, získané pomocí detailních hydrogeologických modelů, především obsahují:

- zprávy pasportů modelů pro jednotlivé lokality (Baier 2018a,b; Černý 2018a,b; Polák 2018, Uhlík 2018a,b)
- podkladové zprávy pro hodnocení vhodnosti lokalit z hlediska dlouhodobé bezpečnosti (Havlová et al, 2018a,b; Jankovec 2018a,b).

Zpracované „detailní“ modely se od regionálních hydrogeologických modelů neliší rozlohou, ale mírou podrobnosti zpracování vstupních a výstupních modelových dat v prostoru projektovaného HÚ (centrální oblast modelů). Na zpracování detailních hydrogeologických modelů navazuje modelování transportních procesů (Říha et al, 2018).

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

2 Metodika zpracování hydrogeologických modelů

2.1 Cíle

Hlavním cílem realizace detailních hydrogeologických modelů je popis poměrů proudění podzemní vody v horninových masivech lokalit posuzovaných z hlediska situování HÚ. Realizované hydrogeologické modely poskytují informace o:

- tlakovém poli proudění (úroveň hladiny podzemní vody),
- směrech proudění podzemní vody (detailně ve vazbě na projektem určený prostor HÚ),
- prostorové bilanci oběhu podzemní vody,
- prostorové distribuci propustnosti horninového prostředí.

Hydrogeologické modely byly, vedle modelů geologických a transportních, začleněny do skupiny popisných modelů lokalit (SDM – site descriptive models). Popisné modely jsou vyvíjeny za účelem archivace a analýzy průběžně doplňovaných informací o posuzovaných lokalitách. Pro účely porovnání jednotlivých kandidátních lokalit HÚ (Havlová et al., 2018b) byla vybrána modelová data s vazbou na bezpečnost HÚ.

Při konstrukci detailních hydrogeologických modelů byla využita archivní data a nové informace získané výhradně nedestruktivními metodami průzkumu z povrchu terénu. Výsledné detailní hydrogeologické modely jsou zaměřeny na popis nasyceného ustáleného proudění podzemí vody horninovým masivem z oblasti HÚ do drenážních bází (popis vzdáleného pole interakcí). Pomocí rychlosti proudění podzemní vody je definována advektivní složka transportu radionuklidů.

2.2 Harmonogram prací

Práce na zpracování hydrogeologických modelů probíhaly v letech 2015–2018. Detailní popis etap modelových prací uvádí Uhlík et al. (2015). Nejprve byly dokončeny regionální hydrogeologické modely lokalit (zdokumentovány formou pasportů a průběžné zprávy – Uhlík et al. 2016). Regionální modely byly návazně zpřesněny:

- zavedením zjemněné výpočetní sítě v oblasti s projektovaným HÚ,
- uplatněním nových informací z geologických a hydrogeologických průzkumů ČGS z povrchu terénu,
- změnami modelové infiltrace,
- změnami rozložení propustnosti horninového masivu.

Vznikly tzv. detailní hydrogeologické modely. Od roku 2017 byly modelové práce rozšířeny z původních sedmi posuzovaných oblastí na finálních 9 (Tab. 1). Do skupiny modelově hodnocených lokalit byly doplněny oblasti EDU (Jaderná elektrárna Dukovany) a ETE (Jaderná elektrárna Temelín). Modely EDU a ETE byly vzhledem k časovému posunu zahájení prací rovnou realizovány ve formě detailních hydrogeologických modelů.

2.3 Řešitelský tým

Matematické modelování proudění podzemní vody bylo realizováno na třech pracovištích:

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

- PROGEO, s.r.o.,
- Technická univerzita v Liberci (TUL),
- ÚJV Řež, a.s. (ÚJV).

Tab. 1 Modelové hodnocení lokalit účastníky řešitelského týmu

Lokalita	Regionální hydrogeologické modely			Detailní hydrogeologické modely		
	PROGEO	TUL	ÚJV	PROGEO	TUL	ÚJV
Březový potok	1	1	-	1	1	-
Čertovka	1	1	1	1	1	-
Čihadlo	1	1	1	1	1	1
Horka	1	1	1	1	1	1
Hrádek	1	1	-	1	1	-
Kraví hora	1	1	1	1	1	-
Magdaléna	1	1	-	1	1	-
EDU	1	1	-	1	1	-
ETE	1	1	-	1	1	-

Na pracovištích PROGEO a TUL byly regionální a detailní hydrogeologické modely zpracovány pro všechny posuzované lokality. V ÚJV Řež byly modelově řešeny vybrané lokality.

Vedoucím týmu pro zpracování hydrogeologických modelů byla společnost PROGEO, s.r.o. Týmová práce na úkolu zpracování hydrogeologických modelů při uplatnění rozdílného softwaru zajistila:

- paralelní ověření, vyhodnocení a kontrolu výsledků,
- metodicky propracované zadání vstupních dat modelů,
- vhodné sdílení informací s navazujícími dílčími projekty „Výzkumné podpory pro bezpečnostní hodnocení HÚ“,
- výměnu dat, know-how a uchování dosažené znalosti na více pracovištích.

Hydrogeologické modely jsou zpracovány v úzké návaznosti na 3D strukturně geologické (3DSG) modely a ve vazbě na terénní průzkum, rovněž realizovaný Českou geologickou službou.

2.4 Software

Modelové simulace proudění podzemní vody jsou realizovány s využitím tří rozdílných softwarů:

- MODFLOW, verze MF2005 při zpracování regionálních modelů, MODFLOW verze USG při zpracování detailních hydrogeologických modelů (pracoviště PROGEO),

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

- Flow123d verze 2.1.2 (pracoviště TUL),
- FEFLOW verze 6.0 (pracoviště ÚJV).

Podrobnější popis užitých softwarů byl proveden v rámci řešení zahraničních přístupů k modelování HÚ (Uhlík et al., 2015). Soupis vybraných základních informací obsahuje následující tabulka.

Tab. 2 Vybrané informace k softwaru pro zpracování hydrogeologických modelů

Vlastnosti softwaru	MODFLOW	Flow123d	FEFLOW
typ	volně šiřitelný	volně šiřitelný	komerční
numerická metoda	konečné diference, konečné objemy	konečné elementy	konečné elementy
vývoj	USA	ČR – TUL	Německo
odkaz	http://water.usgs.gov/ogw/modflow/	http://flow123d.github.io/	https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow

Výpočet míst drenáže, rychlosti a směru proudění podzemní vody byl návazně na výpočet proudění v programu MODFLOW proveden s využitím softwarů MODPATH (Pollock, 1994) a MOD-PATH3DU (Muffels, 2014) pomocí techniky particle tracking. V programu Flow123d jsou rychlosti a směry proudění podzemní vody přímo výsledkem simulace proudění; aplikace metody particle tracking pro analýzu transportních cest a míst drenáže z výsledků Flow123d uvádí Říha et al. (2018). V případě softwaru FeFlow je metoda výpočtu dráhy částic nedílnou součástí softwaru.

Aplikace rozdílného softwaru přináší v některých detailech odlišné konceptuální přístupy při modelování jednotlivých lokalit. Získaný popis proudění v jednotlivých posuzovaných lokalitách (při užití rozdílného softwaru a při účasti rozdílných osob řešitelského týmu) logicky není zcela identický.

Říha et al. (2018) identifikují následující malé rozdíly mezi modely :

- velikost modelové domény – v případě detailních hydrogeologických modelů zpracovaných v programu Flow123d je zadána zmenšená vertikální mocnost horninového masivu oproti 3DSG modelům;
- metodika kalibrace – v softwaru MODFLOW-USG je pro kalibraci úrovně volné hladiny v přìpovrchové (první modelové) vrstvě využita technika „pilot points“ (hodnoty hydraulické vodivosti se lineárně mění mezi zadanými kalibračními body, kalibrační body hydraulické vodivosti jsou rozmístěny v pravidelné síti 500 m), navázaná na metodiku automatické (Doherty, 2016 – PEST) a manuální kalibrace; v případě zbylých dvou softwarů byl využit zonální přístup ke kalibraci hydraulické vodivosti při využití metod automatické a manuální kalibrace; pro kalibraci modelu realizovaném ve Flow123d byl pro automatickou kalibraci použit software UCODE_2014 (<https://igwmc.mines.edu/ucode/>); software FeFlow pro potřebu automatické kalibrace používá program PEST.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

- interpretace zlomových linií – softwaru FeFlow a Flow123d pro popis zlomových zón využily diskrétní prvky; v softwaru typu MODFLOW byly zlomové zóny zohledněny zvýšením hydraulické vodivosti buněk zlomovými liniemi protnutými;
- rozdílná podrobnost výpočtu (diskretizace) – nejmenší elementy v softwaru FeFlow a MODFLOW-USG mají charakteristický rozměr 25 m, nejmenší elementy v softwaru Flow123d mají charakteristický rozměr 50 m;
- rozdílná kritéria konvergence numerických solverů řešených rovnic proudění.

2.5 Úložný koncept

Detailní informace dispozičního řešení úložišť v jednotlivých lokalitách byly převzaty z projektové dokumentace. Přijatá koncepce HÚ pro ČR situuje úložiště do hornin krystalinika – ideálně granitoidů. Úložné prostory pro VJP jsou projektovány minimálně 500 m pod úroveň nejnižšího místa terénu v půdorysné ploše úložiště.

V rámci zpracování detailních hydrogeologických modelů bylo uvažováno dispoziční řešení pro vertikální orientaci úložných obalových souborů (UOS). Úložné chodby HÚ v závislosti na přítomném typu horniny zaujímají v jednotlivých posuzovaných lokalitách plochu 2,0 – 3,5 km².

