

Technická zpráva číslo 66/2016

---

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

---

Autoři: Uhlík J  
a kolektiv

PROGEO, s.r.o.

**Roztoky, říjen 2016**



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

Evidenční označení:

**SÚRAO TZ 66/2016**

 SÚRAO	HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 66/2016

---

# HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA

---

**Autoři: Jan Uhlík <sup>1</sup>, Jiřina Královcová <sup>2</sup>, Dagmar Trpkošová <sup>3</sup>**

Autorský kolektiv: Milický M<sup>1</sup>, Baier J<sup>1</sup>, Černý M<sup>1</sup>, Chudoba J<sup>2</sup>, Říha J<sup>2</sup>, Grecká M<sup>3</sup>, Rukavičková L<sup>4</sup>

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

## Obsah

1	Úvod.....	7
2	Modelové území.....	7
3	Hydraulické charakteristiky.....	8
4	Okrajové podmínky.....	10
4.1	Toky.....	10
4.2	Srážková infiltrace.....	11
5	Realizace modelu v programu MODFLOW.....	11
5.1	Geometrie modelu.....	11
5.2	Hydraulické charakteristiky.....	12
5.3	Kalibrace modelu.....	12
5.4	Výsledky hydraulického modelu.....	13
5.4.1	Bilance modelu.....	13
5.4.2	Hladiny a směry proudění podzemní vody.....	15
6	Realizace modelu ve Flow123d.....	17
6.1	Geometrie modelu.....	17
6.2	Parametry modelu.....	19
6.3	Kalibrace modelu.....	19
6.4	Výsledky modelu.....	22
6.4.1	Bilance modelu.....	22
6.4.2	Hladiny a směry proudění podzemní vody.....	22
7	Realizace modelu ve FEFLOW.....	25
7.1	Geometrie modelu.....	25
7.2	Parametry modelu.....	25
7.3	Tektonické linie.....	26
7.4	Kalibrace modelu.....	27
7.5	Výsledky hydraulického modelu.....	28
7.5.1	Bilance modelu.....	28
7.5.2	Hladiny podzemní vody.....	29
8	Závěr.....	31

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

9	Literatura.....	32
---	-----------------	----

### Seznam obrázků:

Obr. 1	Rozsah oblasti modelů, fialově zobrazena hranice aktivního modelového území modelů MODFLOW a FEFLOW, červeně čárkovaně hranice modelu Flow123d .....	7
Obr. 2	Výstup z 3D SG modelu - vodorovný řez, rozložení horninových typů v úrovni 0 m n. m. Zlomy I. kategorie jsou vykresleny tlustou černou linií, zlomy II. kategorie jsou tmavě šedé a zlomy III. kategorie jsou světle šedé. ....	10
Obr. 3	Vertikální řez modelovou doménou s úrovní bází jednotlivých modelových vrstev v programu MODFLOW. Barevně jsou odlišeny jednotlivé horninové typy a zlomová pásma. ....	11
Obr. 4	Porovnání měřených a modelových hladin podzemní vody modelu MODFLOW.....	13
Obr. 5	Hlavní povodí v oblasti a výsledné drénované množství podzemní vody do příslušných toků v modelu MODFLOW.....	14
Obr. 6	Přetok podzemní vody přes báze jednotlivých modelových vrstev (model MODFLOW) .....	14
Obr. 7	Modelové hladiny a směry proudění podzemní vody v přípovrchové vrstvě – model MODFLOW .....	15
Obr. 8	Modelové hladiny podzemní vody v úrovni HÚ (6. modelová vrstva) – model MODFLOW .....	16
Obr. 9	Schematické znázornění základního vertikálního členění modelu Flow123d do dvou modelových subdomén (přípovrchová vrstva - v1 a horninový masiv - v2) .....	17
Obr. 10	Tektonické zlomy uplatněné v modelu ve Flow123d .....	18
Obr. 11	Zobrazení povrchu sítě a promítnutí linií vodních toků do hraničních elementů na povrchu sítě modelu Flow123d.....	18
Obr. 12	Schematické znázornění členění masivu do litologických typů v modelu Flow123d – situace ve třetí modelové vrstvě (členitost rozhraní mezi jednotlivými litologickými typy je způsobena jednak nestrukturovanou sítí a jednak identifikací příslušnosti elementů k jednotlivým litologickým typům až po vygenerování sítě).....	19
Obr. 13	Zobrazení pozorovacích bodů stanovených na základě reálných měření ve vymezené oblasti (model Flow123d) .....	20
Obr. 14	Vizualizace výsledných hydraulických vodivostí v první modelové vrstvě modelu Flow123d.....	21
Obr. 15	Graf porovnání měřených a vypočtených hydraulických výšek v pozorovacích bodech stanovených na základě dostupných reálných dat (model Flow123d).....	21
Obr. 16	Hydraulické výšky [m n. m.] v první modelové vrstvě modelu Flow123d .....	23

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

Obr. 17 Výsledné hydraulické výšky [m n. m.] a směry proudění v úrovni 0 m n. m. modelu Flow123d.....	24
Obr. 18 Hydraulická vodivost horninových těles ve čtvrté modelové vrstvě modelu FEFLOW. Hodnoty hydraulické vodivosti v legendě jsou uvedeny v jednotkách $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .....	26
Obr. 19 Průběh tektonických linií v modelu FEFLOW .....	27
Obr. 20 Porovnání archivních údajů s modelovými hladinami modelu FEFLOW .....	28
Obr. 21 Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev modelu FEFLOW .....	29
Obr. 22 Izolinie hladiny podzemní vody v připovrchové vrstvě modelu FEFLOW. Růžovými kroužky jsou znázorněny pozorovací body v první modelové vrstvě. ....	30
Obr. 23 Izolinie hladiny podzemní vody v úrovni 0 m n. m. modelu FEFLOW.....	31

### Seznam tabulek:

Tab. 1 Tabulka horninových typů dle podkladů ČGS, užití parametry $K_0$ a $c$ pro výpočet $K(z)$ .....	9
Tab. 2 Stanovené hodnoty transmisivity jednotlivých zlomových pásem kategorizovaných dle SKB.....	12
Tab. 3 Souhrnná data o množství drenáže podzemní vody do jednotlivých povodí v modelu Flow123d.....	22

## 1 Úvod

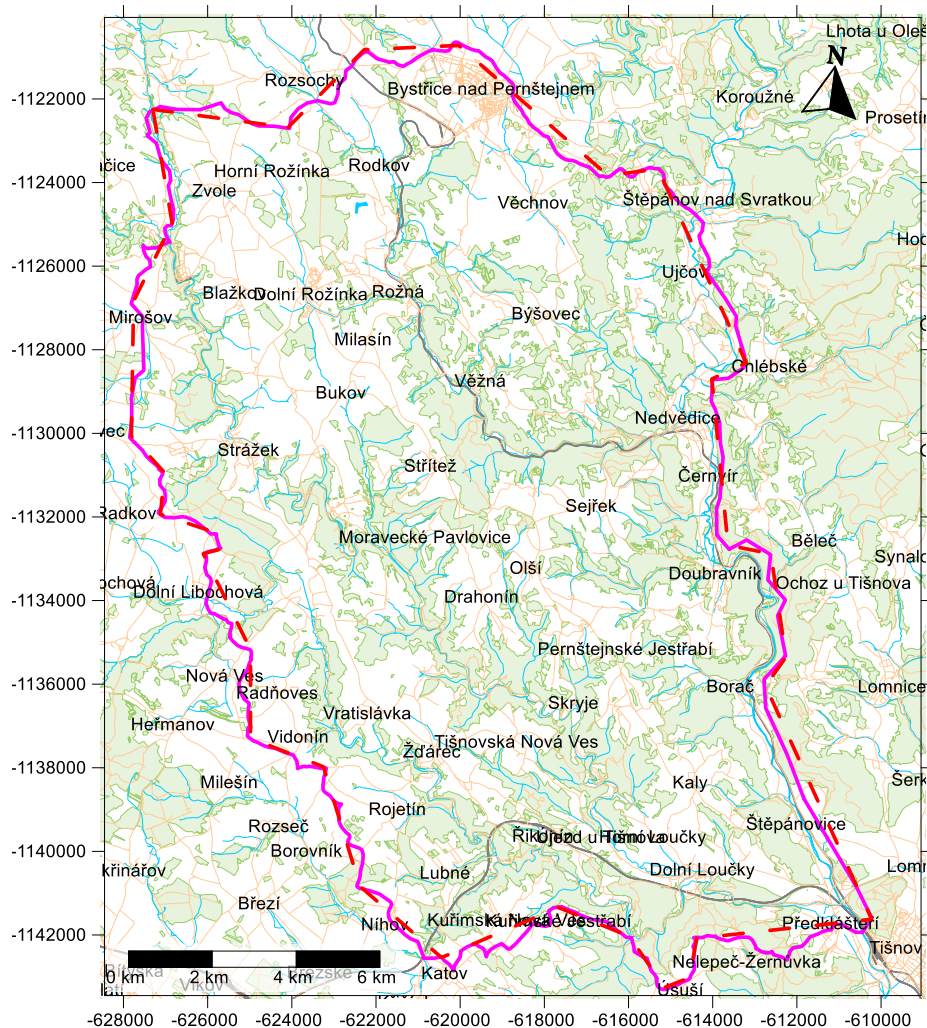
Předkládaná zpráva dokumentuje průběh zpracování hydrogeologického modelu pro lokalitu Kraví hora. Práce jsou realizovány v rámci projektu: "Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště.

Zpracování hydrogeologického modelu lokality Kraví hora je z hlediska harmonogramu přibližně v polovině - byly dokončeny práce v regionálním rozsahu (regionální model). Hlavním cílem hydrogeologického (hydraulického) modelu lokality je hodnocení a analýza proudění podzemní vody v horninovém masivu.

Hydraulické modely jsou zpracovány pomocí softwarů MODFLOW, FEFLOW a Flow123d.

## 2 Modelové území

Rozsah aktivní plochy hydraulických modelů s výpočtem proudění podzemní vody je dokumentován na Obr. 1.



Obr. 1 Rozsah oblasti modelů, fialově zobrazena hranice aktivního modelového území modelů MODFLOW a FEFLOW, červeně čárkovaně hranice modelu Flow123d

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

Průběh terénu (povrch modelové domény) je převzat z Digitálního modelu reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G, ČÚZK). Maximální nadmořská výška v zájmové oblasti je 698 m n.m., minimální výška je 246 m n. m. Úroveň terénu v oblasti granulitového tělesa, uvažovaného pro situování HÚ, je přibližně v rozmezí 500 až 600 m n. m.

V rámci přijaté konceptualizace byla modelová doména rozdělena na:

- oblast připovrchového zvětrání,
- oblast přirozeně rozpukaného horninového masivu,
- oblast zvýšených propustností podél vymapovaných linií zlomů.

Mocnost modelové domény pro hydraulický model dosahuje shodně s prostorovým strukturně-geologickým (3D SG) modelem 1.5 km pod terén.

### 3 Hydraulické charakteristiky

Geometrie těles, zlomů a hodnoty hydraulické vodivosti  $K$  v oblasti přirozeně rozpukaného horninového masivu jsou zadány na základě horninových typů zdokumentovaných v 3D SG modelu lokality. Hodnoty hydraulické vodivosti v dané hloubce ( $z$ ) pod terénem  $K(z)$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] jsou vypočteny dle vzorce (1) převzatého z Gustafson et Liedholm (1989).

