

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, PŘÍRODOVĚDECKÁ  
FAKULTA**

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



**Matematický model proudění podzemní vody v oblasti  
s cirkulačním vrtem**

**Mathematical model of groundwater flow during operation of  
a circulation well**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tereza Žáková

Vedoucí: Doc. RNDr. Jiří Mls, CSc.

Praha 2014

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 11. srpna 2014

Podpis: .....

## **Poděkování**

V první řadě bych ráda poděkovala panu Docentu Jiřímu Mlsovi, za obětavé konzultace, odborné rady a trpělivost, kterou mi projevil především v poslední fázi práce. Dále děkuji kolektivu doktorandů oddělení Hydrogeologie a doktoru Tomáši Ondovčínovi, za jejich ochotu a cenné rady.

Děkuji firmě Dekonta a.s. za to, že mi poskytla spoustu informací a umožnila podílet se na sběru dat.

Děkuji své rodině, Jirkovi a přátelům za podporu při tvorbě této práce.

## **Abstrakt**

V diplomové práci byl vytvořen matematický model proudění podzemní vody v kontaminantem postižené lokalitě Hradec Králové. Poté byl do oblasti zaveden cirkulační vrt, kterému byly připsány dvě různá množství přečerpávané vody. Všechny modely byly vytvořeny programem Feflow 5.2, který využívá metodu konečných prvků.

Pomocí matematického modelu bylo zjištěno, že mapa hydroizohyps se dobře shoduje s hodnotami hydraulických výšek naměřenými v terénu a že podzemní voda vykazuje proudění ve směru J, J-Z. Po zavedení cirkulačního vrtu byl sledován rozsah ovlivnění proudění podzemní vody v závislosti na velikosti přečerpávané vody. Bylo zjištěno, že při vyšším čerpání má cirkulační cela větší dosah a zůstává v ní více vody. Vyhodnotila jsem tedy, že pro danou lokalitu je účinnější čerpat větší množství vody.

## **Abstract**

In this master's thesis, a numerical model of groundwater flow in a contaminated area of Hradec Králové was created. After that, a circulation well was introduced. Two circulation well variants, which differ in the amount of pumped water, were examined. All simulations were performed with the aid of a finite element solver Feflow 5.2.

The values of hydraulic head resulting from the mathematical model are in a good agreement with those obtained from the field measurement. The groundwater flow present in the area of interest exhibits south to southwest direction. After introducing the circulation well, I focused on the influence of the amount of pumped water on the groundwater flow. The outcome of this observation was that during the higher volume pumping, the circulation cell is larger and therefore has a higher influence on the groundwater flow. I evaluated that it is more efficient to pump a higher amount of water in the investigated area.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Základní charakteristika studované lokality .....</b>	<b>2</b>
2.1	Přírodní charakteristika .....	2
2.1.1	Geografické vymezení .....	2
2.1.2	Geomorfologické poměry .....	2
2.1.3	Klimatické poměry .....	5
2.1.4	Geologické poměry .....	5
2.1.5	Hydrogeologické poměry .....	8
2.2	Znečištění lokality .....	9
2.2.1	Charakter kontaminace .....	10
<b>3</b>	<b>Cirkulační vrty .....</b>	<b>10</b>
3.1	Základní rozdělení cirkulačních vrtů .....	11
3.2	Popis cirkulačního vrtu .....	12
3.2.1	UVB - reverzní mód .....	12
3.3	Studie provedených cirkulačních vrtů .....	14
3.3.1	Port Hueneme Naval Exchange Site, CA .....	14
3.3.2	Keesler Air Force Base, MS .....	15
<b>4</b>	<b>Matematické modelování .....</b>	<b>17</b>
4.1	Analytické metody .....	18
4.2	Numerické metody .....	18
4.2.1	Diferenční metody .....	19
4.2.2	Metody Galerkinova typu .....	20
4.2.2.1	Metoda konečných prvků .....	20
4.2.3	Diferenční metoda versus metoda konečných prvků .....	22
4.3	Okrajové a počáteční podmínky .....	23

4.3.1	Počáteční podmínky .....	23
4.3.2	Okrajové podmínky .....	24
4.3.2.1	Dirichletova okrajová podmínka.....	24
4.3.2.2	Neumannova okrajová podmínka .....	24
4.3.2.3	Newtonova okrajová podmínka .....	25
4.4	Software .....	25
4.4.1	FEFLOW .....	26
4.5	Matematické modelování cirkulačního vrtu.....	26
4.5.1	Faktory ovlivňující dosah cirkulační cely .....	26
<b>5</b>	<b>Koncepční model.....</b>	<b>31</b>
5.1	Metodika práce.....	31
5.2	Koncepční model studované oblasti neovlivněné cirkulačním vrtem.....	33
5.2.1	Parametry oblasti .....	33
5.2.2	Okrajové podmínky .....	34
5.3	Koncepční model studované oblasti ovlivněné cirkulačním vrtem .....	34
<b>6</b>	<b>Řešení.....</b>	<b>34</b>
6.1	Tvorba polygonu a trigonální sítě .....	35
6.2	Tvorba jednotlivých vrstev .....	36
6.3	Zadání okrajových podmínek a hydraulické vodivosti .....	38
6.4	Zavedení cirkulačního vrtu .....	38
6.5	Možnosti simulace .....	39
<b>7</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>40</b>
7.1	Zadání úlohy.....	40
7.2	Výsledky úlohy bez cirkulačního vrtu .....	41
7.2.1	Porovnání výsledků stejné úlohy s jiným koncepčním modelem.....	47
7.3	Výsledky úlohy s cirkulačním vrtem .....	49
<b>8</b>	<b>Diskuse.....</b>	<b>58</b>

<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>60</b>
<b>10</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>61</b>



## Seznam obrázků

Obr. 1:	Širší okolí studované oblasti (Esri, 2014). .....	2
Obr. 2:	Geologická mapa širší studované oblasti (Česká geologická služba, 2014). .....	4
Obr. 3:	Schématická geologická mapa české křídové pánve (Chlupáč et al., 2002). .....	6
Obr. 4:	Stratigrafické schéma české křídové pánve. (Chlupáč et al., 2002). .....	7
Obr. 5:	Cirkulační vrt typu UVB-reverzní mód (Stamm, 1995). .....	13
Obr. 6:	Závislost relativního množství cirkulované vody v určitém čase ( $Q_{Tzirk}/Q$ ) vyjádřeného v procentech, na stupni anizotropie ( $K_h/K_v$ ) v logaritmickém měřítku (Stamm, 1995). .....	27
Obr. 7:	Ilustrace drah částic vody s rostoucí vzdáleností od osy cirkulačního vrtu a jejich doby zdržení mezi extrakcí a injektáží (Johnson, Simon, 2007). .....	28
Obr. 8:	Ukázka několika možností proudění ve vícenásobném cirkulačním vrtu ( IEG Technologie GmbH, 2014). .....	28
Obr. 9:	Řez proudovým polem v oblasti s cirkulačním vrtem pro odlišné hodnoty rychlostí proudění podzemní vody (Stamm, 1995). .....	29
Obr. 10:	Řez proudovým polem v oblasti cirkulačního vrtu v reverzním módu (IEG Technologie GmbH, 2014). .....	29
Obr. 11:	Řez proudovým polem v oblasti několikanásobného cirkulačního vrtu (IEG Technologie GmbH, 2014). .....	30
Obr. 12:	Mapa hydroizohyps zpracována v programu Surfer 8. ....	32
Obr. 13:	Výsledná trojúhelníková síť studované oblasti. ....	36
Obr. 14:	Rozdělená studovaná oblast na modelové vrstvy s příslušnou nadmořskou výškou. ....	37

Obr. 15: Simulace proudění podzemní vody 2,3 m p.t. (obr. 15a) a 10 m p.t. (obr.15b). .....	42
Obr. 16: Simulace objemové hustoty toku 2,3 m p. t. ....	43
Obr. 17: Průběh výšky volné hladiny ve směru proudění podzemní vody.....	44
Obr. 18: Mapa hydroizohyps 2,3 m p.t.....	45
Obr. 19: Vypočtená hladina podzemní vody .....	47
Obr. 20: Simulace proudění při malém (a) a velkém (b) čerpání 2,3 m p. t.....	50
Obr. 21: Průběh volné hladiny podzemní vody ovlivněné malým (a) a velkým (b) čerpáním v oblasti horní perforace.....	51
Obr. 22: Průběh volné hladiny podzemní vody při malém (a) a velkém (b) přečerpávaném množství vody v oblasti dolní perforace.....	52
Obr. 23: Řez oblastí ve směru proudění podzemní vody oblastí s cirkulačním vrtem při malém čerpání. ....	52
Obr. 24: Řez oblastí ve směru proudění podzemní vody oblastí s cirkulačním vrtem při velkém čerpání. ....	53
Obr. 25: Mapa hydroizohyps v oblasti s velkým (a) a malým (b) čerpáním.....	54
Obr. 26: Proudnice v oblasti s horní (I.) a spodní (II.)perforací při malém čerpání (a). Tentýž obrázek při velkém čerpání (b). ....	54
Obr. 27: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při malém čerpání. ....	55
Obr. 28: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při čerpání 0,1 l/s. ....	55
Obr. 29: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při čerpání 2 l/s. ....	56
Obr. 30: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při čerpání 2 l/s. ....	56

## Seznam tabulek

Tab. 1: Regionální geomorfologické členění zájmového území.....	3
Tab. 2: Regionálně-geologické jednotky zájmového území (Česká geologická služba, 2014).....	5
Tab. 3: Aktualizovaná data studované oblasti .....	33
Tab. 4: Porovnání výsledků s naměřenými a vypočtenými daty. ....	46
Tab. 5: Porovnání výsledků mé modelované úlohy (model I) se stejnou úlohou při rozdílně zadaných podmínkách (model II).....	48
Tab. 6: Porovnání výsledků bez čerpání a při rozdílném čerpání. ....	57

## Seznam použitých zkratek

BTEX	– souhrnný název pro kontaminanty benzen, toluen, ethylbenzen a skupinu xylenu
C-Sparger	– typ cirkulačního vrtu využívající injektáž ozonu
DDC	– Density Driven Convection, typ cirkulačního vrtu, který k vyvolání cirkulace využívá pouze injektáž vzduchu
DM	– diferenční metoda nebo také metoda sítí, numerická metoda
DS PMH	– distribuční sklad pohonných hmot, zkratka studované lokality
GCW	– Groundwater Circulation Well, základní typ cirkulačního vrtu
GZB	– Grundwasser-Zirkulations-Brunnen, základní typ cirkulačního vrtu
LNAPL	– termín pro kontaminanty lehčí než voda
MKP	– metoda konečných prvků, numerická metoda
NEL	– nepolární extrahovatelné látky, ukazatel pro kontaminaci ropnými látkami
SVE	– Soil Vapor Extraction, doplňková technologie k cirkulačnímu vrtu
SZB	– Spulung-Zirkulations-Brunnen, typ cirkulačního vrtu pro sanaci nenasycené zóny
TPH	– Total Petroleum Hydrocarbons, jakákoli směs uhlovodíků vyskytující se v ropě
UVB	– Unterdruck-Verdampfer-Brunnen, typ cirkulačního vrtu využívající stripování

# 1 Úvod

Voda je předpokladem pro rozkvět lidské společnosti. Už naši předkové si tuto skutečnost velmi dobře uvědomovali, když se usazovali u pramenů a v blízkosti vodních toků. Dostatek pitné vody byl hlavním faktorem pro osídlení dané oblasti. Další činností a rozvojem společnosti se však voda na územích zasažených lidskou činností stala zranitelnou. Prudkým rozvojem průmyslu a nedostatkem zákonů chránících životní prostředí začala také voda a její kvalita přicházet k újmě. V případě, kdy selžou opatření určená k ochraně dané přírodní oblasti, a dojde ke kontaminaci, je nutné takovou situaci řešit. I na tento problém zná společnost, díky technologickému vývoji, odpověď. Je však třeba zdůraznit, že i když je v současné době možné vyčistit oblasti zasažené rozličnými odpadními produkty našeho průmyslu, užití moderních technologií by mělo v první řadě směřovat k zamezení takového úniku škodlivých látek. Až v případech, kdy dojde k havárii, nebo znečištění zabránit nelze, zasáhne sanační technika.

Efektivnost sanačních prací je dnes umocněna nasazením výpočetní techniky. Počítačové simulace vycházející z naměřených dat přímo v dané lokalitě nám poskytují podrobný vhled do daného problému, který by jiným způsobem nebyl možný. Obsáhlé výsledky analýzy proudění podzemních vod umožňují inženýrům zacílit na problematickou oblast a odloučit z ní polutanty s vysokou přesností a účinností.

Cílem práce je pomocí matematického modelu zhodnotit přirozené proudění podzemní vody v dané lokalitě. Jedná se o kontaminovanou oblast bývalého distribučního skladu pohonných hmot v Hradci Králové, kdy polutantem jsou zde ropné látky. Výsledný matematický model proudění podzemní vody bude základem pro umístění cirkulačního vrtu, který bude sloužit jako sanační zařízení. Protože jsou kontaminantem látky, které mají hustotu nižší než voda a drží se při hladině podzemní vody, bude třeba zavést cirkulační vrt s opačným režimem čerpání, tj. shora dolů. Tento vrt bude následně podroben dvěma simulacím s rozdílným množstvím čerpané vody. Závislost proudění podzemní vody na jejím čerpaném množství ve vrtu bude následně porovnána a diskutována.

## 2 Základní charakteristika studované lokality

### 2.1 Přírodní charakteristika

#### 2.1.1 Geografické vymezení

Studovanou oblastí je bývalý distribuční sklad pohonných hmot (dále DS PHM) společnosti Benzina s.r.o. (obr. 1) sídlící na okraji města Hradce Králové v jeho průmyslové zóně a spadající do severního okraje katastrálního území Pražské Předměstí. DS PHM spadá do okresu Hradec Králové a do Královéhradeckého kraje. Areál DS PHM sídlí cca 700 m na západ od pravého břehu řeky Labe.



Obr. 1: Širší okolí studované oblasti, červeně vyznačen areál DS PHM Benzina s.r.o. (Esri, 2014).

#### 2.1.2 Geomorfologické poměry

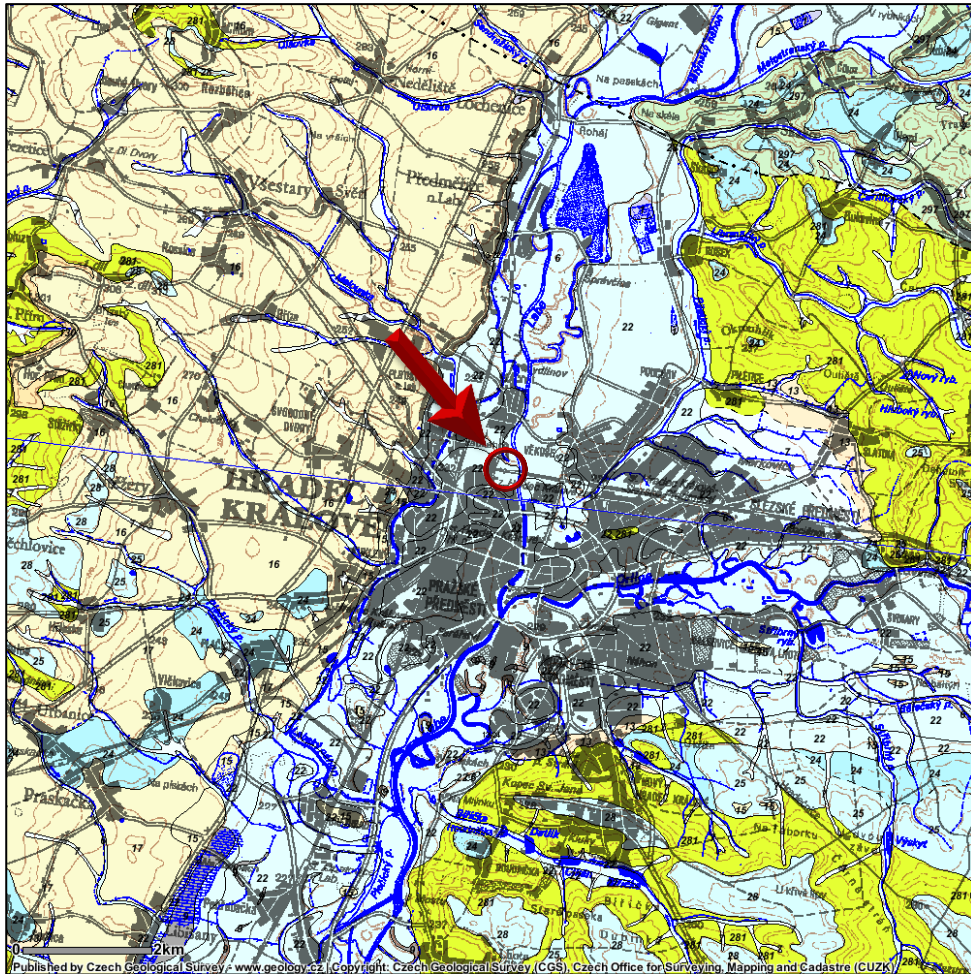
Dle regionálního geomorfologického členění reliéfu ČSR (Demek J. et al., 1987) spadá zájmové území do následujících jednotek:

*Tab. 1: Regionální geomorfologické členění zájmového území.*





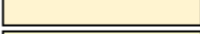




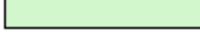
<b>Provincie</b>	<b>Soustava</b>	<b>Podsoustava</b>	<b>Celek</b>	<b>Podcelek</b>	<b>Okrsek</b>
Česká Vysočina	Česká tabule	Východočeská tabule	Východolabská tabule	Pardubická kotlina	Královehradecká kotlina

Královehradecká kotlina je erozní kotlinou v povodí řeky Labe, která je vytvořená na slínovcích, jílovcích a spongilitech spodního turonu až coniacu. Kvartérní pokryv je tvořen pleistocenními říčními štěrky a písky, eolitickými písky a sprašemi. V údolní nivě Labe jsou četná opuštěná říční ramena, vyplněná zčásti hnilokaly (Kozubek, 2008).

Dále Kozubek (2008) ve své studii uvádí, že DS PHM leží na pravém břehu řeky Labe ve vzdálenosti cca 700 m od jejího stávajícího koryta. Jedná se o téměř ploché území s velmi mírným sklonem k jihu až jihovýchodu. Povrch terénu areálu DS PHM se nachází ve výšce cca 232 m n. m.



Legenda:

<b>KVARTÉR</b>	
	navážka, halda, výsypka, odval
	nivní sediment
	smíšený sediment
	slatina, rašelina, hnílokal
	kamenitý až hlinito-kamenitý sediment
	navátý písek, spraš a sprašová hlína
	písek, štěrk
<b>NEOGÉN</b>	
	štěrky, písčité štěrky, pisky s vložkami jílu
<b>KŘÍDA</b>	
	vápnité jílovce, slínovce, vápnité prachovce
	slínovce s polohami či konkrecemi vápenců, rytmy či cykly slínovec - vápenec

Obr. 2: Geologická mapa širší studované oblasti (Česká geologická služba, 2014).



### 2.1.3 Klimatické poměry

Studovaná oblast spadá do klimatické oblasti B2 – mírně teplá oblast, která se vyznačuje dlouhým létem, teplým a suchým, velmi krátkým přechodným obdobím s teplým až mírně teplým jarem a podzimem. Zima je krátká, mírně teplá, suchá až velmi suchá, s velmi krátkým trváním sněhové pokrývky (Kozubek, 2008).

Následující klimatické údaje byly převzaty ze serveru Českého meteorologického ústavu. Průměrná roční teplota vzduchu v období 1961-1990 činila 8,5°C s maximem v červenci a minimem v lednu. Průměrný roční úhrn atmosférických srážek v období 1961-1990 činí 616,8 mm, s maximy v červnu a srpnu, s minimy v únoru a březnu.

### 2.1.4 Geologické poměry

Zájmové území patří v rámci Českého masivu do následujících regionálně – geologických jednotek (Česká geologická služba, 2014):

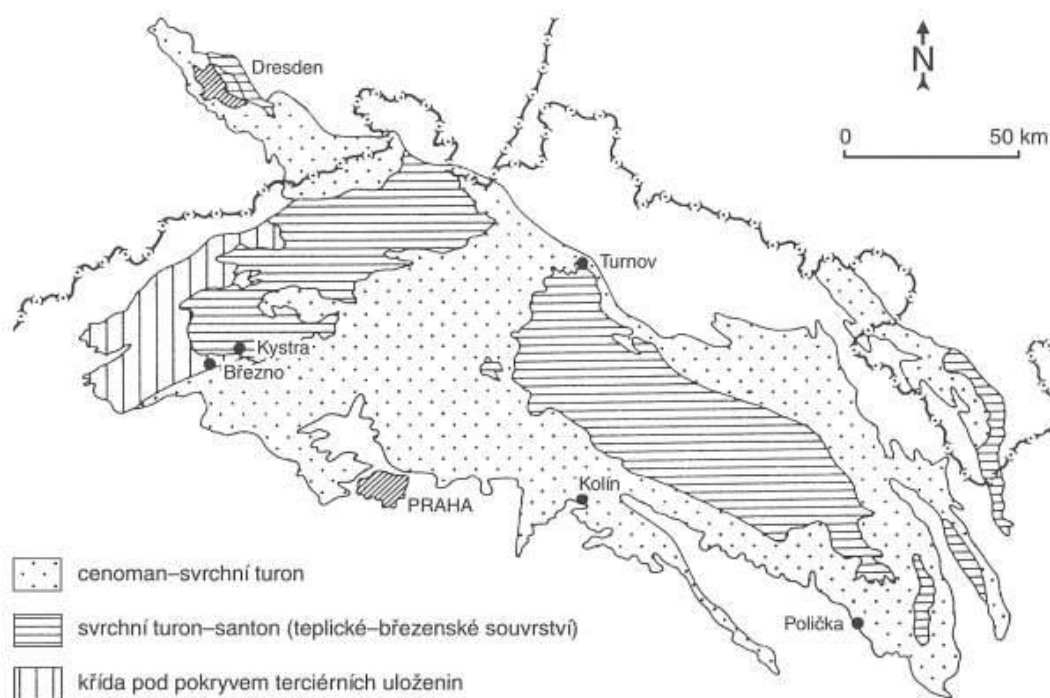
Tab. 2: Regionálně-geologické jednotky zájmového území (Česká geologická služba, 2014).

