

Univerzita Karlova v Praze

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



**Matematický model proudění ovlivněného
cirkulačními vrty**

**Mathematical model of groundwater flow affected
by circulation wells**

Diplomová práce

Jakub Nedvěd

Školitel: Doc. RNDr. Jiří Mls, CSc.

Praha 2014

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne:

Podpis:

Abstrakt:

V této práci jsem se věnoval numerickému modelování proudění podzemní vody v okolí cirkulačního vrtu. Práce má dvě části. V té první jsem vytvořil jednoduchý model cirkulačního vrtu ve válcové oblasti a pomocí něj jsem zkoumal, jak proudění v okolí vrtu reaguje na změny jednotlivých parametrů. Ukázalo se, že vlastnosti prostředí mají větší vliv na toto proudění, než konstrukce vrtu. Jediný významnější konstrukční parametr je vzdálenost perforací, ostatní parametry (jako např. délka perforací) nejsou příliš důležité. Naopak parametry prostředí jsou pro proudění v okolí vrtu velmi důležité. Z hlediska dosahu proudění má největší vliv anizotropie prostředí a přítomnost nevodivých vrstev mezi perforacemi. Oba tyto parametry zapříčiňují zvýšení dosahu proudění, čímž se ovšem zvětší dráha částice vody a tím se i prodlouží doba, za kterou částice vody putuje od jedné perforace k druhé, což má za následek zpomalení sanace. Velkou roli hraje i intenzita přírodního proudění v oblasti, neboť snižuje dosah proudění. V druhé části práce jsem vytvořil numerický model proudění na pilotní lokalitě Velká Hleďsebe a zkoumal jsem, zda je cirkulační vrt jako sanační technologie vhodný pro tuto lokalitu. Z modelů se však ukázalo, že díky nepříznivým hydrogeologickým podmínkám a parametrům prostředí by bylo použití cirkulačních vrtů ve Velké Hleďsebi neefektivní.

Summary:

In this thesis, I focused on numerical modelling of groundwater flow in the vicinity of groundwater circulation well (GCW). The thesis can be divided into two parts. In the first one, I created a simple numerical model of GCW. I used a cylindrical flow domain because of the radial symmetry of the problem. The task was to find out which parameters have the biggest influence on groundwater flow. It was found that the hydrogeological settings and hydraulic properties have more considerable effect on GW flow than the well construction parameters. Distance between the well screens is the only important construction parameter, other parameters can be neglected. However, we cannot neglect the influence of hydraulic properties of the porous medium. Considering the radius of influence of GCW, the presence of aquitards and anisotropy of layers affect the groundwater flow around the well seriously. These two parameters cause the extension of the radius of influence, which leads to a longer path of the particle of water. The travel time of particles increases too this slows down the remediation. A big influence has also an intensity of natural groundwater flow in the area because it decreases the radius of influence of the well. In the second part I created a numerical model of pilot site Velká Hleďsebe to investigate the efficiency of GCW as a remediation technology. On the base of the model results it can be shown that GCW technology can hardly be recommended for this area. The reasons are poor hydrogeological settings and bad hydraulic properties (low permeability).

Obsah:

1. Úvod.....	1
2. Princip fungování cirkulačního vrtu.....	2
2.1 Cirkulační vrt v jeho základním provedení.....	2
2.2 Cirkulační vrt využívající „čerpání vzduchem“.....	3
2.3 Využití cirkulačních vrtů při čištění nesaturované zóny.....	5
2.4 Kombinované cirkulační vrty, vrty násobné a bioremediace.....	5
3. Popis pilotní lokality Velká Hleděsebe.....	7
3.1 Historie areálu.....	7
3.2 Geomorfologie a klimatické poměry oblasti.....	7
3.3 Geologie oblasti.....	7
3.4 Hydrogeologické poměry.....	9
4. Znečištění lokality.....	10
4.1 Zdroje kontaminace.....	10
4.2 Charakter kontaminace.....	11
4.2.1 Chlorované uhlovodíky.....	11
4.2.2 Aromatické uhlovodíky.....	12
4.2.3 Nepochopitelné extrahovatelné látky.....	12
4.3 Rozšíření kontaminace.....	12
5. Jednoduché modely cirkulačního vrtu.....	17
5.1 Zadání úlohy.....	18
5.2 Konceptní model.....	18
5.3 O programu Feflow.....	19
5.4 Řešení.....	20
5.4.1 Zjišťování dosahu vrtu.....	21
5.5 Výsledky.....	22
5.5.1 Množství přečerpávané vody.....	22
5.5.2 Vzdálenost perforací.....	24
5.5.3 Délka perforací.....	25
5.5.4 Asymetrie perforací.....	27
5.5.5 Hydraulická vodivost.....	28
5.5.6 Anizotropie prostředí.....	29
5.5.7 Heterogenita prostředí.....	30
5.5.8 Přirozené proudění podzemní vody v okolí vrtu.....	32
5.5.9 Vzdálenost nepropustného podloží od konce dolní perforace.....	35
5.6 Diskuse.....	36
5.6.1 Návrh pro zavedení pojmu efektivní poloměr dosahu cirkulačního vrtu.....	37
6. Matematický model proudění podzemní vody na lokalitě Velká Hleděsebe.....	38
6.1 Stopovací zkouška na lokalitě Velká Hleděsebe.....	39
6.2 Zadání úlohy.....	41
6.3 Konceptní model.....	41
6.3.1 Geometrie oblasti.....	42
6.3.2 Zjištění parametrů.....	45
6.3.3 Okrajové podmínky.....	47
6.4 Řešení.....	47
6.5 Výsledky.....	48
6.5.1 Maximální možné čerpání.....	50
6.5.2 Rychlost vytvoření cirkulační cely.....	50
6.5.3 Transport látek v okolí vrtu.....	51
6.6 Diskuse.....	55
7. Závěr.....	57
Literatura.....	58
Seznam zkratk.....	60

1. Úvod

V dnešní době pozvolného vzestupu nanotechnologií či vysílání kosmických sond do vzdálených hlubin vesmíru je více než kdy jindy nezbytné, aby se lidstvo neodcizovalo přírodě a naopak se snažilo o její pochopení a ochranu. Pokud však ochrana přes veškerou snahu selže, je třeba řešit vzniklý problém a snažit se zjednat nápravu. Toto platí nejen pro živou, ale i pro neživou přírodu, obzvláště pro jednu z jejích složek, která je pro člověka velice důležitá, možná dokonce úplně nejdůležitější - pro vodu.