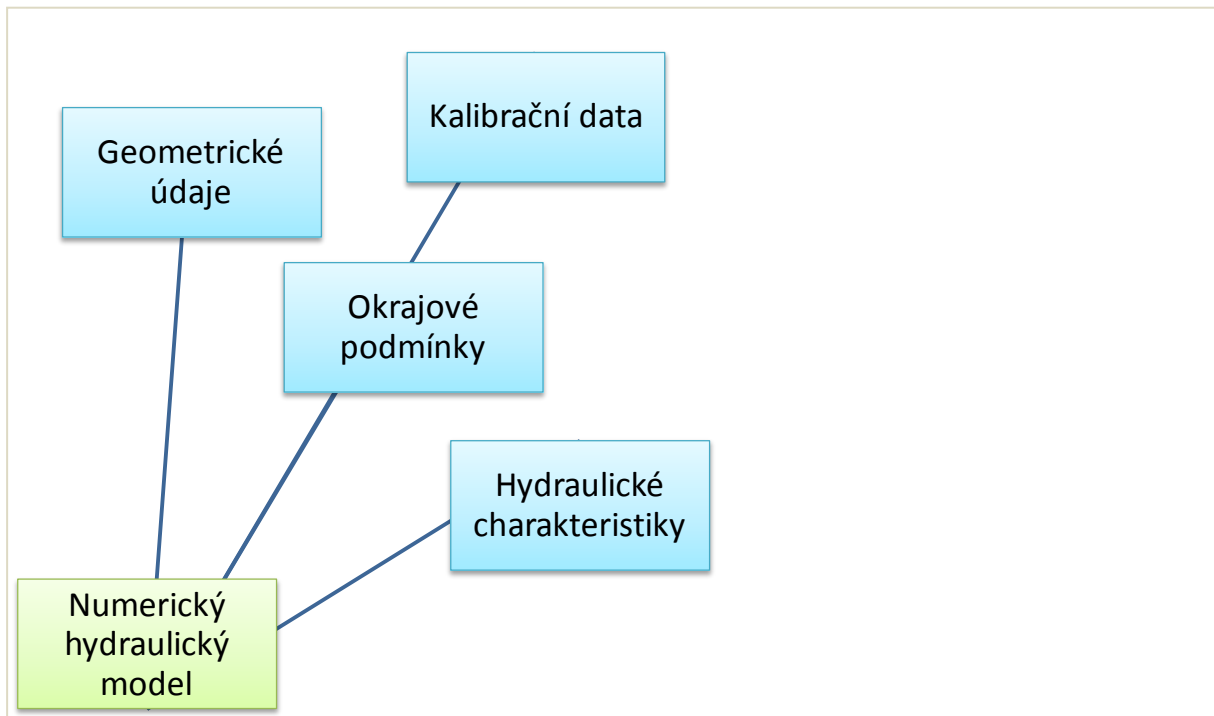
V grafické dokumentaci pasportů detailních modelových prací je oblast HÚ vymezena následujícími polygony:

- průzkumné území (polygon vymezuje oblast, ve které je předpokládán průzkum za účelem situovat úložiště; vymezeno SÚRAO),
- homogenní bloky (nejvíce vhodná oblast pro situování HÚ z geologického hlediska; vymezeno ČGS),
- úložné prostory HÚ (oblast určená pro ukládání UOS; převzato z projektové dokumentace).

Podklady dispozičního řešení HÚ se v koncepci detailních hydrogeologických modelů promítly následujícím způsobem:

- v širší oblasti chodeb s UOS je modelová výpočetní síť horizontálně i vertikálně zjemněna pomocí elementů s charakteristickým rozměrem 25 m (MODFLOW-USG), 50 m (Flow123d) a 25 m (FeFlow),
- identifikace drenážních a infiltračních oblastí pro horninový masiv s HÚ je realizována s využitím techniky particle tracking (sledování částic v proudovém poli) při zadání údajů o průměrné nadmořské výšce úložných chodeb dle příslušných projektů,
- plocha úložných chodeb a průměrná výška HÚ určují objem horninového masivu, pro který je modelem kalkulována bilance proudění podzemní vody prostorem HÚ.

2.6 Vstupní okruhy dat



Obr. 1 Hydrogeologický model – vstupní okruhy dat

Charakteristiky každé z kandidátních lokalit se promítají do následujících okruhů vstupní modelové informace:

- geometrické údaje,
- okrajové podmínky,
- propustnost horninového masivu (hydraulická charakteristika),
- kalibrační data.

První tři okruhy dat umožňují po zadání do simulačního softwaru spustit simulaci proudění podzemní vody. Shoda výsledků modelu s pozorováním je docílena v procesu kalibrace a je hodnocena na základě porovnání kalibračních dat a příslušných modelových ekvivalentů.

Zpracované detailní hydrogeologické modely lokalit vychází z aktuálních informací poměrů na lokalitě. Při komplexním posuzování lokalit a hodnocení bezpečnosti bude nezbytné v modelových simulacích dle posuzovaných scénářů zohlednit změny úrovně terénu i klimatu (srážek).

2.6.1 Geometrické údaje, diskretizace

Rozlohu zpracovaných hydrogeologických modelů určuje aktivní plocha modelů (oblast s výpočtem proudění podzemní vody). Aktivní plocha jednotlivých hydrogeologických modelů je vykreslena v grafických přílohách zpráv pasportů.

Tab. 3 Rozloha detailních hydrogeologických modelů

Lokalita	Plocha [km ²]
Březový potok	194,8
Čertovka	263,1
Čihadlo	256,6
Horka	263,7
Hrádek	236,2
Kraví hora	253,5
Magdaléna	237,9
EDU	311,6
ETE	248,1

Hydrogeologické modely devíti posuzovaných lokalit mají rozlohu v rozmezí 195–312 km². Rozloha modelů souvisí s volbou okrajových podmínek. Modely jsou koncipovány jako bilančně uzavřené – přes okraj modelového území nedochází k proudění podzemní vody do/z okolního horninového prostředí. Průběh modelových hranic je proto veden především podél regionálních rozvodí, daných průběhem:

- orografické rozvodnice v místech terénních elevací (je předpokládána shodná poloha orografické a hydrogeologické rozvodnice),
- toků (pravobřežní a levobřežní přítoky podzemní vody vytváří hydrogeologické rozvodí – v oblasti drenáže podzemní vody).

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

Uvedená metodika stanovení hranice modelu snižuje nejistoty bilance modelu, které by vznikly v případě aplikace okrajové podmínky proudění přes vnější hranici modelu.

Aktivní plocha hydrogeologického modelu je v případě softwarů MODFLOW-USG a FeFlow specifikována volbou aktivních a neaktivních elementů. Software Flow123d od počátku specifikuje výpočetní elementy výhradně v prostoru výpočtu proudění podzemní vody (neaktivní modelové elementy se nevyskytují). Z důvodu minimalizace velikosti výpočetní sítě byla geometrie vnější hranice modelu pro tento software s výjimkou lokalit EDU a ETE nevýznamně zjednodušena.

Ve vertikálním směru odpovídají realizované detailní hydrogeologické modely (software MODFLOW-USG a FeFlow) modelům geologickým – horninový masiv je v modelu zadán do úrovně -1000 m n. m. V případě softwaru Flow123d byla z důvodu minimalizace velikosti výpočetní sítě mocnost modelové domény poněkud zmenšena (modely zpracované ve Flow123d zasahují do úrovně -700 m n. m.). Báze všech zpracovaných detailních hydrogeologických modelů je vodorovná a nedochází přes ni k výměně podzemní vody s okolním horninovým prostředím.

V programu MODFLOW-USG (aplikován pro zpracování detailního hydrogeologického modelu) tvoří základní výpočetní síť v horizontální rovině (pro všechny lokality) vždy pravidelné čtvercové elementy s délkou strany 100 m. Modelová doména je vertikálně diskretizována do třinácti regionálně průběžných vrstev (shodně s regionálními hydrogeologickými modely). Detailní modely lokalit EDU a ETE mají 14 regionálních modelových vrstev. Mocnost regionálních vrstev je 100 m, na bázi modelu 200 m. Báze prvních tří vrstev částečně kopíruje terén. Báze čtvrté až poslední vrstvy je horizontální. V bližší oblasti HÚ mají detailní hydrogeologické modely zjemněnou výpočetní síť. V případě softwaru MODFLOW-USG jsou jejím základem pravidelné elementy s délkou strany 25 m a výpočetní síť je shodně zahuštěna v horizontálním i vertikálním směru. V prostoru zjemněné výpočetní sítě vlivem vertikálního zjemnění vzniká až 40 modelových vrstev (41 v případě lokalit EDU a ETE). Detailní informace o horizontální i vertikální diskretizaci každé modelové domény obsahují pasporty detailních hydrogeologických modelů.

Síť pro výpočet ve Flow123d je nestrukturovaná, sestává ze simplexových elementů (úsečky, trojúhelníky, čtyřstěny), a je definována právě pro prostor výpočtu požadovaného procesu (tj. v případě hydrogeologických modelů proudění podzemní vody). Shora je síť omezena úrovní terénu a zdola úrovní -700 m n. m. Horizontální rozsah modelové domény (a tím i sítě) byl vymezen v souladu s výše uvedenou metodikou stanovení hranic modelu. Vertikálně je modelová doména rozdělena do pěti vrstev. První dvě vrstvy mají mocnost 75 m, základní charakteristický rozměr pro diskretizaci je v těchto vrstvách 120 m. Čtvrtá vrstva modelu má mocnost 100 m, její vertikální střed byl volen v úrovni projektovaného HÚ. Druhá a čtvrtá vrstva mají základní charakteristický rozměr pro diskretizaci 200 m. V rozsahu první až čtvrté modelové vrstvy je v širším okolí úložných prostor HÚ diskretizace zjemněna tak, aby libovolný rozměr elementů nepřesahoval 50 m. V páté vrstvě se maximální rozměr elementů se zvyšující se hloubkou v širším okolí úložných prostor HÚ zvyšuje až na 300 m, mimo tuto oblast HÚ až na 500 m.

Pomocí softwaru FeFlow byla vygenerována trojúhelníková výpočetní síť s hranou elementů o přibližné délce 100 m. V širším okolí projektovaného HÚ byla síť zjemněna rozčtvrcením trojúhelníkových elementů původní sítě. Ve vertikálním směru jsou modely pravidelně rozčleněny na desítky vrstev. Obvykle jsou modelové vrstvy 100 m mocné, v blízkosti

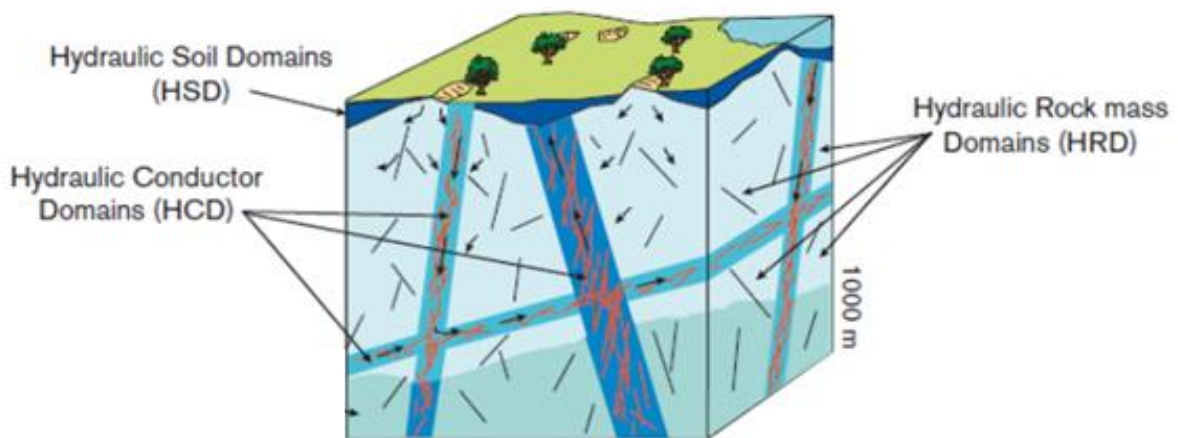
projektovaného HÚ byly mocnosti vrstev zjemněny ze 100 m na 25 m. Připovrchové zóny modelů byly rozděleny na několik vrstev různé mocnosti (do prvních desítek metrů).