Soustava	Oblast	Region	Jednotka
Český masiv – pokryvné útvary a postvariské magmatity	Křída	Česká křídová pánev	Labský vývoj

### Česká křídová pánev

Česká křídová pánev je velice významnou geologickou jednotkou na území České republiky. Jedná se o největší dochovanou sedimentární pánev na našem území, kde pokrývá plochu velkou 12 500 km<sup>2</sup> (Bruthans, 2012). Časově zaujímá interval téměř 80 milionů let (přibližně mezi 140 – 65 Ma) a mezinárodně se dělí na svrchní a spodní oddělení (Chlupáč, 2002).

Velký význam se české křídové pánvi připisuje zejména díky velkým prostorům pro akumulaci a oběh vody. Výplň pánve představují klastické uloženiny různé zrnitosti, v mořských uloženinách se uplatňuje také karbonátová sedimentace, ve které převládají slíny, slínovce, opuky i vápence.

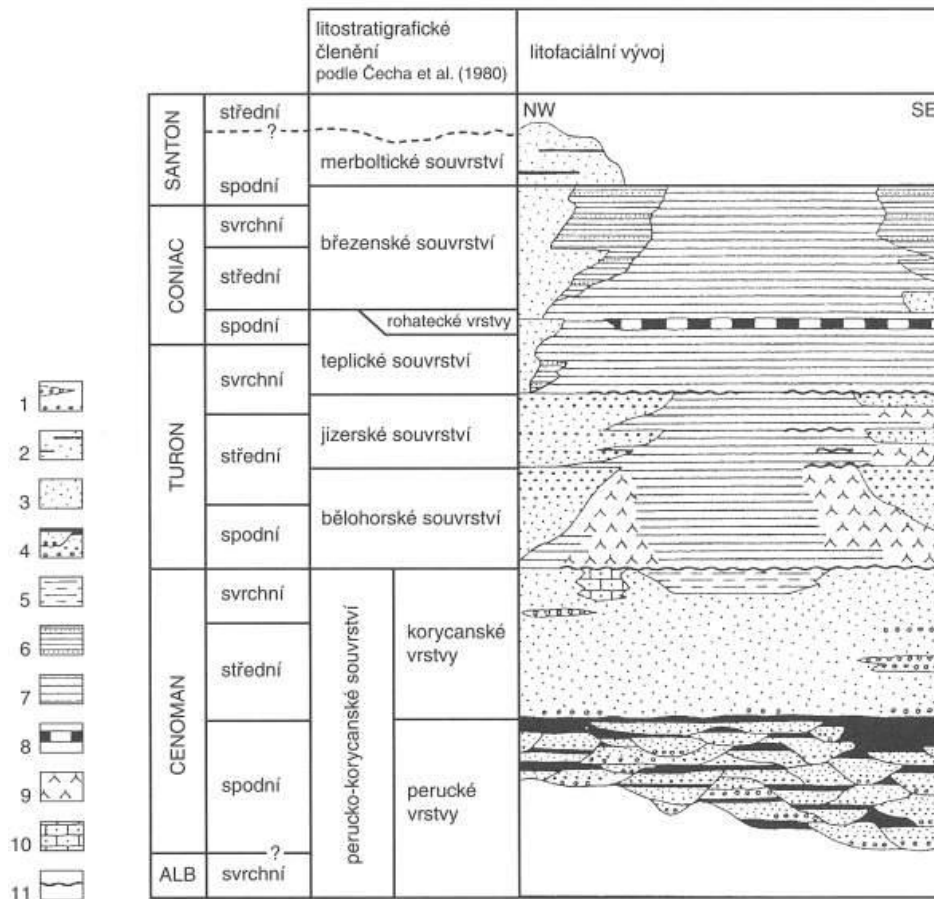


Obr. 3: Schématická geologická mapa české křídové pánve (Chlupáč et al., 2002).

Díky mořské transgresi, která nastala po období sladkovodní sedimentace, lze pozorovat rozrůznění facií do dvou základních typů, které jsou závislé hlavně na přínosu materiálu z pevninských snosových oblastí (Chlupáč et al., 2002):

- *Facie kvádrových pískovců.* Tato facie je více či méně zřetelně cyklicky zvrstvená, tvořící tělesa o mocnosti až několika set metrů. Jedná se o oblasti, kam zasahoval přínos písčitého materiálu z ploché pevniny. Tento vývoj je typický pro oblast mezi Drážďany a širším okolím Mladé Boleslavi a pro centrální části vnitrosudetské pánve na Broumovsku.

▪ *Facie vápnných jílovců a slínovců s přechody do jílovitých vápenců.* Vrstevní sledy často vykazují cykličnost. Tyto facie jsou typické pro pánevní oblasti vzdálené od pobřeží s omezeným přínosem pevninského materiálu.



Obr. 4: Stratigrafické schéma české křídové pánve. Vysvětlivky: 1 – slepence; 2 – písčivce s vložkami jílovců; 3 – písčivce; 4 – cyklické střídání slepenců, písčivců a jílovců; 5 – prachovce; 6 – vápnné jílovce s vložkami písčivců; 7 – vápnné jílovce až biomikritické vápence; 8 – rohatecké vrstvy; 9 – slínovce (opuky); 10 – bioklastické vápence; 11 – glaukonitické obzory na hiátových plochách (Chlupáč et al., 2002).

Do poslední zmiňované facie spadá také studovaná oblast a podrobněji ji popsal ve své studii Kozubek (2008):

Skalní podloží je coniackého stáří a tvoří ho horniny březenského souvrství - vápnné jílovce a slínovce o mocnosti do 160 m.

Na těchto křídových sedimentech leží kvartérní deluviofluviální a fluviální uloženiny řeky Labe - štěrky a písky o mocnosti až 10,6 m. Štěrkovité sedimenty zastižené novými vrtnými pracemi jsou středně zrnité s příměsí jemnozrnné zeminy, s přechody do štěrků písčitých. Vyznačují se strukturou typickou pro fluviální sedimenty s kolísavou propustností, odpovídající proměnlivé frakci, a to ve směru horizontálním i vertikálním. Na těchto štěrcích leží cca 2 – 2,5 mocné písčité jíly až jílovité písky hnědo rezavé barvy. Nejsvrchnější vrstvu představují proměnlivě mocné různorodé navážky, které mají charakter jílovito – písčité zeminy s přechody do hlinitých písků s příměsí kamenů, stavebního materiálu a dřeva. Převážná část studované oblasti je pokryta betonovými panely, z části je také zastavěna.

### **2.1.5 Hydrogeologické poměry**

Podle Kozubka (2008) vypadá studovaná oblast následovně. Daná lokalita náleží do hydrogeologického rajónu 1121 – Kvartér Labe po Hradec Králové (Ferbar, 2008). Hladina podzemní vody mělkého kolektoru byla zaznamenána v hloubce 3,2 – 3,7 m pod terénem, přičemž proudění vykazuje jižní až jihovýchodní směr orientovaný k erozní bází koryta řeky Labe. Geologický profil lze rozčlenit nad sebe tři vrstvené horizonty.

Horní vrstvou je průlinový kolektor vyznačující se charakteristickou alternací propustných a nepropustných vrstev závislou přímo na povaze navážky. Hladina podzemní vody, která nevykazuje souvislou úroveň, je dotována pouze atmosférickými srážkami. Průlinový kolektor je v bezprostředním kontaktu s pod ním se nacházejícím následujícím zvodnělým systémem.

Hlouběji nacházející se průlinový kolektor je vázaný na kvartérní uloženiny a zónu zvětralinového pláště. Je charakterizován průměrnou hodnotou koeficientu transmisivity  $T$  v rozmezí řádu  $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Hladina podzemní vody je v tomto zvodnělém systému mírně napjatá a je závislá na množství atmosférických srážek a hydrologickém stavu řeky Labe.

Spodní zvodnělý systém je vázan na podložní horniny, slínovce a vápnité jílovce. Toto podloží je relativně nepropustné a z hlediska hydrogeologických souvislostí nepříliš významné.

## 2.2 Znečištění lokality

Jak již bylo řečeno, zájmovým územím je bývalý distribuční sklad pohonných hmot společnosti Benzina s.r.o., která zde sídlila od roku 1976 a svoji činnost ukončila v roce 1996 (Kozubek, 2008). Z archivních záznamů je ale známo, že oblast byla využívána k manipulaci s pohonnými hmotami již před 2. světovou válkou. V současné době nedochází na studované lokalitě k žádné kontaminaci ani k jiné pro přírodu škodlivé činnosti.

Kontaminace na zájmovém území má tedy kořeny již v minulosti, kdy došlo k úniku ropných látek do životního prostředí z dnes již bývalého areálu DS PHM Benziny s.r.o.

Problematikou kontaminace na tomto území se velice pečlivě zabýval Kozubek (2008) ve své studii proveditelnosti sanace. Ten uvádí, že rozhodnutím ČIŽP OI Hradec Králové č.j. 5/OV/3096/99/Ma-O 2/99 ze dne 20.5. 1999 byly pro areál DS PHM stanoveny následující cílové limity sanace:

▪ Zeminy:	NEL (nepolární extrahovatelné látky)	4 000 mg/kg suš.
▪ Podzemní vody	NEL (nepolární extrahovatelné látky)	5 mg/l
	Benzen	0,15 mg/l
	Toluen	3,5 mg/l
	Ethylbenzen	1,5 mg/l
	Xyleny	2,5 mg/l

Po tomto ustanovení došlo k řadě sanačních opatření, po kterých bylo zjištěno, že zájmové území je stále masivně postiženo látkami NEL, které výrazně překračují sanační limity (Kozubek, 2008).

### 2.2.1 Charakter kontaminace

Ropné látky se dostávají jako závažné kontaminanty do životního prostředí při činnostech souvisejících s těžbou a zpracováním ropných produktů nebo při jejich skladování, přepravě či při jejich využívání při výrobních procesech. Jako ukazatel pro kontaminaci ropnými látkami byl zaveden parametr NEL (nepolární extrahovatelné látky). Kuráň et al. (2009) definuje NEL jako hmotnostní koncentraci organických látek, které je možné vyextrahovat ze vzorku trichlortrifluoethanem a po odstranění polárních látek spektrometricky stanovit v infračervené oblasti spektra.

Je důležité si uvědomit, jak se budou takové látky v podzemní vodě chovat. Tento typ kontaminantu se může sorbovat, přičemž míra sorpce je závislá na obsahu organického uhlíku v půdě, velikosti molekuly a chemické struktuře. Dále se může vyskytovat v rozpuštěné formě nebo se držet jako kapalná fáze při hladině podzemní vody.

## 3 Cirkulační vrty

Cirkulační vrt je sanační objekt využívající inovativní technologie k odstranění kontaminantu z podzemní vody. Velkému zájmu se těší díky výhodě, kterou je možnost odstranění kontaminantu in situ, tudíž není nutné čerpat vodu na povrch a zase zpět jako například u metody pump&treat. Další výhodou je relativně jednoduchá konstrukce a nenáročnost na údržbu (Khan et al., 2004).

Cirkulační vrt má výstroj perforovanou ve dvou úrovních, které jsou odděleny úsekem s výstrojí plnou. V místě plné výstroje je obvykle umístěno čerpadlo a sanační prvek. Čerpaná voda je v jednom perforovaném úseku vrtu čištěna a druhým úsekem zase vypouštěna zpět do horninového prostředí, kde se díky vytvořené cirkulační cele vrací zpět do vrtu. Uvnitř vrtu dochází pomocí sanační techniky k čištění v každém cyklu. Čerpat lze oběma směry, podle druhu kontaminace a hydrogeologických podmínek v kolektoru.

### 3.1 Základní rozdělení cirkulačních vrtů

Existuje několik typů cirkulačních vrtů, které jsou založeny na vertikální cirkulaci vody. Podle J. Stamm (1995) to jsou právě tyto:

- *Vacuum Vaporizer Well* (v Německu označovány jako UVB). Tento typ cirkulačního vrtu využívá k čištění stripování vody. Do vrtu je vháněn vzduch a díky rozdílným koncentracím kontaminantu ve vodě a ve vzduchu přechází kontaminant do plynné fáze. Modifikací UVB vrtu je například Density Driven Convection (DDC) nebo C-Sparger.

- *Groundwater Circulation Well* (v Německu označovány jako GZB). Tento typ cirkulačního vrtu je oproti UVB vrtu konstrukčně velice jednoduchý. Nedochozí zde k žádnému vhánění vzduchu, voda je pouze vedena z dolní části vrtu do horní části vrtu přes filtr nebo jinou zvolenou čisticí jednotku.

- *Groundwater Flushing Circulation Well* (v Německu jako SZB) lze jako jediný typ cirkulačního vrtu uplatnit v nesaturevané zóně. Tato metoda je ale závislá na množství vody v pórech, kdy je ideální stupeň nasycení mezi 50 – 80%. Voda je čerpadlem vháněna ze svrchní části saturevané zóny nebo z kapilární třásně do reaktoru, který je umístěný v horní části vrtu blízko pod zemským povrchem, kde je případně použito stripování. Odtud je voda vháněna zpět do nesaturevané zóny, odkud proudí k hladině podzemní vody. Před stripováním mohou být přidány nutriety pro zvýšení mikrobiální aktivity v akviferu.

Velkou výhodou cirkulačních vrtů je možná kombinace těchto technik vzájemně mezi sebou a případným doplněním o další metody, jako je bioremediace. Právě tím lze docílit nejlepších výsledků.

Více se touto kapitolou zabývá a podrobněji popisuje jednotlivé typy cirkulačních vrtů např. Stamm (1995) ve své publikaci *Vertical Circulation Flow for In-Situ Bioremediations in Aquifers*.

## **3.2 Popis cirkulačního vrtu**

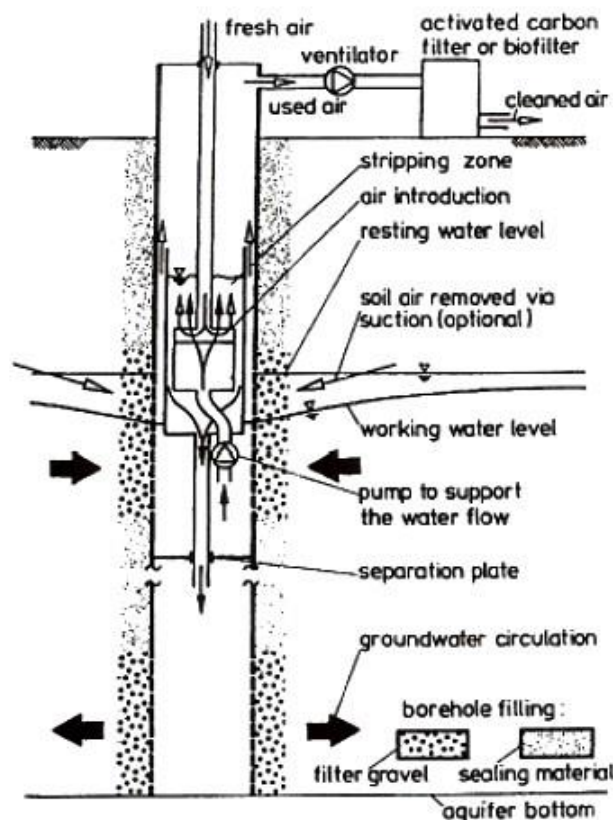
Jak bylo právě řečeno výše, ke zvýšení efektivnosti čištění podzemních vod je zde několik typů cirkulačních vrtů navržené dle vlastností kontaminantu. Nás bude zajímat konstrukce vrtu, který je pro naši studii vhodný, tedy cirkulační vrt typu UVB – reverzní mód.

### **3.2.1 UVB - reverzní mód**

Polutanty typu LNAPL, mezi které patří také polutanty z naší studie – ropné látky, mají hustotu nižší než voda a mají proto tendenci držet se na hladině podzemní vody. Zdá se tedy výhodnější použít opačný mód cirkulačního vrtu, tedy nasávání vody horní perforací a vypouštění dolní perforací, a zamezit tak případnému rozšiřování kontaminačního mraku, ke kterému by došlo při vzestupném módu. Tím se na hladině podzemní vody vytvoří deprese, která je postačující zábranou k dalšímu šíření kontaminantu.

Na obr. 5 vidíme samotnou konstrukci vrtu, která se skládá z několika částí. Popis konstrukce vrtu a jeho chod je převzat od Stamm (1995) a upraven. Samotné těleso vrtu je obsypáno dvojitým druhem filtračního obsypu, a to štěrkem u perforovaných a jílem u neperforovaných částí výstroje. Pažnice je perforovaná ve dvou částech vrtu a to v dolní a horní části, mezi kterými je těsnicí přepážka, která rozděluje vrt na dvě části – horní a dolní. Z dolní části vede trubka skrze těsnění do horní části, kde ústí do tzv. stripovacího reaktoru, do něhož naopak shora ústí trubice, kterou je do systému vháněn vzduch z atmosféry.





Obr. 5: Cirkulační vrt typu UVB-reverzní mód (Stamm, 1995).

Samotný proces čištění pak probíhá následovně. Nad povrchem je ventilátor, kterým je odsáván vzduch z celého vnitřního objemu vrtu, tím vzniká podtlak, který omezuje snížení vyvolané čerpáním směrem nahoru, a proto není vzniklá deprese příliš hluboká. Trubicí je do stripovacího reaktoru přiváděn vzduch z atmosféry a dochází k nasávání vzduchu (tlak vody je menší než tlak atmosférický). Zónu mezi místem nasátí vzduchu a hladinou podzemní vody nazýváme stripovací zónou, dochází zde ke stripování vody vzduchem. Pod stripovacím reaktorem je umístěno malé čerpadlo, které napomáhá udržovat tok vody. Čerpaná voda prochází stripovací zónou, kde je nasycena vzduchem a zároveň z ní jsou odstraňovány těkavé uhlovodíky přeměněné na výpary. Tyto výpary jsou spolu se vzduchem uvnitř vrtu a s okolním půdním vzduchem nasávány ventilátorem, který je dále vhání do určité čistící jednotky (na obrázku filtr s aktivním uhlím nebo biofiltrem). Voda nasycená kyslíkem mezitím opouští stripovací zónu a postupuje trubicí do dolní části vrtu, kde proudí zpět do kolektoru. Díky těmto pochodům dojde k vytvoření proudové cirkulační cely, díky které voda opakovaně prochází

jednotlivými pochody a v každém jednom cyklickém procesu je čištěna. Proces čištění je založen na sníženém tlaku, který podpoří únik těkavých složek z vody, na velikosti povrchu vzduchových bublin a na vysokém rozdílu koncentračního gradientu mezi vodou a čistým vzduchem.

### 3.3 Studie provedených cirkulačních vrtů

V následujících podkapitolách jsou uvedeny případové studie, které dokumentují sanační opatření ustavená v oblastech zasažených podobným kontaminantem. Všechny uvedené studie jsou převzaty z U. S. EPA (1998).

#### 3.3.1 Port Hueneme Naval Exchange Site, CA

<i>Kontaminant:</i>	BTEX
<i>Typ zeminy:</i>	prachovitý písek, písek
<i>Typ cirkulačního vrtu:</i>	GCW, modifikace technologie UVB
<i>Cena projektu:</i>	184 000 USD (částka nezahrnuje náklady na výzkum)

Cirkulační vrty typu Ground-Water (GCW) pro sanaci látek BTEX (benzen, toluen, ethylbenzen, xylen) byly použity na lokalitě Port Hueneme Naval Exchange v americkém státě Kalifornie v roce 1995. Použité vrty byly modifikací technologie UVB.

Lokace byla kontaminovaná přibližně 41 640 litry benzínu z bývalé benzinové stanice. Mělké zeminy v oblasti se skládají ze tří vrstev. Do 1,7 m pod povrch sahá jemnozrnný prachovitý písek. V hloubce do 6,2 m pak dosahuje jemný až hrubozrnný písek. Pod ním až do hloubky 8 m pod terénem leží písčité až prachovitý jíl. Hladina podzemní vody je v hloubkách od 1 – 3,7 m a kontaminace se drží v horním aquiferu. Naměřená horizontální hydraulická vodivost je rovna  $3,84 \cdot 10^{-2}$  m/s, vertikální hydraulická vodivost je o řád nižší, a to  $3,84 \cdot 10^{-3}$  m/s. Koncentrace BTEX před zahájením sanace byla 4,66 mg/l ve vrtu blízko zdroje kontaminace a 118 mg/l v hlubokých monitorovacích vrtech. Koncentrace byla nižší ve vrtu u zdroje, protože

umístění tohoto vrtu bylo provedeno na základě špatných informací z předchozího projektu.