Žijeme v oblasti, ve které zatím nemáme žádné problémy se získáváním a využíváním tohoto živlu, o to významnější pro nás je si uvědomit, že nemůžeme pouze donekonečna využívat a brát, ale je nutná i určitá zpětná zodpovědnost vůči přírodním zdrojům. V České republice je téměř polovina zdrojů pitné vody získávána z vod podzemních, které jsou všeobecně považovány za méně zranitelné než vody povrchové, pokud však přesto dojde k jejich znečištění, je jeho odstranění a znovuoobnovení kvality vody často velice náročným úkolem. Situaci týkající se čistoty podzemních vod nezjednodušuje ani fakt, že v dřívějších dobách nebyl příliš brán zřetel na jejich ochranu. Naštěstí nová doba přinesla i moderní přístupy a technologie, pomocí kterých můžeme se znečištěním podzemních vod často celkem efektivně bojovat. Jedním z těchto přístupů jsou i cirkulační vrty - technologie, která umožňuje čistit podzemní vodu in-situ, tedy bez nutnosti čerpání vody na povrch.

Této diplomové práci předcházela bakalářská práce, která byla obecnou rešerší a problematiku cirkulačních vrtů popisovala hlavně ze shrnujícího teoretického hlediska. Na tento základ navazují touto diplomovou prací, ve které se již chci věnovat řešení konkrétního problému. Cílem práce bude nejprve pomocí numerického modelování zjistit, jak se bude cirkulační vrt chovat za různých podmínek, v různých prostředích a při změnách různých parametrů, a poté posoudit účinnost cirkulačního vrtů na konkrétní znečištěné lokalitě. Pozornost budu věnovat ovlivnění přirozeného proudění či migraci kontaminantu v čase. Pokud dojde k zahájení sanace na pilotní lokalitě Velká Hleďsebe v době před dokončením práce, budu v závěru práce také srovnávat průběh sanace s výsledky z modelů a diskutovat možné nesrovnalosti.

2. Princip fungování cirkulačního vrtu

Cirkulační vrty se poprvé objevily na přelomu osmdesátých a devadesátých let, jedná se tedy o technologii, která má za sebou přes třicet let vývoje, nicméně princip fungování se příliš nezměnil. Základem je vždy těleso vrtu, které má nejméně dva úseky perforací - jedna z nich se nachází v horní části vrtu (obvykle poblíž hladiny podzemní vody) a druhá část se nachází v dolní části vrtu. Tyto dvě perforace mezi sebou mají úsek nepropustného pažení a uvnitř vrtu se mezi nimi nachází těsnící ucpávka, která dělí vrt na dvě samostatné poloviny, horní a dolní. Princip funkce je takový, že pomocí čerpadla umístěného v jednom úseku vrtu čerpáme vodu potrubím vedoucím skrz nepropustné těsnění z jedné poloviny vrtu (obvykle dolní) do druhé poloviny vrtu, ze které voda sama odtéká perforací zpět do okolního prostředí. Po určité době dojde k ustálení tohoto proudění a vytvoření tzv. cirkulační cely, což je název pro proudové pole v okolí cirkulačního vrtu.

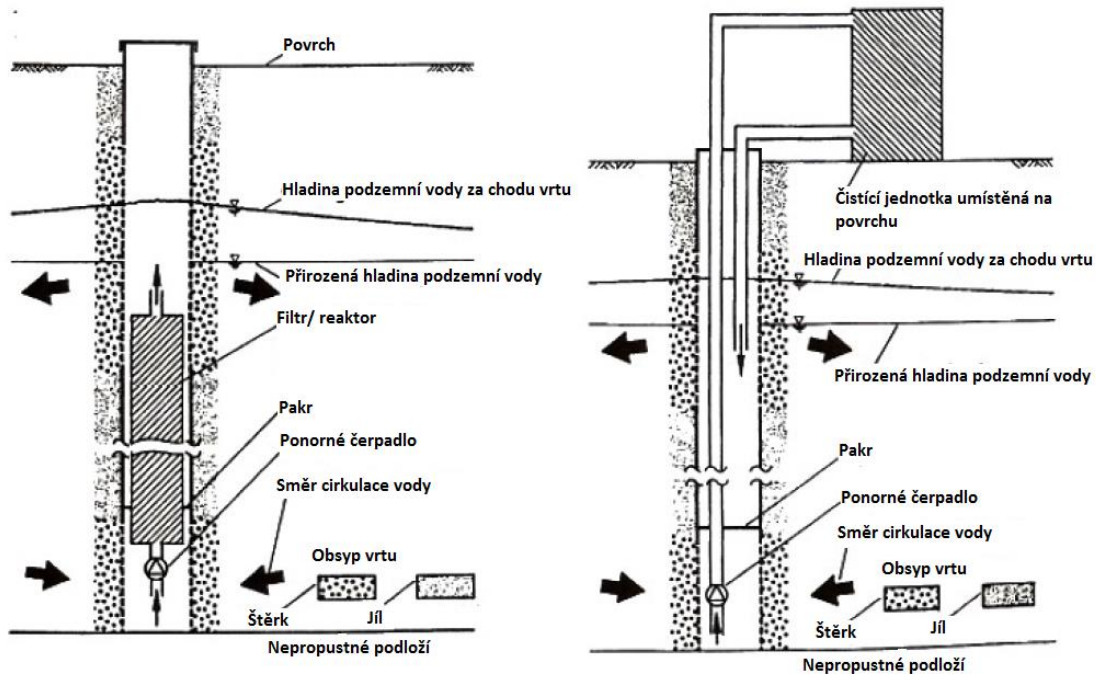
Částice vody prochází vrtem několikrát za sebou. Pokud do systému přečerpávacích potrubí mezi dolním a horním úsekem vrtu umístím kupř. čistící reaktor, pak při každém průchodu částice vody vrtem je z této částice odstraněna část kontaminace, což je jednou z hlavních výhod cirkulačních vrtů - díky opětovné cirkulaci vody ve vrtu dochází k jejímu několikanásobnému přečištění. Další výhodou tohoto postupu je, že není nutné čerpat vodu na povrch a nákladně ji odvádět někam, kde by měla být přečištěna, a poté ji vsakovat zpět.

2.1 Cirkulační vrt v jeho základním provedení

Klasifikaci cirkulačních vrtů jsem převzal z práce Stamma (1995), protože je v ní dle mého názoru daná problematika nejlépe a nejpřehledněji zpracována. Výčet typů cirkulačních vrtů jsem pouze doplnil o několik málo druhů, které začaly být používány až v poslední době.