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

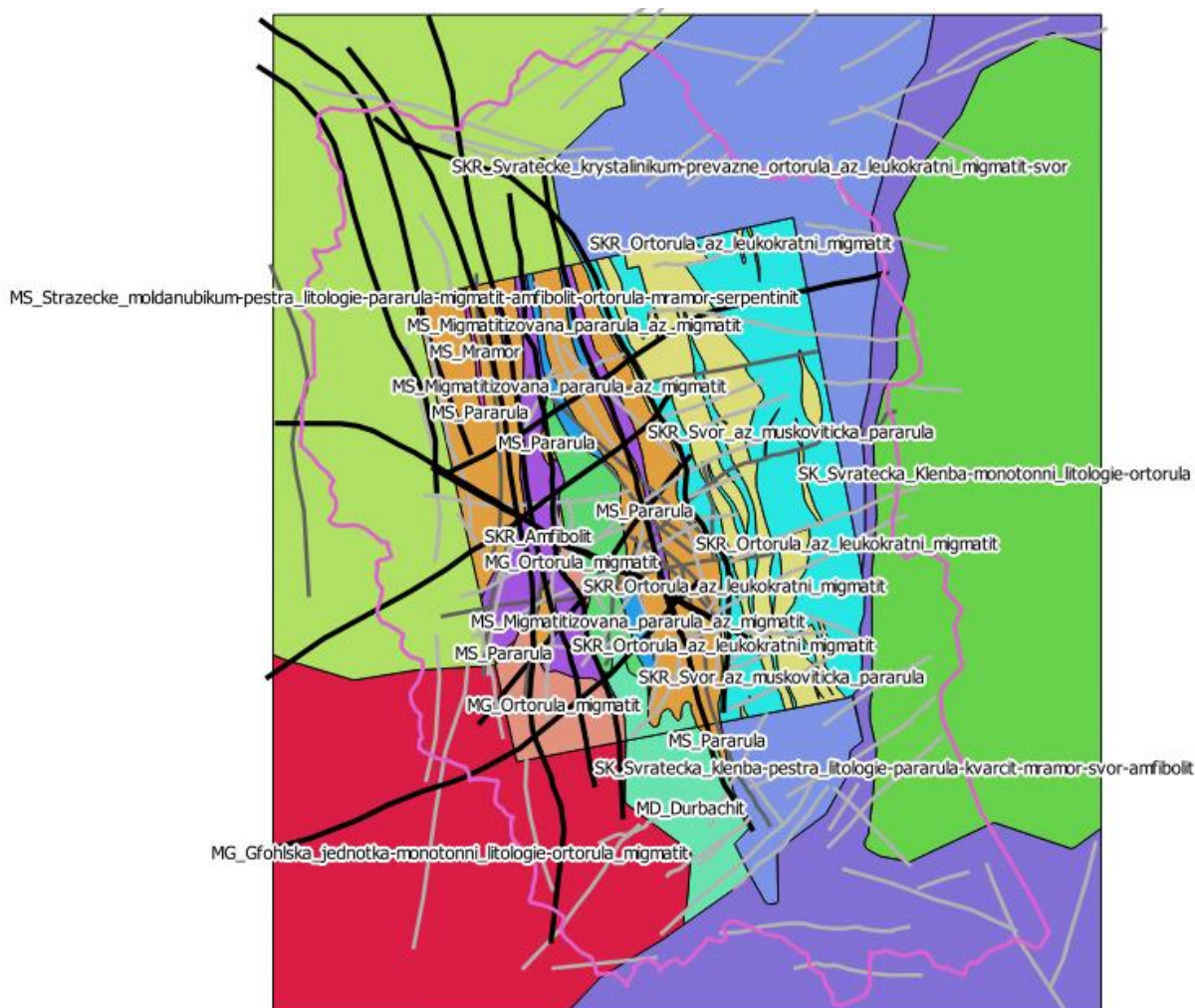
Výpočet vychází z hodnot koeficientů  $K_0$  (základní hydraulická vodivost horninového masivu) a  $c$  (koeficient poklesu  $K$  o jeden řád), které byly převzaty od ČGS. Pro každé těleso byla stanovena střední hodnota úrovně terénu. V případě zlomových pásem je úroveň pod terénem ( $z$ ) vypočtena jako rozdíl mediánu úrovně terénu v celé aktivní modelové ploše a nadmořské výšky dané modelové vrstvy. Výchozí hodnoty parametrů  $K_0$  a  $c$  pro výpočet  $K(z)$  jsou uvedeny v Tab. 1.



 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

Tab. 1 Tabulka horninových typů dle podkladů ČGS, užití parametry  $K_0$  a  $c$  pro výpočet  $K(z)$

Litologická položka 3D SG modelu	$K_0$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$c$ [m]
MD_Durbachit	4,00E-08	400
MG_Felzicky_granulit	6,00E-08	400
MG_Gfohlska_jednotka-monotonni_litologie-ortorula_migmatit	1,00E-08	400
MG_Ortorula_migmatit	1,00E-08	400
MG_Peridotit_Serpentinit	8,00E-09	400
MS_Amfibolit	8,00E-09	400
MS_Apliticky_granit	2,00E-08	400
MS_Migmatitizovana_pararula_az_migmatit	7,00E-09	400
MS_Mramor	2,00E-07	400
MS_Ortorula	1,00E-08	400
MS_Pararula	7,00E-09	400
MS_Peridotit_Serpentinit	8,00E-09	400
MS_Strazecke_moldanubikum-pestra_litologie-pararula-migmatit-amfibolit-ortorula-mramor-serpentinit	7,50E-09	400
SK_Svratecka_Klenba-monotonni_litologie-ortorula	1,00E-08	400
SK_Svratecka_klenba-pestra_litologie-pararula-kvarcit-mramor-svor-amfibolit	7,50E-09	400
SKR_Amfibolit	8,00E-09	400
SKR_Kvarcit	9,00E-08	400
SKR_Mramor	2,00E-07	400
SKR_Ortorula_az_leukokratni_migmatit	1,00E-08	400
SKR_Peridotit_Serpentinit	8,00E-09	400
SKR_Svor_az_muskoviticka_pararula	7,00E-09	400
SKR_Svratecke_krystalinikum-prevazne_ortorula_az_leukokratni_migmatit-svor	1,00E-08	400
zlomové pásmo I. kategorie	1,00E-06	400
zlomové pásmo II. kategorie	1,00E-06	400
zlomové pásmo III. kategorie	1,00E-06	400



Obr. 2 Výstup z 3D SG modelu - vodorovný řez, rozložení horninových typů v úrovni 0 m n. m. Zlomy I. kategorie jsou vykresleny tlustou černou linií, zlomy II. kategorie jsou tmavě šedé a zlomy III. kategorie jsou světle šedé.

## 4 Okrajové podmínky

### 4.1 Toky

Průběh říční sítě vychází z Digitální databáze vodohospodářských dat (DIBAVOD, VÚV TGM, v.v.i.). Říční síť byla zjednodušena - drobné přítoky s délkou 100 až 200 m nejsou simulovány. Nadmořská výška toků byla zadána na základě modelu terénu DMR 4G a na základě údajů vodohospodářských map (1:50 000). Toky jsou ve všech programech (MODFLOW, Flow123d i FEFLOW) zadány pouze jako drenážní (vcez povrchové vody do horninového prostředí není simulován).

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

## 4.2 Srážková infiltrace

Na celém modelovém území byla ve stávající etapě zadána infiltrace do podzemní vody  $2,5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ . Hodnota byla stanovena na základě mapy odtoku podzemní vody (Krásný et al., 1982).

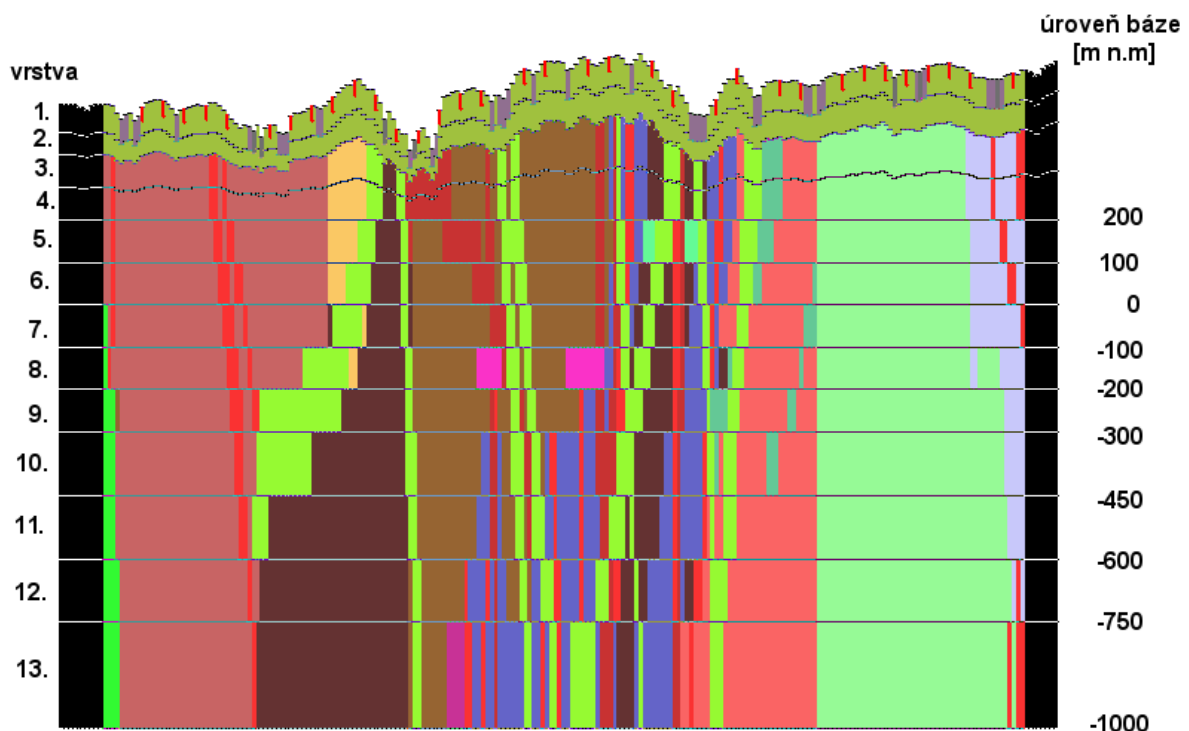
## 5 Realizace modelu v programu MODFLOW

Proudění podzemní vody v softwaru MODFLOW bylo zpracováno s využitím programu Groundwater Vistas verze 6. Výsledky simulací reprezentují ustálený (stacionární) stav proudění podzemní vody na lokalitě. Simulovány jsou poměry proudění podzemní vody bez antropogenních vlivů.

### 5.1 Geometrie modelu

Oblast výpočetní sítě hydraulického modelu je obdélníkového tvaru s počátkem na souřadnicích  $X_{Kr} = -628\,500$ ,  $Y_{Kr} = -1\,143\,500$  (v systému S-JTSK). Rozsah oblasti pokryté výpočetní sítí je  $19,5 \times 23,5$  km.

Plocha modelového území je v horizontálním směru diskretizována pravidelnou čtvercovou sítí se základnou elementu 100 m. Model sestává z 235 řádek a 195 sloupců. Aktivní modelová oblast je na Obr. 1 ohraničena fialově. Z celkových 595 725 výpočetních buněk je 329 381 aktivních (zadán výpočet proudění podzemní vody).



Obr. 3 Vertikální řez modelovou doménou s úrovní bází jednotlivých modelových vrstev v programu MODFLOW. Barevně jsou odlišeny jednotlivé horninové typy a zlomová pásma.

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

Ve vertikálním směru je prostor modelu rozdělen do 13 modelových vrstev. První a druhá vrstva reprezentují oblast připovrchového rozvětrání. Maximální mocnost první vrstvy je 70 m a druhé vrstvy 90 m. Báze čtvrté vrstvy (úroveň 200 m n. m.) je vodorovná. Báze třetí vrstvy vznikla rozdělením prostoru mezi bází druhé a čtvrté vrstvy na poloviny. Báze 13. vrstvy je v úrovni -1000 m pod hladinou moře a odpovídá bází zpracovaného 3D SG modelu. Úroveň bází jednotlivých modelových vrstev je znázorněna na Obr. 3.

## 5.2 Hydraulické charakteristiky

Propustnost horninového masivu je v modelu MODFLOW zadána pomocí hydraulické vodivosti  $K$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Pokles hydraulické vodivosti s hloubkou pod terénem je vypočten podle vzorce (1). Pro každé horninové těleso byla stanovena střední hodnota úrovně terénu, z které byla pro každou vrstvu vypočtena hloubka pod terénem ( $z$ ) a následně hodnota hydraulické vodivosti  $K(z)$  ve stanovené hloubce. Střední hodnota úrovně terénu byla vypočtena jako medián nadmořských výšek terénu modelových elementů. V případě zlomových pásem byla výchozí úroveň terénu stanovena jako střední hodnota úrovně terénu v celé aktivní modelové ploše – 493,15 m n. m. Ve stávající etapě je horninové prostředí předpokládáno jako izotropní.