Detailní informace o geometrii výpočetní sítě (souřadnice, rozměry, počty výpočetních elementů) obsahují paspory detailních hydrogeologických modelů. Horninový masiv, uvažovaný jako hostitelské prostředí pro HÚ, se ve všech modelových lokalitách nachází v centru modelového území.

Směr a intenzitu proudění podzemní vody ve všech posuzovaných lokalitách zásadním způsobem ovlivňuje terén. V krystalinickém prostředí lze předpokládat, že významnější orografická rozvodí současně formují i rozvodí hydrogeologická. Oběh podzemní vody v připovrchové zóně, vázaný na puklinovo-průlinové prostředí, vytváří okrajovou podmínku pro hlubinné puklinové proudění v horninovém masivu. Značné rozdíly terénu na všech posuzovaných lokalitách vytváří podmínky pro rychlý oběh podzemní vody minimálně v připovrchové zóně.

2.6.2 Hydraulické charakteristiky

S ohledem na minimální znalost horninových masivů kandidátních lokalit HÚ z hlediska propustnosti bylo vhodným východiskem použít při zpracování hydrogeologických modelů koncept EPM (Equivalent Porous Media). V něm je propustnost horninového masivu vyjádřena prostřednictvím koeficientů hydraulické vodivosti.



Obr. 2 Schéma rozdělení modelové domény (SKB 2008)

Modelové domény všech posuzovaných lokalit jsou (shodně s přístupem SKB – Obr. 2) členěny na 3 podoblasti:

1. podoblast ovlivněná procesy připovrchového zvětrání (mocnost připovrchové zóny průměrně dosahuje vyšší desítky metrů),
2. podoblast přirozeně rozpukaného masivu (rozevření puklin v řádu μm ; střední vzdálenost puklinových systémů je předpokládána v metrech),
3. podoblast zlomových pásem (šířka intenzivního rozpukání podél zlomových linií dosahuje v modelových lokalitách až první stovky metrů)

Koeficient hydraulické vodivosti je v hydrogeologických modelech zadán v závislosti na příslušnosti modelového elementu k výše uvedené podoblasti.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

V přípovrchové zóně (podoblast 1) je rozložení modelové hydraulické vodivosti podřízeno cíli simulovat volnou hladinu podzemí vody mělce pod terénem a v souladu s hladinami archivovanými ve vrtné databázi ČGS-Geofond. Tomu je přizpůsobeno zadání koeficientů hydraulické vodivosti, které je upravováno v rámci procesu kalibrace.

Ve druhé a třetí podoblasti (HRD a HCD na Obr. 2) je koeficient hydraulické vodivosti zadán s využitím výrazu 1 – v závislosti na:

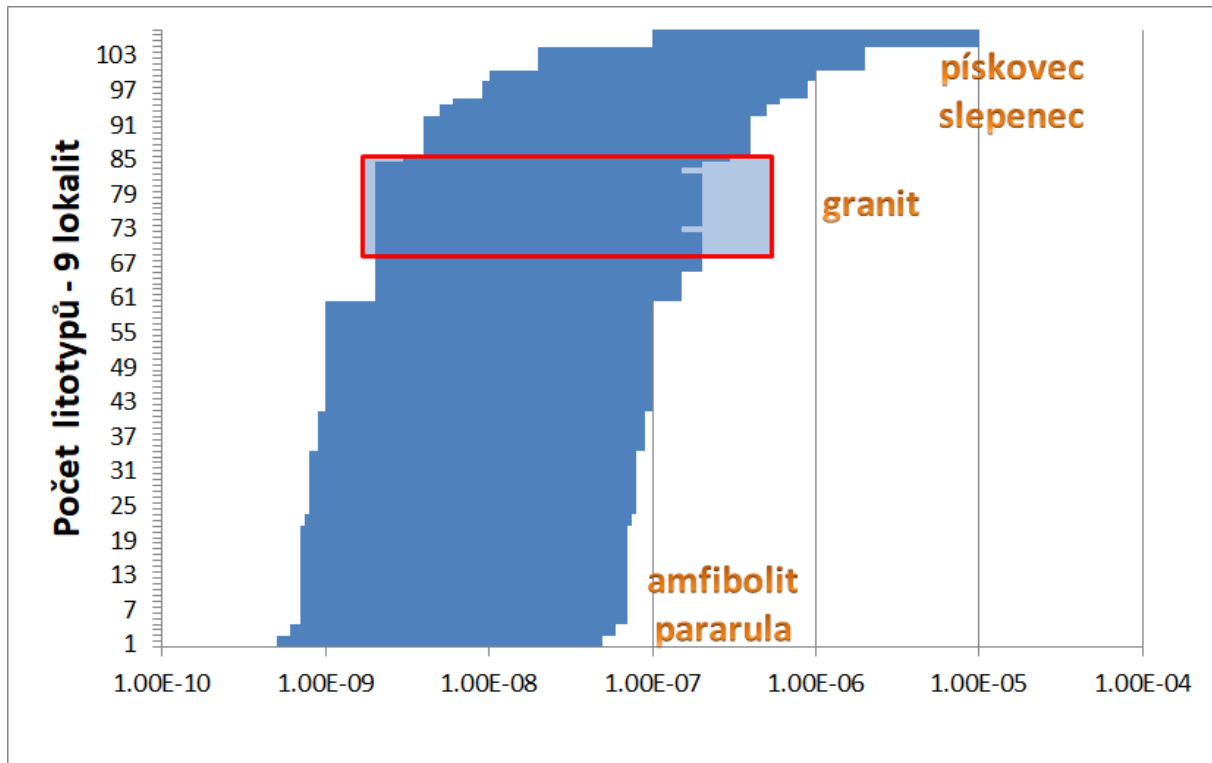
- hloubce pod terénem,
- přítomném typu horniny,
- přítomnosti poruchových zón.

Tab. 4 Počet všech litotypů horninového masivu uvažovaných v detailních hydrogeologických modelech

Lokalita	Počet litotypů
Březový potok	15
Čertovka	15
Čihadlo	7
Horka	13
Hrádek	7
Kraví hora	23
Magdaléna	14
EDU	10
ETE	9

Nejméně heterogenní z hlediska zastoupení horninových typů jsou lokality Hrádek, Čihadlo, EDU a ETE. Na opačném pólu je lokalita Kraví hora s 22 druhy hornin.

Celkem bylo v posuzovaných lokalitách do modelů zadáno 107 horninových typů. Na Obr. 3 jsou vykresleny pravděpodobné rozsahy koeficientu hydraulické vodivosti (K_0) pro jednotlivé horninové typy. Jedná se o expertní odhad pracovníků ČGS na základě vlastních souhrnně nepublikovaných zkušeností. Koncept stanovení hydraulické vodivosti jednotlivých litotypů byl diskutován na pravidelných kontrolních dnech projektu. Rozpětí pravděpodobné hodnoty hydraulické vodivosti (K_0) pro každý litotyp bylo odhadnuto 2 řády (Obr. 3).



Obr. 3 Intervaly koeficientu hydraulické vodivosti K_0 pro horniny zastížené v posuzovaných lokalitách (expertní odhad pracovníků ČGS)

Nejvíce propustné jsou horniny permokarbonu (pískovce, slepenec) s omezeným výskytem na lokalitě Čertovka. K nejméně propustným horninám patří amfibolit a pararula. Granity (projektované hostitelské prostředí pro HÚ) náleží do skupiny málo propustných hornin.

Příslušnost modelových elementů k horninovým tělesům a poruchovým zónám je v detailních hydrogeologických modelech zadána podle převzatého detailního 3D SG modelu lokality (Franěk et al. 2018). Modelová hodnota hydraulické vodivosti $K(z)$ [$m \cdot s^{-1}$] klesá s hloubkou pod terénem z [m]. Pokles hydraulické vodivosti modelových elementů s hloubkou je vypočten dle vzorce (1) převzatého z práce Gustafson et Liedholm (1989).

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

K_0 je tzv. základní hydraulická vodivost bez ovlivnění procesy přepovrchového zvětrání, která vstupuje do hydrogeologických modelů. Výchozí hodnoty parametrů K_0 pro jednotlivé litotypy hornin obsahují pasporty regionálních modelů, zdokumentovaných v rámci Uhlík et al., 2016. Koeficient c reprezentuje vzdálenost, na níž koeficient hydraulické vodivosti poklesne o 1 řád.

Hodnoty hydraulické vodivosti v oblastech poruchových zón (zlomy 1. – 3. kategorie dle klasifikace SKB; Andersson et al., 2000) byly stanoveny na základě shodného vzorce jako pro výpočet propustnosti masivu a zadaná propustnost zlomu závisí na hloubce pod terénem (snižuje se s hloubkou). Jednotlivé kategorie zlomů mají vzhledem k rozdílné uvažované šířce (1, 10 a 100 m pro zlomy 3., 2., a 1. kategorie) rozdílný příspěvek k celkové propustnosti masivu.

V závislosti na možnostech softwaru a na zvoleném konceptuálním pojetí byly:

- v programu Flow123d všechny tektonické linie zadány s využitím diskretních prvků; pro poruchy prvního a druhého řádu dle klasifikace SKB byla zachována transmisivita,

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

(šířka poruch byla snížena, hydraulická vodivost poruch byla odpovídajícím způsobem zvýšena), poruchy třetí kategorie zůstaly v rámci modelové interpretace beze změn,

- v programu FeFlow pomocí diskretních prvků simulovány tektonické linie druhé a třetí kategorie (při zachování šíře poruchových zón a uvažované transmisivity); poruchy první kategorie dle klasifikace SKB byly simulovány zvýšením propustnosti elementů protnutých tektonickými liniemi,
- v programu MODFLOW-USG všechny tektonické linie reprezentovány pomocí příspěvku k celkové transmisivitě příslušných modelových buněk. Tento příspěvek byl vypočten pomocí softwaru ConnectFlow (Amec Foster Wheeler 2017).