System sestával ze čtyř cirkulačních vrtů. Jeden (GCW-400) byl nainstalován blízko zdroje znečištění. Horní a dolní perforované úseky vrtu GCW-400 byly prodlouženy na 2,4 – 4,8 m p. t. a 6,6 – 8 m p. t. Vrt byl vybaven jedním ventilátorem a ponorným čerpadlem. Čtyři skupiny obsahující po třech monitorovacích vrtech byly nainstalovány v různých hloubkách kolem vrtu. Tři GCW-200 vrty byly nainstalovány s překrývajícím se poloměrem cirkulační cely k vytvoření bio-curtain. Bio-curtain je technologie, založena na injektování bakterií do podzemí. Vrty jsou umístěny před kontaminační mrak kolmo k pohybu podzemní vody. Jakmile kontaminovaná voda dosáhne této zóny, kontaminant je degradován injektovanými bakteriemi (Bolster et al, 1999). Horní a dolní perforované úseky těchto vrtů byly umístěny mezi 2,2 – 5 m p. t. a 7 – 8,7 m p. t. Osm monitorovacích vrtů bylo umístěno okolo vrtů s technologií bio-curtain. Kromě monitorování bylo také odebráno osm vzorků každý čtvrtrok.

Sanace započala v lednu 1995 a trvala 18 měsíců. Již po půl roce od začátku procesu, naměřená data v oblasti s bio-curtain vykazovala pokles koncentrace BTEX z 77 mg/l na 2 µg/l. Koncentrace BTEX v podzemní vodě naměřené v hlubokých vrtech klesla ze 118 mg/l na méně než 1 µg/l. Během osmi měsíců tohoto procesu klesla koncentrace BTEX, naměřená mělkými pozorovacími vrty umístěnými poblíž GCW-400 z 4,66 na 2,88 mg/l, tj. o 52%.

### 3.3.2 Keesler Air Force Base, MS

<i>Kontaminant:</i>	TPH (total petroleum hydrocarbons), BTEX
<i>Typ zeminy:</i>	prachovitý písek, písek, jíla
<i>Typ cirkulačního vrtu:</i>	DDC a SVE

Jednalo se o objekt letecké základny v americkém státě Mississippi, kde došlo k úniku benzínu a nafty z podzemních nádrží. Akvifer byl mělký s volnou hladinou podzemní vody 2 – 3 m p. t. Geologický profil vypadal následovně. Nejsvrchnější vrstvu tvořil 0,9 – 1,2 m mocný prachovitý písek, pod ním následoval jemnozrnný až středně

zrnitý písek do hloubky 6,7 m p. t. Nejspodnější vrstvu tvořily jíly. Kontaminant se držel při hladině podzemní vody a směrem do hloubky se snižovala jeho koncentrace. Maximální koncentrace TPH v sanované oblasti činila 96 mg/l a látek BTEX 7,46 mg/l. Tyto látky byly zjištěny také mimo sanovanou oblast. TPH dosahovaly 32 mg/l a BTEX 14 mg/l.

Dekontaminace proběhla v letech 1995 – 1997. Hlavní systém technologie sestával z jednoho DDC vrtu a jednoho SVE vrtu. Cirkulační vrt typu DDC (Density Driven Convection – hustotou poháněné proudění) je variací UVB vrtu, neobsahuje ale těsnicí desku a shora je uzavřen, aby nedošlo k úniku škodlivin. Tento typ vrtu je založen čistě na bioremediaci, kdy nechává volně vniknout kontaminované výpary do saturované i nesaturované zóny, kde dochází k degradaci kontaminantu mikroorganismy. Tento vrt byl doplněn vrtem SVE (soil vapor extraction – extrakce půdních výparů), který měl zabránit migraci výparů a pomoci nasávat kyslík do nesaturované zóny z DDC. Systém byl navržen tak, aby docházelo ke stripování těkavých škodlivin z podzemní vody proudícím vrtem DDC. Jakmile se stripované uhlovodíky a kyslík dostaly skrze horní perforaci do okolní zeminy, byly následně odstraněny systémem SVE. Okysličená podzemní voda a vzduch byly hnány ven a směrem od vrtu DDC. Také zlepšovaly podmínky pro bioremediaci v okolní zemině i podzemní vodě. K tomuto hlavnímu systému byl připojen systém ve velkém rozsahu (v angličtině označován jako large – scale system), který sestával z 32 DDC vrtů a 6 SVE vrtů. DDC vrt sahal přes celý profil, tj. do hloubky necelých 7 metrů, zatímco SVE byly nainstalovány pouze do hloubky 2 m.

Systém byl v provozu 18 měsíců. Průměrná koncentrace TPH v monitorovacích vrtech klesla o 87%, zatímco průměrná koncentrace BTEX klesla až o 91%. Problémem ovšem je, že ve stejný čas ve vrtech vně studované oblasti, vzrostla koncentrace o více než dvojnásobek původní koncentrace a nakonec se ustálila na mírně větší hodnotě než před začátkem celého procesu. To by mohlo být důsledkem neúplného zachycení kontaminované podzemní vody systémem ve velkém měřítku a následující desorpce půdních kontaminantů uvolňovaných z DDC.

Koncentrace TPH a BTEX klesla v celé oblasti v průběhu celého procesu v průměru o 98% v kapilární třásni. Koncentrace u obou skupin kontaminantů klesla kdekoli o 35 - 87% v různých hloubkách pod hladinou podzemní vody.

Protože mezi hlavním systémem a large – scale systémem, kde docházelo k novým přítokům a odtokům podzemní vody, nebyly zavedeny monitorovací vrty, bylo nutné zavést mnoho předpokladů k tomu, aby byla určena míra odstranění kontaminantu. Proto je nejasné jak velký podíl na celkovém odstranění kontaminantu má SVE nebo DDC, stejně tak jako kolik kontaminantu odmigrovalo mimo lokalitu.

## 4 Matematické modelování

Matematické modelování je nedílnou součástí přírodních a technických věd, které má svůj význam při modelování systémů, jejich simulacích a analýzách.

Matematický model je popsán soustavou rovnic, které jsou doplněny počátečními a okrajovými podmínkami (Bartoň et al., 2014). Pro řešení těchto úloh lze využít jak analytická řešení některých speciálních případů, tak i řadu numerických metod pro přibližné řešení obecnějších úloh (Blaheta, 2012).

Jak uvádí ve své knize Klamkin (1987), lze matematické modelování pro zjednodušení rozdělit do pěti stupňů podle Henryho Pollaka:

- I. *Rozpoznání problému* a určení v čem spočívá.
- II. Jakmile je problém rozpoznán a stanoven, musí existovat jeho *matematická formulace*
- III. Po formulaci je nezbytné získat *matematické řešení*, které je v případě numerického řešení obvykle aproximativní.
- IV. Matematické řešení zahrnuje *výpočet*, který obvykle vyžaduje počítačovou techniku.
- V. Správná interpretace *výsledků*.

Jak nabádá Blaheta (2012), při formulaci matematických modelů je třeba zanedbávat souvislosti, které jsou méně významné. V opačném případě by vytvořené modely byly příliš složité, těžko řešitelné a málo pochopitelné pro použití. Avšak pokud je zjednodušení velké, pak řešení modelu nebude odpovídat skutečnosti a je naopak

potřeba přikročit k doplnění a použití často mnohem složitějších modelů. Je třeba mít na paměti, že existuje hierarchie modelů, které jsou postupně více a více složité. Proto také nesmíme zapomínat na závěrečné ověření platnosti modelu a jeho shody se skutečností. Tento postup je označován jako validace matematického modelu a má prověřit přesnost a vypovídací schopnost modelu přes přijatá zjednodušení. Stejně tak musíme mít na paměti verifikaci, která ověřuje vztah řešení matematického modelu a přibližného řešení, navíc vzniklého realizací numerických metod na počítači s konečnou aritmetikou.

Kvalita modelu je dána přesností vystižení objektu, mírou zjednodušení a stupněm poznání zákonitostí, které platí pro daný objekt (Bartoň et al., 2014).

#### **4.1 Analytické metody**

Řešení úlohy v analytickém tvaru lze nalézt pouze pro některé jednoduché typy úloh. Analytické modely poskytují exaktní řešení, avšak vyvozené na základě mnoha zjednodušujících předpokladů. Analytický postup lze využít v případě tvarově jednoduché oblasti, řídicí rovnicí např. s konstantními koeficienty a jednoduchými okrajovými a počátečními podmínkami, které jsou zpravidla konstantní na celé oblasti.

#### **4.2 Numerické metody**

U mnoha praktických případů, kdy se řeší proudění podzemní vody, nelze použít analytické metody z důvodu například nepravidelného tvaru řešené oblasti. K vypořádání se s reálnou úlohou přicházejí na řadu numerické metody, které nemusí být zatížené velkým množstvím zjednodušujících předpokladů, a proto jsou příhodné pro řešení obtížnějších problémů v komplikovanějších podmínkách. Dostupnost a relativně nízká cena výpočetního výkonu dnes umožňuje řešení reálných problémů s použitím minimálního zjednodušení úlohy. Podle například Yeh a Chang (2012), poskytují numerické metody vhodný, flexibilní a výkonný nástroj umožňující řešení komplexních úloh. Pomocí těchto metod jsou vytvářeny numerické modely, které simulují požadovaný děj pomocí počítačů.

Při matematickém modelování určité úlohy, zadáváme do programu, který vygeneruje výsledný matematický model, vstupní údaje spolu s počátečními a okrajovými podmínkami. Diferenciální rovnice, které popisují proudění podzemní vody, vyjadřují požadavek rovnosti mezi určitými funkcemi a jejich derivacemi na daném intervalu nebo oblasti. Poskytují nekonečně mnoho rovnic a tím i nekonečně mnoho neznámých funkčních hodnot. Abychom ale mohli řešit takovou úlohu na počítači, je vyžadováno, aby byl počet vstupních a výstupních dat konečný. Při řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnici, se tedy postupuje následovně. Pro prvotní diferenciální rovnici se sestavuje konečný počet rovnic pro konečný počet neznámých. Tento proces se nazývá diskretizace diferenciální úlohy, to znamená, že dochází k diskretizaci původní diferenciální rovnice. Dostáváme pak hledané přibližné řešení dané okrajové úlohy.

Diskretizace může probíhat dvěma metodami a to buď diferenční metodou nebo metodou Galerkinova typu.

#### 4.2.1 Diferenční metody

Diferenční metoda (DM) neboli metoda sítí aproximuje původní diferenciální úlohu a jejím výsledkem je soustava algebraických rovnic pro hodnoty přibližného řešení v konečné síti bodů  $n, n_1, n_2, \dots, n_x$ . Sestavení síťových rovnic lze provádět dvěma způsoby:

- **Metodou konečných diferencí** – zde je derivace v okrajových podmínkách a v diferenciální rovnici přímo nahrazena vhodnými poměrnými diferencemi a princip diskretizace metody konečných diferencí má pak tyto tři fáze:
  - Oblast nebo interval jsou nahrazeny sítí uzlů
  - Funkce v diferenciální rovnici jsou nahrazeny síťovými funkcemi
  - Derivace v uzlech sítě jsou nahrazeny poměrnými diferencemi a následně je složena soustava lineárních algebraických rovnic (diferenčních rovnic) pro neznámé hodnoty přibližného řešení. Počet rovnic je dán množstvím

uzlů sítě, v nichž je derivace aproximována. Uzly jsou prvky sítě a představují spojnice přímk, které jsou na sebe kolmé.

V metodě konečných diferencí je tedy aproximace derivací diferenčními podíly použita k sestavení rovnic, z nichž chceme přibližné funkční hodnoty stanovit.

Metoda konečných diferencí byla využívána matematiky již v 18. století jako jedna z prvních numerických metod. Tato metoda má nejstarší kořeny a vznikla mnohem dříve, než se vyvinula výpočetní technika.

- **Metodou integrálních identit** – dochází k aproximaci určitých integrálních vztahů, které platí pro řešení dané diferenciální rovnice.

#### 4.2.2 Metody Galerkinova typu

Podle Míky et al. (2006) jde o metody, které aproximují přímo řešení dané úlohy pomocí konečných lineárních kombinací vhodně zvolených lineárně nezávislých funkcí. Přičemž tyto zvolené funkce nazýváme bázové funkce. Výsledkem diskretizace je potom soustava algebraických rovnic pro koeficienty lineární kombinace určující hledané přibližné řešení. Do těchto metod spadá Galerkinova metoda (touto metodou se budu více zabývat v následujícím textu) a Ritzova metoda.

##### 4.2.2.1 Metoda konečných prvků

Kromě metody konečných diferencí je dále vyvinuta další metoda a to metoda konečných prvků (MKP). Jedná se o numerickou metodu, která může být použita pro přesné řešení složitých technických problémů. Metodu konečných prvků jako první formuloval, kvůli potřebě řešit úlohy strukturální mechaniky Richard Courant v roce 1942 (Beneš, 2008). Během následujícího desetiletí metoda konečných prvků pronikla do mnoha odvětví aplikované vědy a techniky. V průběhu let tato metoda natolik pokročila, že dnes je považována za jednu z nejlepších metod pro řešení nejrůznějších úloh.



Metoda konečných prvků se řadí mezi metody Galerkinova typu se speciální volbou báзовých funkcí.

Bázovou funkci chápeme jako funkci, která tvoří jakousi základnu pro aproximaci neznámé, hledané funkce. Báзовé funkce volíme s určitými požadavky (např. aby splňovaly určité interpolační podmínky, byly lineárně nezávislé atd.) a následně je můžeme definovat jako po částech konstantní, po částech lineární nebo po částech kubické. Každá taková báзовá funkce se užívá pro jiný typ rovnice. Po částech konstantní báзовé funkce užíváme k aproximaci okrajových úloh s rovnicí prvního řádu. Po částech lineární báзовé funkce zase k aproximaci řešení okrajových úloh s rovnicí druhého řádu. A konečně po částech kubická báзовá funkce se nejčastěji používá k aproximaci okrajových úloh s rovnicí čtvrtého řádu. Z těchto vyjmenovaných báзовých funkcí se nejvíce užívá po částech lineární báзовá funkce.

Při řešení úloh metodou konečných prvků používáme buď metodou minima kvadratického funkcionálu (variační princip) nebo Galerkinovu metodu.

Galerkinova metoda spadá pod metody Galerkinova typu. Tato metoda se užívá tehdy, když se řešení dané úlohy nedá vyjádřit tvarem konečné lineární kombinace jednoduchých elementárních funkcí. Tato neschopnost má jednoduché odůvodnění. U lineárních prostorů spojené s okrajovými úlohami pro diferenciální rovnice je totiž typické, že nemají konečnou dimenzi. Galerkinova metoda tedy spočívá v nahrazení prvotní rovnice její integrální formou. Dochází tedy k nahrazení silného řešení slabým řešením a následně k diskretizaci nově vzniklého slabého řešení.

Pro metodu konečných prvků jsou typické tři následující aspekty (Míka et al. 2006):

- a) Diskretizace množiny  $\Omega$ , na níž se okrajová úloha řeší. Množina  $\Omega$  se vyjádří jako konečné sjednocení zvolených podmnožin. Tyto podmnožiny se nazývají konečné prvky a obvykle jsou to buď trojúhelníky, nebo čtyřúhelníky.
- b) Konstrukce prostorů funkcí, které jsou na každém prvku polynomem. Těmto prostorům se říká prostory konečných prvků.

- c) Existence takové báze prostoru konečných prvků, že jednotlivé bázové funkce mají malý nosič, tj. jsou nenulové pouze na několika sousedních prvcích.

Zatímco v metodě konečných diferencí je síť složena z řádků a sloupců na sebe kolmých, v metodě konečných prvků je každá sekce ojedinelá a nevyžaduje kolmost (Pepper, Heinrich, 1992). Strukturu sítě tak lze snadno přizpůsobit složitější tvarům modelované oblasti a je možné ji i dle potřeby zahušťovat. V případě, kdy mají konečné prvky tvar trojúhelníků, nazýváme diskretizaci triangulací.

Přibližné výsledky výchozí okrajové úlohy se stanovují jako funkce z báze prostoru, tj. jako lineární kombinace bázových funkcí.

#### **4.2.3 Diferenční metoda versus metoda konečných prvků**

Metoda konečných prvků (dále pouze MKP) je skvělým nástrojem k získání představy o řešení dané úlohy, zejména pokud dokáže výstižně zvolit bázové funkce. Tato metoda se těší velké oblibě zejména v posledních téměř již třiceti letech, ovšem jejím velkým konkurentem stále zůstává diferenční metoda (dále pouze DM). V této kapitole budou srovnány hlavní výhody a nevýhody obou těchto metod. Protože toto srovnání velice pěkně zpracoval Míka et al. (2006), je následující kapitola převzata a upravena.

Přesto, že si jsou MKP a MD podobné, jsou mezi nimi i rozdíly, přičemž asi nejpodstatnějším je skutečnost, že metoda sítí vychází přímo z diferenciální rovnice, kdežto metoda konečných prvků zahrnuje slabou metodu nebo se opírá o variační princip. Obě metody sice nakonec vedou na soustavu algebraických rovnic, ale u MKP je tento proces poněkud složitější. Tento fakt se samozřejmě odráží v sestavení programů, kdy program pro MD je jednodušší nežli program pro MKP. To je ale dáno také tím, že novodobější programy pro MKP jsou konstruovány pro řešení širokého spektra úloh.

Dalším rozdílem jsou problémy při aproximaci hranice oblasti. Zatímco u MKP lze tento problém poměrně lehce vyřešit díky vyšší flexibilitě při triangulaci, u DM se často vyskytují problémy spojené s volbou sítě. Při definování vlastností materiálu lze

v MKP zadávat do každého elementu různé, což u DM působí potíže na rozhraní. Tyto potíže lze ale díky metodě integrálních identit vyřešit. Zpracování okrajových podmínek je také různé u každé metody. Zatímco DM snáze zpracovává nehomogenní Dirichletovy okrajové podmínky, MKP zase Neumannovy a Newtonovy.

Aproximace vyšších řádů se jednodušeji provádí u DM, což u MKP znamená použít v každém prvku polynomy vyšších stupňů. To má za následek mnoho parametrů a pracnost algoritmu.

Pro kterou metodu se rozhodnout a řešit s ní určitou úlohu, závisí pouze na uživateli a jeho zkušenostech. Každá metoda má svá pro a proti. Někteří uživatelé řeší tento problém kombinací obou metod, kdy využívají předností jedné nebo druhé metody.

### **4.3 Okrajové a počáteční podmínky**

K vyřešení dané úlohy je třeba doplnit dílčí diferenciální rovnice, které popisují proudění podzemní vody, patřičnými počátečními a okrajovými podmínkami.

#### **4.3.1 Počáteční podmínky**

Počáteční podmínkou zavádíme, jak se daná modelovaná oblast chová v počátečním čase, tj. v  $t = 0$ . Tuto podmínku lze obecně zapsat vztahem (Valentová, 2007):

$$H = f(x, y, z, 0)$$

V případě modelování proudění podzemní vody z tohoto vztahu vyplývá, že pro libovolný bod  $(x, y, z)$  známe hydraulickou výšku v čase  $t_0 = 0$ ,  $f$  je známá funkce.

### 4.3.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky se zadávají na hranici oblasti a předepisují, jak je neznámá funkce ovlivněna kontaktem s vnějškem oblasti.

Jak píše Mucha a Šestakov (1987), základním typem ohraničení zvodnělého prostředí jsou břehy řek, kanálů, vodních nádrží a nepropustné ohraničení na styku zvodnělého prostředí s nepropustnými horninami. Ve zvodnělém prostředí s volnou hladinou je vrchním ohraničením volná hladina podzemní vody.

Proudění podzemní vody lze popsat třemi druhy okrajových podmínek, jedná se o tyto: Dirichletova, Neumannova a Newtonova okrajová podmínka.

#### 4.3.2.1 Dirichletova okrajová podmínka

Dirichletova okrajová podmínka neboli okrajová podmínka I. druhu, vyjadřuje hodnotu neznámé funkce, kterou je nejčastěji v hydrogeologických problémech hydraulická výška. Zápis Dirichletovy okrajové podmínky podle Valentové (2007) pak vypadá takto:

$$H = f_1(x, y, z)$$

nebo  $H = f_2(x, y, z, t)$  na ploše  $S$ ,

kde  $H$  jsou hydraulické výšky,  $f_1, f_2$  jsou známé funkce a plochou  $S$  je myšlena hranice oblasti. První případ vyjadřuje stacionární okrajovou podmínku, druhý případ je okrajová podmínka závislá na čase.

#### 4.3.2.2 Neumannova okrajová podmínka

Známe-li ve všech bodech hranice hustotu toku ve směru kolmém na hranici, použijeme Neumannovu podmínku neboli okrajovou podmínku II. druhu. Tu můžeme vyjádřit následujícím vztahem:

$$v_n = -K H x_i v_i,$$

kde  $x_i = (x_1, x_2, x_3)$ ,  $v_i = (v_1, v_2, v_3)$  je vektor vnější normály hranice oblasti,  $H$  je hodnota hydraulické výšky uvnitř řešené oblasti a  $K$  je hydraulická vodivost.