Vypočtené hodnoty transmisivity zlomových pásem pro jednotlivé kategorie zlomů (dělení podle SKB) jsou uvedeny v Tab. 2. Transmisivita zlomů byla zpětně přepočtena na ekvivalentní hydraulickou vodivost pro danou velikost výpočetního elementu (100 m). V připovrchové zóně nebyla zlomová pásma simulována.

Tab. 2 Stanovené hodnoty transmisivity jednotlivých zlomových pásem kategorizovaných dle SKB

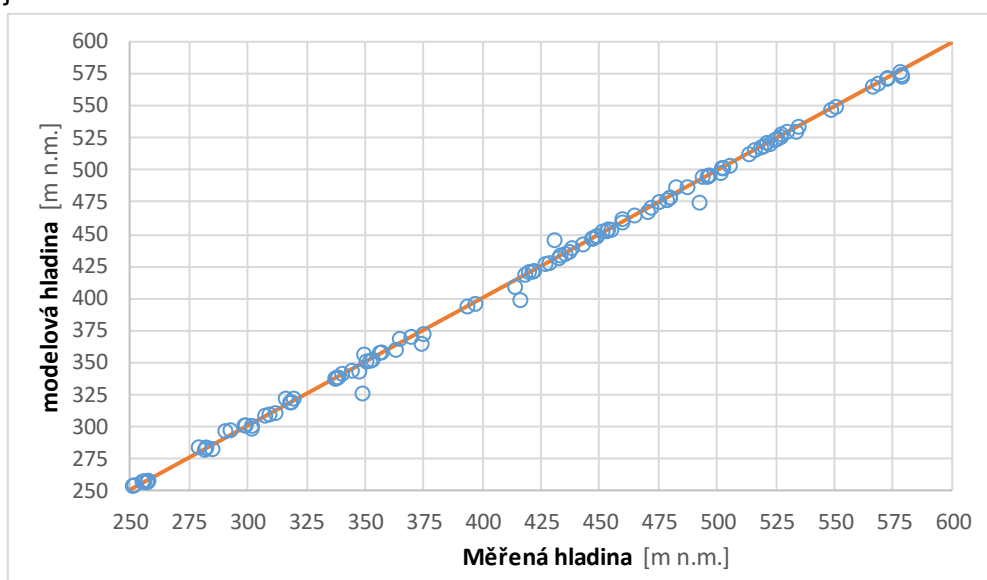
kategorie SKB		I.	II.	III.
šířka pásma		> 100 m	5 - 100 m	0,1 - 5 m
vrstva	hloubka [m]	transmisivita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]		
3	143,15	4,39E-05	4,39E-06	4,39E-07
4	243,15	2,47E-05	2,47E-06	2,47E-07
5	343,15	1,39E-05	1,39E-06	1,39E-07
6	443,15	7,80E-06	7,80E-07	7,80E-08
7	543,15	4,39E-06	4,39E-07	4,39E-08
8	643,15	2,47E-06	2,47E-07	2,47E-08
9	743,15	1,39E-06	1,39E-07	1,39E-08
10	868,15	6,75E-07	6,75E-08	6,75E-09
11	1018,15	2,85E-07	2,85E-08	2,85E-09
12	1168,15	1,20E-07	1,20E-08	1,20E-09
13	1368,15	3,80E-08	3,80E-09	3,80E-10

## 5.3 Kalibrace modelu

Kalibrační úrovně hladin podzemní vody byly získány z archivních údajů hydrogeologických vrtů databáze ČGS. Databáze pro lokalitu Kraví hora obsahuje 256 záznamů. Pro kalibraci v oblasti modelového území bylo vybráno 119 objektů (studny a vrty) s kompletními údaji o měření hladiny podzemní vody. Většina měřených údajů reprezentuje úroveň hladiny

v přípovrchové vrstvě a v modelu jsou zadány do první nebo druhé modelové vrstvy. Plošné rozložení objektů, ve kterých je provedeno porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody, je dokumentováno v Obr. 7. Většina měřených objektů leží v údolích v blízkosti vodních toků. Údaje o měřených hladinách podzemní vody v oblasti terénních elevací jsou minimální. S ohledem na menší počet měřených hladin byla za druhé hlavní kalibrační kritérium zvolena simulace hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě mělce (cca 10 m) pod úrovní terénu.

Porovnání modelových a měřených hladin podzemní vody je dokumentováno v grafu na Obr. 4. Jejich shodu lze u regionálního modelu i s ohledem na časovou nesouslednost měření považovat za dobrou. Celkem 108 kalibračních bodů má reziduál (rozdíl modelové a měřené hladiny podzemní vody) menší než 5 m, u čtyř kalibračních údajů modelový reziduál přesahuje 10 m.

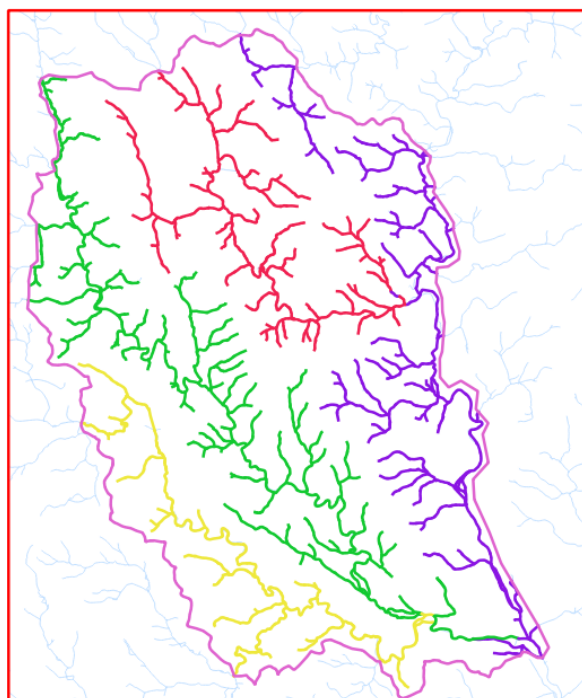


Obr. 4 Porovnání měřených a modelových hladin podzemní vody modelu MODFLOW

## 5.4 Výsledky hydraulického modelu

### 5.4.1 Bilance modelu

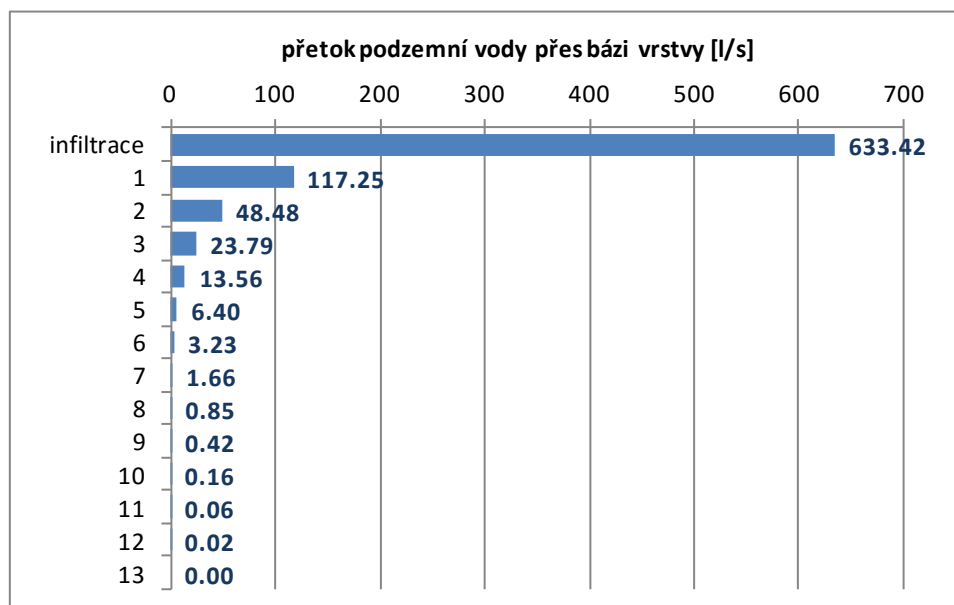
Ze srážek do podzemí vody (do svrchní modelové vrstvy) infiltruje  $633 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Stejně množství podzemní vody je drénováno do říční sítě. Na Obr. 5 jsou znázorněna jednotlivá hlavní povodí v modelové oblasti. Do toků v povodí Libochovky na jihozápadě území je v modelu drénováno  $107 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , v povodí Bobrůvky ve středu území je drénováno  $216 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , na severu území je drénováno  $155 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  v povodí Nedvědičky a  $156 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  v povodí Svatky a Bystřice.



povodí	drenáž [ $l \cdot s^{-1}$ ]
Libochovka	106,59
Bobrůvka	216,00
Nedvědička	154,72
Svatka	156,12
suma	633,42

Obr. 5 Hlavní povodí v oblasti a výsledné drénované množství podzemní vody do příslušných toků v modelu MODFLOW

Množství podzemní vody proudící v prostoru modelu v jednotlivých modelových vrstvách je uvedeno v grafu na Obr. 6. Pro každou vrstvu je uveden přetok přes její bázi do hlubší modelové vrstvy. Do modelové vrstvy odpovídající předpokládané úrovni hlubinného úložiště (6. vrstva) přetéká přes bázi páté modelové vrstvy  $6,40 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$  podzemní vody.

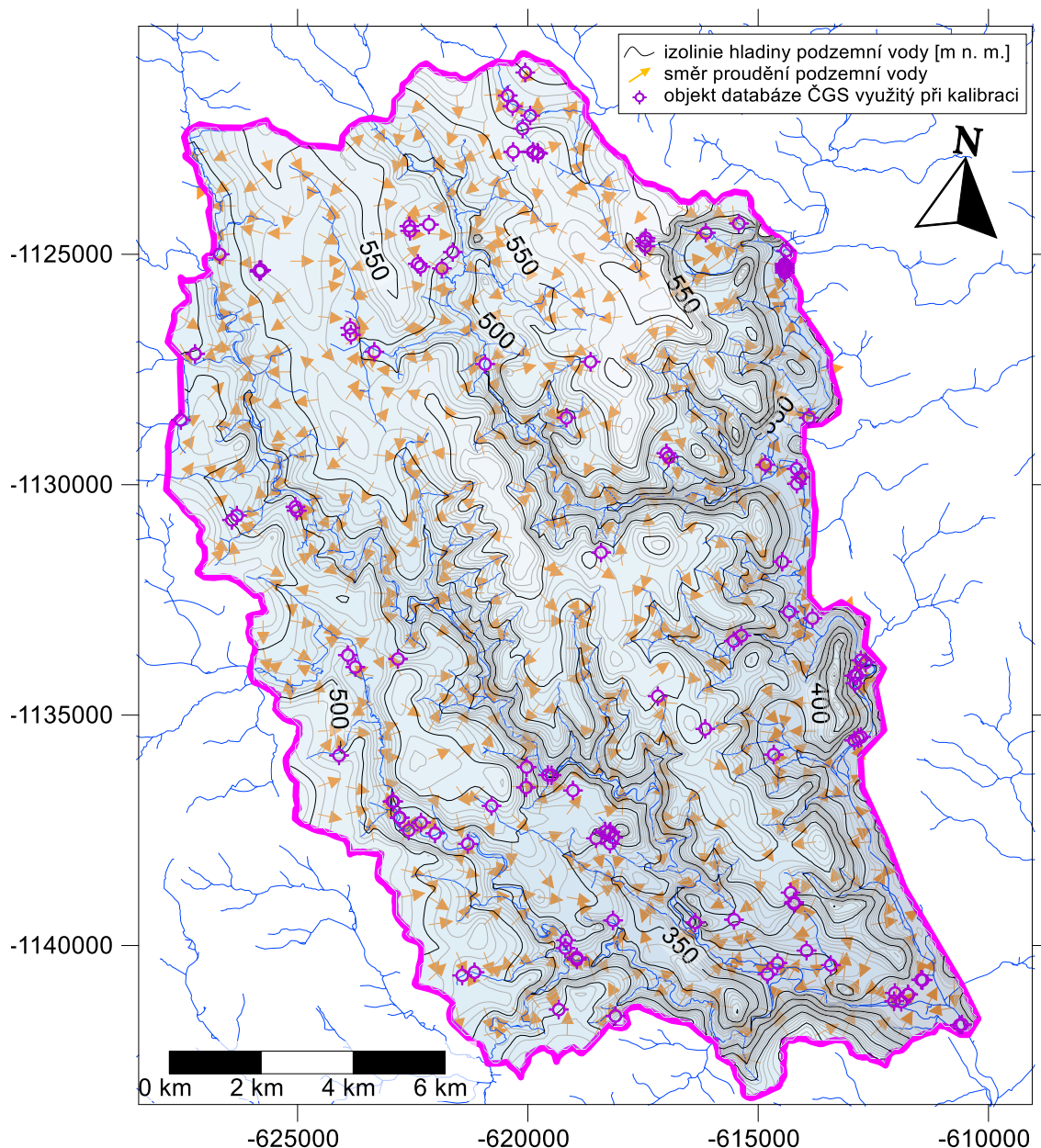


Obr. 6 Přetok podzemní vody přes báze jednotlivých modelových vrstev (model MODFLOW)



### 5.4.2 Hladiny a směry proudění podzemní vody

Tlakové poměry (úroveň hladiny podzemní vody) a směry proudění v první (připovrchová vrstva) a šesté modelové vrstvě (předpokládaná úroveň úložiště) jsou zobrazeny na Obr. 7 a Obr. 8 .