V přìpovrchové zóně nebyla poruchová pásma simulována.

Jedinou lokalitou, pro niž bylo možné nakalibrovat hodnoty koeficientů c a K_0 pro zlomové linie (souhrnně) a vybrané litotypy na základě naměřených dat, byla lokalita Kraví hora. Upřesnění hodnot koeficientů bylo provedeno v rámci dílčího projektu „Bezpečnostní rozbor HÚ v lokalitě Kraví hora“ (Trpkošová et al., 2017). Pro ostatní lokality kalibrace koeficientů K_0 a c nebyla možná.

Metodika porovnání a vyhodnocení lokalit s využitím výsledků hydrogeologických modelů vyžadovala v případě absence údajů o propustnosti horninového masivu přistupovat ke všem lokalitám shodně. Proto v rámci detailních hydrogeologických modelů byly s ohledem na výsledky modelu pro bezpečnostní rozbor lokality Kraví hora pro ostatní lokality shodně uvažovány hodnoty:

- $c = 675$ m (u regionálních modelů byla aplikována hodnota 400),
- $K_{0\text{zlomů}} = 1,0E^{-7}$ m.s⁻¹ (u regionálních modelů byla aplikována hodnota $1,0E^{-6}$ m.s⁻¹).
- $K_{0\text{litotypů}}$ bylo oproti regionálním hydrogeologickým modelům vždy sníženo o 45%.

V rámci zpracování detailních hydrogeologických modelů tak nastala změna v popisu propustnosti horninového prostředí v porovnání s regionálními modely lokalit. Hydraulická vodivost klesá s hloubkou pozvolněji, horninový masiv má v blízkosti přìpovrchové zóny nižší hydraulickou vodivost a zlomové linie (poruchové zóny) přispívají k transmisivitě celého masivu menší měrou.

2.6.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky v kombinaci se zadanou propustností horninového masivu určují množství podzemní vody, které v prostoru modelu obíhá.

Z konceptuálního hlediska je jediným zdrojem podzemní vody v prostoru všech devíti simulovaných lokalit efektivní srážková infiltrace – infiltrace zmenšená o evapotranspirované množství, povrchový odtok a hypodermický odtok.

Modelová infiltrace v jednotlivých lokalitách proto odpovídá specifiku vyhodnoceného podzemního odtoku (Krásný et al., 1982). Přesnější informaci pro zadání modelové infiltrace bez dlouhodobého kontinuálního monitoringu a plošného hodnocení odtoku přímo z území posuzovaných lokalit nelze získat.

Tab. 5 Průměrná modelová infiltrace v území posuzovaných lokalit HÚ

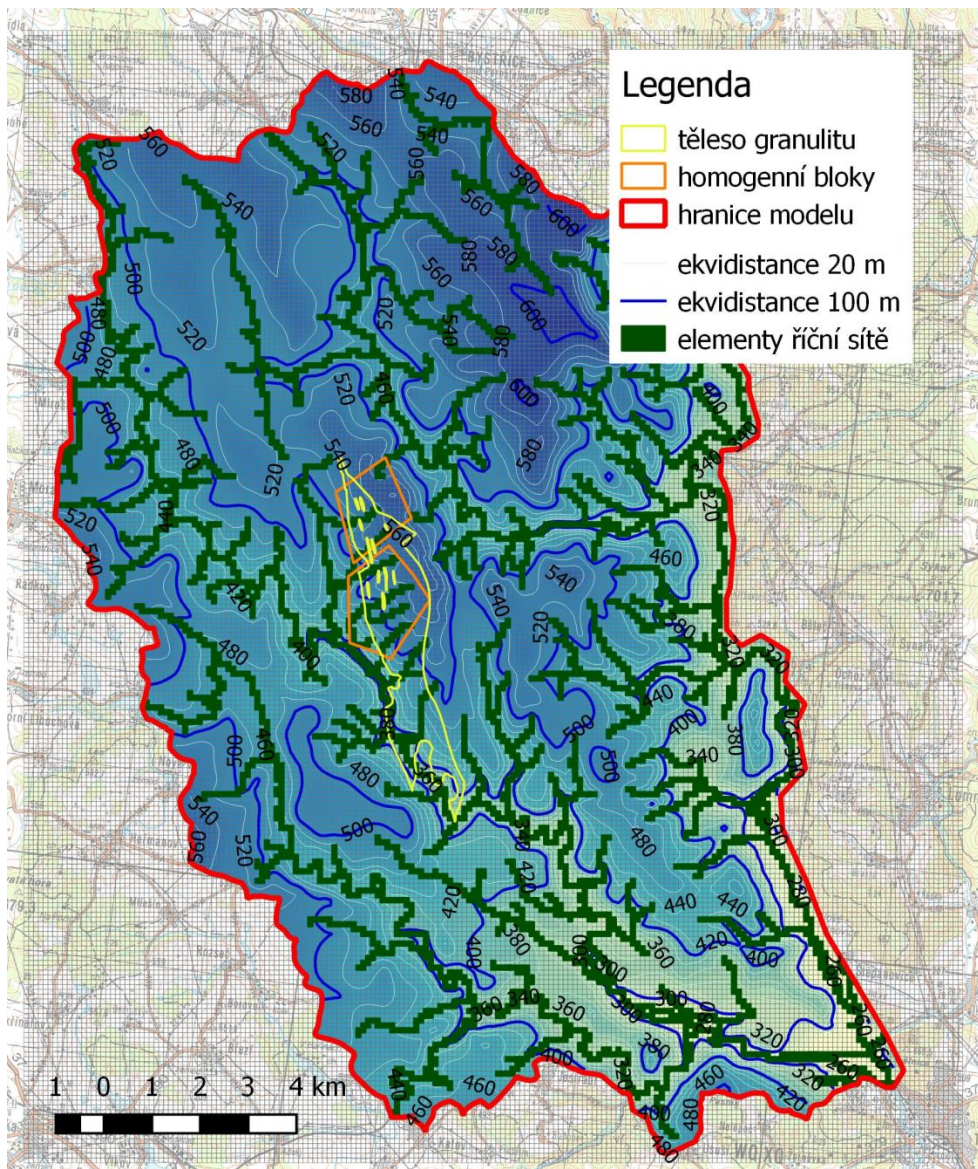
Lokalita	Infiltrace [l.s ⁻¹ .km ⁻²]
Březový potok	3,0

Čertovka	2,0
Čihadlo	3,2
Horka	2,5
Hrádek	4,0
Kraví hora	2,5
Magdaléna	2,5
EDU	1,9
ETE	1,5

V rámci detailních hydrogeologických modelů již modelová infiltrace není v ploše konstantní (takto zadány regionální hydrogeologické modely), ale rozložením odpovídá rozložení dlouhodobého srážkového normálu. Tato data byla pro účely zpracování detailních hydrogeologických modelů doplněna ze strany ČHMÚ.

Báze modelové domény a rovněž boční stěny jsou vzhledem k volbě hranic modelové domény na regionálních rozvodích (kap. 2.6.1) zadány s okrajovou podmínkou nulového přetoku kolmo k hranici modelu.

Drenáž infiltrovaného množství vody na všech lokalitách probíhá výhradně do říční sítě (okrajová podmínka třetího typu). Vcez říční vody do horninového prostředí není simulován. Lokální nevýznamné zdroje podzemí vody nejsou v modelech uvažovány. Výjimka se vyskytuje v případě detailního hydrogeologického modelu lokalita Kraví hora. Zde je kromě drenážního účinku říční sítě simulován i drenážní účinek zaplavených chodeb důlních děl v závislosti na projektované výšce přelivů do dědičných štol (s využitím okrajové podmínky třetího typu).



Obr. 4 Rozložení elementů s okrajovou podmínkou říční sítě (zelené buňky), lokalita Kraví Hora, software MODFLOW-USG, hydroizohypsy v přípořkové vrstvě

Při zadání hydrogeologických modelů cíleně není využita okrajová podmínka prvního typu (neomezený zdroj/ztráta podzemní vody).

2.6.4 Kalibrační data

Pro účely kalibrace hydraulických modelů byly z archivu Geofondu ČGS využity archivní údaje měřených hladin podzemní vody v množství desítek vrtů na každou modelovanou lokalitu. Vrtky jsou ale rozmístěny nerovnoměrně – především jsou situovány poblíž říční sítě (údolní nivy) a v blízkosti komunikací. Kvalita vstupní informace je ovlivněna i časovou nesousledností měřených hladin. Cílem vrtných prací bylo efektivně zajistit maximální množství podzemní vody. Obvyklá hloubka vrtů proto nepřesahuje vyšší desítky metrů, otevřený úsek vrtu ve většině případů začíná mělce pod terénem. Převzaté informace tak charakterizují vrstvu přípořkového zvětrání. Informace o tlakových poměrech v hlubších partiích horninového masivu na všech lokalitách absentují.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

Vzhledem k charakteru zastoupených hornin byl pro všechny lokality přijat předpoklad, že hladina podzemí vody je v celém území (nejen v drenážních oblastech) pouze mělce zakleslá pod úroveň terénu. V rámci kalibrace poměrů proudění v přípovrchové vrstvě (optimalizováno bylo rozložení koeficientu hydraulické vodivosti) byl tento předpoklad vyjádřen požadavkem, aby mimo drenážní báze a mimo lokality s měřenými údaji o hladině podzemní vody byla hladina podzemí vody přibližně 10 m pod terénem. Mimo drenážní oblasti byly zadány imaginární hodnoty měřené hladiny s využitím údajů sníženého terénu.

Míra dosažené shody hydrogeologických modelů s archivními naměřenými údaji neovlivněné hladiny podzemí vody je dokumentována v jednotlivých pasportech detailních hydrogeologických modelů.

Informace o bilanci množství podzemní vody jsou v hydrogeologických modelech kandidátních lokalit HÚ zavedeny implicitně – efektivní srážková infiltrace do přípovrchové vrstvy je zadána na základě informací z map podzemního odtoku.

V ideálním případě kalibrační data obsahují údaje trojího typu:

- údaje o tlakovém poli proudění (hladiny podzemní vody),
- údaje o bilanci množství podzemní vody v modelovém území (příron podzemní vody ve zvolených mezipovodích říční sítě),
- údaje o propustnosti horninového prostředí (z hydrodynamických zkoušek).