V případě, kdy by se jednalo o nepropustnou hranici, tedy hranici s nulovým průtokem, určili bychom okrajovou podmínku jako  $v_n = 0$ .

#### 4.3.2.3 Newtonova okrajová podmínka

Newtonovu okrajovou podmínku použijeme tam, kde je oblast proudění v kontaktu s otevřeným vodním zdrojem, ale je mezi nimi polopropustná vrstva. Můžeme ji pak vyjádřit vztahem:

$$v_n = -K H x_i v_i,$$

kde  $x_i = (x_1, x_2, x_3)$ ,  $v_i = (v_1, v_2, v_3)$  je vektor vnější normály hranice oblasti,  $H$  je hodnota hydraulické výšky uvnitř řešené oblasti a  $K$  je hydraulická vodivost.

## 4.4 Software

Pro numerické metody existuje řada softwarové techniky, která umožňuje neoptimalnější řešení pro danou úlohu. Jedná se o komerční software jako například MODFLOW, FEFLOW, Groundwater Vistas, Groundwater Modelining System nebo AQUA3D (Scientific Software Group, 2005).

Nejužívanějším softwarem pro proudění podzemní vody je program MODFLOW, který řeší řídicí rovnice metodou sítí. Já pro svoji studii použiji software FEFLOW 5.2 a proto se budu podrobněji zabývat pouze tímto produktem.

#### **4.4.1 FEFLOW**

Simulační software FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system) představuje jeden z nejpropracovanějších souborů programů pro modelování proudění podzemní vody a transportních procesů v porézním prostředí za nasycených a nenasyčených podmínek. FEFLOW je simulační systém založený na metodě konečných prvků, který obsahuje interaktivní grafické rozhraní, nástroje pro regionalizaci a vizualizaci dat a účinné numerické techniky. Poskytuje nástroje pro tvorbu sítě konečných prvků, přiřazení modelových parametrů a okrajových podmínek, průběh simulace a vizualizaci výsledků (Baier, 2007).

### **4.5 Matematické modelování cirkulačního vrtu**

Jak již bylo řečeno v kapitole 3, cirkulační vrt je sanační technologie sloužící k odstranění kontaminantu z podzemních vod. Velkou výhodou této technologie je uskutečnitelnost toho procesu in situ, tudíž dochází k sanaci přímo v kontaminovaném prostředí. Aby byla tato technologie co nejefektivněji využita, nastupuje matematické modelování, které vizualizuje proudění podzemní vody v okolí toho sanačního vrtu. Výsledky umožňují posoudit efektivitu sanace při různých čerpaných množstvích a návratnost cirkulující vody do vrtu či dosah vytvořeného proudění.

#### **4.5.1 Faktory ovlivňující dosah cirkulační cely**

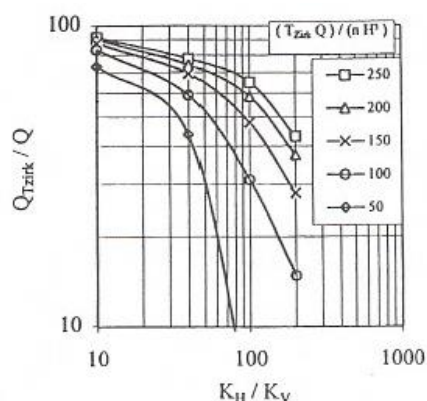
Dosahem cirkulační cely rozumíme maximální vzdálenost od cirkulačního vrtu, ve které voda ještě proudí od místa injektáže k místu čerpání.

Jak velký dosah bude mít proudění vyvolané cirkulačním vrtem (cirkulační cela) v režimu ustáleného proudění, ovlivňují především hydrogeologické parametry a technické parametry cirkulačního vrtu. Jsou to např. vertikální i horizontální hydraulická vodivost, přirozené proudění podzemní vody v okolí vrtu a mocnost akviferu. Přečerpávané množství není uvedeno, protože podle Stamm (1995), není dosah cirkulační cely v napjatém homogenním kolektoru při ustáleném proudění, ovlivněn velikostí

čerpání. Jeho tvrzení potvrdil také Nedvěd (2014), který ve své práci zjistil, že podobně to platí i pro kolektor s volnou hladinou. Ten uvádí, že při různých průtocích není pozorována výrazná změna v průběhu kumulativních křivek. Z technických parametrů hraje výraznější roli v ovlivňování dosahu proudění, především provedení perforací.

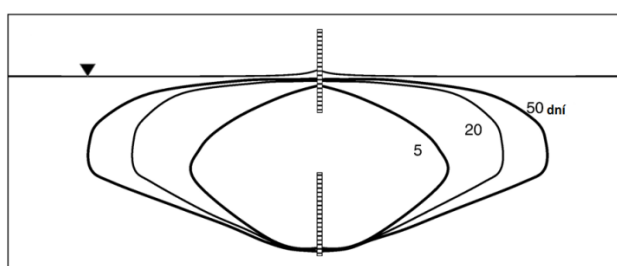
Kvůli těmto faktorům, je nutné přijmout určité předpoklady, provést vhodná zjednodušení a pamatovat na tato opatření při vyhodnocování výsledků.

Hydraulická vodivost sama o sobě neovlivňuje velikost cirkulační cely a má v tomto pojetí vliv pouze na rychlost proudění (Stamm, 1995). Významnosti se jí dostává až v koncepci s anizotropií prostředí. Ta je definována jako závislost určité veličiny, v tomto případě hydraulické vodivosti, na volbě směru. Obecně je známo, že horizontální vodivost  $K_h$  převyšuje vertikální vodivost  $K_v$ . Nejvíce tento jev pozorujeme v hydrogeologických pánvích, které jsou charakteristické cyklickým střídáním kolektorů a izolátorů. Anizotropie je tedy v tomto konceptu chápána jako podíl horizontální vodivosti ku vertikální tj.  $A = K_h/K_v$ , a vyjadřuje stupeň anizotropie. Platí tedy, že čím větší horizontální vodivost vůči vertikální, tím je cirkulační cela větší. Ve svých publikacích uvádí tento fakt nejen Stamm (1995), ale také Cunningham et al. (2004). Podle Bear (1972) dosahuje stupeň anizotropie v píscích 1,5 – 3, zatímco v jílech může stupeň anizotropie dosahovat hodnot 10 a více. Jako následek zvětšující se cirkulační cely je rostoucí interval, za který se dostane zpět do cirkulačního vrtu (obr. 7). To znamená, že čím větší dosah bude mít cirkulační cela (neboli čím větší bude stupeň anizotropie), tím menší množství vody se dostane zpět do cirkulačního vrtu za určitý čas (obr. 6).



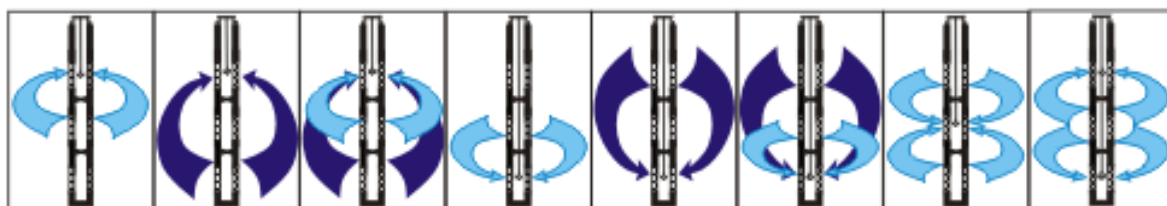
Obr. 6: Závislost relativního množství cirkulované vody v určitém čase ( $Q_{Tzirk}/Q$ ) vyjádřeného v procentech, na stupni anizotropie ( $K_H/K_V$ ) v logaritmickém měřítku (Stamm, 1995).

Díky znalosti rozložení rychlostí proudění vody v oblasti cirkulační cely, jsme schopni odhadnout intenzitu proudění v jakékoliv vzdálenosti od vrtu. To následně umožňuje zvýšení mikrobiální aktivity v akviferu, které lze dosáhnout přidáním nutrietů nebo elektronových příjemců. Tato opatření vedou ke zvýšení biodegradace a tím i zkvalitnění sanace. Avšak větší dosah cirkulační cely nemusí znamenat vyšší účinnost sanace. Jak je patrné z obrázku 7, dráha částice vody se totiž prodlouží a projde čistícím cyklem méně často.



*Obr. 7: Ilustrace drah částic vody s rostoucí vzdáleností od osy cirkulačního vrtu a jejich doby zdržení mezi extrakcí a injektáží (Johnson, Simon, 2007).*

Při vyšších mocnostech akviferu lze tento problém vyřešit násobným cirkulačním vrtem, který má tři perforace a vytvoří tedy dvě menší cirkulační cely (obr. 8). Tím se zmenší dráha molekuly vody, tedy i doba zdržení a zvýší se efektivnost sanace.

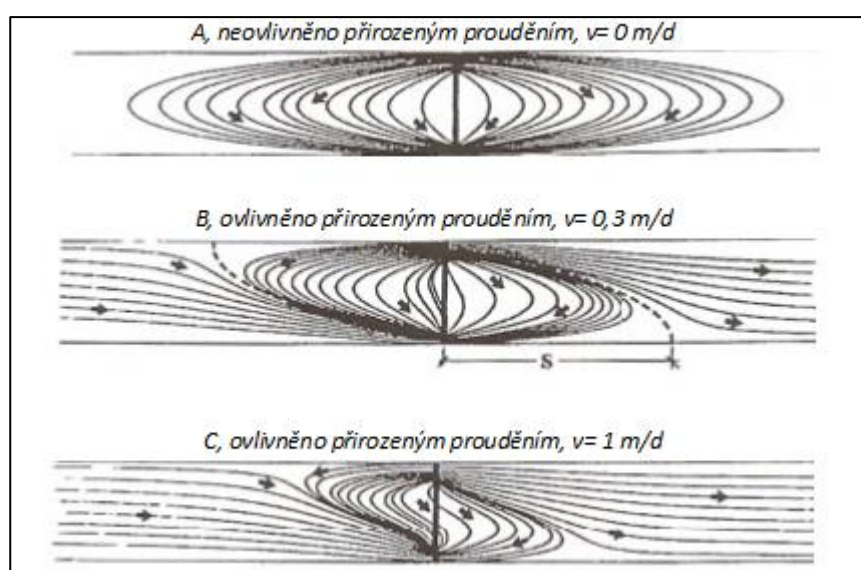


*Obr. 8: Ukázka několika možností proudění ve vícenásobném cirkulačním vrtem (IEG Technologie GmbH, 2014).*

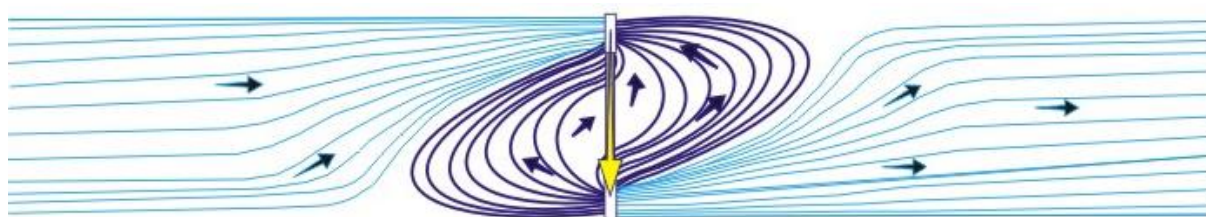
Dalším významnějším faktorem, který ovlivní dosah cirkulační cely, je přirozené proudění podzemní vody. Tento jev popsal Stamm (1995) a připojil názorný obrázek



(obr. 9). Na něm je řez oblastí s cirkulačním vrtem, který je paralelní s přirozeným prouděním. V oblastech bez přirozeného proudění se cirkulační cela zvětšuje (obr. 9a) a naopak se zvyšující se rychlostí přírodního proudění je cirkulační cela menší a asymetrická (obr. 9c). Dochází k úniku vody po směru proudění, tím pádem nedochází k její recirkulaci a sanace je tak méně účinná. O tomto problému pojednává také IEG Technologie GmbH (2014) na obr. 10, kde je za stejných podmínek názorný obrázek cirkulační cely v reverzním módu, stejně jako je tomu na studované lokalitě v Hradci Králové.



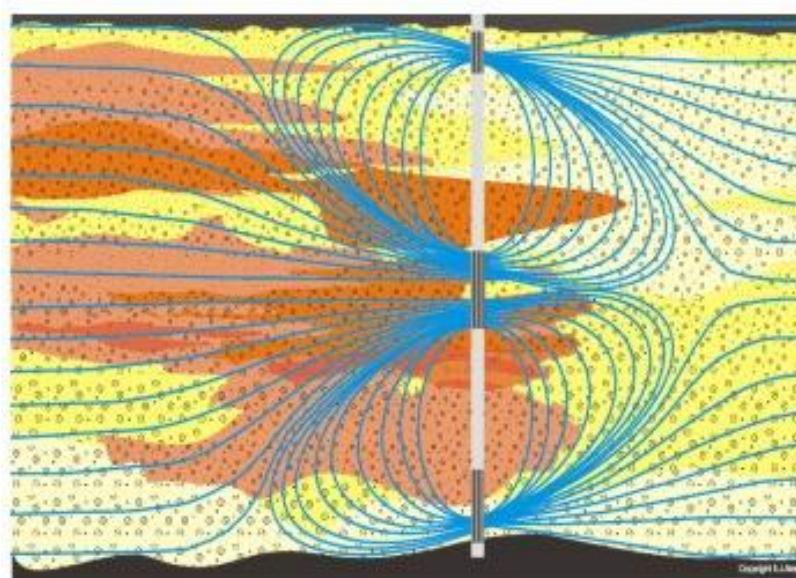
Obr. 9: Řez proudovým polem v oblasti s cirkulačním vrtem pro odlišné hodnoty rychlostí proudění podzemní vody (Stamm, 1995).



Obr. 10: Řez proudovým polem v oblasti cirkulačního vrtu v reverzním módu (IEG Technologie GmbH, 2014).

Mocnost akviferu také hraje svou roli při dosahu cirkulační cely a souvisí hlavně se vzdáleností perforovaných částí výstroje, od kterých se odvíjí dosah cirkulační cely.

Cirkulační vrt obsahuje dvě perforované části, které musí být odděleny těsnicí jednotkou, ve které je případně umístěn čistící reaktor. Je tedy logické, že kolektor by měl být mocný alespoň několik metrů. Miller et al. (1997) doporučuje jako minimální mocnost kolektoru 3 m. Současně by ale kolektor neměl být mocný až příliš. Při velké vzdálenosti perforovaných částí vrtu by znamenalo pro molekulu vody velkou vzdálenost, kterou by musela urazit. Tím pádem by se zpomalil čistící cyklus a sanace by nebyla efektivní. V takovém případě můžeme opět použít vícenásobný cirkulační vrt se třemi perforacemi, díky kterým se vytvoří dvě cirkulační cely.



*Obr. 11: Řez proudovým polem v oblasti několikanásobného cirkulačního vrtu (IEG Technologie GmbH, 2014).*

Mezi významnější parametry cirkulačního vrtu, které ovlivňují dosah proudění, patří hlavně technické zpracování perforací ve výstroji. Perforace mohou být umístěny v různé vzdálenosti od sebe, mohou být libovolně dlouhé nebo dokonce každá perforace v jedné výstroji jinak dlouhá. Významnější roli z předchozího výčtu hraje především vzdálenost perforací, což ve své práci potvrdil také Nedvěd (2014). I když si vzdálenost perforací můžeme zvolit, např. prodloužíme horní a dolní perforaci nebo posuneme obě perforace směrem k sobě, stále z velké části závisí na mocnosti akviferu. Při větší vzdálenosti perforací bude větší dosah cirkulační cely, zároveň ale bude sanace pomalejší kvůli vzdálenosti, kterou musí molekula vody překonat. Naproti tomu blíže umístěné

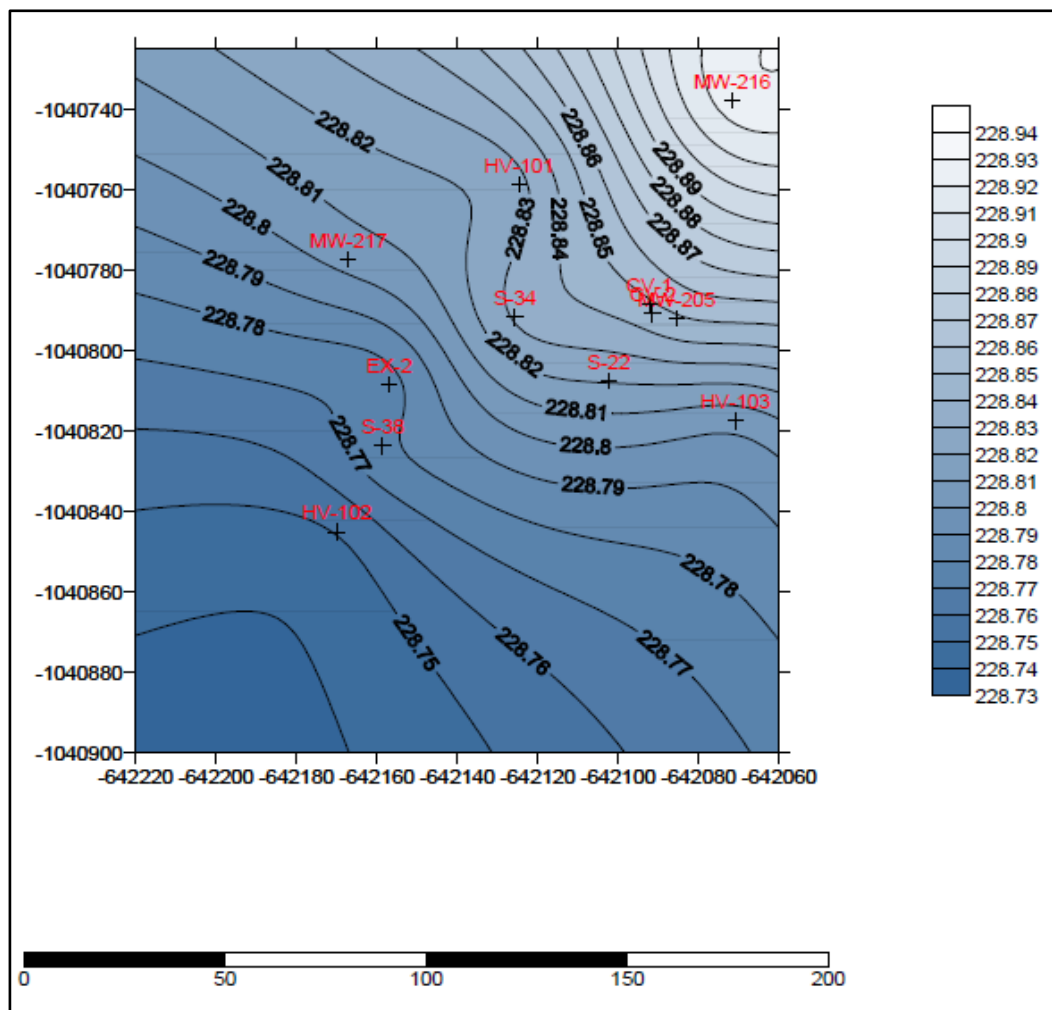
perforace sice nebudou mít takový dosah, ale sanace bude probíhat rychleji, protože molekula vody projde vícekrát cyklem čištění. Problém s dosahem cirkulační cely u různých vzdáleností perforací, lze vyřešit intervalem okolních cirkulačních vrtů. Například u vrtů s velkou vzdáleností perforací, kdy má cirkulační cely poměrně velký dosah, nepotřebujeme na daném území tolik cirkulačních vrtů, jako by tomu bylo u vrtů s malou vzdáleností perforací. V takovém případě sice je sanace rychlejší, ale je třeba umístit na daném území více vrtů nežli tomu je v předchozím případě.

## **5 Konceptní model**

Protože konceptní model formuluje danou úlohu, která je jasně definovaná a řešitelná pomocí jedné z numerických metod, při jeho tvorbě pomáhá zpracovateli utřídit si dosavadní informace o modelované oblasti a následně lze podle tohoto modelu postupovat při tvorbě dané simulace.

### **5.1 Metodika práce**

Hlavním cílem práce je simulace proudění podzemní vody na zkoumané lokalitě. Před tím, než byl použit software Feflow 5.2 pro vytvoření matematického modelu, bylo nutné přesně vymežit modelovanou oblast a následně poskytnutá a aktualizovaná data nejprve zpracovat v programu Surfer 8. Do tohoto programu byla importována data souřadnic vybraných vrtů v souřadném systému S-JTSK spolu s hydraulickou výškou. Po zadání velikosti oblasti program Surfer 8 extrapoloval mapu hydroizohyps. Vznikla tak přehledná mapa hydraulických výšek zkoumané lokality (obr. 12), která výrazně usnadnila práci při prvotním definování oblasti a při zadávání okrajových podmínek do programu Feflow 5.2.



Obr. 12: Mapa hydroizohyps zpracována v programu Surfer 8. V pravé části obrázku se nachází grafická stupnice hydraulické výšky v m n. m., ve spodní části se nachází měřítko v metrech. Na osách x a y je souřadný systém S-JTSK.

Z výstupního obrázku je na první pohled patrné, jak se mění hydraulická výška. Nejvyšších hodnot dosahuje v pravém horním rohu a nejnižších v levém dolním rohu. Protože proudnice jsou kolmé na hydroizohypsy, lze předpokládat směr proudění podzemní vody jihozápadním směrem. Po ukončení simulace tyto domněnky ověříme.