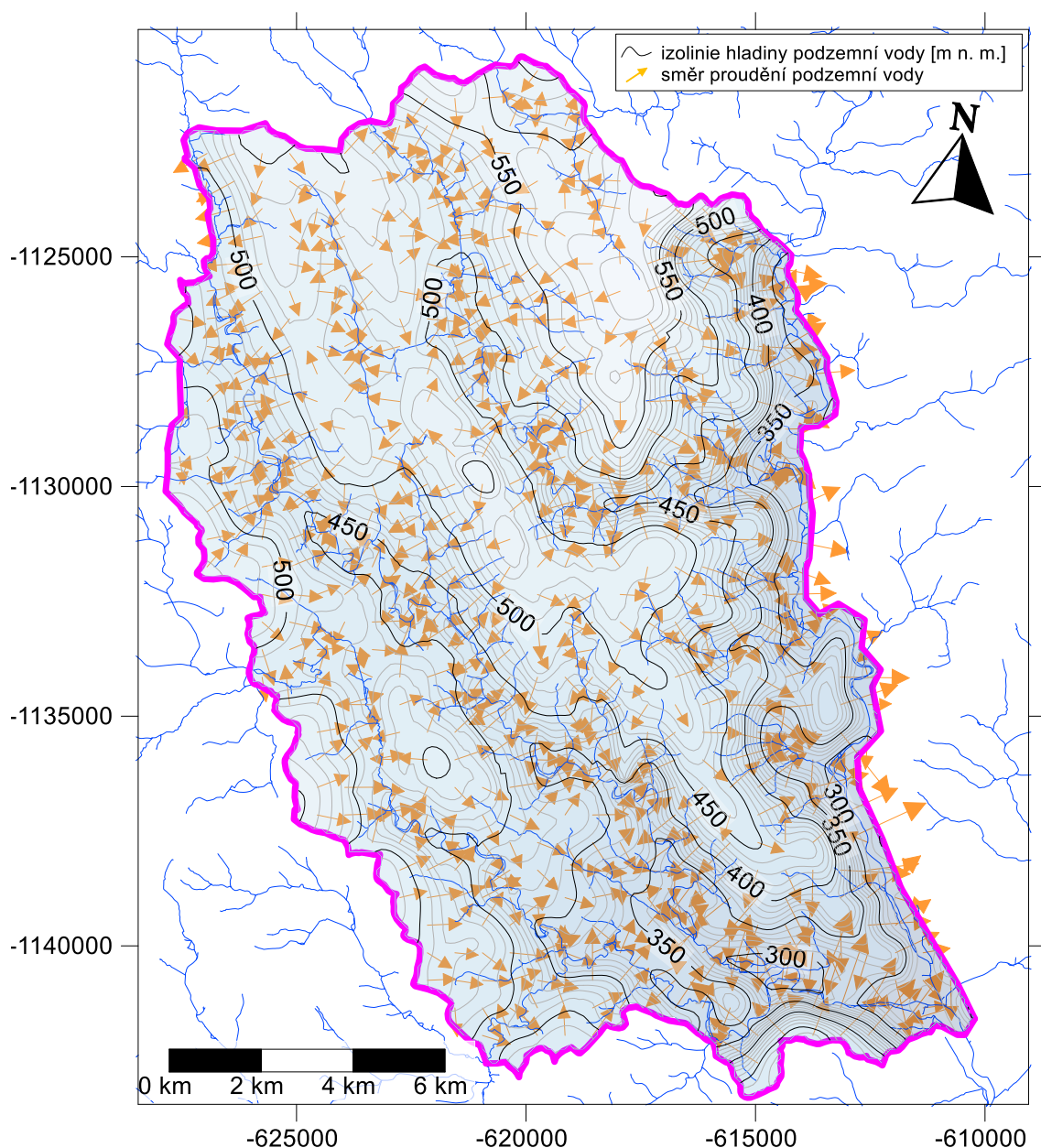


Obr. 7 Modelové hladiny a směry proudění podzemní vody v připovrchové vrstvě – model MODFLOW

Tlakové poměry v připovrchové zóně korespondují s nadmořskou výškou terénu. Nejvyšší úroveň dosahuje hladina podzemní vody v oblasti elevace Kraví hora (přes 580 m n. m.). Při východním okraji granulitového masivu je na Střítěžském hřbetu (s hlavními vrcholy Dejmalka, Kraví hora a elevacemi v oblasti Drahonína a vrchu Chochola) formováno hydrogeologické rozvodí mezi Bobrůvkou na západě a Nedvědičkou a Hadůvkou na východě. Při dané poloze rozvodí dochází k tomu, že podzemní vody jsou z granulitového tělesa odvodňovány směrem do Bobrůvky.

Hladiny mělké zvodně (v pásmu připovrchového rozvětrání) dosahují v centrální oblasti granulitového masivu (vymezeném Habřínskou dislokací a dislokacemi O23 a Litavskou) přibližně úroveň 460 - 580 m n. m. Výchozy granulitu vyklíňují v levostranném úbočí Bobrůvky - vysoko nad úrovní toku. Ten má v oblasti nejbližší k centrální části tělesa granulitů úroveň 380 - 397 m n. m. Při drenáži do Bobrůvky tedy dochází k přetoku podzemní vody z granulitů do horninového masivu budovaného ortorulami, migmatity nebo amfibolity.

V úrovni předpokládaného HÚ jsou tlakové poměry vyrovnanější a mizí vliv menších toků a terénních elevací.



Obr. 8 Modelové hladiny podzemní vody v úrovni HÚ (6. modelová vrstva) – model MODFLOW

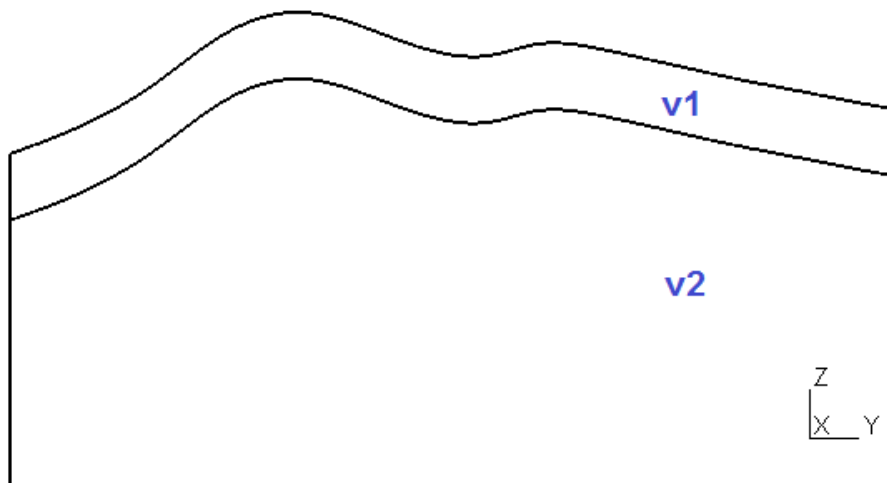


 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

## 6 Realizace modelu ve Flow123d

### 6.1 Geometrie modelu

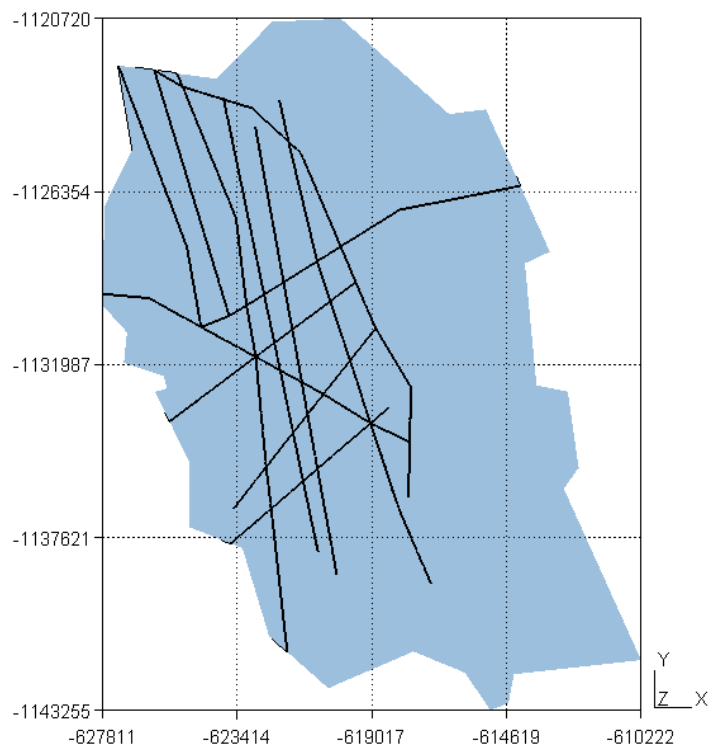
Pro výpočet ve Flow123d byla připravena 3D geometrie oblasti. Rozsah modelu v horizontální rovině je znázorněn v Obr. 1 V horizontální rovině je hranice oblasti vymezena polygonem, který přibližně kopíruje původně stanovenou hranici regionálního modelu. Přibližná plocha tohoto polygonu je 252 km<sup>2</sup>; v Z-V směru je maximální rozsah 17,6 km v S-J 22,5. Ve vertikálním směru je geometrie modelu rozdělena do dvou základních modelových vrstev (schematicky znázorněno na Obr. 9): první modelová vrstva v1 má horní okraj v úrovni terénu a bázi v hloubce 100 m pod terénem; druhá modelová vrstva v2 (a tedy i celý model) má bázi v úrovni -700 m n. m. Maximální vertikální rozsah modelu je 1336 m; terén je od 253 do 636 m n. m. (což představuje převýšení 383 m). Součástí základní geometrie modelu jsou i tektonické zlomy; v případě regionálního modelu lokality Kraví hora ve Flow123d byly zahrnuté pouze linie první kategorie, viz Obr. 10. Vertikální rozsah tektonických linií je od druhé modelové vrstvy (tj. od hloubky 100 m) na bázi modelu.