Nezákladnějším druhem cirkulačního vrtu je jeho provedení nazývané ve všech zemích shodně - groundwater circulation well (zkratka GCW), což překládám jednoduše jako cirkulační vrt. Tento typ vrtu splňuje svou konstrukcí podmínky výše uvedené - má dvě perforace, které jsou od sebe uvnitř vrtu odděleny nepropustným těsněním, kterým prochází pouze trubice čerpadla (to je většinou umístěno v dolní části vrtu). Pro lepší představu viz obrázek 1. Zde můžeme vidět čistící reaktor či filtr, který je umístěn nad čerpadlem tak, aby jím čerpaná voda musela procházet a tím se přečišťovala. Po protečení reaktorem voda proudí horní perforací zpět do prostředí, dochází k vytvoření cirkulační cely a voda je při opakovaných průchodech přes reaktor opětovně čištěna. V současné době je mnoho různých druhů reaktorů, které můžeme použít vzhledem k druhu kontaminantu - existují reaktory biodegradační (škodlivá látka je použita při životním cyklu bakterií a tím je přeměněna na

jiný, neškodný produkt) či chemické (využití elementárního železa, paládia/platiny v kombinaci s plynným vodíkem, filtry s aktivním uhlím). Jejich nejčastější využití je při odstraňování těžkých kovů nebo chlorovaných uhlovodíků (Siantar et al., 1996; Shelley et al., 2002), některé z nich jsou však příliš drahé pro širší využívání v praxi.



Obrázek 1: Cirkulační vrt s vnitřní (vlevo) a vnější čistící jednotkou (Stamm, 1995).

2.2 Cirkulační vrty využívající „čerpání vzduchem“

Do této kategorie spadají podle Stamma vrty označované německy jako Unterdruck-Verdampfer- Brunnen (UVB), anglicky nazývané Vacuum Vaporizer Well (i zde je však používána německá zkratka UVB). V Americe je tento druh cirkulačního vrtu částečně obměněn a používán pod názvy kupříkladu Density-driven-convection well (DDC), No Volatile Compounds neboli NoVOC's, Air-lift pumping well či C-Sparger. Všechny tyto druhy vrtů se vypořádají s kontaminantem stejným způsobem nazývaným stripování vody.

Stripování vody je termín z oblasti chemického inženýrství a význam tohoto procesu spočívá v převedení těkavých kontaminantů rozpuštěných ve vodě do plynné fáze, se kterou jsou následně odsáty a zneškodněny. Této změny stavu se docílí tím, že se do vody s obsahem rozpuštěných těkavých látek vhání vzduch, do něhož se pak daná těkavá látka uvolňuje ve formě plynu. Fyzikálně je tato metoda založena na principu Henryho zákona, který udává vztah mezi obsahem plynu rozpuštěným ve vodě a parciálním tlakem plynu v okolí. Při vhánění vzduchu do vody v ní dochází k vytvoření bublin. Přítomnost těchto bublin pak způsobí, že díky rozdílným koncentracím ve vodě a ve vzduchu (bublině) přejde těkavý

kontaminant z kapalné do plynné fáze (těkání). Někteří autoři označují proces změny stavu těkavé látky při stripování jednoduše jako difuzi.

Při vtlačování plynu (vzduchu) ke dnu vrtu pozorujeme ještě jeden efekt, a to efekt „čerpání vzduchem“ (z anglického air-lift pumping). Bublinky plynu stoupající vrtem vzhůru sebou částečně berou i částice vody a vyvolávají tak proudění ve vrtu směrem vzhůru (voda naředená bučkami vzduchu má menší hustotu a proto stoupá směrem k hladině, zatímco se na její místo tlačí skrze dolní perforaci hustější voda z blízkého vnějšího okolí vrtu). Podobnou věc mohl pozorovat každý, kdo vlastní akvárium s rybičkami a bublinovým provzdušňovačem vody. Díky tomuto efektu není nutné do vrtu umisťovat čerpadlo, neboť je možné čerpat samotným vhaněným vzduchem, který zároveň vodu čistí. Pokud však používáme k čerpání vzduch, je nutné mít utěsněné zhlaví vrtu, abychom zabránili úniku jedovatých par do ovzduší. Tyto páry jsou z vrtu odsávány a na povrchu jsou přečištěny přes filtr z aktivního uhlí.

Jednou z nevýhod air-lift pumping vrtů je fakt, že čerpat ve vrtu je možné pouze odspoda nahoru, což se v názvosloví cirkulačních vrtů nazývá standartní mód, resp. standartní chod. Opačný mód, resp. chod, se nazývá reverzní. Směr čerpání se odvíjí od charakteru kontaminantu. Pokud jde o látky typu DNAPLs, které díky své hustotě klesnou na dno kolektoru, je vhodné použít standartní mód čerpání, naopak pro látky typu LNAPLs, které se drží na hladině podzemní vody, je nutné reverzní čerpání. Je třeba rozlišovat, o jaký druh kontaminantu se jedná, protože při nesprávném použití můžeme pomoci jeho plošnému rozšíření.

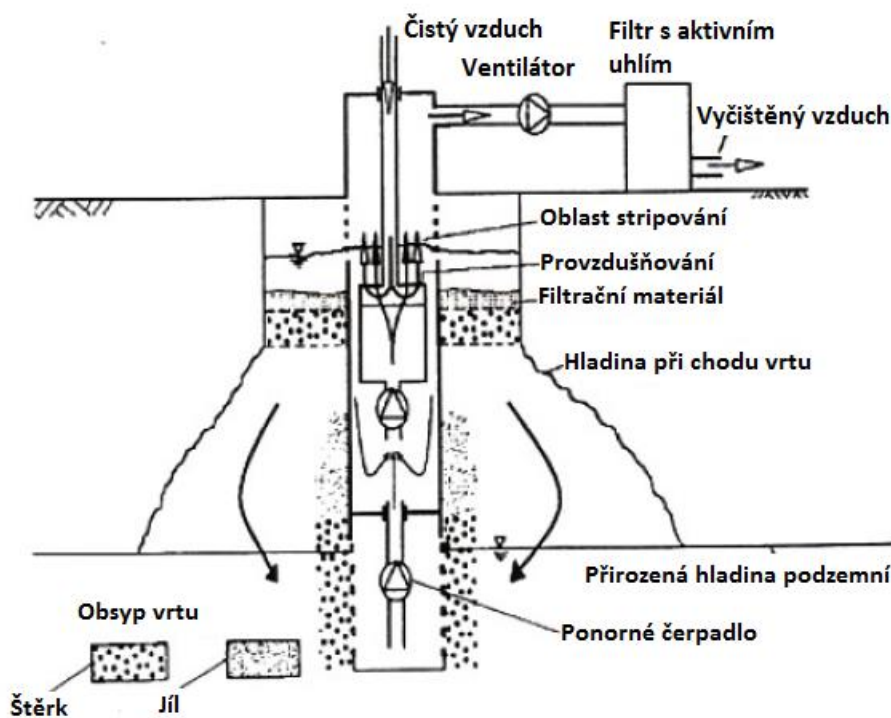
Problém s reverzním módem řeší vrt typu UVB, vyvinutý v Německu. Zde je proudění, obdobně jako u obyčejného cirkulačního vrtu, vyvoláno čerpáním ponorným čerpadlem a proto je možné si zvolit, v jaké části vrtu a jaké množství vody budu čerpat. Namísto reaktoru je za čerpadlem v systému zapojen tzv. stripovací reaktor, což je nádoba, do které je z povrchu vhaněn plyn (vzduch) a dochází zde ke stripování vody. Nicméně zapojení reverzního módu u vrtu typu UVB je složitější právě z důvodu přítomnosti stripovacího reaktoru a nebývá příliš často využíváno.