Použitá data a informace byla převzata z Dekonta, a.s. (2013). Opětovné zaměření vrtů a výška hladiny podzemní vody byla mnou osobně aktualizována.

Tab. 3: Aktualizovaná data studované oblasti

<b>vrť</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>HPV (m n.m.)</b>
S-22	-642102,35	-1040807,34	228,82
S-34	-642125,66	-1040791,7	228,85
S-38	-642158,54	-1040823,69	228,8
HV-101	-642124,62	-1040758,52	228,81
HV-102	-642170	-1040845,08	228,74
HV-103	-642070,85	-1040817,45	228,79
MW-216	-642071,6	-1040737,6	228,94
MW-217	-642167,1	-1040777,29	228,81
MW-205	-642085,39	-1040791,93	228,87
EX-2	-642156,97	-1040808,34	228,75
CV-1	-642092,22	-1040788,21	228,85
CV-2	-642091,4	-1040790,83	228,83

## **5.2 Koncepční model studované oblasti neovlivněné cirkulačním vrtem**

Jedná se o 3D model v nehomogenním nasyceném prostředí v podmínkách ustáleného proudění.

### **5.2.1 Parametry oblasti**

Studovaná lokalita nepředstavuje celý areál DS PHM Benzina s.r.o., ale pouze jeho část. V kontaminantem postižené oblasti byla zvolena oblast obdélníkového půdorysu o délce stran 160 x 177 m, tj. plochou 28 320 m<sup>2</sup>. Mocnost modelované oblasti byla zvolena jako výška zvodně, tj. 8,7 m. Modelovaná oblast je tedy v prvním kroku zadána jako kvádr o zmíněných rozměrech.

Podle geologické dokumentace tvoří tuto oblast dvě vrstvy. V následujícím textu budou označovány jako spodní a horní vrstva.

Spodní vrstva, která je zdola v nadmořské výšce 221 m n. m. omezena málo propustným podložím z křídových sedimentů, je tvořena písčitém štěrskem a má hodnotu

hydraulické vodivosti  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s. Mocnost této vrstvy je proměnlivá v závislosti na rozhraní mezi touto a horní vrstvou. Zmiňované rozhraní se nenachází v konstantní nadmořské výšce, ale kolísá mezi 227,6 a 229,5 m n. m. V každém bodě rozhraní byla jeho nadmořská výška aproximována na základě známých hodnot ve 12 bodech (v místech vrtů). Horní vrstva, tvořená písčítým jílem, má hodnotu hydraulické vodivosti  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Shora je omezena volnou hladinou podzemní vody, která je v prvním kroku zadána ve výšce 229,7 m n. m. Přesná poloha volné hladiny je součástí řešení této úlohy.

### **5.2.2 Okrajové podmínky**

Díky výstupnímu obrázku z programu Surfer 8 (obr. 12) bylo snadné definovat okrajové podmínky. Na vertikální hranici modelované oblasti byla stanovena Dirichletova podmínka, která je rovna hydraulické výšce. Vertikální složku rychlosti proudění jsme zanedbali, což je při malém gradientu přijatelné zjednodušení. Díky zvolenému tvaru modelované oblasti není tato předepsaná podmínka konstantní. Klesá nebo naopak stoupá po hranici (patrné z předchozího obr. 12) mezi hodnotami 228,73 – 228,93 m n. m. Spodní hranici modelované oblasti, která se chová jako nepropustné podloží, byl předepsán nulový průtok, tj. Neumannova okrajová podmínka. Stejná podmínka byla zavedena u horní hranice.

### **5.3 Konceptní model studované oblasti ovlivněné cirkulačním vrtem**

Konceptní model zkoumané oblasti s cirkulačním vrtem je stejný, jako v předchozí kapitole 5.2. Schází pouze předepsat cirkulační vrt. Ten bude zaveden do míst určených pro tuto sanační technologii jako zdrojový člen.

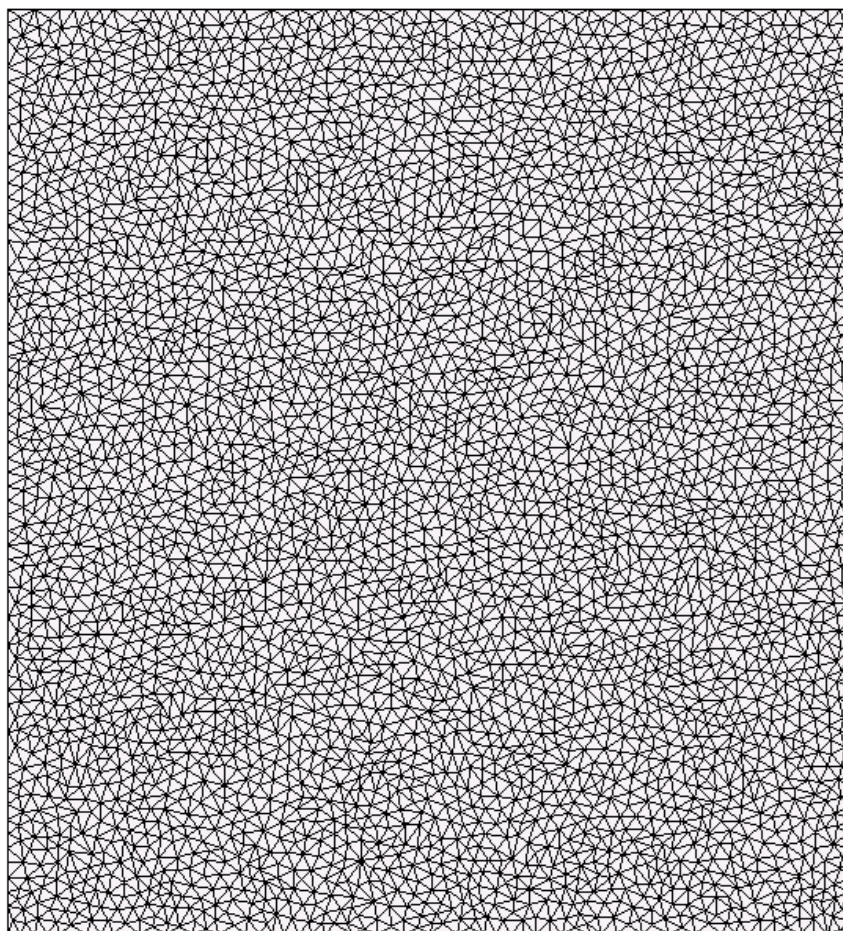
## **6 Řešení**

Řešení úlohy proběhlo v programu Feflow 5.2. Následně byly popsány jednotlivé kroky, které bylo nezbytné provést před samotným spuštěním simulace.

## 6.1 Tvorba polygonu a trigonální síť

Prvním krokem k úspěšné simulaci je definování tvaru modelované oblasti. Před tím je ale nutné zvolit vhodnou šířku pracovního okna, kterou jsem vzhledem k velikosti modelované oblasti zvolila na 300 m. Dále je třeba definovat počáteční souřadnice. Ty nebyly zvoleny jako krajní roh oblasti, ale byly upraveny tak, aby modelování bylo přehlednější. V dalším kroku byl zaveden jednoduchý polygon obdélníkového tvaru, který reprezentuje tvar oblasti a kterému byly přiřazeny skutečné souřadnice.

Tomuto finálně vymezenému polygonu byla v dalším kroku vygenerována geometrická síť. Geometrická síť je tvořena superelementy, které jsou spojeny v uzlech, ve kterých dochází k výpočtům parciálních diferenciálních rovnic a tedy k řešení popisu proudění podzemní vody. Počet elementů může být libovolný, při složitějších tvarech řešené oblasti je možné síť podle potřeby zahušťovat. V případě trojúhelníkové sítě lze jednotlivými uzly dokonce pohybovat, což se v mé úloze vyjevilo jako velice užitečné při umístění cirkulačního vrtu. Počet elementů volíme podle uvážení, nesmí být příliš nízký, ale ani příliš vysoký. Obecně sice platí, že čím hustší bude síť, tím lze předpokládat přesnější výsledky, ale na druhé straně se však prodlužuje doba výpočtu a je nutné uvažovat nepřesnosti, které mohou vzniknout při velkém množství zkreslených bodů. Elementy geometrické sítě mohou mít podobu různých mnohoúhelníků např. trojúhelníky, čtverce, obdélníky a jiné. V mém případě byla vybrána trojúhelníková síť a počet elementů byl stanoven na 5000.



*Obr. 13: Výsledná trojúhelníková síť studované oblasti.*

## **6.2 Tvorba jednotlivých vrstev**

Před začátkem této kapitoly, je třeba nejprve upřesnit termín z programu Feflow, který bude následně hojně používán. Jedná se o pojem „slice“. Tímto pojmem rozumíme rozhraní dvou modelových vrstev a horní i spodní hranici modelované oblasti.

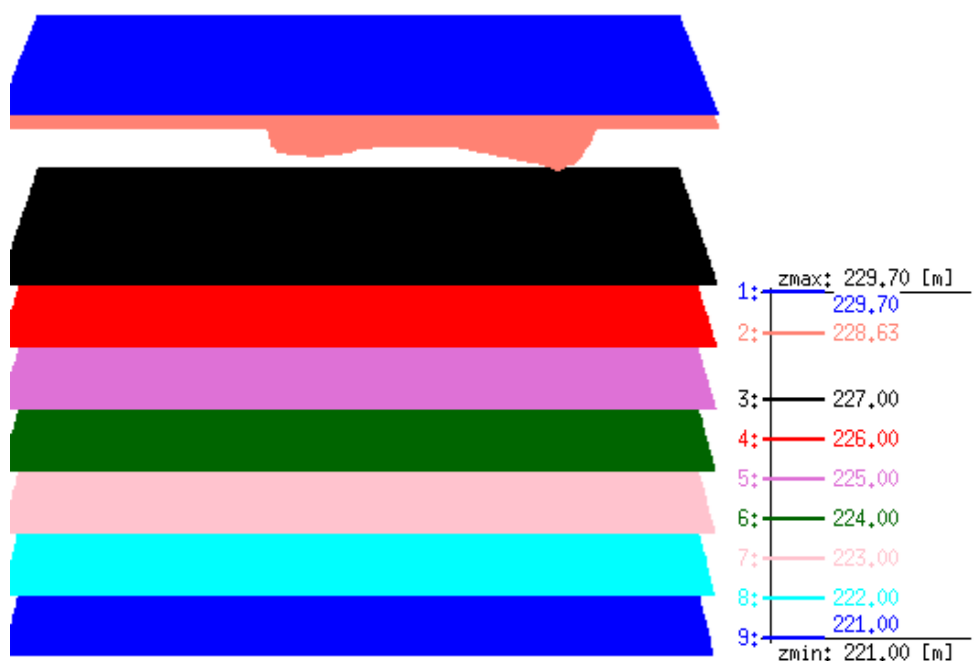
Na základě výše popsaných hydrogeologických parametrů (kap. 5.2.1), byla modelovaná oblast rozdělena do 8 modelových vrstev, tj. 9 slices.

Kvůli komplikované hydraulické výšce, která leží právě na litologickém rozhraní dvou odlišných materiálů, probíhala tvorba vrstev následovně.

Pro zvolené rozhraní, které představoval 2. slice, bylo nejprve zapotřebí vytvořit textový dokument s jednotlivými vrty, které se nacházejí v modelované oblasti, s jejich příslušnými souřadnicemi  $x$  a  $y$ . Třetí souřadnice,  $z$ , představovala nadmořskou výšku



litologického rozhraní. Po importování souboru ale bylo zjištěno, že se s ostatními slices překrývá z důvodu špatné extrapolace dat v místech, kde byly velké mezery, a chyběla příslušná data. Bylo tedy zapotřebí vyexportovat všechna data v příslušném slice, opravit hodnoty, které byly nereálné a takto upravený textový soubor nahrát zpět do programu. Nyní bylo možné definovat zbylé slices. První byl definován pouze 20 cm nad zvlněné rozhraní, tj. dosahoval nadmořské výšky 229,7 m nad nepropustné podloží. Zbýlých 7 slices bylo vloženo pod zvlněné rozhraní. Každá vrstva, kromě té pod zvlněným rozhraním, byla mocná 1 m (obr. 14).



Obr. 14: Rozdělená studovaná oblast na modelové vrstvy s příslušnou nadmořskou výškou.

Po takto vymezených slices, bylo potřeba definovat, o jaké prostředí se jedná a každému slice přiřadit jeho charakteristiku. Jedná se tedy o stacionární proudění v saturevaných podmínkách. První slice byl definován jako Free&movable, což znamená, že se bude chovat jako volná hladina. Poslední slice byl definován jako Fixed, takže nebude pohyblivý. Všechny ostatní slices mezi těmito dvěma byly definovány jako Unspecified, dokonce i zvlněné rozhraní, což umožní volný vertikální pohyb slices při respektování okrajových podmínek volné hladiny a zachování hydraulických vodivosti vrstev podle původního zadání.

### 6.3 Zadání okrajových podmínek a hydraulické vodivosti

Před samotným zahájením simulace již zbývá pouze vymezit počáteční a okrajové podmínky spolu s hydraulickou vodivostí.

Jako okrajovou podmínku po hranici volím Dirichletovu okrajovou podmínku, která je definována hydraulickou výškou. Ta ale není, kvůli zvolenému tvaru oblasti, konstantní. Využiji proto mapu hydroizohyps z programu Surfer 8, kde lze tyto proměnlivé hodnoty lehce vyčíst. Hodnoty hydraulické výšky, tzn. okrajové podmínky, zadávám tak, aby program sám interpoloval zbylé hodnoty po hranici této oblasti. Protože je tato okrajová podmínka platná ve vertikálním směru modelované oblasti, bylo zapotřebí ji zkopírovat do všech zbylých slices. Dolní podstavě, která leží na nepropustném podloží, byl zadán nulový průtok hraniční plochou, tj. Neumannova okrajová podmínka. Horní plochou nepřitéká do oblasti žádná voda a tato oblast je tedy také definována Neumannovou okrajovou podmínkou.

Hydraulickou vodivost volím pro první vrstvu s písčítým jílem, tj. mezi první a druhý slice,  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Do zbylých vrstev definuji hydraulickou vodivost pro písčítý štěrk 1000 x větší, tj.  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s.

### 6.4 Zavedení cirkulačního vrtu

Cirkulační vrt byl předepsán na skutečné souřadnice vrtu CV-1 jako zdrojový člen. Ten předepisujeme ve stejné nabídce jako okrajové podmínky, s tím rozdílem, že zvolíme okrajovou podmínku IV. druhu. Tento druh okrajové podmínky předepisujeme pro studny nebo vrty, která představuje v tomto konceptu zdrojový člen. V závislosti na směru, kterým chceme čerpat vodu, předepisujeme zasakování nebo injektáž. V mé úloze jsou kontaminantem ropné látky, které mají hustotu nižší než voda a drží se při hladině podzemní vody. Je tedy zapotřebí zvolit opačný směr přečerpávání než je běžné, tj. horní perforací se bude čerpat, zatím co dolní perforací injektovat.

Horní perforovaný úsek byl zvolen metr dlouhý v nadmořské výšce 227 m, tj. 5 m p. t. Spodní perforace byla definována opět jako metr dlouhá v nadmořské výšce 222

m, tj. 10 m p. t. Obě perforace jsem tedy definovala metr dlouhé a čtyři metry od sebe vzdálené.

Do těchto perforací jsem pomocí výše zmíněného zdrojového členu postupně předeepsala přečerpávaná množství 0,1 l/s a 20x větší, tj. 2 l/s.

Kromě vizualizace tvaru cely bylo dále spočítáno procentuální zastoupení vody, která po injektování z vrtu do saturované zóny neuniká po směru přirozeného proudění podzemní vody, ale proudí uvnitř cirkulační cely. Po provedení výpočtu byl zvolen reprezentativní počet bodů v okolí cirkulačního vrtu (celkem 100 bodů), které byly výchozími body pro sledování proudnic. Procentuální podíl cirkulující vody byl následně určen jako podíl bodů, jejichž proudnice směřují od místa injektáže k místu čerpání, tj. proudí uvnitř cirkulační cely.

## 6.5 Možnosti simulace

Program Feflow 5.2 nabízí spoustu možností vizualizace modelované oblasti. Před samotnými výsledky nejprve uvedu některé funkce, které program poskytuje.

Po spuštění simulace proudění podzemní vody, program nabízí v záložce Halt & view results několik vizualizací oblasti. Kromě jednoduché mapy hydroizohyps nebo vektorů rychlosti, lze také oblast zobrazit jako např. příčný řez s barevným vyznačením hydraulických výšek, přičemž sám uživatel zvolí velikost řezu (úsečky) a jeho směr v modelované oblasti. Další užitečnou funkcí v této záložce je Particle tracking, která umožňuje vykreslení trajektorií jednotlivých částic vody v modelované oblasti. Nabízí několik možností nastavení, např. také vykreslení trajektorií v okolí vrtu, které bude využito v kapitole 6.8. Velice efektivní je funkce 3D pohledu, kdy je v trojrozměrném vyobrazení zobrazena celá modelovaná oblast, ve které je současně zobrazena spolu s měřítkem mapa hydroizohyps, barevná simulace hydraulických výšek rovněž se zvolenou geometrickou sítí.

Druhou záložkou, kterou program nabízí a která byla v této práci několikrát využita, je Flux fluid analyser. Díky této nabídce je možné vypočítat velikost průtoku, který projde jistou částí modelu. Lze zvolit proudění v horizontálním nebo vertikálním směru pouze v definované vrstvě nebo horizontální průtok celou oblastí (tzn. všemi

vrstvami modelu). Dále lze zvolit výpočet velikosti průtoku jedním bodem geometrické sítě, jedním či několika elementy nebo jakoukoli úsečkou, kterou lze libovolně vložit do oblasti. Při výpočtech velikosti průtoku jakoukoli oblastí modelu musíme mít na paměti, že výsledky nemusí být zcela přesné hodnoty. Tyto nepřesnosti jsou způsobeny tím, že z relativně správných výsledných hodnot hydraulických výšek dostáváme hodnoty objemové hustoty toku a hodnoty průtoku numerickým derivováním, které je zatíženo chybou aproximace (Diersch H. - J. G., 2005). Nicméně je to velice užitečná a doplňková funkce pro přibližný odhad velikosti průtoku celou nebo pouze částí modelované oblasti.

Poslední záložkou, která byla v této práci bohatě využívána při simulaci proudění podzemní vody v okolí cirkulačního vrtu, je 3D Projection. V nabídce je opět několik funkcí, které nabízejí více či méně účinné projekce modelované oblasti. Tyto simulace se dají jednoduše otáčet a přibližovat tak, aby byl výsledný obrázek co nejefektivnější. Funkce 3D Projection byla v této úloze nejvíce používána k vizualizaci cirkulační cely.

## **7 Výsledky**

Nežli přejdeme k samotným výsledkům a vizualizacím, nejprve si ujasněme, jaké je zadání úlohy.

### **7.1 Zadání úlohy**

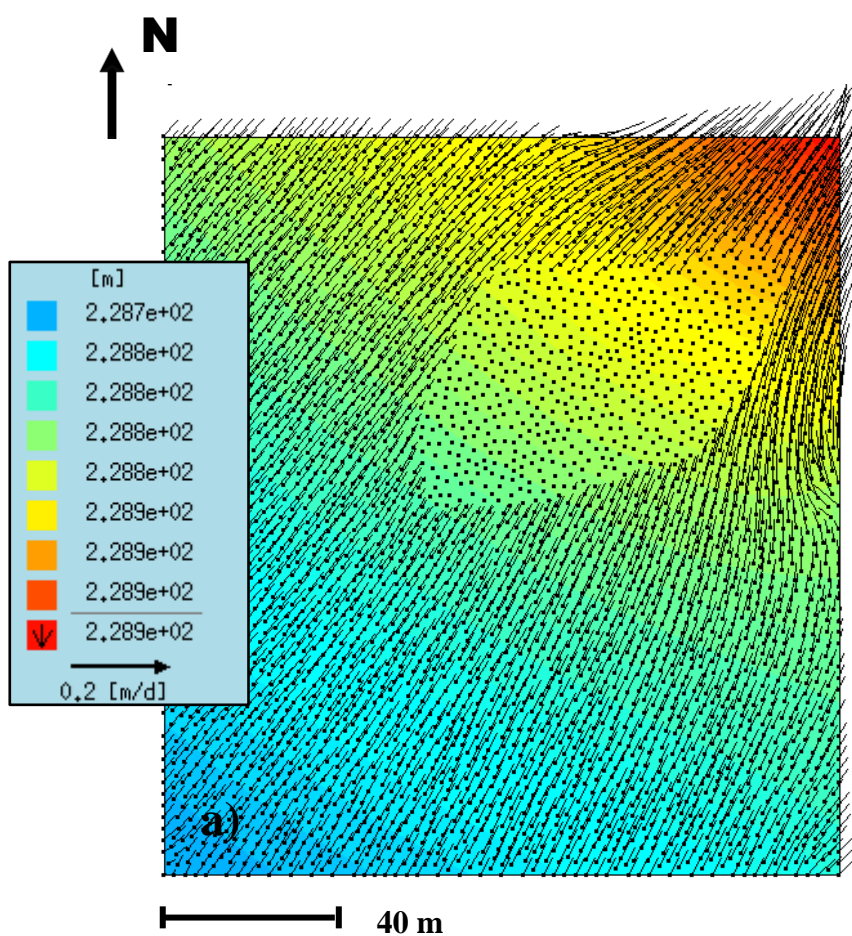
Budeme se zabývat následující úlohou.