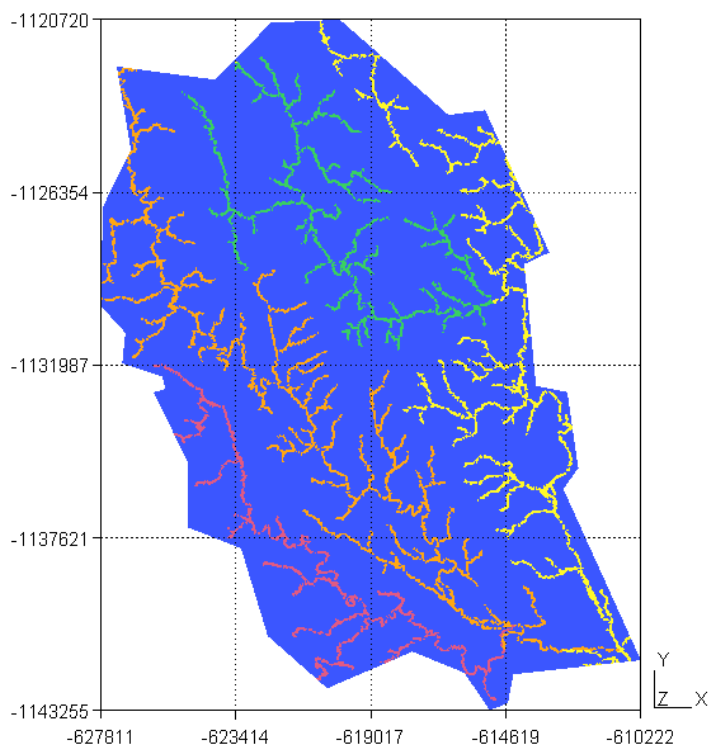
Obr. 9 Schematické znázornění základního vertikálního členění modelu Flow123d do dvou modelových subdomén (připovrchová vrstva - v1 a horninový masiv - v2)

Na základě takto vytvořené geometrie byla generovaná nestrukturovaná síť simplexových elementů s charakteristickou délkou hran při povrchu cca 100 m a v úrovni báze modelu cca 500 m. Generovaná síť obsahuje celkem 492 973 elementů; z toho je 60 912 hraničních elementů při povrchu (jedná se o 2D elementy, které slouží pouze pro zadání okrajových podmínek a nepoužívají se dále při simulaci), 10 716 2D elementů v plochách tektonických zlomů a zbývajících 421 315 jsou 3D elementy reprezentující ekvivalentní kontinuum příslušných litologických typů.

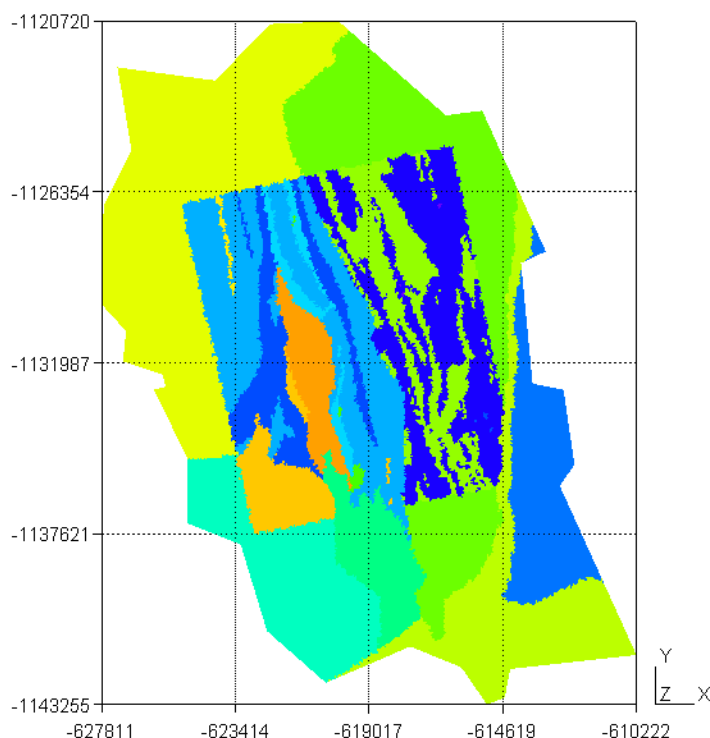
Generovaná síť byla následně podrobena další úpravě: Z množiny hraničních elementů byly identifikované elementy v liniích vodních toků v členění dle jednotlivých povodí (Obr. 11). Na množině 3D elementů bylo provedeno členění dle litologických typů (Obr. 12). Konečně na množinách 2D elementů tektonických zlomů a 3D elementů jednotlivých litologických typů druhé modelové vrstvy bylo provedené následné členění do hloubkových vrstev po 100 m. Takto připravená síť byla následně použita pro výpočty.



Obr. 10 Tektonické zlomy uplatněné v modelu ve Flow123d



Obr. 11 Zobrazení povrchu sítě a promítnutí linií vodních toků do hraničních elementů na povrchu sítě modelu Flow123d



*Obr. 12 Schematické znázornění členění masivu do litologických typů v modelu Flow123d – situace ve třetí modelové vrstvě (členitost rozhraní mezi jednotlivými litologickými typy je způsobena jednak nestrukturovanou sítí a jednak identifikací příslušnosti elementů k jednotlivým litologickým typům až po vygenerování sítě).*

## 6.2 Parametry modelu

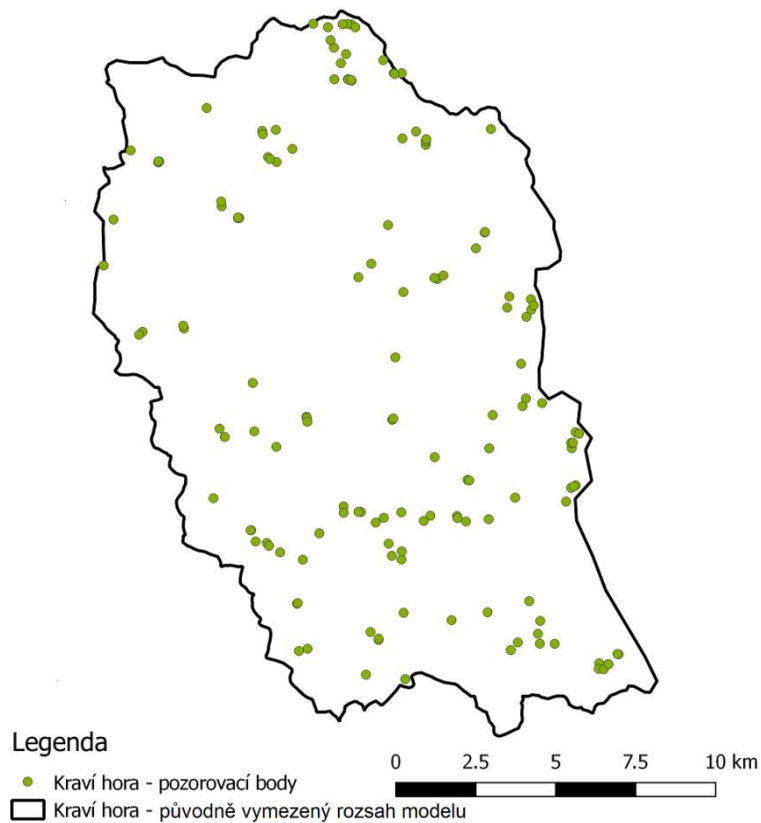
Pro všechny entity modelu odpovídající litologickým typům a tektonickým zlomům byla vypočtena hodnota hydraulické vodivosti  $K(z)$  dle vzorce (1). Při výpočtu byly použité hodnoty parametrů  $K_0$  a  $c$  dle Tab. 1 a střední hodnota hloubky vypočtená pro každou samostatnou dílčí hloubkovou zónu na základě sítě. V případě 2D elementů tektonických poruch je pro výpočet ve Flow123d (stejně jako v případě 3D kontinua) zadávána hydraulická vodivost a rozevření (tj. mocnost příslušné 2D plochy). Takto stanovené hydraulické parametry v plochách tektonických zlomů a v jednotlivých hloubkových zónách všech litologických typů ve druhé modelové vrstvě nebyly dále měněné. Naopak vypočtené hydraulické vodivosti jednotlivých litologických typů v první modelové vrstvě byly použité jako výchozí pro první výpočet a byly dále upravené v procesu kalibrace.

## 6.3 Kalibrace modelu

V rámci kalibrace regionálního modelu lokality Kraví hora byly kalibrovány hydraulické vodivosti v první a druhé modelové vrstvě. Jako výchozí členění těchto vrstev bylo použité členění do vertikálních zón na základě litologických typů. Iniciační hodnoty hydraulických vrstev byly stanovené dle postupu popsaného výše. Postupně bylo prováděné další členění těchto zón dle výsledků předchozího kroku kalibrace. Hydraulické vodivosti v druhé modelové vrstvě byly v procesu kalibrace svázané s hydraulickými vodivostmi v první

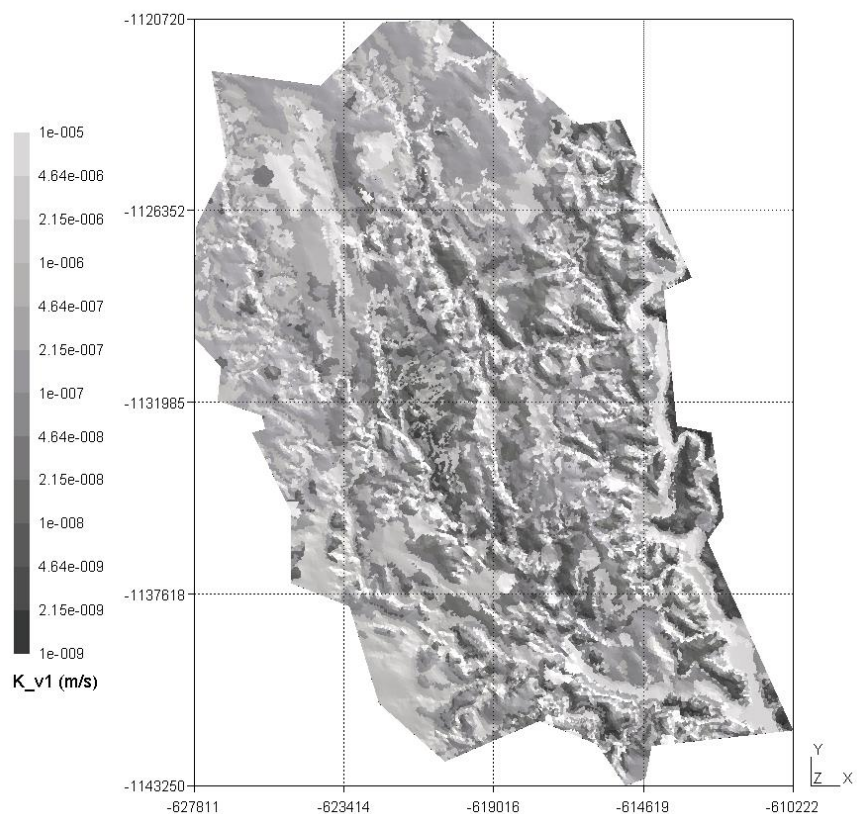
 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

modelové vrstvě (v druhé vrstvě o jeden řád nižší hodnoty než v první). Při kalibraci byla použita sada pozorovacích bodů sestávající z bodů stanovených na základě dostupných reálných měření, takto bylo k dispozici 107 kalibračních bodů, pozice bodů viz Obr. 13. Sada těchto kalibračních bodů byla doplněná o obecné kalibrační kritérium dosažení úrovně hladiny podzemní vody mělce pod povrchem (cca 10 m pod povrchem).