Dosud jsem označoval vhaněný plyn jako vzduch, avšak ve vrtech nazývaných C-Sparger je ke stripování využíván ozon, který jako silné oxidační činidlo často zaručuje vysokou kvalitu dekontaminace, zároveň ale zvyšuje její cenu.

Díky své konstrukční nenáročnosti patří cirkulační vrtky využívající čerpání vzduchem (v jakékoli podobě) k nejvíce využívaným systémům cirkulačních vrtů ve Spojených státech (EPA, 1998).

2.3 Využití cirkulačních vrtů při čištění nesaturované zóny

Cirkulační vrt lze použít i k dekontaminaci nesaturované zóny. Vrt se konstrukčně nijak neliší od předchozích případů, je pouze kratší, neboť příliš nezasahuje do zvodnělé části kolektoru. Jeho dolní perforace se většinou nachází blízko pod hladinou podzemní vody nebo dokonce až v kapilární třásni, odkud je voda čerpána vrtem vzhůru, stripována a přes jemný křemenný písek (sloužící jako filtr na kontaminant) infiltruje skrze nesaturovanou zónu zpět k hladině podzemní vody. Po čase se okolí vrtu nad hladinou zcela nasytí vodou a dojde k vytvoření cirkulační cely. V dnešní době se ke zrychlení proudění využívá systém perforovaných trubek umístěných pár centimetrů nad terénem, ze kterých stříká voda a zavodňuje nesaturovanou zónu v okolí vrtu, čímž zvyšuje vlhkost a tím i rychlost proudění. Pro tento typ vrtů je používána zkratka vzniklá z prvních písmen jeho německého názvu (Spülung-Zirkulations Brunnen) - SZB. Pro lepší představu o vrtu SZB viz obrázek 2.



Obrázek 2: Cirkulační vrt pro dekontaminaci nesaturované zóny (Stamm, 1995).

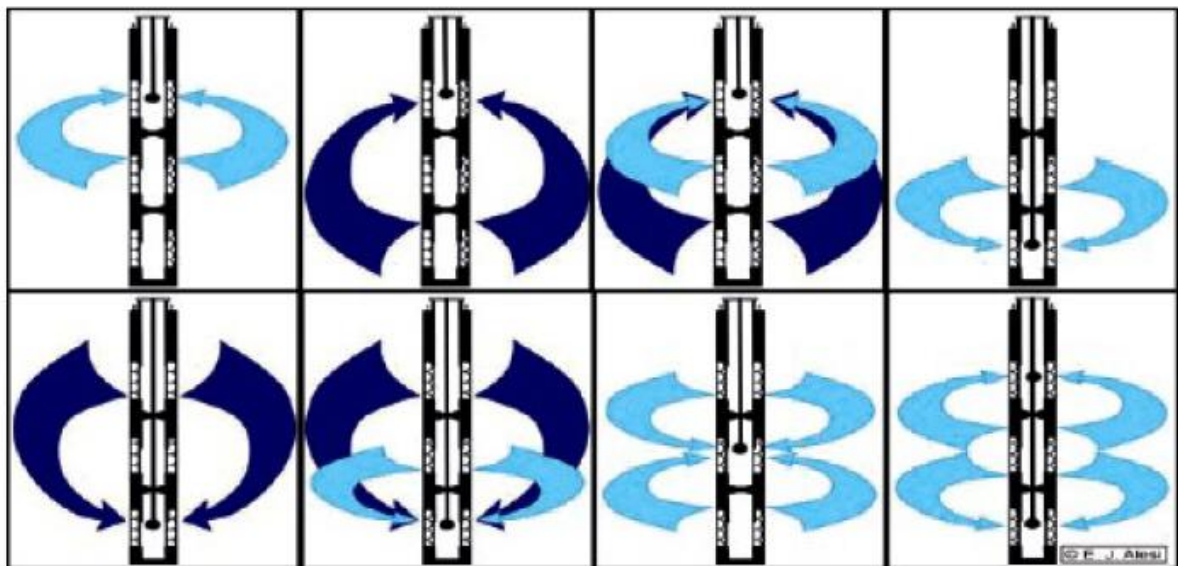
2.4 Kombinované cirkulační vrty, vrty násobné a bioremediace

Jednotlivé dekontaminační postupy v cirkulačních vrtech se mezi sebou dají kombinovat, tento druh vrtu pak nazýváme vrt kombinovaný. Nejčastější spojení bývá buď cirkulační vrt GCW a cirkulační vrt pro čištění nesaturované zóny SZB, nebo cirkulační vrt GCW a umístění stripovacího reaktoru UVB. Těmito kombinacemi můžeme dosáhnout zvýšené

efektivitu sanace, odstraňovat zároveň různé druhy kontaminantů a čistit společně saturovanou i nesaturovanou zónu.

V kolektoru o větší mocnosti může příliš velká vzdálenost perforací ovlivnit proudění natolik, že vůbec nedojde k vytvoření cirkulační cely. Tento problém můžeme vyřešit pomocí tzv. násobného vrtu. Jedná se o vrt, který má perforované úseky na více než dvou místech. Tyto jednotlivé úseky jsou od sebe uvnitř vrtu navzájem odděleny těsněním a mezi každými dvěma těmito úseky můžeme čerpáním vytvořit dílčí cirkulační celu. Zároveň tím můžeme zabránit propojení různých horizontů podzemních vod. Pro větší ilustraci viz obrázek 3, který ukazuje několik možností chodu násobného vrtu.

Poslední poznámka patří bioremediaci. Cirkulační vrt sám o sobě svým chodem napomáhá rozvoji mikroorganismů v půdě (kupříkladu tím, že voda z něj vytékající je více provzdušněná). Pokud ale využijeme vrt i k transportu a roznosu živin do okolí vrtu, můžeme tím zrychlit růst kolonií těchto mikroorganismů a využít je k biodegradaci kontaminantu. Většina z nich jsou bakterie, které jsou velice adaptabilní a po čase začnou kometabolickými reakcemi využívat kontaminant ve svém životním cyklu, čímž ho obvykle přemění na méně škodlivý nebo dokonce neškodný produkt.



Obrázek 3: Různé typy proudění v násobném cirkulačním vrtu - převzato z internetových stránek firmy IEG Technologies GmbH, <http://www.ieg-technology.com/>.

3. Popis pilotní lokality Velká Hled'sebe

Lokalita, na které v době psaní této práce probíhá sanace pomocí cirkulačních vrtů, se nachází přibližně dva kilometry na západ od Mariánských lázní v obci Velká Hled'sebe, konkrétně v její východní části asi 300 metrů od centra obce.