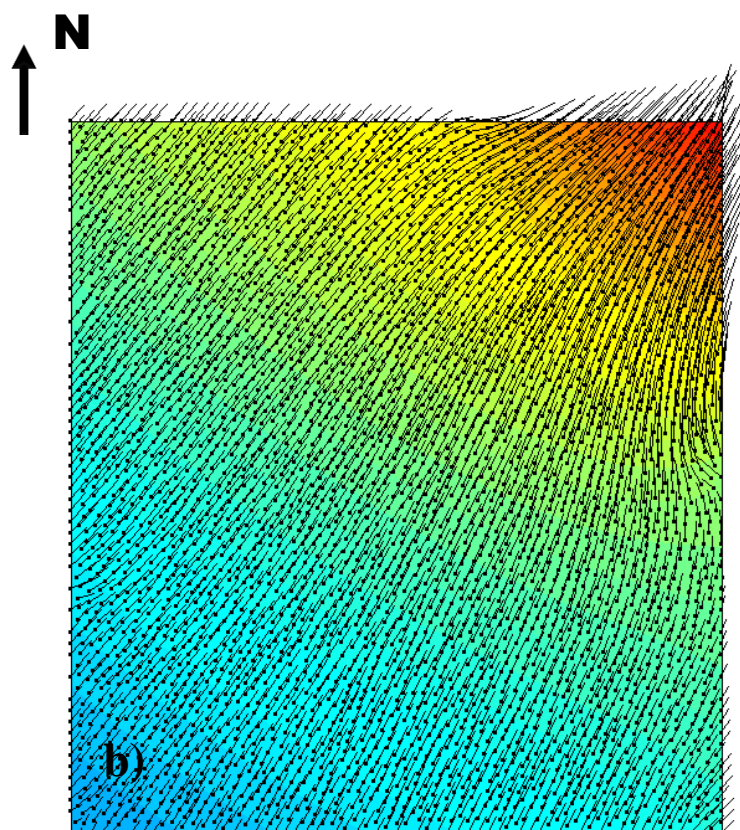
V prvním kroku vytvoříme v programu Feflow 5.2 matematický model proudění podzemní vody na studované lokalitě v Hradci Králové, který poskytne základní informace o proudění podzemní vody. Výsledky budou následně porovnány a diskutovány s výsledky stejné úlohy, ale s rozdílně definovaným koncepčním modelem.

V druhém kroku bude do již vytvořeného matematického modelu zapracován sanační cirkulační vrt. Přečerpávaná množství budou dvě, což umožní sledování a porovnání proudění podzemní vody v závislosti na velikosti čerpání.

## 7.2 Výsledky úlohy bez cirkulačního vrtu

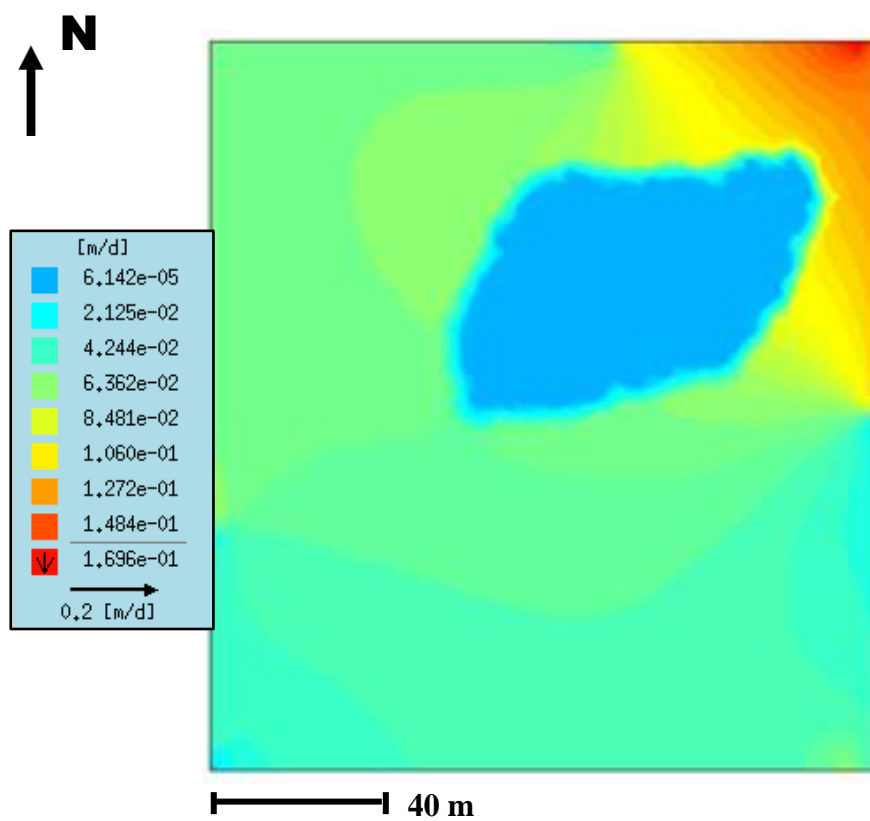
Po vygenerování matematického modelu proudění podzemní vody na lokalitě v Hradci Králové, dostáváme přehlednou mapu proudového pole v oblasti zatím ještě bez cirkulačního vrtu.



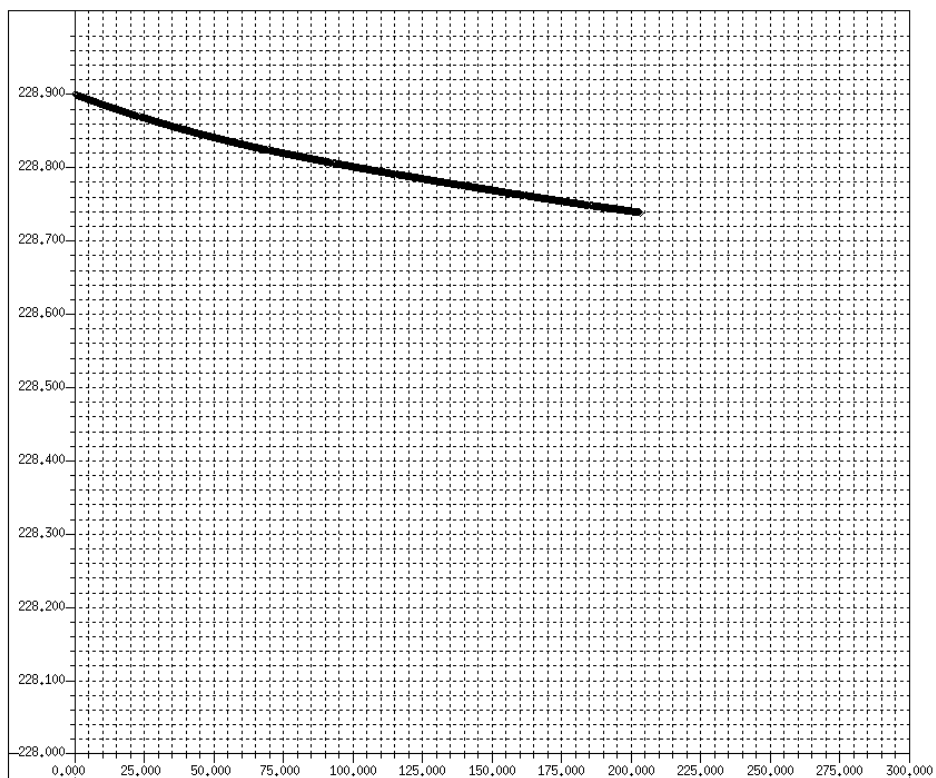


*Obr. 15: Simulace proudění podzemní vody 2,3 m p.t. (obr. 15a) a 10 m p.t. (obr.15b).*

Z výsledné simulace proudění podzemní vody (obr. 15) můžeme říci, že voda vykazuje proudění ve směru J, J-Z. Z barevné vizualizace je zřejmá nejvyšší hydraulická výška v pravém horním rohu a nejnižší v levém dolním rohu. Z modelu je patrný rozdíl proudění podzemní vody s hloubkou pod terénem. V malé hloubce (obr. 15a) se projevuje vliv méně propustného prostředí, kdy jsou v horní polovině obrázku výrazně menší vektory rychlosti, tj. voda v méně propustném prostředí proudí velice pomalu. Tento jev je dobře pozorovatelný na obr. 16, kde jsou barevně znázorněny hodnoty objemové hustoty toku. Protože méně propustné prostředí bylo zadáno pouze v jedné hloubce (2,3 m p. t.), neprojevuje se toto prostředí hlouběji pod povrchem a proudění zde vypadá stejně jako na obr. 15b.



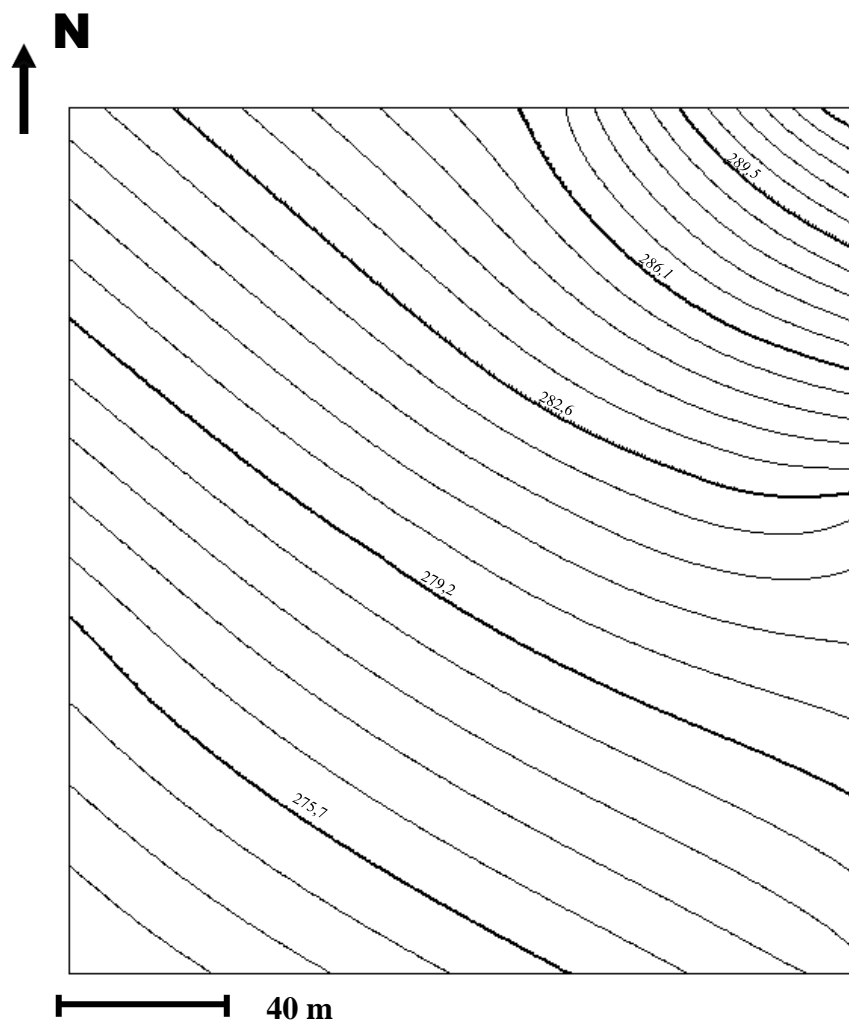
*Obr. 16: Simulace objemové hustoty toku 2,3 m p. t.*



*Obr. 17: Průběh výšky volné hladiny ve směru proudění podzemní vody, osa x – vzdálenost v m, osa y – nadmořská výška v m n. m.*

Průběh výšky volné hladiny celou oblastí je veden po směru proudění podzemní vody (obr. 17). Řez byl konstruován kolmo na hydroizohypsy, takže odpovídá směru proudnic.





Obr. 18: Mapa hydroizohyps 2,3 m p. t.

Protože proudnice jsou kolmé na hydroizohypsy, potvrzuje vykreslená mapa hydroizohyps (obr. 18) směr proudění podzemní vody J, J-Z směrem. Stejně tak dává zapravdu i domněnce z kap. 5.1, kdy byl pod vygenerovanou mapou hydroizohyps z programu Surfer 8 (obr. 12), naznačen předpokládaný směr proudění podzemní vody. V pravém horním rohu oblasti, kde hydraulická výška dosahuje nejvyšších hodnot, pozorujeme vyšší hustotu hydroizohyps. To svědčí o vyšším spádu volné hladiny. Díky tomu dosahuje objemová hustota toku vyšších hodnot nežli na opačné straně oblasti. Tento fakt lze dobře pozorovat na obr. 15, kde se projevují vyšší hodnoty objemové hustoty toku delším vektorem rychlosti.

Z vygenerovaných hydraulických výšek jsem vypočítala hodnotu hydraulického gradientu na 0,08%.

Velikost horizontálního průtoku celou oblastí, který byl vypočten přes funkci Fluid flux analyser, byl stanoven přibližně na hodnotu 93,3 m<sup>3</sup>/d, tj. 1,08 l/s.

Pro zjištění shody vypočtených dat s daty naměřenými v terénu (výška hladiny podzemní vody), je možné díky pozorovacím bodům, které lze zadat do programu, tyto hodnoty porovnat (tab. 4). Pozorovacích bodů bylo vytyčeno celkem 10, umístěny byly do skutečných souřadnic existujících vrtů. Tyto body se nacházejí v různé vzdálenosti od cirkulačního vrtu. Jejich umístění lze pozorovat na obr. 19, kde jsou ty samé pozorovací body použity ve stejné úloze, ale s jinak zvoleným koncepčním modelem. Cirkulační vrt, se kterým budeme pracovat později, nese označení CV-1.

Tab. 4: Porovnání výsledků s naměřenými a vypočtenými daty.

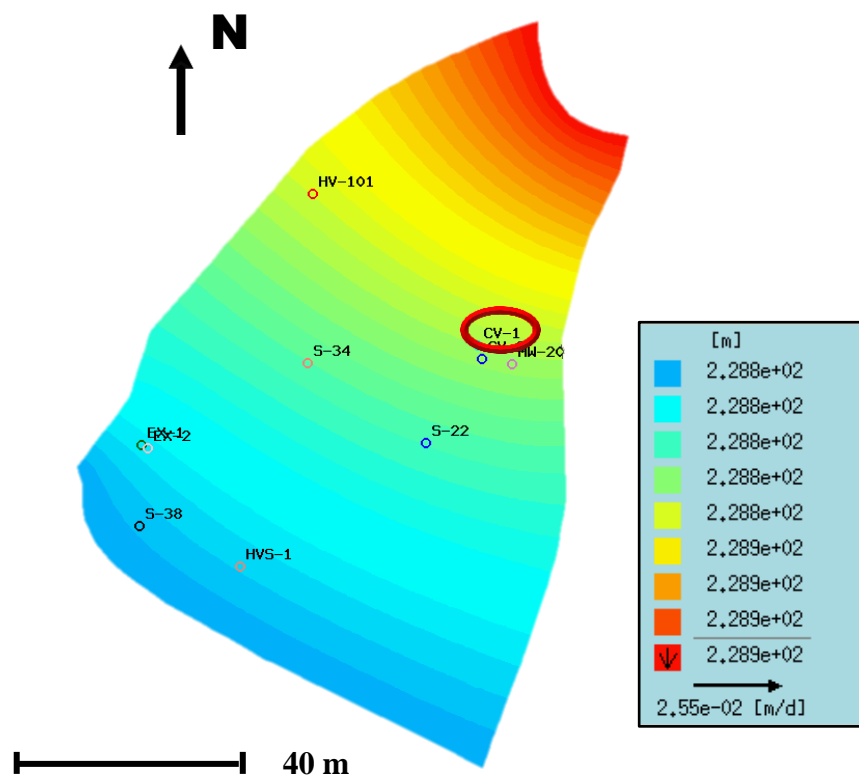
Vrt	Hladina (m n.m.)	
	Měřená	Výsledná
S-22	228,82	228,81
S-34	228,85	228,81
S-38	228,8	228,78
HV-101	228,81	228,84
MW-205	228,87	228,83
EX-1	228,62	228,79
EX-2	228,75	228,79
CV-1	228,85	228,83
CV-2	228,83	228,83
HVS-1	228,92	228,78

Z výsledných hodnot vygenerovaných programem Feflow 5.2 vidíme velice uspokojivý závěr. Téměř všechny hodnoty jsou si velice podobné, v jednom případě dokonce totožné. Dvě hodnoty se sice liší o více než deset centimetrů, avšak pozorovací body, ve kterých byly hodnoty určeny, jsou v dostatečné vzdálenosti od CV-1, kde bude docházet k simulaci cirkulačního vrtu. Toto zjištění je velice příznivé, protože máme jistotu, že numerický model se velmi shoduje s naměřenými daty. Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými daty mohou být způsobeny stárnutím výstroje vrtu, kdy nedochází k úplnému kontaktu prostředí s akviferem.

### 7.2.1 Porovnání výsledků stejné úlohy s jiným koncepčním modelem

Předchozí výsledky budou následně porovnány s výsledky stejné úlohy, ale jiným koncepčním modelem. Přesněji řečeno s jinak definovanou geometrií oblasti, rozdílně zadanými okrajovými podmínkami a hydraulickou vodivostí. Výsledná data a informace o úloze jsou převzata z Kukačka et al. (2014).

Modelovaná oblast není definovaná jednoduchým kvádrem, jako je v případě mé úlohy, nýbrž je vymezena přírodními podmínkami. Spodní hranice, je stejně jako v mé úloze tvořena nepropustným podložím. Horní hranice je pak vymezena volnou hladinou. Z bočních stran je oblast určena vertikální plochou, kdy dvě strany modelované oblasti kopírují předpokládaný průběh hydroizohyps, zbylé dvě strany reprezentují průběh proudnic. Nejedná se tedy o rovné úsečky, ale o přirozeně oblé hranice (obr. 19).



Obr. 19: Vypočtená hladina podzemní vody spolu s pozorovacími body a červeně vyznačeným cirkulačním vrtem CV-1.

Oblast je rozdělena do čtyř vrstev, přičemž každé je přiřazena jiná hodnota hydraulické vodivosti.

Spodní hranice, která leží v nadmořské výšce 221 m, je spolu s horní hranicí, která dosahuje výšky 229 m n. m., určena stejně jako v mé úloze, nulovým průtokem přes hranici, tj. Neumannovou okrajovou podmínkou. Vertikální hranice jsou dvojího typu. Tam, kde je hranice oblasti tvořena předpokládaným průběhem hydroizohyps, je zadána Dirichletova okrajová podmínka, která je, na rozdíl od mé okrajové podmínky, konstantní po ucelených částech hranice. Tyto části jsou dvě. Jedna má hodnotu hydraulické výšky 228,92 m n. m., druhá, protější hranice, má hodnotu hydraulické výšky 228,77 m n. m. Zbylé dvě vertikální hranice reprezentují průběh proudnic, je zde tedy zvolena Neumannova okrajová podmínka s nulovým průtokem hranicí.

Jak se liší výsledky na základě jinak zvoleného koncepčního modelu, je shrnuto v tab. 5. Výsledné hodnoty hladiny podzemní vody jsou téměř totožné, neshodují se pouze tři hodnoty o pouhý centimetr, což je zanedbatelný rozdíl. Znamená to, že na studovanou oblast nemá vliv žádná ze zadaných podmínek (popsáno výše) a záleží na řešiteli, jakým způsobem se rozhodne danou oblast konstruovat.

*Tab. 5: Porovnání výsledků mé modelované úlohy (model I) se stejnou úlohou při rozdílně zadaných podmínkách (model II).*

Vrt	Hladina (m n.m.)	
	Model I	Model II
S-22	228,81	228,81
S-34	228,81	228,82
S-38	228,78	228,78
HV-101	228,84	228,85
MW-205	228,83	228,83
EX-1	228,79	228,79
EX-2	228,79	228,79
CV-1	228,83	228,84
CV-2	228,83	228,83
HVS-1	228,78	228,78

### 7.3 Výsledky úlohy s cirkulačním vrtem

Do připraveného modelu, z něhož bylo zjištěno, jak vypadá přirozené proudění podzemní vody, bylo možné zapracovat cirkulační vrt.