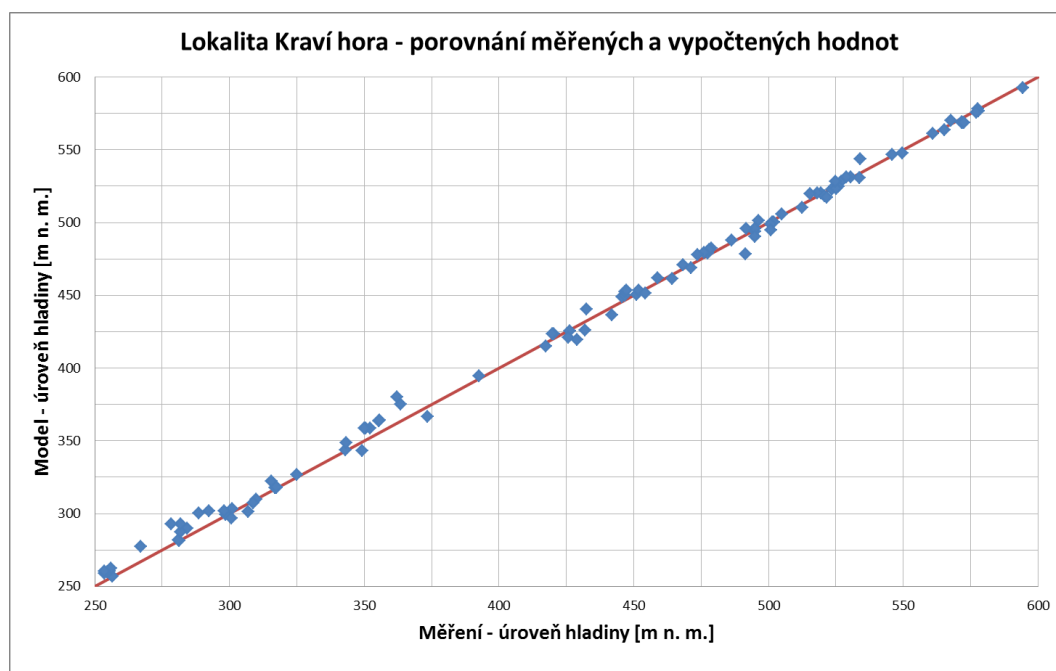


Obr. 13 Zobrazení pozorovacích bodů stanovených na základě reálných měření ve vymezené oblasti (model Flow123d)

Výsledkem kalibrace je členění první modelové vrstvy celkem do 206 vertikálních zón s hydraulickými vodivostmi v řádu od  $1E-9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $1E-5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Na Obr. 14 je vizualizace výsledných hydraulických vodivostí v první modelové vrstvě. Graf na Obr. 15 poskytuje porovnání měřených a vypočtených hydraulických výšek v pozorovacích bodech stanovených na základě dostupných reálných dat; ze 107 pozorovacích bodů v 7 bodech zůstává odchylka větší než 10 m, v 27 bodech je odchylka mezi 5 a 10 m.



Obr. 14 Vizualizace výsledných hydraulických vodivostí v první modelové vrstvě modelu Flow123d



Obr. 15 Graf porovnání měřených a vypočtených hydraulických výšek v pozorovacích bodech stanovených na základě dostupných reálných dat (model Flow123d)

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

## 6.4 Výsledky modelu

### 6.4.1 Bilance modelu

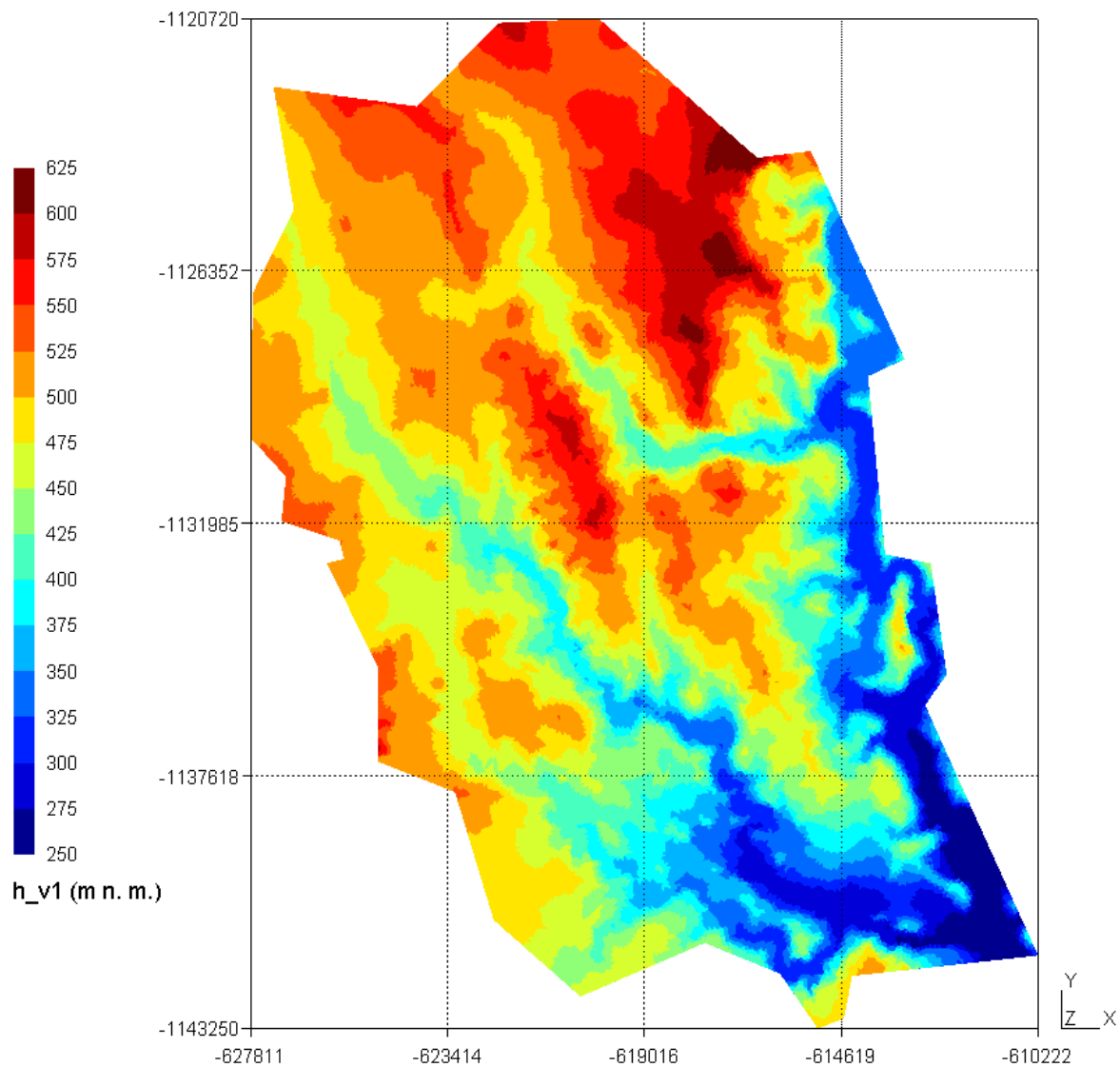
Do podzemní vody infiltruje ze srážek celkem  $640 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  vody. Z celkového množství infiltrované vody je  $101 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  drénováno do povodí Libochovky,  $227 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  do povodí Bobruvka,  $155 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  do povodí Nedvědičky a  $158 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  do povodí Svratky. Přehledný stav bilance je uvedený v Tab. 3. Výměna podzemní vody mezi první a druhou modelovou vrstvou je cca  $100 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , což činí přibližně 17 % z celkového infiltrovaného množství vody.

Tab. 3 Souhrnná data o množství drenáže podzemní vody do jednotlivých povodí v modelu Flow123d

ID povodí	Název povodí	Drenáž [ $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Podíl z infiltrace [%]
1	Libochovka	101,0	15,77
2	Bobruvka	226,7	35,40
3	Nedvědička	154,8	154,8
4	Svratka	157,8	157,8
Celkem infiltrace/drenáž		<b>640,3</b>	

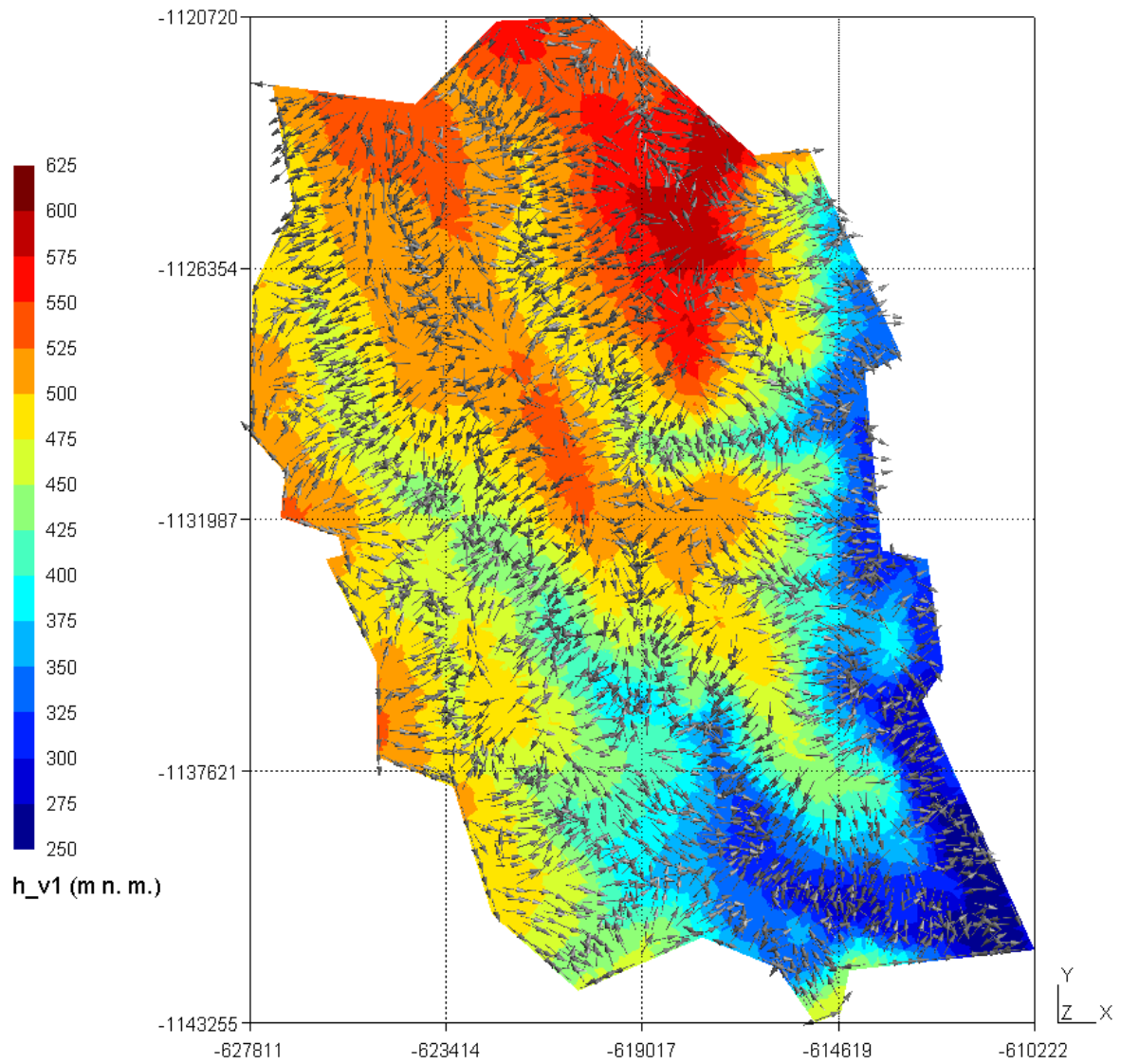
### 6.4.2 Hladiny a směry proudění podzemní vody

Základním výsledkem realizovaného modelu je zpracovaná regionální situace proudění podzemní vody v lokalitě. Mezi hlavními kalibračními kritérii bylo dosažení hladiny v oblasti mělce pod úrovní terénu (cca 10 m). Při kalibraci modelu potom mimo to byla použita data z dostupných reálných měření. Ve výsledné verzi modelu nabývají hydraulické výšky v připovrchové vrstvě hodnot od 253 do 630 m. Úroveň hladiny podzemní vody v připovrchové zóně je na většině území pod úrovní terénu. Přibližně na 7 % plochy výpočetní domény se vyskytuje hladina nad úrovní terénu. Významněji nad terénem (přes 10 m) je hladina podzemní vody pouze na 2 % plochy modelu. Zaklesnutí hladiny 20 m a více pod terén se vyskytuje na 18 % území. Na Obr. 16 a Obr. 17 jsou znázorněny tlakové poměry a směry proudění v první modelové vrstvě (připovrchová vrstva) a v úrovni 0 m n. m. (čtvrtá modelová vrstva).