Ve všech posuzovaných lokalitách byly k dispozici dílčí údaje o úrovni hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě. Pouze v lokalitě Kraví hora kalibrační data obsahovala i údaje o přítoku podzemí vody do jednotlivých jam a etáží důlních děl Rožná a Olší. Tato data umožňují pro danou lokalitu upřesnit informace o vývoji propustnosti horninového masivu i poruchových zón zastížených důlními díly.

2.7 Metodika modelových prací

V dosavadní fázi hodnocení vybraných lokalit HÚ jsou využita zejména archivní data a doplňková data získaná nedestruktivním způsobem z povrchu.

Podrobné hydrogeologické informace o hlubších partiích horninového masivu nejsou v posuzovaných lokalitách dostupné. Výjimkou je lokalita Kraví hora, kde vzhledem k existenci důlních děl Rožná (dosud v provozu) a Olší (dílo je zatopeno), bylo v rámci průzkumných prací a v rámci těžby uranu, získáno nadstandardní množství informací včetně hydrogeologických dat. Dostupná evidence přítoků v jednotlivých etážích důlních děl zakládá pro kalibraci modelu informace o propustnosti horninového masivu v různé hloubce pod terénem.

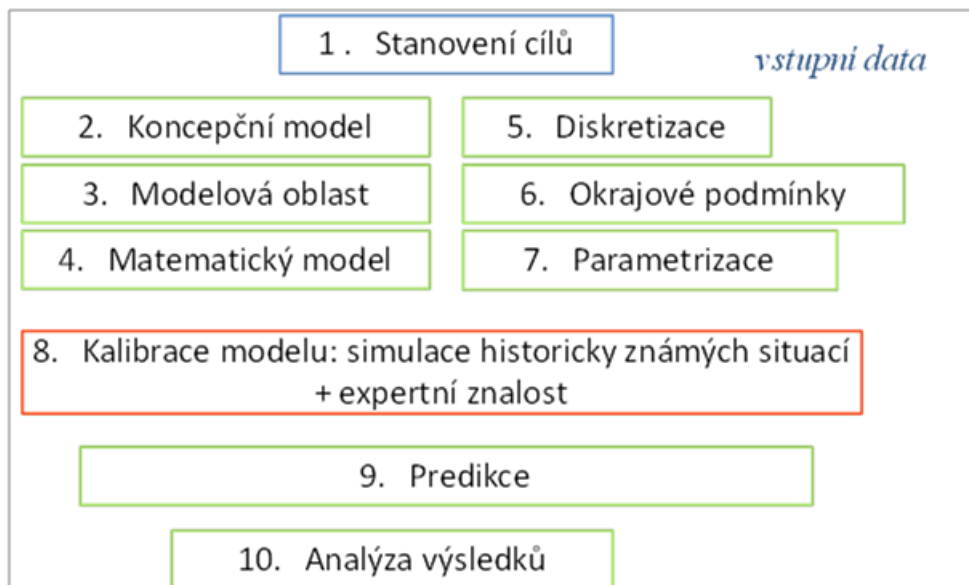
Cíl vzájemně porovnat výsledky detailních hydrogeologických modelů posuzovaných lokalit vyžadoval zvolit pro všechny modely shodnou metodiku zadání v případech, kdy vstupní data byla nejistá, nebo zcela chyběla (propustnost horninového masivu – kap. 2.6.2). Vyhodnocené rozdíly ve výsledcích modelových simulací jsou při splnění tohoto předpokladu dány rozdílnými hydrogeologickými poměry. Rozdíly hydrogeologických poměrů jednotlivých lokalit ovlivňuje:

- nadmožská výška terénu (vliv na potenciál proudění podzemní vody – úroveň hladiny podzemní vody),
- rozložení říční sítě (vymezení drenážních oblastí a nejnižších úrovní hladiny podzemní vody),

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

- velikost efektivní srážkové infiltrace (parametry bilance a rychlosti proudění podzemí vody),
- průběh zlomových zón (propustnost horninového masivu),
- charakteristiky rozpuštění horninového masivu (hustota, orientace, rozevření, konektivita, výplň ovlivňují propustnost horninového masivu).

Postup zpracování hydrogeologických modelů obsáhl všechny standardní metodické fáze:



Obr. 5 Schéma postupu modelových prací

Vzniklé hydrogeologické modely jsou několikanásobně archivovány (archiv PROGEO, s.r.o., archiv ÚJV, archiv SÚRAO).

Přechodné ovlivnění poměrů proudění podzemí vody vlivem výstavby a následného provozu (zavážení) úložiště není předmětem modelových prací. Modelem je prognózováno proudění podzemí vody v dostatečně dlouhém období po uzavření úložiště, kdy hydraulické vliv výstavby úložiště zcela vymizí. Simulace je zadána ve formě ustáleného nasyceného proudění podzemní vody. Vstupní data pro zadání simulací (úroveň říční sítě, velikost srážek, kalibrační data úrovně hladiny podzemní vody) odpovídají aktuálním poměrům. V připovrchové zóně je simulována volná hladina podzemní vody.

2.8 Přehled vstupních dat a podkladů

V aktuální fázi výběru lokality HÚ je pro modelové oblasti charakteristické omezené množství vstupních dat – především pro předpokládanou úroveň úložiště (přibližně 500 m pod terénem). Pro zpracované hydrogeologické modely byly využity archivní zdroje informací. Doplňující průzkumné práce byly vedeny výhradně z povrchu terénu, geofyzikální metody nebyly v době zpracování hydrogeologických modelů realizovány.

Vstupní informace hydrogeologických modelů:

- prostorové strukturně-geologické modely lokalit uvažovaných pro situování HÚ (3D SG modely) sestavené ČGS; tato vstupní data ovlivnila prostorovou distribuci hodnot hydraulické vodivosti v modelovém území – kap. 2.6.2,
- geologická mapa ČR 1:50 000,

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

- databáze vrtných prací ve správě ČGS; tato vstupní data byla využita pro účely kalibrace hydrogeologických modelů podle hladinového kritéria - 2.6.4,
- digitální model terénu; tato vstupní informace ovlivnila vertikální diskretizaci hydrogeologických modelů – úroveň bází modelových vrstev,
- digitální databáze vodohospodářských dat (DIBAVOD, VÚV T.G.M., v.v.i.); tato vstupní informace byla zpracována pro zadání okrajových podmínek reprezentujících říční síť,
- vodohospodářské mapy 1:50 000; tato vstupní informace byla využita při vymezení hranic hydrogeologických modelů v závislosti na průběhu rozvodnic a říční sítě - 2.6.1,
- mapa podzemního odtoku pro území ČSSR (Krásný et al., 1982) – tato vstupní informace byla využita při stanovení dlouhodobé průměrné efektivní srážkové infiltrace do podzemních vod,
- mapová díla různých měřítek.

Hydrogeologické modely jsou zpracovány s využitím následujících typů informací:

- naměřených údajů hladiny podzemní vody ve vrtech, údajů o průběhu zlomových linií,
- odvozených údajů (podzemní odtok, koeficient hydraulické vodivosti v přípoверхové zóně, hloubka a rozsah litologických těles – 3D SG modely),
- vstupních předpokladů (pokles propustnosti horninového masivu s hloubkou, zvýšená propustnost všech zlomových pásem, předpoklad hladiny podzemní vody mělce pod terénem i mimo drenážní oblasti).

Přehled vstupních dat hydrogeologických modelů ve vztahu k nadcházejícím průzkumným pracím na vybraných lokalitách obsahuje kapitola 4.1.

2.9 Archivace a označení modelových prací

Realizované regionální a posléze detailní hydrogeologické modely jsou archivovány na úložištích jednotlivých pracovišť zodpovědných za realizaci modelu v dané softwarové platformě (PROGEO, s.r.o; TUL; ÚJV Řež, a.s.).

Kopie archivu modelových prací byly předávány rovněž koordinátorovi projektu (ÚJV Řež, a.s.) a objednateli (SÚRAO).

Realizované regionální a posléze detailní hydrogeologické modely je vhodné označovat jako verze 1.1 (regionální) a 1.2 (detailní). Návazné modelové práce, již pro zúžený počet lokalit, bude vhodné označovat jako verze 2.X. Úplné označení verze modelu by mělo zahrnout:

- Identifikaci hydrogeologického modelu (HGM),
- koncept (EPM, DFN, nebo kombinace EPMDf – pokud se v modelu současně vyskytují samostatné podoblasti, paralelně řešené s uvedenými rozdílnými konceptuálními východisky při užití rozdílného numerického aparátu pro popis proudění podzemní vody),
- verzi (např. 1.2),
- software (MFUSG, Flow123d, FeFlow),
- a lokalitu (KH).

Vzniklý finální detailní hydrogeologický model lokality Kraví hora v softwaru MODFLOW-USG má navrženo úplné označení v relevantních textech zpráv HGM_EPM_1.2_MFUSG_KH. Odpovídající model realizovaný TUL má navrženo označení HGM_EPM_1.2_Flow123d_KH.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

3 Zpracování modelových informací

Zpracováním výsledků hydrogeologických modelů byl naplněn jeden ze šesti okruhů dat, na jejichž základě Havlová et al. (2018b) posuzují vhodnost jednotlivých lokalit v souvislosti s dlouhodobou bezpečností při situování hlubinného úložiště.

Ve vztahu k hydrogeologickým poměrům je vliv na bezpečnost HÚ posuzován podle následujících kritérií:

1. Přítomnost zvodní v izolační části úložiště.
2. Obtížnost vytvoření důvěryhodného hydrogeologického modelu.
3. Rychlost proudění vody a propustnost horninového masivu:
 - i. v úrovni úložiště,
 - ii. podél trajektorií transportních cest.
4. Identifikace a umístění drenážních bází v lokalitě.
5. Vliv poruchových zón na proudění.
6. Tlakové poměry proudění.
7. Bilance průtoku podzemní vody oblastí HÚ.

První čtyři kritéria jsou identifikována ve vyhlášce SÚJB 378/2016 Sb. a rovněž v metodickém pokynu SÚRAO MP 22v3 (Vokál et al., 2017).

Ad 1)

V izolační části horninového prostředí (mimo připovrchovou zónu), se souvislé zvodně nevyskytují v žádné z posuzovaných lokalit. Proudění podzemní vody v horninovém masivu probíhá pouze po vodivých puklinách. Intenzivnější výskyt vodivých puklin je předpokládán v oblasti poruchových zón.

Ad 2)

Méně vhodné se jeví lokality se složitější geologickou a strukturní stavbou – vyšší stupeň heterogenity zvyšuje nároky průzkumných prací i nejistoty výsledků aplikovaného hydrogeologického (a návazného transportního) modelu.