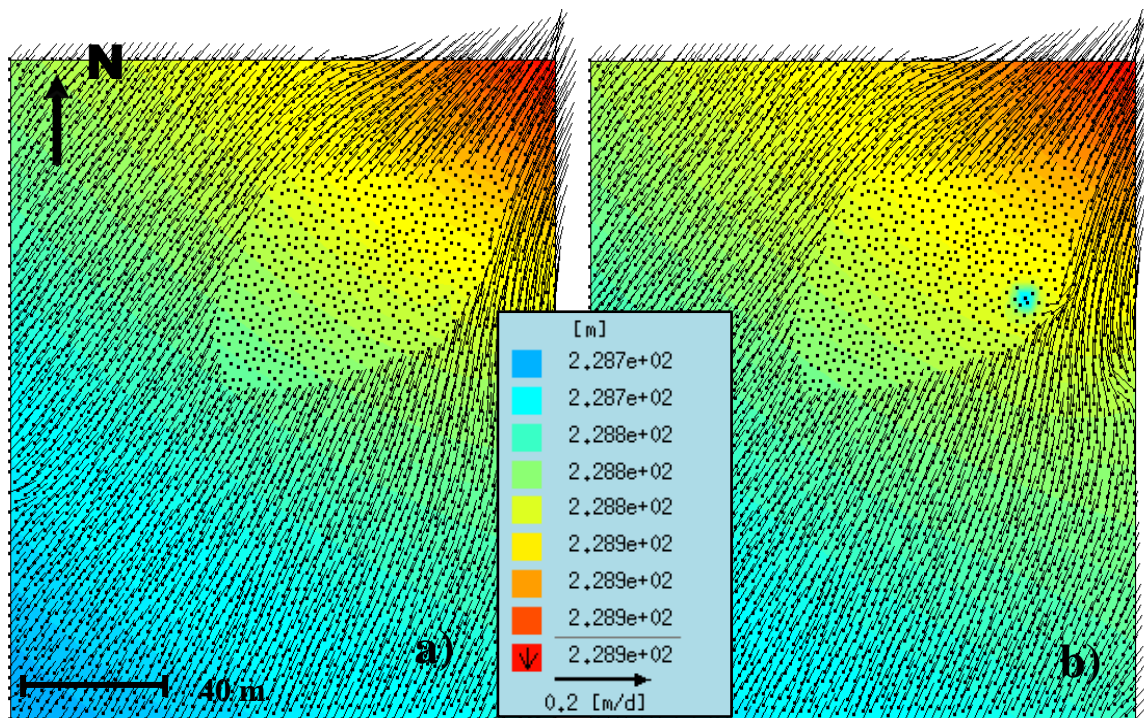
K tomu, abych získala komplexnější obrázek o míře ovlivnění cirkulačního vrtu přirozeným prouděním podzemní vody, rozhodla jsem se přečerpávat dvě různá množství vody.

V této kapitole budeme sledovat proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem. Budou diskutovány změny nejen v této oblasti, ale také změny na celém modelovaném území, vyvolané rozdílným přečerpáváním vody. Díky podstatně rozdílnému množství přečerpávané vody, budeme očekávat především rozdílný tvar cirkulační cely a rozdílné množství cirkulované vody. Stejně tak se dá snadno předpokládat nestejně velká deprese vytvořená při hladině podzemní vody nebo naopak elevace vzniklá ve spodní části modelové oblasti. Dále je možné sledovat trajektorii částičky vody v okolí vrtu u obou perforovaných částí. V poslední části bude diskutován vliv cirkulačního vrtu v celé modelové oblasti. To pomáhají posoudit pozorovací body, které byly zavedeny již v modelové oblasti neovlivněné cirkulačním vrtem.

Při čerpání 0,1 l/s budu v dalším textu hovořit jako o malém čerpání, zatímco čerpané množství 2 l/s budu dále označovat velkým čerpáním.

#### Simulace proudění

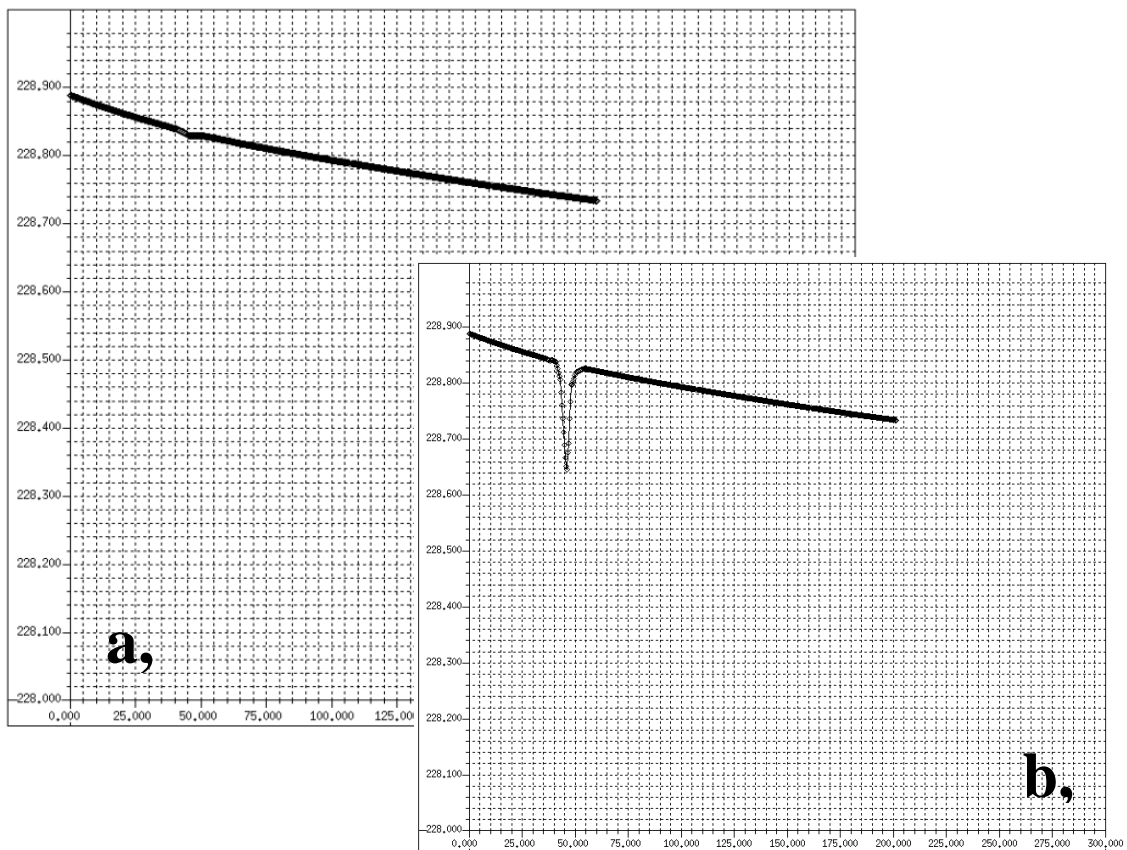
Na výsledné vizualizaci proudového pole pozorujeme rozdíl mezi malým a velkým čerpáním. Při pohledu na proudové pole 2,3 m p. t. (obr. 20) vidíme vliv velkého čerpání i ve svrchním, méně propustném prostředí, kdy pozorujeme v oblasti vrtu sníženou hydraulickou výšku. Malé čerpání na toto prostředí nepůsobí a proudové pole vypadá stejně jako proudové pole neovlivněné cirkulačním vrtem (obr. 15a).



Obr. 20: Simulace proudění při malém (a) a velkém (b) čerpání 2,3 m p. t..

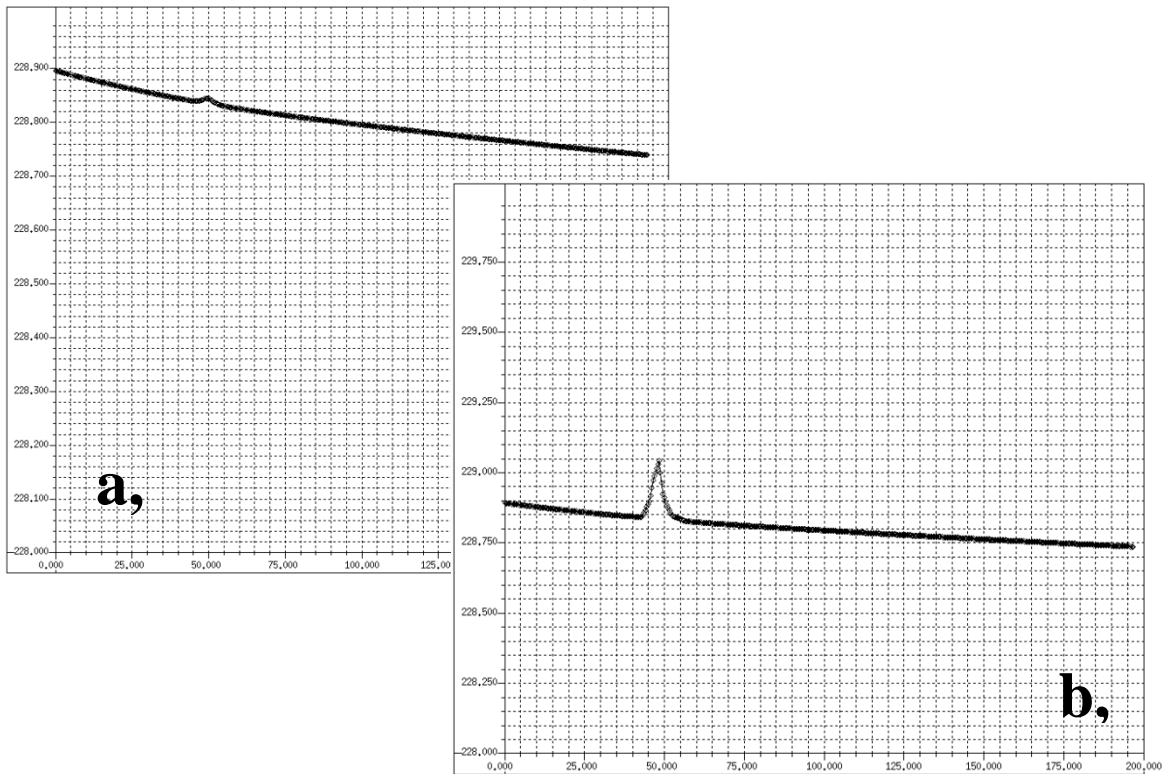
### Deprese, elevace

Při spuštění cirkulačního vrtu v reverzním módu, dochází k nasátí podzemní vody horní perforací, čímž vzniká depresní kužel. Obr. 21 názorně demonstruje velikost depresního kužele v závislosti na množství přečerpávané vody. Zatímco při velkém čerpání (obr. 21b) klesne hladina podzemní vody ve vrtu o 20 cm, při malém čerpání (obr. 21a) je depresní kužel nepatrný. Z grafu je zřejmý pokles hladiny o max. 2 cm.

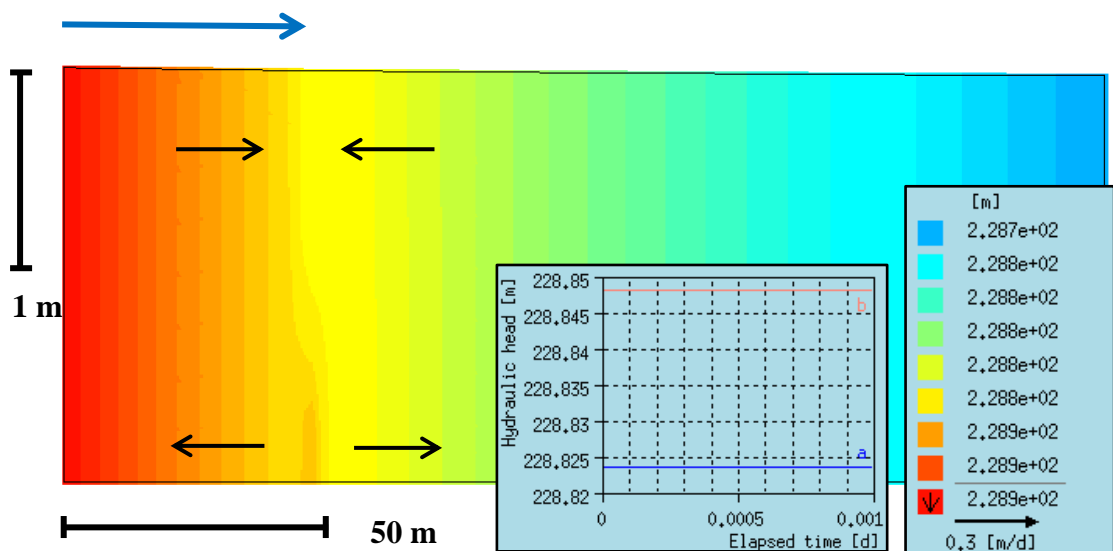


Obr. 21: Průběh volné hladiny podzemní vody ovlivněné malým (a) a velkým (b) čerpáním v oblasti horní perforace, osa  $x$  – vzdálenost v m, osa  $y$  – nadmořská výška m n. m.

Díky matematickému modelu lze pozorovat také opačný jev v dolní, perforované části vrtu (obr. 22). Voda je z vrtu injektována zpět do saturovaného prostředí, kdy perforace začíná již metr nad nepropustným podložím. Tím se vytvoří elevace, která se opět zvětšuje s přečerpávaným množstvím vody. Velikost elevace je stejná jako velikost deprese, tj. asi 20 cm při velkém čerpání (obr. 22b) a nepatrná při čerpání 20x menším (obr. 22a).



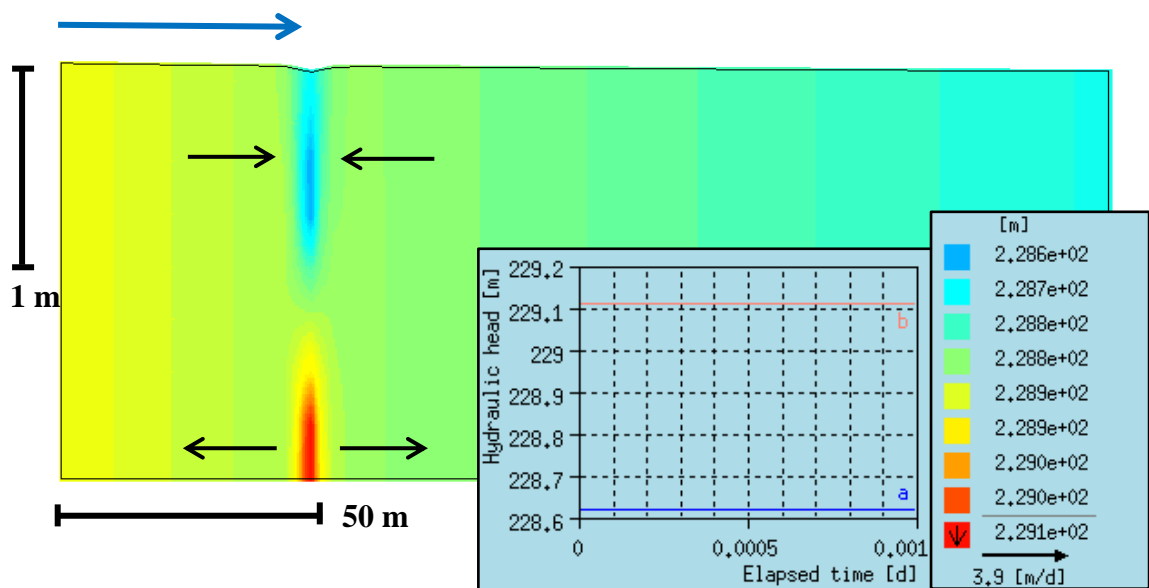
Obr. 22: Průběh volné hladiny podzemní vody při malém (a) a velkém (b) přečerpávaném množství vody v oblasti dolní perforace, osa x – vzdálenost v m, osa y – nadmořská výška m n. m.



Obr. 23: Řez oblastí ve směru proudění podzemní vody oblastí s cirkulačním vrtem při malém čerpání. Vpravo legenda hydraulických výšek, vprostřed hydraulická výška v oblasti horní (a) a spodní (b) perforace. Měřítko na ose y je 10x převýšeno. Černými šipkami je znázorněno čerpání a injektáž, modrá šipka znázorňuje směr proudění vody.



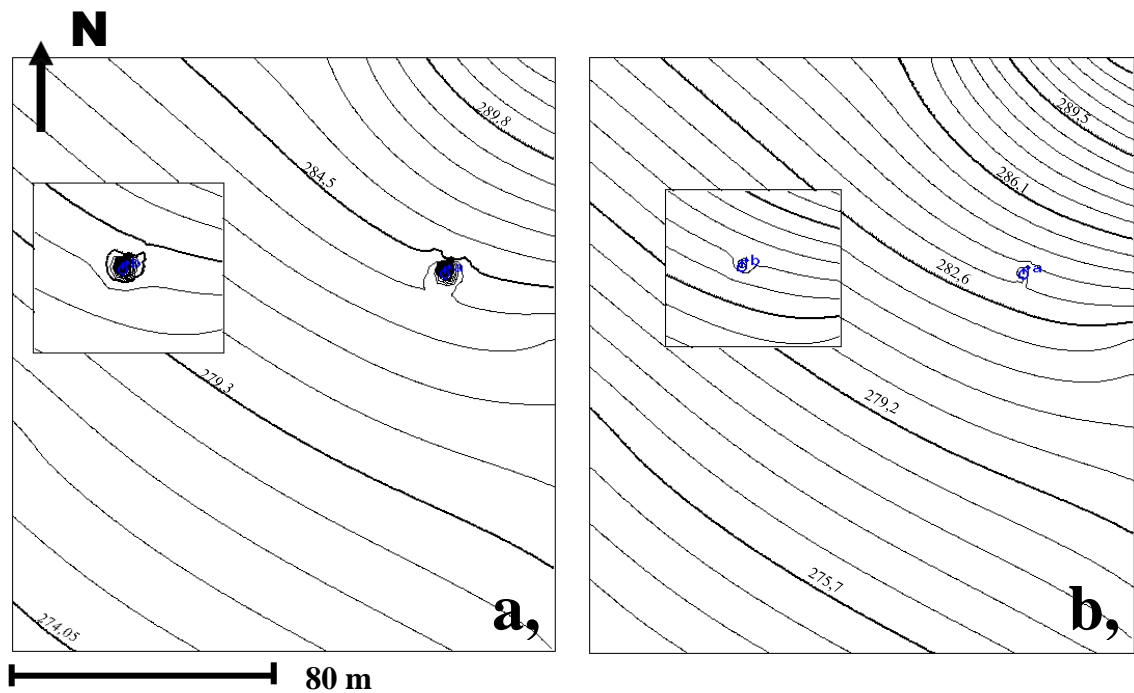
Vzniklá deprese a elevace jsou dány hydraulickou výškou. Obr. 23 a 24 prezentují změnu hydraulické výšky v oblasti se zavedeným vrtem, kde lze opět dobře pozorovat vzniklou depresi a elevaci. Zatímco při malém čerpání (obr. 23) není změna příliš výrazná, velké čerpání (obr. 24) vykazuje dobře viditelnou změnu. V oblasti horní perforace pozorujeme díky čerpání pokles hydraulické výšky až na 228,6 m, tato deprese je dokonce pozorovatelná sníženou volnou hladinou nad vrtem. V dolní perforaci naopak hydraulická výška stoupla až na 229,1 m. Při nižším čerpání je patrný stejný trend s tím rozdílem, že hydraulická výška nestoupne a neklesne o tolik hodnot.



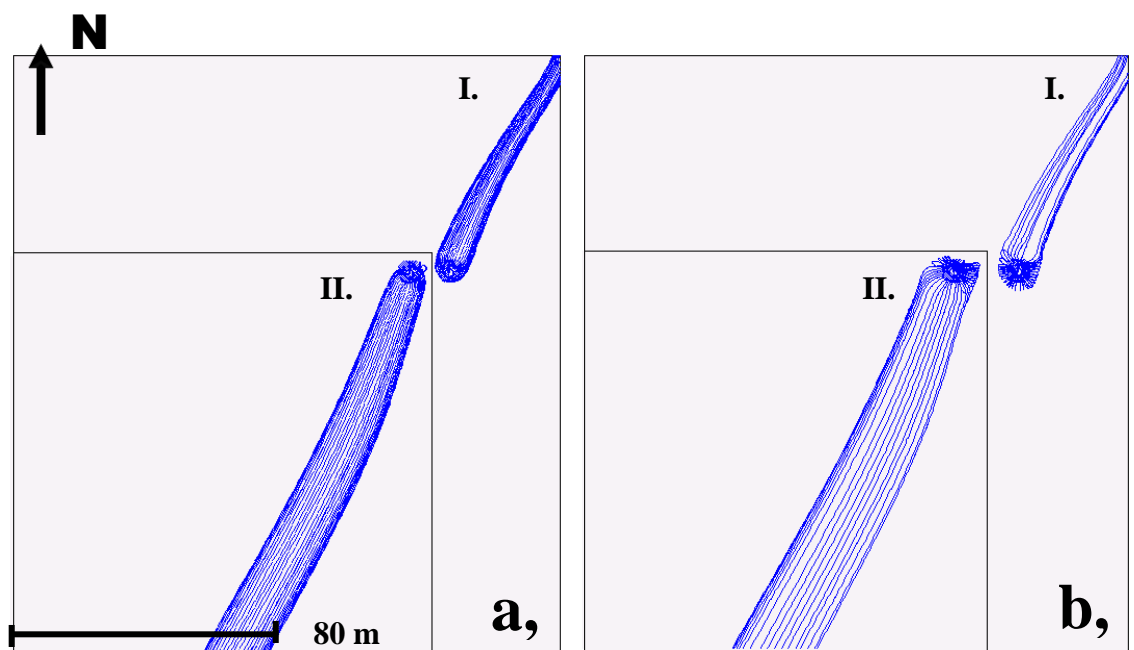
Obr. 24: Řez oblastí ve směru proudění podzemní vody oblastí s cirkulačním vrtem při velkém čerpání. Vpravo legenda hydraulických výšek, vprostřed hydraulická výška v oblasti horní (a) a spodní (b) perforace. Měřítko na ose y je 10x převýšeno. Černými šipkami je znázorněno čerpání a injektáž, modrá šipka znázorňuje směr proudění vody.