Obr. 16 Hydraulické výšky [m n. m.] v první modelové vrstvě modelu Flow123d





Obr. 17 Výsledné hydraulické výšky [m n. m.] a směry proudění v úrovni 0 m n. m. modelu Flow123d



 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ, PASPORT REGIONÁLNÍHO MODELU – LOKALITA KRAVÍ HORA</b>	Evidenční označení:
		<b>SÚRAO TZ 66/2016</b>

## 7 Realizace modelu ve FEFLOW

Model byl zpracován v programu FEFLOW verze 6.0. Jedná se o stacionární model nasyceného porézního prostředí. Při numerickém výpočtu byla simulovaná volná hladina podzemní vody.

### 7.1 Geometrie modelu

Oblast modelu se nachází v rozmezí  $X_{Kr} = -627926$  až  $X_{Kr} = -610288$  a  $Y_{Kr} = -1143311$  až  $Y_{Kr} = -1120633$  souřadnicového systému S-JTSK. Její hranice je nepravidelná (viz Obr. 18). Povrch oblasti osciluje mezi 252 a 633 m n. m. a rozprostírá se přibližně na 254 km<sup>2</sup>.

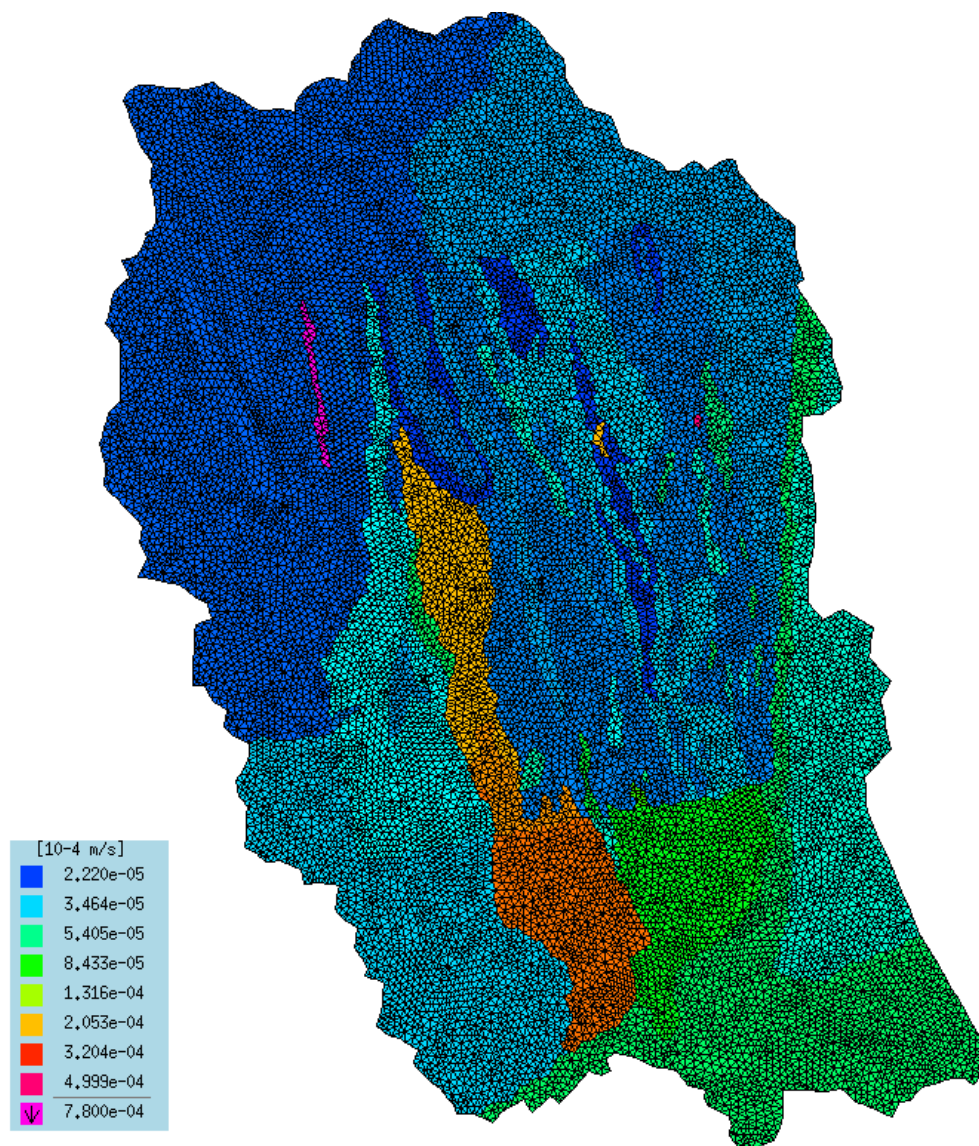
Oblast modelu byla rozdělena na 17 modelových vrstev. Báze modelu byla zvolena v úrovni -1000 m n. m. Mezi úrovněmi +200 a -1000 m n. m. mají všechny vrstvy vodorovné báze a shodnou mocnost 100 m. Připovrchová zóna s nepravidelnou bází a se střední hodnotou mocnosti 125 m byla rozdělena na dvě modelové vrstvy. Přibližně do čtvrtiny a poloviny vzdálenosti mezi bází připovrchové zóny a nadmořskou úrovní +200 m byly vloženy dvě vrstvy. Terén byl v prostředí Feflow interpolován z rastru s krokem 100 m.

Trojúhelníková síť s hranou elementů cca 100 m byla vygenerována s ohledem na umístění povrchových vodních toků a dále tektonických linií. Průběh některých zlomů byl upraven od pozice zlomů dokumentovaných Českou geologickou službou, aby byla respektována pravidelnost sítě. Z důvodu velkého množství linií zlomů nebyl při tvorbě sítě kladen důraz na přesné hranice horninových těles.

### 7.2 Parametry modelu

Hlavním parametrem je hydraulická vodivost  $K(z)$ . Při výpočtu hydraulické vodivosti je uvažován pokles hodnot s hloubkou daných horninových těles pod terénem. Maximální hodnota hydraulické vodivosti v horninovém masivu byla stanovena 7,8E-08 m·s<sup>-1</sup>, minimální hodnota 2,1E-12 m·s<sup>-1</sup>. Na Obr. 18 je znázorněna hydraulická vodivost horninových těles ve čtvrté modelové vrstvě. Hodnoty v legendě jsou uvedeny v jednotkách 10<sup>-4</sup> m·s<sup>-1</sup>.

V připovrchové zóně (první dvě modelové vrstvy) byla předepsána maximální hodnota hydraulické vodivosti 9,0E-05 m·s<sup>-1</sup> a minimální hodnota 2,0E-09 m·s<sup>-1</sup>.



Obr. 18 Hydraulická vodivost horninových těles ve čtvrté modelové vrstvě modelu FEFLOW. Hodnoty hydraulické vodivosti v legendě jsou uvedeny v jednotkách  $10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

### 7.3 Tektonické linie

Do modelu byly zavedeny zlomy kategorie 1 (uvažované šířky 100 m), kategorie 2 (uvažované šířky 10 m) a kategorie 3 (uvažované šířky 1 m). Situace tektonických linií je naznačena na Obr. 19 a tučně jsou znázorněny zlomy kategorie 1.

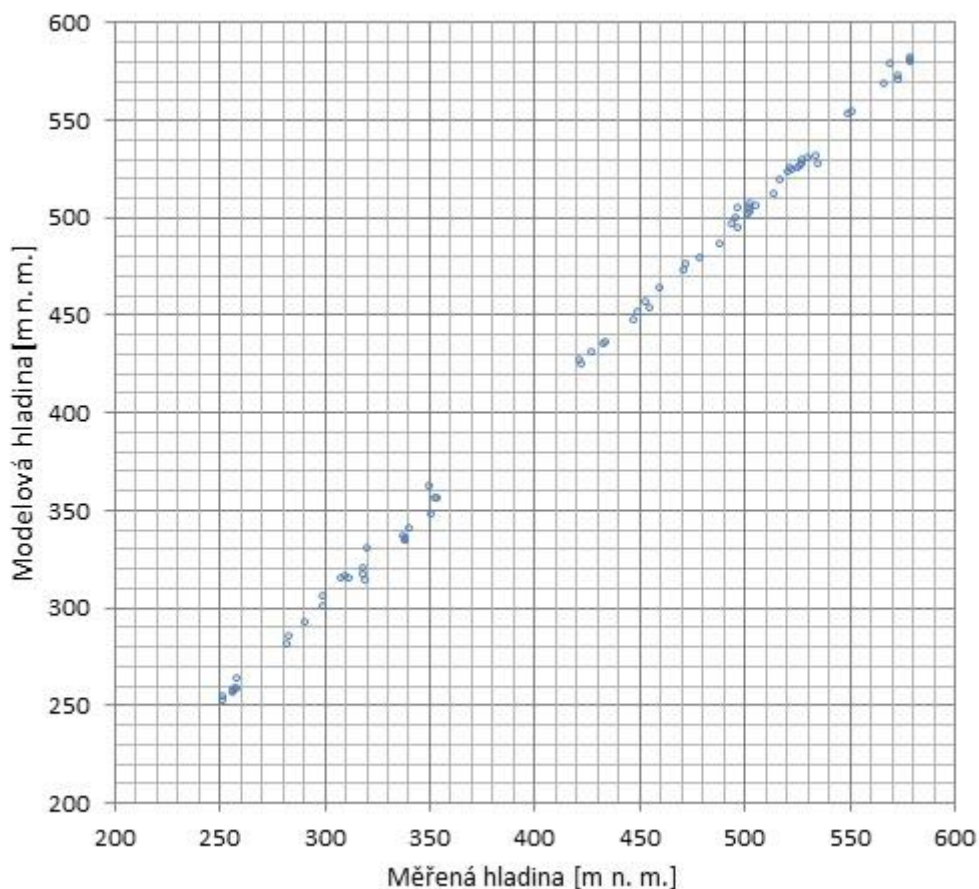
Zlomy jsou považovány za vodivé, výpočet hydraulické vodivosti je shodný s přístupem odvození hydraulické vodivosti v horninové matici. Šikmé zlomy jsou modelovány jako po částech vertikální úseky spojené s horizontálními úseky. Zlomy s malým úklonem od vertikální osy, (rozestup jejich pozic na zemském povrchu a bázi modelové oblasti je menší než 100 m), jsou do modelu zavedeny jako zlomy vertikální. Zlomy se nevyskytují ve vrstvách připovrchové zóny.



*Obr. 19 Průběh tektonických linií v modelu FEFLOW*

## 7.4 Kalibrace modelu

Pro srovnání modelové hladiny podzemní vody v přívodové zóně byly k dispozici archivní údaje databáze ČGS. Pro účely kalibrace bylo vybráno 72 vrtů (viz Obr. 22). Vyřazeny byly některé objekty, které se nachází v těsné blízkosti a podávají podobné informace. Dále nebyly zahrnuty objekty, jejichž údaj o nadmořské výšce terénu se v daném bodě liší od úrovně povrchu, který byl interpolován v prostředí FEFLOW, o více než 5 m. Na Obr. 20 jsou srovnány měřené hladiny podzemní vody s hodnotami z pozorovacích bodů v modelu. Na horizontální ose jsou uvedeny archivní měřené hodnoty (v metrech) hladiny podzemní vody ve vrtech a na horizontální ose jsou hladiny podzemní vody v pozorovacích bodech modelu. Ve 20 případech je rozdíl mezi měřenými a modelovými hladinami větší než 5 m, v dalších 15 případech přesahuje 10 m.