3.1 Historie areálu

Již před druhou světovou válkou byl areál využíván jako skladiště paliva a po válce byl přeměněn na kovovýrobu, v roce 1972 byl po požáru rekonstruován. Od té doby zde probíhala strojírenská výroba, byly tu vyráběny kovové palety pro skladovací prostory. Od roku 1990 byl objekt napojen na kanalizační síť, do té doby byla dešťová voda sváděna do potoka a splaškové vody byly sváděny do žump. Výrobní provoz v areálu skončil v roce 2002 a od té doby nebylo území využíváno. Většina budov byla zbořena a suť z nich odstraněna, zachovány byly pouze budovy ve východní části areálu (vrátnice, kanceláře a část dílen). Odstraněny nebyly podlahy zbořených objektů a zpevněné povrchy v místech, kde vedla dříve komunikace.

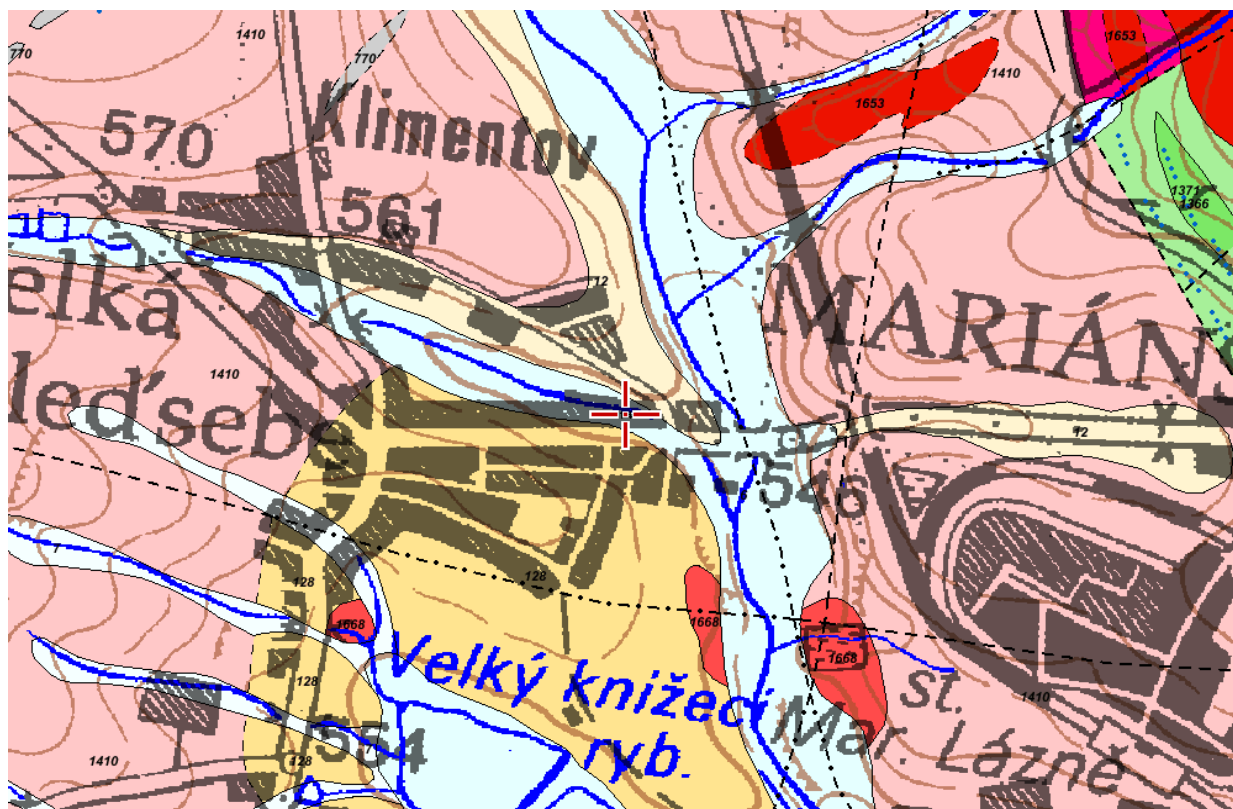
3.2 Geomorfologie a klimatické poměry oblasti

Z geomorfologického hlediska patří zájmové území do Šumavské subprovincie, Českoleské oblasti, celku Podčeskoleská pahorkatina a podcelku Tachovská brázda. Terén je v okolí lokality mírně svažité s úklonem na jihovýchod až východ směrem ke Kosovému potoku s maximálním spádem do 7%. Nadmořská výška lokality se pohybuje v rozmezí 549 až 553 metrů nad mořem.

Území patří do mírně teplé a mírně vlhké klimatické oblasti s mírnou zimou, průměrná roční teplota vzduchu je 6 °C. Roční úhrny srážek za roky 2004 až 2008 sahají od 783,3 mm do 939,7 mm, průměrná hodnota činí 880 mm.

3.3 Geologie oblasti

Z regionálně a geologicky - stratigrafického hlediska se zájmové území nachází na rozhraní metamorfovaných hornin sasko - vogtlandského paleozoika a paleozoických granitoidů mariánsko-lázeňského a borského masivu. Metamorfované horniny jsou zastoupeny drobnozrnným dvojslídovým svorem, granitoidní masivy jsou tvořeny hrubozrnným (mariánsko - lázeňský masiv) a středně až drobnozrnným granitem (borský masiv).



Obrázek 4: Geologická mapa okolí Velké Hleďsebe, níže legenda s popisem hornin. Červený křížek označuje místo, kde se přibližně nachází zájmová lokalita (převzato z online mapové aplikace ČGS, <http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/>).

Legenda:

kvartér

- nivní sediment
- písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment

neogén

- štěrky, písčité štěrky, písky s vložkami jílu

devon-karbon

- amfibolit
- granodiorit
- granit

kambrium,ordovik

- svor

- zlom předpokládaný
- zlom předpokládaný, překrytý sedimentem

Na povrchu lokality se většinou nachází antropogenní navážky různého původu, pod nimiž jsou pokryvné útvary tvořené eluvium skalního podloží. Zvětraliny eluvia mají různorodé složení sahající od hlinitého písku až po štěrkopísek s úlomky svoru, živců a křemene. Přes lokalitu neprochází žádná tektonická porucha, která by mohla ovlivnit migraci kontaminantu, nejbližší zlom se nachází asi 300 metrů na východ od lokality a propaguje v SSZ-JJV směru, druhý, významnější zlom, se nachází asi 400 metrů na jih a prochází ve směru ZSZ-VJV.

Na obrázku 4 na předchozí straně je zobrazena zjednodušená geologická mapa Velké Hleďsebe a jejího blízkého okolí spolu s legendou přítomných hornin.