Ad 3)

Modelové rychlosti proudění podzemní vody přímo v prostoru HÚ i v prostoru mezi HÚ a drenážními bázemi umožňují porovnat lokality z pohledu možnosti advektivního šíření radionuklidů směrem k biosféře. Pomalé proudění podzemní vody v horninovém masivu je jedním z předpokladů odpovídající funkce horninového prostředí jako přirozené bariéry. Méně vhodné se jeví lokality s větší rychlostí proudění podzemní vody.

Ad 4)

Primárním recipientem podzemní vody potenciálně kontaminované radionuklidy v prostoru HÚ budou sedimenty údolních niv a následně říční síť s regionálním drenážním účinkem. Počet úseků (délka) říční sítě, do nichž jsou podzemní vody z prostoru HÚ odvodněny, poskytuje informaci o rozptýlení potenciální kontaminace.

Na základě předpokladů formulovaných SÚRAO je vhodnější větší počet drenážních úseků říční sítě. Hodnocený indikátor má vliv na dosažená maxima koncentrací radionuklidů. Větší míra rozptylu drenáže z prostoru HÚ umožní větší snížení koncentrací radionuklidů. Méně

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

vhodné se jeví lokality, kde drenáž z prostor HÚ (a transport radionuklidů) směřuje například vlivem vodivých poruchových zón do jediného úseku říční sítě a povodí.

Ad 5)

Poruchové zóny lokálního, a především regionálního rozsahu představují riziko vzhledem k možnosti preferenčního proudění v prostředí jinak velmi málo propustného hydrogeologického masivu. Preferenční proudění lze rovněž předpokládat v prostorech zaplavených důlních děl. Méně vhodné se jeví lokality s větším počtem poruchových zón v blízkosti HÚ.

Ad 6)

Výrazné rozdíly v nadmořské výšce terénu a tím v rozložení hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě odlišují posuzované lokality HÚ v ČR od obdobných lokalit v severských zemích, kde je terén plochý.

Méně vhodné se jeví lokality, kde k drenáži podzemní vody z úrovně HÚ může dojít přímo v nadloží HÚ (nulová odlehlost drenážního místa od okraje). HÚ je z hydrogeologického hlediska žádoucí situovat mimo drenážní oblasti a v místech sestupného gradientu proudění podzemní vody z důvodu prodloužení délky transportních cest. Méně vhodné se jeví lokality s menším plošným zastoupením sestupné složky proudění.

Ad 7)

Množství podzemní vody protékající prostorem projektovaného HÚ ovlivňuje mobilitu radionuklidů při advektivním transportu do biosféry. Větší průtok přes prostor projektovaného HÚ signalizuje méně vhodné lokality.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

4 Výhled modelových prací

4.1 Vstupní data modelových prací

Podmínkou odpovídající kalibrace hydrogeologických modelů je, aby vstupní data:

- poskytla prostorovou informaci o poměrech proudění podzemní vody na lokalitě,
- poskytla komplexní informace, založené na různých metodách hodnocení poměrů proudění z důvodu verifikace aplikovaných dat,
- obsáhla nehomogenity v horninovém masivu – jejich výskyt potenciálně signalizuje kritická místa z hlediska bezpečnosti HÚ.

Průzkumné práce je třeba realizovat metodicky tak, aby nedošlo ke znemožnění nebo zkeslení výsledků návazných hodnocení. Typickým příkladem je řazení odběrů pro účely analýz chemismu a stáří podzemní vody návazně na vyhloubení vrtů před realizací vodních tlakových zkoušek (VTZ).

Nehomogenitou primárního významu a zájmu jsou poruchové zóny (deformation zones). Poruchové zóny vytváří okrajové podmínky pro proudění podzemní vody v mezilehlých blocích horniny. V hydrogeologických modelech musí být patřičně reprezentovány. Aktuálně jsou v posuzovaných lokalitách pro umístění HÚ v rámci archivních prací identifikovány a povrchovými terénními pracemi částečně ověřeny poruchy 1 – 3. řádu dle klasifikace SKB. U většiny z těchto poruch ale není znám jejich sklon, hloubkový dosah ani jejich hydraulická funkce (vodivá x těsnící). Pro účely prokazování bezpečnosti finální lokality bude nezbytné pro jednotlivé poruchové zóny s výskytem v oblasti předpokládaných transportních cest specifikovat:

- geometrii (úklon, rozsah, mocnost),
- hydraulickou funkci (srovnáním transmisivity okolního horninového prostředí a transmisivity příslušných úseků vrtů v místech průchodu poruchou, srovnáním analýz odebraných vzorků podzemní vody z poruchy a z prostředí mimo ni, analýzou zjištěných tlaků podzemní vody v různých oblastech poruchové zóny).

Proudění v horninovém masivu probíhá výhradně podél ploch rozpukání. Rozpukání masivu je popisováno při identifikaci počtu puklinových systémů, které jsou dále charakterizovány:

1. četností puklin,
2. rozevřením,
3. popisem výplně,
4. rozměry,
5. orientací,
6. sklonem.

Vrtné průzkumné práce zastihnou jen malou část puklinové sítě. Pro prostorovou interpretaci rozpukání horninového masivu jsou využívány geostatistické metody. Vzniklé modely puklinové sítě v sobě optimálně kombinují stochastický a deterministický přístup popisu (v případě již identifikovaných struktur). Specializované softwary pro modelování v puklinovém prostředí (například ConnectFlow) jsou vybaveny generátorem puklinové sítě.

Vrtné práce vytvoří hydraulický zkrat mezi partiemi horninového masivu s rozdílným tlakem podzemní vody. Důsledkem vrtných prací vzniknou nové poměry přetékání podzemní vody

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

mezi puklinovými systémy s napojením na vrt. Teprve odtěsněním zvolených úseků vrtu s využitím pakrů se částečně obnoví hydraulické poměry před zahájením vrtných prací.

Modelový popis puklinového prostředí je vždy pouze hrubou schematizací reálných poměrů. Přírodní pukliny jsou zakřivené, mají proměnlivou drsnost, rozevření i výplň. Modelové pukliny jsou běžně planární, mají jednoduchou geometrii ohraničení, rozevření je obvykle zadáno konstantní.

Z hlediska modelování proudění podzemní vody je podstatné, aby zjednodušená modelová puklinová síť měla s reálnou puklinovou sítí obdobné charakteristiky z hlediska geometrie, propustnosti a rychlostí proudění. Etážové vodní tlakové zkoušky umožňují kalibrovat propustnost (transmisivitu) puklinové sítě zastižené v testovaných úsecích vyhloubených vrtů. Interferenční (skupinové) hydraulické testy umožňují kalibrovat konektivitu puklinového prostředí v různých směrech a hloubkových úrovních.

Hydraulické testování probíhá při uměle vyvolaných gradientech, které se za přírodních poměrů nevyskytují. Informaci o přírodních poměrech ve smyslu rychlosti proudění podzemní vody lze vyvozovat z analýz chemismu podzemní vody, nejlépe ze zastoupení přítomných izotopů v kombinaci s látkami antropogenního původu. Z komplexní analýzy lze částečně usuzovat i na mísení podzemní vody různého stáří v odebraném (směsném) vzorku. Přes všechna úskalí vyhodnocení jsou právě údaje o stáří podzemní vody jednou z důležitých informací při kalibraci hydrogeologických modelů proudění v horninovém masivu.

Přehled vstupních dat

Data pro účely modelování jsou členěna na okruhy (Obr. 1). V nadcházející etapě průzkumných prací je pro účely následného zpřesnění modelového popisu lokalit potřeba některé položky vstupních dat zpřesnit a velkou část zcela nově doplnit. V nadcházející fázi modelových prací pro čtyři vybrané lokality budou zkombinována data již využitá pro zrealizované hydrogeologické modely verze 1.2. s daty nově získanými.

Geometrické údaje obsáhnou následující fenomény:

- terén posuzovaných lokalit (optimální je aplikovat model terénu DMR 5G),
- geometrii říční sítě (dosud využívané údaje z databáze VÚV TGM DIBAVOD jsou vyhovující),
- geometrii poruchových zón (úklon, rozsah, mocnost) – informace bude v rámci nadcházejících průzkumných prací 4 lokalit podstatně zpřesněna,
- statistické charakteristiky rozpuštění horninového masivu – informace bude v rámci nadcházejících průzkumných prací 4 lokalit podstatně zpřesněna.

Informace pro zadání okrajových podmínek musí obsahovat ve vztahu k:

- říční síti:
 - nadmořskou výšku hladiny v tocích (lze odvodit z DMR 5G),
 - skoky na jezových stupních (lze odhadnout/naměřit při rekognoskaci v terénu),
- modelové infiltraci:
 - srážkové normály (již využitá data v aktuálních hydrogeologických modelech jsou vyhovující),
- odběrům podzemní vody:
 - údaje o poloze a hloubce jímacího objektu (databáze ČGS),
 - údaje o velikosti odběru (evidence ISVS)

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

- k pramenním vývěřům:
 - údaje o poloze a nadmořské výšce (měření, databáze ČHMÚ),
 - údaje o vydatnosti pramenů (vlastní měření, databáze ČHMÚ).

Informace pro zadání hydraulických charakteristik nově obsáhnou ve vztahu k:

- puklinové sítě (v rámci průzkumných vrtných prací):
 - počet puklinových systémů,
 - podíl vodivých puklin v rámci jednotlivých puklinových systémů,
 - charakterizaci geometrie každého puklinového systému – rozměry, orientace, sklon, rozevření
 - statistické údaje pro účely stochastického generování
- konceptu EPM:
 - informace o transmisivitě všech testovaných úseků nově vyhloubených průzkumných vrtů,
 - archivní informace o propustnostech horninového prostředí z databáze Geofondu – ČGS,

Informace pro účely kalibrace hydrogeologických modelů obsáhnou:

- údaje o naměřené ustálené hladině podzemní vody z hydrogeologických vrtů historicky hloubených v lokalitě (dosud využívané údaje z databáze Geofondu – ČGS jsou vyhovující) a z odvrtných vrtů v rámci nových průzkumných prací,
- údaje o příronu podzemní vody ve vymezených úsecích říční sítě (informace bude pořízena nově v rámci nadcházejících průzkumných prací na zvolených lokalitách),
- údaje o stáří podzemní vody (informace bude nově pořízena pro vybrané vrty a hloubky horninového masivu),
- údaje o naměřených tlacích v jednotlivých úsecích nově vyhloubených vrtů (vertikální profily vývoje tlaku ve vrtech),
- údaje o směru pohybu (a průtoku) vody v nově vyhloubených vrtech (nová informace z karotážních prací na nově vyhloubených vrtech),
- kompletní záznamy o všech provedených hydraulických testech v nově vyhloubených vrtech.