Obr. 20 Porovnání archivních údajů s modelovými hladinami modelu FEFLOW

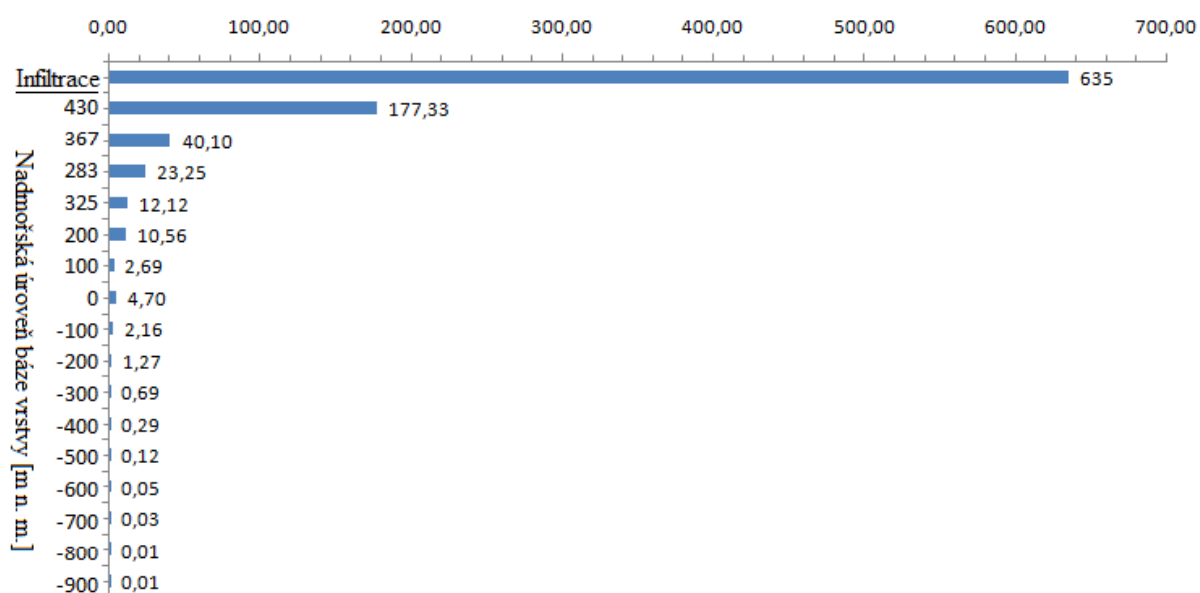
## 7.5 Výsledky hydraulického modelu

### 7.5.1 Bilance modelu

Srážkové infiltraci odpovídá  $635 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tato hodnota vychází z předepsané infiltrace  $2,5 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ . Povrchovými toky je celkově odváděno  $635 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na Obr. 21 je znázorněn výsledný vertikální přetok přes báze modelových vrstev směrem do podloží. Na vertikální ose je uvedena nadmořská výška (střední hodnota) dané báze, na horizontální ose je vyznačen přetok podzemní vody v  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Hodnoty vertikálního přetoku do podloží byly odečteny pomocí nástroje Fluid Flux Analyzer, který vychází z projekce vektorů Darcyovské rychlosti.

### Celkový vertikální přetok do podloží [l/s]



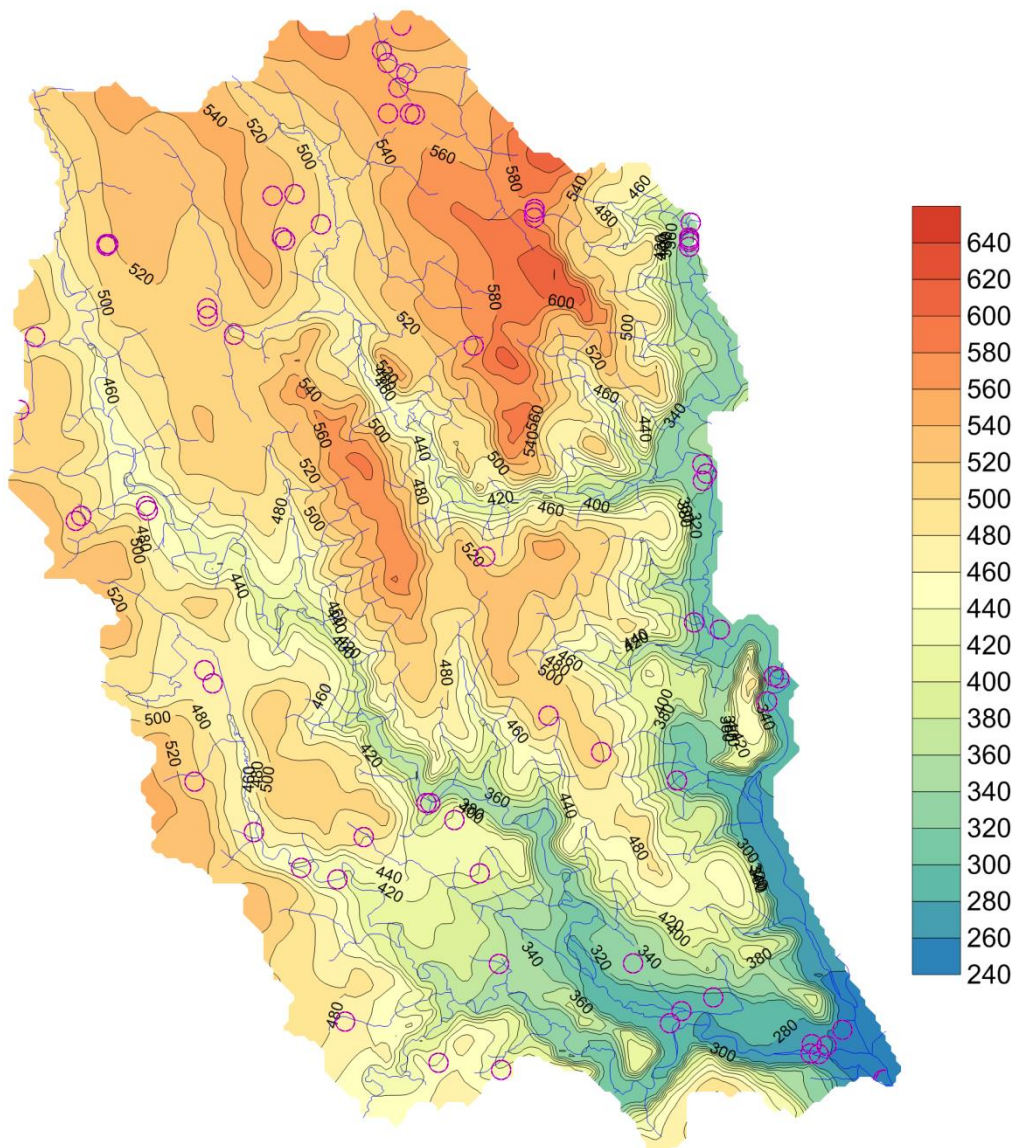
Obr. 21 Přetok podzemní vody přes báze modelových vrstev modelu FEFLOW

## 7.5.2 Hladiny podzemní vody

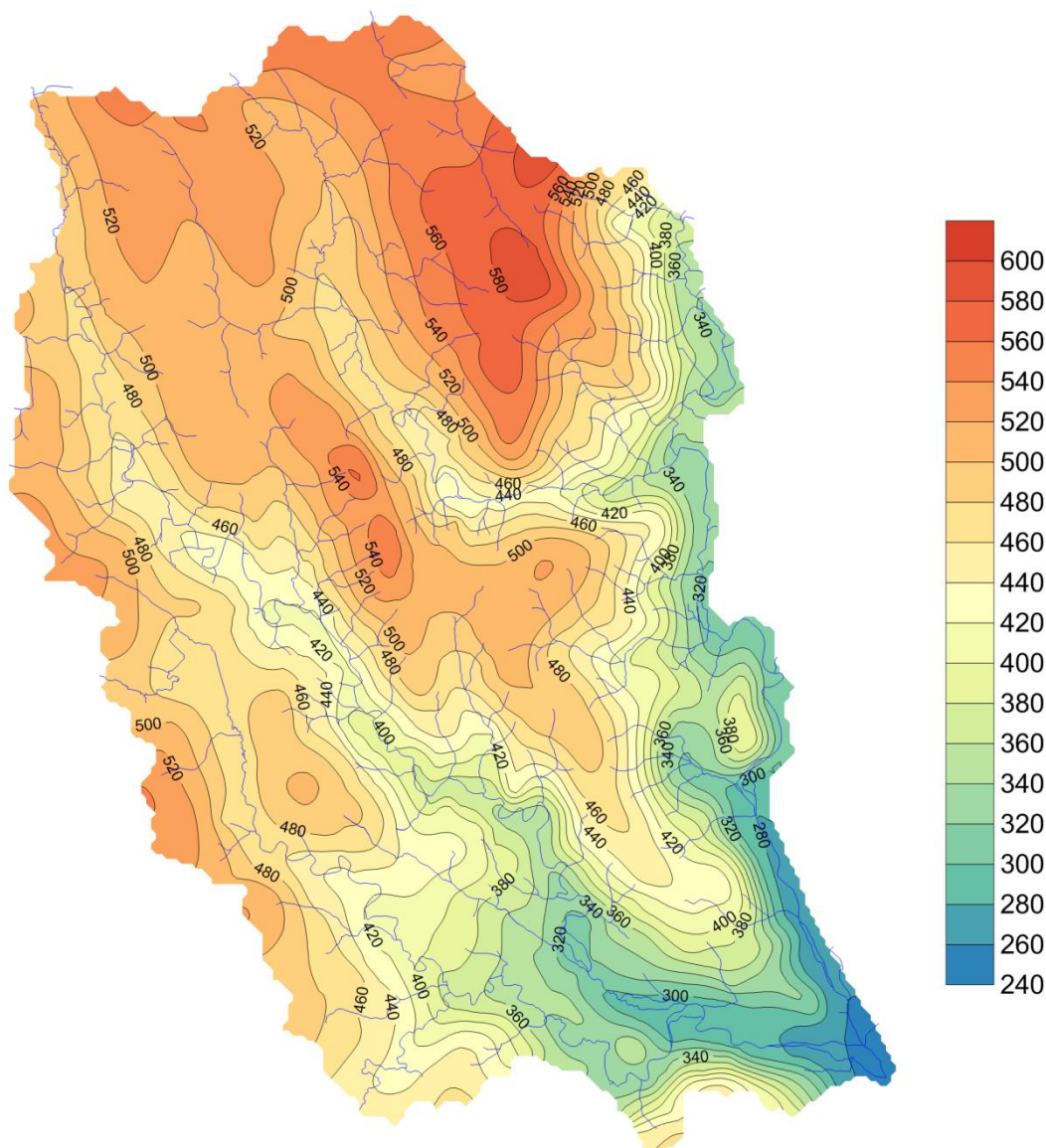
Maximální úroveň hladiny v přípovrchové vrstvě se nachází v 620 m n. m., minimální hodnota v 254 m n. m. V úrovni 0 m n. m. je maximální hodnota 590 m n. m. a minimální 256 m n. m.

Výsledné proudění v přípovrchové zóně a v úrovni 0 m n. m. je znázorněno izoliniemi hladiny podzemní vody na Obr. 22 a Obr. 23.





Obr. 22 Izolinie hladiny podzemní vody v přípovrchové vrstvě modelu FEFLOW. Růžovými kroužky jsou znázorněny pozorovací body v první modelové vrstvě.




Obr. 23 Izolinie hladiny podzemní vody v úrovni 0 m n. m. modelu FEFLOW

## 8 Závěr

Hydrogeologický model pro lokalitu Kraví hora je zpracován pomocí softwarů MODFLOW, Flow123d a FEFLOW. V modelu jsou využity informace z nově zpracovaného 3D SG modelu a dostupné archivní informace. Pasport dokumentuje výsledky zpracování modelů v regionálním měřítku. V lokalitě hlubinného úložiště budou výsledky zpřesňovány v navazující etapě zpracování modelů proudění v detailním měřítku.

Regionální modelové území má rozsah přibližně 253 km<sup>2</sup>. V dané ploše ze srážek do podzemní vody infiltruje přibližně 630 l·s<sup>-1</sup> vody. Celé infiltrované množství je drénováno do říční sítě, nejvíce vody se drénuje v povodí Bobruvky. Tlakové pole proudění podzemí vody má v modelovém území rozsah od 250 m n. m. do 630 m n. m.

 <b>SÚRAO</b>	<b>HYDROGEOLOGICKÉ MODELY HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ – LOKALITA KRAVÍ HORA, PASPORT ZA 1. ETAPU PRACÍ</b>	Evidenční označení:
		<i>(doplň SÚRAO)</i>

## 9 Literatura

- 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.
- KRÁSNÝ, J. et al. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. Český hydrometeorologický ústav. Praha.



# NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



**SÚRAO**

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

Tel.: 221 421 511, E-mail: [info@surao.cz](mailto:info@surao.cz)

[www.surao.cz](http://www.surao.cz)