3.4 Hydrogeologické poměry

Oblast náleží do hydrogeologického rajónu 6212 - Krystalinikum v povodí Mže po Stříbro a Radbuzy po Staňkov a je vcelku podrobně prozkoumána několika desítkami vrtů, z nichž všechny byly ukončeny v eluvium.

Na lokalitě se vyskytují dvě zvodně, mělká a hlubší. Kontaminace se nachází v mělké zvodni, která je vázána na eluvium. Hlubší oběh podzemní vody je vázán na puklinový systém hornin krystalinika, který je úzce spjat s mariánskolázeňskou zřídelní strukturou, nicméně Analýza rizika (Faflík, 2009) možnost kontaminace vod hlubšího oběhu označuje za málo pravděpodobnou a proto nebyla uvažována. Zajímat se tedy budeme pouze o mělkou zvodně, tvořenou kvartérními sedimenty a zvětralým pláštěm krystalinika. Podle posledních průzkumů na lokalitě (Pitrák, 2013; Bruthans, 2014) se ukázalo, že tato mělká zvodně je ještě sama rozdělena na dvě menší zvodně oddělené jílovou vrstvou. Tato jílová vrstva byla zachycena vrtvy CV-1 a CV-2, ale nemáme o ní zprávy z ostatních vrtů, respektive nemáme k dispozici popisy jader ostatních vrtů.

Hlavní směr proudění v mělké zvodni je ze západu na východ. Voda proudí směrem na východ ke Kosovému potoku, který je drenážní bází. Zvodně je silně závislá na srážkách a hladina podzemní vody velmi kolísá v závislosti na nich, místy je ale vsak dešťové vody omezen betonovými panely na povrchu. Přes lokalitu protéká bezejmenný potok, který je pod areálem veden vyzděným potrubím, na sever od lokality pak protéká Kosový potok s dlouhodobým průměrným průtokem asi 0,5 m³/s.

Na základě rozborů vzorků podzemní vody z lokality bylo zjištěno, že pozadové koncentrace všech přirozeně se vyskytujících iontů (nebereme tedy v potaz koncentrace kontaminantu) se nijak nevymykají průměrnému složení podzemních vod v dané oblasti až na mírně zvýšený obsah CO₂, který je ovšem v oblasti výskytu tohoto typu minerálních vod běžný. Průměrná celková mineralizace činí 0,33 g/l.

Hydraulické parametry prostředí na lokalitě jsou popsány v Analýze rizika (Faflík, 2009) přibližně takto: Na šesti vybraných vrtech byly provedeny čerpací a stoupací zkoušky, ze kterých byla určena hodnota hydraulické vodivosti, která v průměru ze všech zkoušek činí $7,1 \cdot 10^{-6}$ m/s, všechny hodnoty se pak pohybovaly v intervalu od $1,29 \cdot 10^{-4}$ do $5,15 \cdot 10^{-7}$ m/s. Výpočty byly prováděny podle následující rovnice, která je Jacobovou transformací Theisových rovnic:

$$T = 0,183 \cdot Q_p / S_p$$

Q_p je čerpané množství, S_p je snížení pro daný interpretovaný úsek, T je transmisivita. Z transmisivity byla pak určena hydraulická vodivost jako podíl transmisivity a mocnosti zvodnělé vrstvy.

Na vrtu CV-1, který se nachází přibližně uprostřed areálu a který je jedním z dvojice vrtů (druhý je CV-2), na níž budou probíhat pilotní testy, byla provedena karotáž (Pitrák, 2013) za účelem zjištění vertikálního proudění ve vrtu, kvality jílové cementace okolo vrtu a hydraulické vodivosti prostředí okolo vrtu. Opět podle Jacobovy metody přímky byla zjištěna hodnota celkové hydraulické vodivosti zvodně - $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s.

4. Znečištění lokality

Zájmové území je velice silně znečištěno několika různými druhy kontaminantů. Díky dlouhodobé lhostejnosti po léta unikaly škodlivé látky z několika míst a došlo tak ke znečištění nejen povrchových vod, ale i ke kontaminaci podzemních vod, zemin (nesaturované zóny) a stavebních konstrukcí. V této kapitole popíšu zdroje kontaminace, její stáří a charakter.

4.1 Zdroje kontaminace

Škodlivé látky byly používány především při povrchových úpravách výrobků na výrobní lince. Ta měla odmašťovací a lakovací část. Odmašťovací zařízení tvořila odmašťovací vana naplněná $2,5 \text{ m}^3$ trichlorethenu a tetrachlorethenu. Samotné odmaštění bylo prováděno v páře, která pak byla odsávána zařízením napojeným na adsorbční čistící filtr z aktivního uhlí. Účinnost čištění byla zjištěna více než 97 %, problém byl, že zachyceno bylo pouze malé množství par, zbytek unikal (v rámci měření emisí byl zjištěn dlouhodobý únik trichlorethenu, tetrachlorethenu a xylenů do ovzduší). Únik trichlorethenu (zkratka TCE) byl stanoven na 7,5 až 9,0 kg/hod! Po odmaštění byly výrobky dopravníkem transportovány do lakovací části, která se skládala z máčecí vany a sušárny. Lakovací vana měla rozměry 6,2 x 3,0 metry, hloubku 1,6 metru a byla také zdrojem kontaminace.

Dalším zdrojem znečištění byl sklad barev a hořlavin. V tomto skladu byly uchovávány barvy, ředidla a rozpouštědla pro výrobu. V podlaze skladu byl umístěn sběrný kanál, který měl sloužit k zachycení unikající kontaminace. Sběrný kanál se po stržení budovy zachoval a dnes je zaplněn srážkovou vodou s povlakem ropných látek.

K menším nesoustředěným únikům ropných látek docházelo také v místech, kde se nacházela strojní zařízení (nůžky, lisy, kompresory). Tato zařízení se nacházela porůznu v budovách dílen, hale či v lisovně. Je tedy zřejmé, že zdrojů kontaminace bylo několik a byly roztroušeny po celém areálu.

4.2 Charakter kontaminace

Lokalita byla znečištěna několika druhy chemických látek, konkrétně chlorovanými uhlovodíky, aromatickými uhlovodíky a nepolárními extrahovatelnými látkami. V dalších podkapitolách bude popsáno jejich chemické složení a jejich škodlivý vliv na živé organismy (zdroj - internetové stránky US EPA, <http://water.epa.gov/drink/contaminants/index.cfm>).

4.2.1 Chlorované uhlovodíky

Jako chlorované uhlovodíky označujeme organické látky, které mají některé nebo všechny atomy vodíku nahrazeny atomy chloru. Z těchto pro člověka toxických látek se na zájmové lokalitě nacházely následující tři: trichlorethen (TCE), tetrachlorethen (PCE) a dichlorethen (DCE).