Hlavní metoda kalibrace hydrogeologických modelů bude založena na modelové simulaci vybraných hydraulických testů v příslušném měřítku.

4.2 Výhled aplikace modelů

Matematické modely proudění podzemní vody a transportu rozpuštěných látek jsou nedílnou součástí metodiky výběru lokality HÚ, která je úzce spjata s prokazováním bezpečnosti. Matematické modely umožňují na základě naměřených a vyhodnocených dat z průzkumných prací predikovat procesy ovlivňující migraci radionuklidů.

Práce na hydrogeologických modelech byly dosud realizovány v regionálním měřítku. Zásadním přínosem zpracování regionálních hydrogeologických modelů je identifikace oblastí, kam jsou odvodněny prostory horninového masivu vymezené v projektech technického řešení hlubinného úložiště za účelem situování UOS. Tento cíl je potřeba nadále sledovat s důrazem na zpřesňování výsledku. V hydrogeologických modelech regionálního měřítku je proudění podzemní vody popsáno uceleně – z míst infiltrace do oblastí drenáže. Výpočty zahrnují oblast vzdáleného pole interakcí.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

Základem dosud realizovaných modelových simulací jsou výpočty na podkladě aktuálně platné hydrogeologické situace (velikosti srážek, úrovně říční sítě). V souvislosti s komplexním prokazováním bezpečnosti HÚ bude nutné postupně do simulací zařadit faktory dlouhodobě ovlivňující poměry proudění (klimatická změna; změny úrovně terénu a říční sítě) i krátkodobější vlivy (odvodnění v důsledku ražby a následné sycení).

Primární využití realizovaných hydrogeologických modelů bylo dosud pro účely popisné charakterizace a pro návazné porovnání poměrů proudění v horninových masivech na posuzovaných lokalitách (Havlová et al., 2018b). Po zúžení počtu kandidátních lokalit na čtyři bude nezbytné modelové práce zpřesnit pro potřeby komplexního prokazování bezpečnosti HÚ (Safety case). Zejména je potřeba modelové práce založit na datech charakterizujících horninové prostředí každé posuzované lokality v úrovni projektovaného HÚ z hlediska propustnosti, geometrie puklin a poruchových zón i fyzikálně chemických vlastností ovlivňujících transportní proces radionuklidů. Výsledky hydrogeologických modelů je potřeba maximálně využít při sestavování realistických (byť konzervativních) scénářů vývoje HÚ pro potřeby prokazování bezpečnosti. Výsledky bezpečnostní analýzy čtyř posuzovaných lokalit budou klíčovým podkladem při dalším zúžení počtu posuzovaných lokalit.

Modelové práce v komplexním hodnocení bezpečnosti budou zejména využity pro následující cíle:

- analýza rychlostí proudění a postupových dob (hydrogeologický model),
- charakterizace transportních cest (hydrogeologický model),
- posouzení izolačních schopností geosféry (hydrogeologický model),
- stanovení maximálních koncentrací radionuklidů v prostoru biosféry (transportní model),
- výpočtu radiační dávky na zemském povrchu (model biosféry),
- analýzy nejistot předkládaných výsledků (všechny modely).

Zcela samostatnou kapitolou je aplikace modelů detailního měřítka pro potřeby prokazování účinnosti inženýrských bariér (blízké pole interakcí).

Výše uvedené cíle komplexní aplikace modelů za účelem posuzování bezpečnosti lze optimálně realizovat při využití:

- modelů různého měřítka (site scale, repository scale, canister scale),
- rozdílných principů popisu horninového prostředí (EPM, SC, DFN, kombinovaný přístup),
- řešitelského týmu s možnostmi výsledky validovat s uplatněním rozdílných výpočetních kódů.

Regionální hydrogeologické modely kandidátních lokalit průběžně zůstanou nedílným podkladem pro posuzování izolačních schopností horninového masivu (geosféry). Při realizaci detailních modelových prací jsou okrajové podmínky stanoveny právě z výsledků proudění v regionálních modelech.

Po celou dobu kumulování znalosti o lokalitě (nadcházející periody průzkumných prací, perioda výstavby HÚ, perioda monitoringu po uzavření HÚ) musí být aktualizován i regionální hydrogeologický model lokality.

Po zúžení počtu kandidátních lokalit na čtyři budou v rámci nadcházejících projektovaných průzkumných prací pořízeny informace o puklinových systémech horninových masivů a jejich propustnosti minimálně do projektované úrovně HÚ. Regionální modely čtyř lokalit projdou

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

zásadní aktualizací ve vztahu k zadané propustnosti horninového masivu. Dosud uplatňovaný shodný postup zadání vstupní modelové informace o propustnosti horninového masivu bude nahrazena přístupem specifickým pro každou posuzovanou lokalitu. V procesu kalibrace hydrogeologických modelů bude nezbytné zajistit, aby regionální modely verze 2.X obsahly maximální množství nově zjištěných informací o hydrogeologických poměrech lokalit.

Při kalibraci modelů by proto měla být docílena přiměřená shoda:

- modelové a vyhodnocené drenáže podzemní vody do říční sítě, tímto postupem bude zajištěno, že modelový oběh podzemní vody v připovrchové vrstvě bude odpovídat skutečným poměrům z hlediska bilance,
- měřené a modelové hladiny podzemní vody v připovrchové vrstvě, rozložení hladiny v připovrchové zóně má vliv na tlakové poměry proudění i v prostoru horninového masivu,
- velikosti i zjištěných trendů vývoje propustnosti horninového masivu v místech průzkumných vrtů; v důsledku svírání puklin geostatickým tlakem je s nárůstem hloubky pod terénem očekáván pokles propustnosti horninového masivu (anomálie tohoto trendu se mohou vyskytovat v úsecích poruchových zón),
- úrovně hladiny i trendů vývoje hladiny v průzkumných hlubinných vrtech; odpovídající modelová interpretace oblastí se vztupnou a sestupnou složkou proudění je klíčová pro detailní věrohodnou modelovou analýzu poměrů proudění,
- průběhu zjištěných regionálních poruchových zón; poruchové zóny v závislosti na orientaci ovlivňují směry proudění v puklinové síti lokálního významu; identifikace a odpovídající modelová interpretace regionálních poruchových zón je klíčem k detailní analýze poměrů proudění v horninovém masivu,
- zjištěného stáří podzemní vody a trendů vývoje v závislosti na hloubce pod terénem; informace o stáří a chemismu podzemí vody přináší souhrnnou kvalitativní informaci o poměrech proudění mezi místy infiltrace a místem odběru; jedná se o významný údaj, kterým je potřeba verifikovat v modelu implementované vlastnosti puklinové sítě (primárně rozevření a konektivitu).

Zkalibrovaný hydrogeologický model při využití informací ze strukturně geologického modelu poskytuje data o poměrech proudění podzemní vody (rychlost, množství, směr) v horninovém masivu. Tato data jsou využita v transportním modelu za účelem výpočtů časoprostorových informací koncentrací radionuklidů pro uvažované scénáře vývoje UOS. Transportní model využívá vstupní informaci vývoje koncentrací z modelů blízkého pole interakcí.

Hydrogeologické a transportní modely reprezentují komplexní 3D nástroj popisu proudění a transportních jevů v horninovém masivu. Pro účely návazného vyhodnocení bezpečnostních aspektů transportu radionuklidů do biosféry jsou data z hydrogeologických a transportních modelů transformována. Transportní proces radionuklidů v horninovém prostředí probíhá při uplatnění poklesu koncentrací vlivem procesů:

- ředění a nárůstu zasaženého objemu horninového masivu v důsledku větvení puklinové sítě (disperze),
- radioaktivní přeměny,
- sorpce v puklinách,
- difuze do horninové matrice.

Jedná se o jev prostorový. Návaznostem mezi jednotlivými modely a odpovídající interpretací horninového prostředí je potřeba věnovat zvýšenou pozornost.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

S regionálními modely lokalit (plocha nejmenšího modelu přesahuje 185 km²) je z důvodů výpočetní náročnosti obecně spjat výpočet proudění podzemní vody na podkladě konceptu EPM, kdy propustnost horninového masivu v každém modelovém elementu definuje tenzor hydraulické vodivosti.

Na opačném pólu jsou modely popisující proudění podzemní vody v síti diskretních puklin (DFN modely). Propustnost horninového masivu je určena charakteristikami zadané puklinové sítě. DFN modely mají vyšší nároky na výpočetní kapacitu, protože jejich primárním cílem je detailní popis proudění, které je reálně vymezeno rozpukáním horninového masivu.

Specializované softwary proto umožňují selektivně (s cílem snížit výpočetní nároky modelové simulace) v různých částech modelové domény kombinovat oba výše uvedené koncepty popisu proudění (EPM a DFN). Další možnost modelového přístupu spočívá výhradně v aplikaci DFN modelu pro regionální měřítko, přičemž modelová síť puklin odpovídající detail obsahuje pouze v oblasti přednostního zájmu, v okrajových partiích modelu je puklinová síť schematizována.

Výhodou DFN modelů oproti modelům EPM je, že se více přibližují fyzikální podstatě proudění v rozpukaném skalním prostředí. Poskytují informaci o smáčeném povrchu, přes který může docházet k interakci mezi horninou a podzemní vodou v puklině. DFN modely umožňují lépe uplatnit lokálně zjištěná data z vrtných prací. Klíčovou vlastností DFN modelů je konektivita puklin, která určuje celkovou propustnost horninového masivu. Ovlivňována je zejména kombinací geometrických parametrů puklinové sítě (rozměry, rozevření) a hustotou rozpukání. Vždy je potřeba ji kalibrovat – na základě hydraulických testů a informací o stáří podzemní vody v prostoru horninového masivu. Specializované softwary umožňují výpočet tenzoru hydraulické vodivosti z existujícího DFN modelu a převedení (scaling) DFN modelu na model EPM.

V dosud realizovaných pracích byly hydrogeologické modely, založené na konceptu EPM, koncipovány jako deterministické. Dochází v nich k plynulým změnám hydraulické vodivosti v závislosti na hloubce pod terénem. V rámci stejného horninového typu je hydraulická vodivost ve shodné hloubce pod terénem vždy shodná.

Stochastické hydrogeologické modely zohledňují prvek nahodilosti v propustnosti horninového masivu. Stochastické modely umožňují analyzovat nejistoty modelových výsledků. Při sestavení jednotlivých realizací modelu je ale nezbytné oddělovat doménu poruchových zón a doménu přirozeně rozpukaného horninového masivu. Doménu propustných poruchových zón je potřeba zadávat odděleně – při zachování deterministického přístupu, nebo s odlišnou střední hodnotou i variabilitou propustnosti od zbytku horninového masivu.