### Hydroizohypsy, trajektorie částic vody

Z obr. 25 a 26 je zřejmé, jak trajektorie částice vody závisí na průběhu hydroizohyps (obr. 25). Protože proudnice probíhají kolmo na hydroizohypsy, sbíhají se k vrtu více ze stran při vyšším čerpání (obr. 26b). Důvodem je větší rozsah depresního kužele.



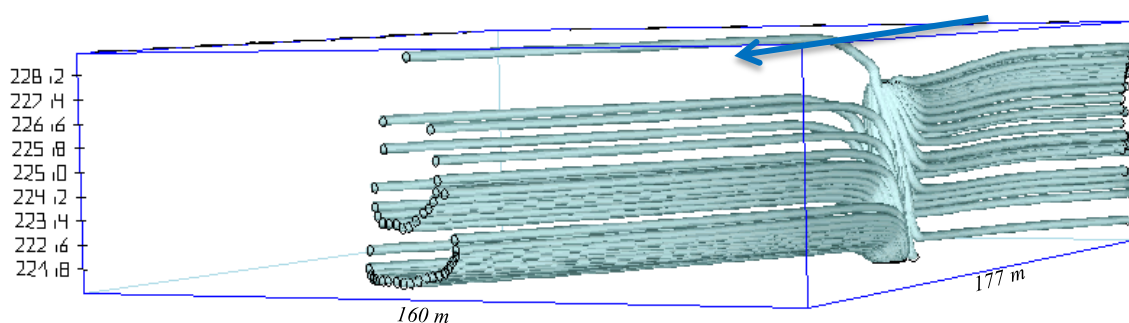
Obr. 25: Mapa hydroizohyps v oblasti s velkým (a) a malým (b) čerpáním. Velké obrázky jsou z hloubky 5 m p. t., kdežto malé z 10 m p. t.



Obr. 26: Proudnice v oblasti s horní (I.) a spodní (II.) perforací při malém čerpání (a). Tentýž obrázek při velkém čerpání (b).

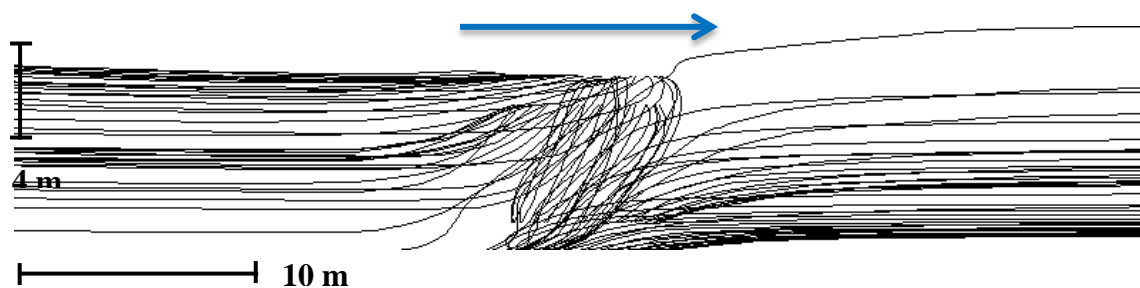
## Cirkulační cela

Jeden s nejvýznamnějších faktorů působící na tvar cirkulační cely je přirozené proudění podzemní vody. Pokud v oblasti voda neproudí, cirkulační cela se zvětšuje. Naopak zase platí, že se zvyšujícím se přirozeným prouděním se cela zmenšuje a je asymetrická. V této úloze zůstává přirozené proudění konstantní. Budeme tedy sledovat, jak se mění proudění v cirkulační cele se změnou přečerpávané vody.



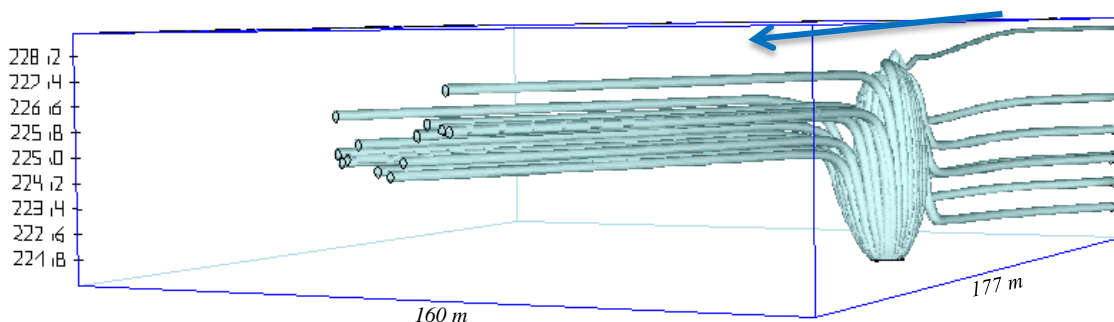
Obr. 27: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při malém čerpání. Modrá šipka znázorňuje směr proudění podzemní vody, osa y – nadmořská výška v m n. m., velikost oblasti v m je vyznačena pod obrázkem, převýšeno 6x.

Nejprve se zabývejme malým čerpaným množstvím, tj. 0,1 l/s. Z obr. 27 je patrné, že ne všechna voda se vrací zpět do horní perforace. Naopak lze pozorovat, že na pohled poměrně velké množství vody po injektáži do saturovaného prostředí, uniká ve směru proudění podzemní vody a nedochází k jejímu opětovnému průchodu filtrem. Tento předpokládaný jev se ukázal být správným. Ze simulace bylo určeno, že voda, která uniká ve směru přirozeného proudění, dosahuje 40%. To znamená, že 60% čerpané vody zůstává v cirkulační cele.



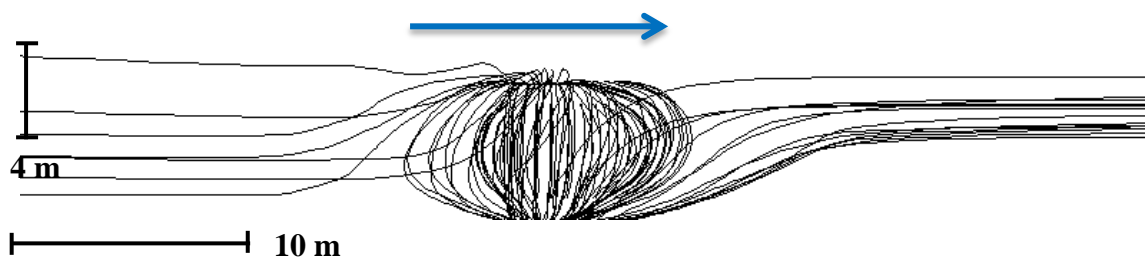
Obr. 28: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při čerpání 0,1 l/s. Šipka v obrázku znázorňuje směr proudění podzemní vody.

Z obr. 28, ve kterém pozorujeme proudění ve stejných podmínkách jako na obr. 27., lze dobře pozorovat vliv přirozeného proudění podzemní vody. Cirkulační cela je asymetrická, vidíme část proudnic, které do vrtů vstupují horní perforací a po injektáži spodní perforací zase unikají po směru přirozeného proudění. Maximální poloměr cirkulační cely byl stanoven na 2,5 m.



Obr. 29: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při čerpání 2 l/s. Modrá šipka znázorňuje směr proudění podzemní vody, osa y – nadmořská výška v m n. m., velikost oblasti v m je vyznačena pod obrázkem, převýšeno 6x.

Naopak při vyšším čerpání (obr. 29) je na první pohled zřejmé, že neuniká tolik cirkulované vody ven z cely, jako se tomu děje při čerpání menším (obr. 27). Simulací byl stanoven podíl vody, který uniká po směru přirozeného proudění, cca na 15%. Z toho lze lehce určit, že 85% vody zůstává v cirkulační cele.



Obr. 30: Proudění podzemní vody v oblasti s cirkulačním vrtem při čerpání 2 l/s. Šipka v obrázku znázorňuje směr proudění podzemní vody. Nepřevýšeno.

Obr. 30 názorně vykresluje situaci zobrazenou na obr. 29. Cirkulační cela je širší a pravidelná s menším počtem trajektorií, které vstupují a unikají ven z cely, nežli na obr. 28. Maximální poloměr cirkulační cely byl stanoven na 4 m.

## Pozorovací body

Díky pozorovacím bodům zjišťujeme, že na okolí cirkulačního vrtu nemá rozdílné množství přečerpávané vody vliv. Rozdíl ve výšce volné hladiny pozorujeme pouze ve vrtu CV-2, který je v těsné blízkosti cirkulačního vrtu CV-1.

Tab. 6: Porovnání výsledků bez čerpání a při rozdílném čerpání.

Vrt	Hladina (m n.m.)		
	bez CV	0,1 l/s	2 l/s
S-22	228,81	228,81	228,81
S-34	228,81	228,81	228,81
S-38	228,78	228,78	228,78
HV-101	228,84	228,84	228,84
MW-205	228,83	228,83	228,83
EX-1	228,79	228,79	228,79
EX-2	228,79	228,79	228,79
CV-1	228,83	228,82	228,62
CV-2	228,83	228,82	228,77
HVS-1	228,78	228,78	228,78

Dále byl také stanoven normálový průtok skrz vodorovnou plochu, která protíná vrt mezi perforacemi, tj. 8 m p. t. Tato plocha byla zvolena na základě předpokladu, že jí bude, díky umístění mezi perforacemi, protékat největší množství vody. Po dosažení výsledků, se tento předpoklad vyjevil jako správný. Při čerpání 0,1 l/s je průtok touto plochou asi 8,683 m<sup>3</sup>/d, tj. 0,1 l/s. Při čerpání 2 l/s je průtok danou plochou 180 m<sup>3</sup>/d, tj. 2,1 l/s.

## 8 Diskuse

Vytvořila jsem matematický model studované lokality v Hradci Králové. Díky tomu jsem mohla posoudit, jak vypadá přirozené proudění podzemní vody a jak je toto proudění ovlivněno v oblasti s cirkulačním vrtem.

Vytvořená simulace přirozeného proudění podzemní vody vykazuje směr proudění J, J-Z. Mapa hydroizohyps se dobře shoduje se stejnou mapou vytvořenou v programu Surfer 8. Díky tomu jsem ověřila, že v modelu nedošlo k žádné chybě, což následně ještě podpořily pozorovací body. V těchto bodech se hydraulická výška vypočtená matematickým modelem jen málo odchyluje od hodnot naměřených v terénu.

Výsledná data byla dále srovnána s dalším matematickým modelem stejné oblasti, avšak s rozdílně zvoleným koncepčním modelem. Srovnáním výsledků obou úloh bylo možné prohlásit výstupní data za stejná. Porovnávané hodnoty sice nebyly zcela identické, avšak rozdíly byly natolik malé, že je možno tyto odchylky zanedbat. Z tohoto zjištění vyplývá, že modelovaná oblast není nějak citlivá na postup řešení numerickou metodou konečných prvků a záleží na řešiteli, jakou formou bude úlohu konstruovat.

Následně byly vytvořeny další dva matematické modely s již zavedeným cirkulačním vrtem. Aby bylo možné lépe pozorovat chování podzemní vody v oblasti s tímto zařízením, předepsala jsem dvě čerpaná množství vody. Rozdíl v simulacích je znatelný. Výsledky se liší jak v dosahu cirkulační cely, tak i v procentuálním podílu cirkulované vody. Při čerpaném množství 2 l/s zůstává v cirkulační cele a prochází dalšími čistícími cykly 85% vody. Kdežto při druhém, 20x menším čerpaném množství vody, tj. 0,1 l/s, byl tento podíl pouze 60 %. Při vyšším čerpání byl také dosah cirkulační cely větší. Maximální poloměr dosahu cirkulační cely jsem stanovila na 4 m, zatímco při nižším čerpání byla tato vzdálenost menší, a to 2,5 m.

Z výsledných simulací mohu vyvozovat, že pro vyšší účinnost cirkulačního vrtu v dané oblasti, je třeba přečerpávat větší množství vody. Podle mého názoru je tento návrh uskutečnitelný. Toto tvrzení se dá podpořit výsledky matematického modelu na studované lokalitě bez a s cirkulačním vrtem (s přečerpávaným množstvím 2 l/s). Díky pozorovacím bodům jsem zjistila, že hydraulická výška na hladině je při cirkulaci 2 l/s ovlivněna do vzdálenosti 3 m od cirkulačního vrtu. Maximální poloměr cirkulační cely

byl sice stanoven na 4 m, ale musíme mít na paměti, že na hladině je poloměr ovlivnění menší, než je maximální dosah cirkulační cely. Ve větší vzdálenosti nebyly zjištěny rozdíly oproti výsledkům bez ovlivnění cirkulačním vrtem.

V případě podstatně většího čerpání by bylo nutné zohlednit čistící techniky, které jsou citlivé na velikost průtoku. Pro přečerpávané množství je také limitující propustnost prostředí. Zatímco v reverzním módu je nutné dbát na případný pokles hladiny až k horní perforaci (příliš velká deprese hladiny), v případě normálního módu je třeba dbát na příliš velkou elevaci u horní perforace, která se může projevit přetokem vrtu. Pro zvýšení účinnosti cirkulačního vrtu existují i jiné způsoby. Zůstanu-li u této úlohy, určitě by stálo za to vyzkoušet, jak by se projevil vliv jinak zvolených perforací. Zajímavé by také bylo zavedení vícenásobného vrtu. Vzhledem k tomu, že pro obvyklý cirkulační vrt je vyžadována mocnost akviferu minimálně 3 m, mocnost akviferu na lokalitě v Hradci Králové by měla být dostačující pro zavedení tohoto zařízení. Typ proudění by se potom zvolil podle charakteru kontaminantu.

## 9 Závěr

Na začátku této práce jsem si položila několik cílů. Prvním z nich bylo vytvoření matematického modelu proudění podzemní vody na lokalitě v Hradci Králové. Simulace byla zhodnocena a správnost výsledků ověřena dvěma způsoby. Prvním bylo zjištění shody vypočtených dat s daty naměřenými v terénu. Druhým způsobem bylo porovnání výsledků s jiným matematickým modelem stejné oblasti, ale s rozdílně definovaným koncepčním modelem. V obou případech se ukázala shoda ve srovnávaných datech velice vysoká.

Dalším cílem bylo do takto připraveného modelu zapracovat cirkulační vrt. K tomu, abych získala komplexnější obrázek o tom, jak se chod tohoto sanačního zařízení projeví na přirozeném proudění podzemní vody, rozhodla jsem se přečerpávat dvě různá množství. Z výsledných simulací byl mimo jiné určen tvar a dosah cirkulační cely, byl porovnán vliv jednotlivých čerpaných množství na přirozeném proudění podzemní vody a byla zjištěna návratnost cirkulující vody. Díky tomu jsem vyhodnotila, že z hlediska efektivity sanace je pro danou lokalitu vhodné čerpat maximální možné množství vody, které je porézní prostředí schopné uvolnit, resp. pojmout.

Vzhledem k tomu, že na studované lokalitě dojde v blízké době k sanaci za užití cirkulačního vrtu, věřím, že je tato práce přínosem.



## 10 Použitá literatura

- [1] Baier J. (2007): Využití matematického modelování při hodnocení ekologických škod na podzemních vodách (na příkladu vybrané rafinérské společnosti). Diplomová práce, Fakulta lesnická a environmentální, Česká zemědělská univerzita v Praze, 89 str.
- [2] Bear J. (1972): Dynamics of Fluid in Porous Media. Dover Publications, INC. New York.
- [3] Bolster C. H., Mills A. L., Hornberger G. M., Herman J. S. (1999): Spatial Distribution of Deposited Bacteria Following Miscible displacement Experiments in Intact Cores. Water Resources Research, vol. 35, No. 6, strany 1797-1807.
- [4] Beneš (2008). Metoda konečných prvků, MS, KM FJFI ČVUT v Praze.
- [5] Blaheta R. (2012): Matematické modelování a metoda konečných prvků. Matematika pro inženýry 21. století. Ostrava.
- [6] Bruthans J. (2012): Česká křídová pánev. Přednášky z Regionální hydrogeologie. MS, PřF UK, Praha.
- [7] Cunningham J. A., Hoelen T. P., Hopkins G. D., Lebrón C. A., Reinhard M. (2004): Hydraulics of Recirculation Well Pairs for Groundwater Remediation. Ground Water, vol. 42, No. 6, str. 880 – 889.
- [8] Dekonta, a.s. (2013): Dokumentace vrtu na lokalitě v Hradci Králové. MS, Praha 2013.
- [9] Diersch H. - J. G. (2005): User´s Manual. Wasy software FeFlow 5. 2 – Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System. Berlin.
- [10] Ferbar P. (2008): Zpráva o hodnocení množství a jakosti podzemních vod pro území ve správě Povodí Labe, státní podnik. Vodohospodářská bilance za rok 2007. Odbor péče o vodní zdroje. Hradec Králové.
- [11] Kha, F. I., Husain T., Hejazi R. (2004): An Overview and Analysis of Site Remediation Technologies. Journal of Enviromental Managment 71 (2004), str. 95 – 122.

- [12] Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z. (2002): Geologická minulost České republiky. 1. vyd., Academia Praha, ISBN 80-200-0914-0.
- [13] Johnson R. L., Simon M. A. (2007), Evaluation of Groundwater Flow Patterns Around a Dual Screened Groundwater Circulation Well. *Journal of Contaminant Hydrology* 93 (2007), str. 188-202.
- [14] Klamkin M. S. (1987): *Mathematical Modelling: Classroom Notes in Applied Mathematics*. Siam (Society for Industrial and Applied Mathematics). Philadelphia., 338 str., ISBN 0-89871-204-1.
- [15] Kozubek P. (2008): DS PHM Hradec Králové. Studie proveditelnosti. Závěrečná zpráva. MS, ENACON, s.r.o., Praha.
- [16] Kukačka J., Urban O., Kubricht J., Šváb M., Mls J., Bruthans J., Ondovčín T., Šindelář J. (2014): Inovace a využití cirkulačních vrtů s vloženým reaktorem v sanační geologii. Odborná zpráva o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2013. MS, Dekonta, a.s., Praha. Projekt podpořený TA ČR evidovaný pod č. TA02021263.
- [17] Kuráň P., Nováková J., Janoš P. (2009): Možnosti stanovení uhlovodíků (C10 – C40) v kompostech a kalech metodou plynové chromatografie s plamenově-ionizačním detektorem s klasickým injektorem s děličem a bez děliče toku. *Chem. listy* 105, str. 133-137.
- [18] Míka S., Příkryl P., Brandner M. (2006): Speciální numerické metody. Numerické metody řešení okrajových úloh pro diferenciální rovnice. 1. vyd., 305 str., ISBN 80-86843-13-0.
- [19] Miller R. R., Roote D. S. (1997): In-Well Vapor Stripping, Ground-water Remediation Technologies Analysis Center report, Technology report No. TO-97-01.
- [20] Mucha I., Šestakov V. M. (1987): *Hydraulika podzemních vod*. 1. vyd., Alfa, Bratislava, 344 str.
- [21] Nedvěd J. (2014): Matematický model proudění ovlivněného cirkulačními vrty. Diplomová práce, MS, PřF UK, Praha.
- [22] Pepper D. W., Heinrich J. C. (1992): *The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications*. Hemisphere Publishing Corporation, 235 str., ISBN 1-56032-104-0.

- [23] Pitter P. (2009): Hydrochemie. 4. vyd., vydavatelství VŠCHT Praha, ISBN 978-80-7080-701-9.
- [24] Říha, J. et al. (1997): Matematické modelování hydrodynamických a disperzních jevů. Skriptum VUT, Brno.
- [25] Rao S. S. (2005): The Finite Element Method in Engineering. Elsevier Science & Technology Books, str. 230-276, ISBN: 978-0-7506-7828-5.
- [26] Stamm J. (1995): Vertical Circulation Flow for In-Situ Bioremediations in Aquifers, Institute of Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany.
- [27] U.S. EPA (1998): Field Application of In Situ Remediation Technologies: Ground-Water Circulation Wells. U.S. Environmental Protection Agency. Publication EPA 542-R-98-009, Washington, DC.
- [28] Valentová J. (2007): Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT. Praha. 174 str., ISBN 978-80-01-03625-9.
- [29] Yeh H.-D., Chang Y.-C. (2013): Recent Advances in Modeling of Well Hydraulics. Advances in Water Resources, vol. 51, str. 27- 51. Elsevier, 2012.

### **Internetové stránky**

- [1] Bartoň, J., Hillermann, J., Valešová, M., Urbánek, B., Hebelka, A. (2014): Modelování transportních a transformačních procesů kontaminantů v podzemní vodě. GEOTest, a.s, [www.geotest.cz](http://www.geotest.cz), 1. 7. 2014.
- [2] IEG Technology GmbH (2014): Groundwater Circulation Well Technology. IEG Technology GmbH, Soil and Groundwater Remediation Specialists. [www.ieg-technology.com](http://www.ieg-technology.com), 5. 7. 2014.
- [3] Scientific Software Group (2014): Groundwater Equipment. Scientific Software Group. [www.scisoftware.com](http://www.scisoftware.com), 30. 6. 2014.
- [4] Český hydrometeorologický ústav, [www.chmi.cz](http://www.chmi.cz), 10. 6. 2014.

### **Mapové podklady**

- [1] Česká geologická služba (ČGS): [www.geology.cz](http://www.geology.cz)., 30. 5. 2014
- [2] Esri: [www.arcgis.com](http://www.arcgis.com), 10. 6. 2014.