Trichlorethen (TCE), chemicky C_2HCl_3 , je bezbarvá kapalina nasládlého zápachu. Tato látka bývá používána mimo jiné jako čisticí a odmašťovací prostředek na kovové materiály. Má narkotické a dráždivé účinky, při akutních otravách působí neurotoxicky. O jeho karcinogenitě se vedou spory. Maximální povolené koncentrace ve vodě - $0,1 \mu\text{g/l}$ - byly na lokalitě překročeny až 250 krát.

Tetrachlorethen (PCE), chemicky C_2Cl_4 , je bezbarvá kapalina s teratogenními a hepatotoxickými účinky, je také karcinogenem druhé kategorie (tzn. podezřelý z karcinogenity pro člověka). Poškozuje plodnost, napadá jaterní enzymy a přítomný v pitné vodě zvyšuje riziko onemocnění leukémií.

Dichlorethen (DCE), chemicky $C_2H_2Cl_2$, ve skutečnosti představuje dva izomery- cis 1,2 a trans 1,2 dichlorethen. Oba izomery působí na lidský organismus toxicky, jsou prokazatelně karcinogenní, způsobují nevolnost, závratě, zvracení, poškozují ledviny a játra.

4.2.2 Aromatické uhlovodíky

Z aromatických uhlovodíků byl na lokalitě přítomen benzen, toluen a xylen (respektive jeho izomery). Tyto látky se většinou vyskytují ještě s ethylbenzenem a mají souhrnné označení BTEX (zkratka z benzen, toluen, ethylbenzen a xylen), přičemž xylen není jedna látka, ale skupina látek (orto-,meta- a paraxylen, chemicky dimethylbenzen).

Benzen (C_6H_6) je karcinogen první kategorie, tzn. že je prokazatelně karcinogenní pro člověka. Je toxický při akutní i chronické otravě, dráždivý při styku s pokožkou. V průmyslu je používán jako rozpouštědlo, sám je však ve vodě jen slabě rozpustný a navíc je chemicky stabilní.

Toluen (methylbenzen) je čirá, při vdechnutí či styku s pokožkou škodlivá látka. Při vdechování může způsobit závislost, kumuluje se v organismu. V průmyslu se opět využívá jako rozpouštědlo, ve vodě je velmi málo rozpustný, má nižší hustotu než voda.

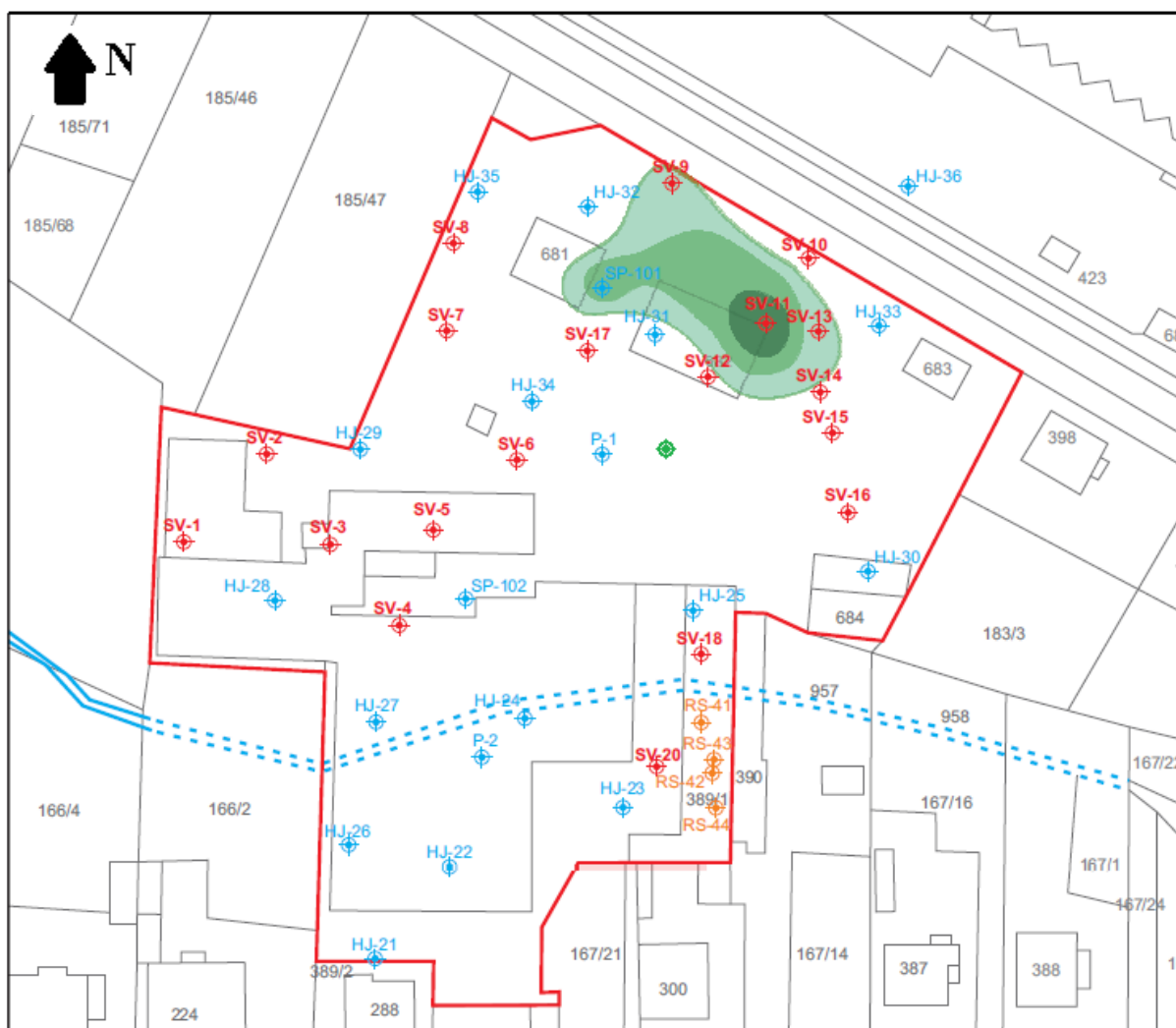
Xyleny jsou skupina látek, které jsou velmi těkavé, takže se dostávají převážně do ovzduší. Jsou součástí nátěrových hmot a v přírodě jsou biotransformací rozložitelné v půdě i ve vodě, někdy i za anaerobních podmínek. Jsou zdraví škodlivé při požití.

4.2.3 Nepochůrné extrahovatelné látky

Zkratkou bývají označeny jako NEL a jedná se o velice různorodou směs organických látek. Jejich hlavním zdrojem jsou produkty získané z ropy - benziny, petroleje, nafta, mazací oleje, mazut nebo asfalt. V podzemní vodě se mohou vyskytovat v mnoha formách. Mohou být rozpuštěné, tvořit kapalnou fázi na hladině nebo se sorbovat. Jejich schopnost se sorbovat závisí na množství organického uhlíku v půdě. Nebezpečná je jejich vlastnost akumulace v lipidních tkáních organismů. Přítomnost těchto látek většinou snadno poznáme podle charakteristického zápachu a olejového filmu na hladině vody.