Aplikaci hydrogeologických modelů pro vzdálené pole interakcí na zúženém počtu lokalit lze charakterizovat následujícími body:

1. Modelové práce mají v procesu kalibrace v maximální míře zohlednit nová data z projektovaného průzkumu lokalit (kap. 4.1).
2. Další zúžení počtu lokalit bude realizováno s využitím výsledků hodnocení bezpečnosti (safety case). Bude tak dále posílena vazba mezi výběrem a bezpečností lokality. Hydrogeologické (a návazně transportní) modely poskytnou potřebná vstupní data pro hodnocení. Výsledky hodnocení bezpečnosti jsou souměřitelné s požadavky SÚJB.
3. Základem modelových prací bude:
 - aktualizace regionálního hydrogeologického modelu v konceptu EPM, podkladem pro zadání hydraulické vodivosti v prostoru horninového masivu (minimálně v okolí

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

HÚ) bude kombinovaný (stochastický a deterministický) model vodivých puklin a zlomových zón,

- DFN model části masivu s projektovaným HÚ a vrtnými průzkumnými pracemi,
- analýza nejistot.

5 Závěr

Završen je čtyřletý projekt zpracování hydrogeologických modelů devíti lokalit uvažovaných pro situování HÚ. Projekt byl realizován v rámci programu SÚRAO "Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště". Modelové práce byly dokončeny při uplatnění většího detailu (modelové elementy s charakteristickým rozměrem 25 m) výpočtu v centrální oblasti s projektovaným úložištěm. Tento postup umožnil v modelových simulacích lépe zohlednit geometrii úložišť z příslušné projektové dokumentace. Větší detail výpočetní sítě poskytl možnost do modelů zadat větší detail zjištěných nehomogenit horninového prostředí v návaznosti na průzkumné práce. Metodicky byla ověřena schopnost všech použitých softwarů (MODFLOW-USG, Flow123D, FeFlow) poskytnout výsledky v detailu souměřitelném s rozměry HÚ.

Získané výsledky všech hydrogeologických modelů z hlediska tlakového pole a bilance proudění podzemní vody si pro jednotlivé softwarové platformy odpovídají. Získaný popis proudění podzemní vody v horninovém masivu je robustní a platný pro aktuální dostupná data. Nevýznamné rozdíly ve vypočteném takovém poli mezi jednotlivými softwary souvisí se zvolenou metodikou kalibrace, interpretací zlomových linií, nastavením kalibračních kritérií i podrobností výpočtu ve smyslu zavedené diskretizace modelové domény (kap. 2.4).

Z hlediska systematické klasifikace modelových prací je nyní pro každou z devíti posuzovaných lokalit zpracován hydrogeologický model verze 1.2. Vytvořené hydrogeologické modely reprezentují aktuální představu o poměrech proudění v horninových masivech zvažovaných pro situování HÚ i v jejich širším okolí. V každé posuzované lokalitě byly pro rozhodovací proces zúžení počtu specifikována pravděpodobná místa drenáže podzemní vody (a radionuklidů) z projektovaných HÚ. Poměry proudění charakterizují informace o velikosti, rychlosti a směru proudění podzemní vody. Absence informací o propustnosti horninových masivů v projektové úrovni HÚ (s výjimkou Kraví hory) byla překlenuta přijetím shodných vstupních předpokladů pro všechny lokality. Modely jsou zpracovány na podkladě konceptu ekvivalentního pórového kontinua (EPM), kdy propustnost horninových masivů posuzovaných lokalit je popsána pomocí koeficientu hydraulické vodivosti, protože aktuálně chybí informace charakterizující puklinové prostředí horninových masivů. Specifikem všech posuzovaných lokalit hlubinného úložiště v České republice jsou v porovnání s vybranými lokalitami v severovýchodních zemích rozdíly úrovně terénu v řádu prvních stovek metrů. Obecně tak existují podmínky pro relativně rychlé proudění podzemní vody, které může degradovat izolační schopnost horninového masivu v souvislosti s transportem radionuklidů. Skutečné poměry proudění podzemní vody v jednotlivých lokalitách závisí na intenzitě rozpukání, propojení, orientaci puklinových systémů a na jejich výplni. Nadcházející průzkumné práce je nezbytné (mimo jiné) nasměrovat k popisu těchto fenoménů. Získané informace o poměrech proudění na jednotlivých lokalitách je potřeba nezávisle ověřovat s využitím informací o stáří podzemní vody.

I přes nejistoty provedených modelových výpočtů je pravděpodobné, že proudění podzemní vody z projektovaných prostor HÚ nejdál směřuje do údolních niv toků s regionálním drenážním účinkem. Pro všechny posuzované lokality lze konstatovat, že k odvodnění úložných prostor HÚ obvykle dochází do vzdálenosti 10 km od projektovaného podzemního díla. Často ale na podstatně kratší vzdálenosti. Vymezena je tak oblast přednostního situování průzkumných prací.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

Hydrogeologické modely umožňují z dat získaných průzkumnými pracemi předpovědět poměry proudění v horninovém masivu. Jsou tak nedílnou součástí nástrojů pro posuzování bezpečnosti hlubinných úložišť. Ta je primárně spjata s vlastnostmi horninového prostředí pod bází zóny ovlivněné připovrchovým zvětráním.

Hlavním rysem hydrogeologických modelů je trvalý nedostatek vstupní informace. Vrtné průzkumné práce zastihnou jen malý objem horninového masivu. Důsledkem je nejistota vstupní informace i modelového výsledku. Pro její snížení je klíčové v rámci procesu kalibrace hydrogeologického modelu v maximální míře uplatnit prostorové informace rozdílné povahy (tlak podzemní vody, průtoky zjištěné při etážových VTZ a interferenčních testech, informace o stáří a chemismu podzemí vody i propustnosti testovaných úseků vrtů, místa a velikost drenáže podzemní vody). Optimální postup kalibrace hydrogeologických modelů, ale i vyhodnocení naměřených dat spočívá v simulaci vybraných hydraulických testů na modelech odpovídajícího měřítka.

Nejistoty modelových simulací lze identifikovat na základě analýzy vlivu změn (alternativ) vstupních dat modelu na předkládaný výsledek. Provedené změny zadání modelu přitom nesmí být v rozporu s dostupnou znalostí o poměrech lokality. Pokud budou vzniklé alternativy modelu současně generovat nejvíce nepříznivý výsledek z hlediska bezpečnosti HÚ, lze analýzu nejistot modelu úzce spojit s analýzou bezpečnosti HÚ. Pokračující průzkum a výzkum na lokalitách je možné návazně zaměřit tak, aby nepříznivé alternativy uvažované v modelu byly průzkumnými pracemi vyloučeny/ověřeny.

Modelové práce v souvislosti s výběrem lokality HÚ budou v období posuzování čtyř lokalit podřízeny vyhodnocení jejich bezpečnosti. Pro tyto účely bude nezbytné použít více typů softwaru, koncepcí popisu horninového prostředí i uvažovaných jevů při volbě modelů různých měřítek a typu.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

6 Citace a seznam literatury

- BAIER J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Hrádek. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Rostoky u Prahy.
- BAIER J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Březový potok. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Rostoky u Prahy.
- ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Čertovka. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Rostoky u Prahy.
- ČERNÝ M., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Magdaléna. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Rostoky u Prahy.
- Doherty J., PEST, Model-independent Parameter Estimation-User Manual Part I, Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia, 2016.
- 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., KÚRKOVÁ 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., HROCH T., POLÁK M., ŠTĚDRÁ V., ŘÍHA J., ČERVINKA R., (2018a): hierarchizace kritérií či indikátorů vhodnosti lokalit a způsob hodnocení lokalit. Technická zpráva v přípravě. UJV Řež, Řež.
- HAVLOVÁ V., PERTOLDOVÁ J., BUKOVSKÁ Z., MIXA P., HROCH T., ŠTĚDRÁ V., MILICKÝ M., ŘÍHA J., ČERVINKA R., TRTÍLEK R., RATAJ J. (2018b): Hodnocení vhodnosti lokalit pro umístění hlubinného úložiště VJP a RAO z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Technická zpráva v přípravě. UJV Řež, Řež.
- JANKOVEC J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Dukovany. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Rostoky u Prahy.
- JANKOVEC J., KRÁLOVCOVÁ J., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018b): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Temelín. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Rostoky u Prahy.
- MUFFELS C., WANG X., TONKIN M., NEVILLE C. (2014): User's Guide for mod-PATH3DU. S.S. Papadopoulos & Associates Inc., Bethesda, Ontario, USA.

 SÚRAO	Detailní hydrogeologické modely lokalit	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 323/2018

- POLÁK M., KRÁLOVCOVÁ J., GRECKÁ M., UHLÍK J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu – lokalita Čihadlo. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Roztoky u Prahy.
- POLLOCK D.W. (1994): User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3; a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey.
- ŘÍHA J., UHLÍK J., GRECKÁ M., BAIER J., ČERNÝ M., GVOŽDÍK L., HAVLOVÁ V., KRÁLOVCOVÁ J., MARYŠKA J., MILICKÝ M., POLÁK M., TRPKOŠOVÁ D., (2018): Transportní modely – závěrečná zpráva. Technická zpráva v přípravě. Technická univerzita v Liberci, Liberec.
- 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 Uhlík⁴, 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., KRÁLOVCOVÁ J., TRPKOŠOVÁ D., BAIER J., BALVÍN A., POLÁK M., ŘÍHA J., ŠKARYDOVÁ I., (2015): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště, Rešerše zahraničních přístupů a koncepce řešení, Průběžná zpráva. PROGEO, s.r.o. Roztoky u Prahy.
- 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 u Prahy.
- UHLÍK J., KRÁLOVCOVÁ J., BAIER J., MILICKÝ M., GVOŽDÍK L., CHUDOBA J., ŘÍHA J., RUKAVIČKOVÁ L. (2018a): Hydrogeologické modely horninového prostředí pro hlubinné úložiště. Pasport detailního modelu - lokalita Kraví hora. Technická zpráva. PROGEO, s.r.o. Roztoky u Prahy.
- 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. PROGEO, s.r.o. Roztoky u Prahy.
- VOKÁL A., POSPÍŠKOVÁ I., VONDROVIC L., KOVÁČIK M., STEINEROVÁ L. (2017): Požadavky, indikátory vhodnosti a kritéria výběru lokalit pro umístění hlubinného úložiště. Metodický pokyn SÚRAO MP 22, verze 3, SÚRAO, Praha, 41 str.

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