4.3 Rozšíření kontaminace

Díky rozptýlení zdrojů kontaminantů a jejich velkému množství tyto nebezpečné chemikálie na lokalitě Velká Hleďsebe pronikly nejen do povrchových toků, ale také do nenasycené zóny, půdního vzduchu, stavebních konstrukcí a nakonec i do podzemních vod, přičemž podzemní voda je hlavním transportním médiem (Kubricht, 2012). Díky dobré vrtné prozkoumanosti areálu byla s velkou přesností určena místa s nadlimitní koncentrací kontaminantů a poté vykresleny konturové mapy, zobrazující rozšíření kontaminačních mraků v areálu - viz obrázky 5 a - d. Díky omezenosti zakázky na oblast areálu neznáme přesný průběh čela kontaminačního mraku.



Legenda:

HJ-21 stávající hydrogeologické vrtý

SV-1 nové průzkumné hydrogeologické vrtý

pozice cirkulačního vrtu

Kontaminace suma BTEX:

Koncentrace 620 až 5 000 ug/l

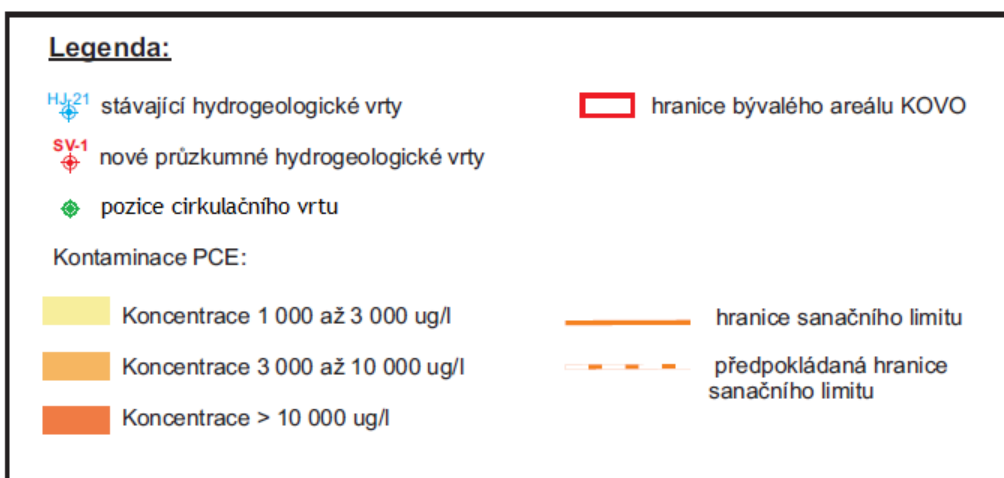
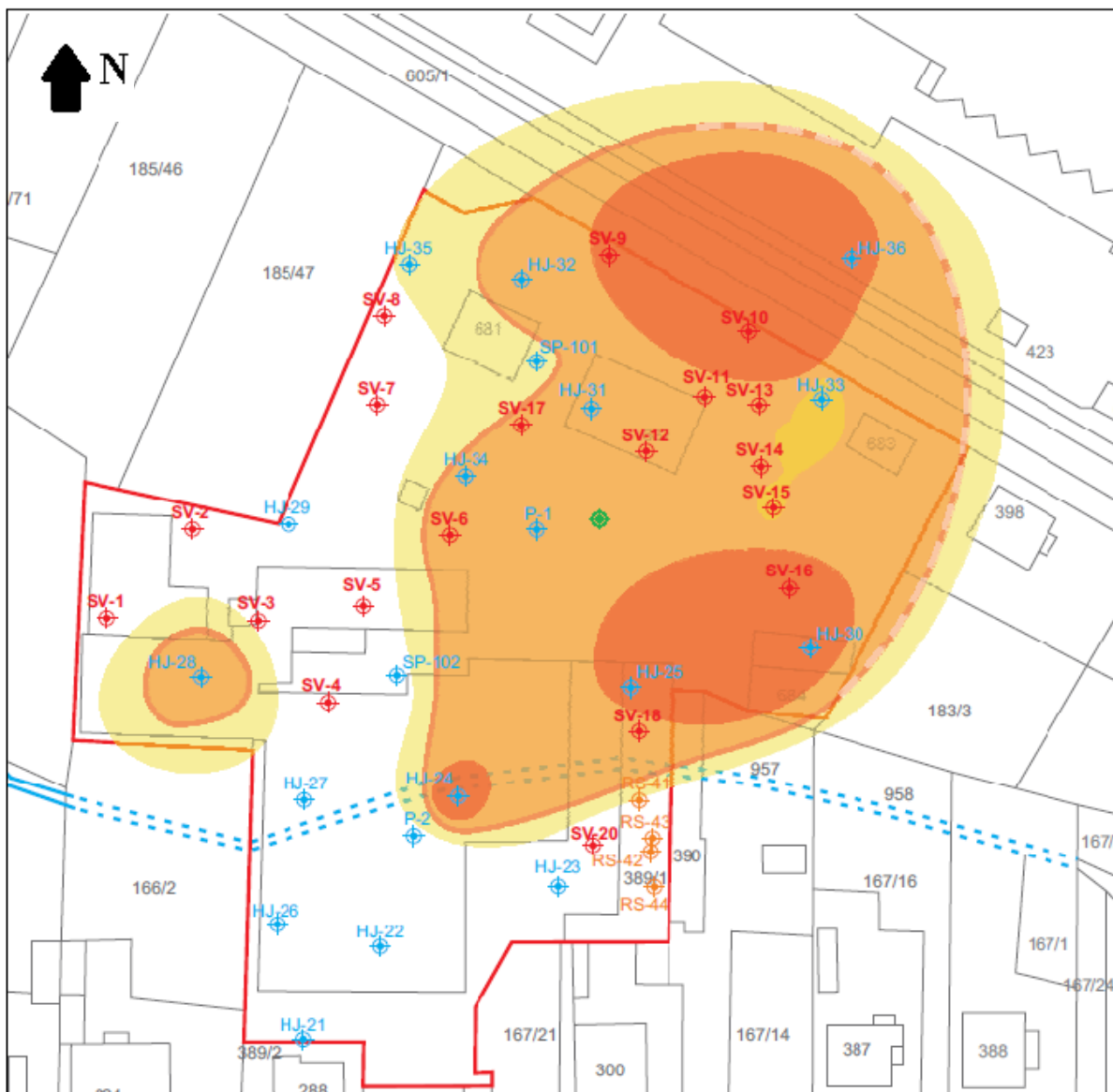
Koncentrace 5 000 až 10 000 ug/l

Koncentrace > 10 000 ug/l

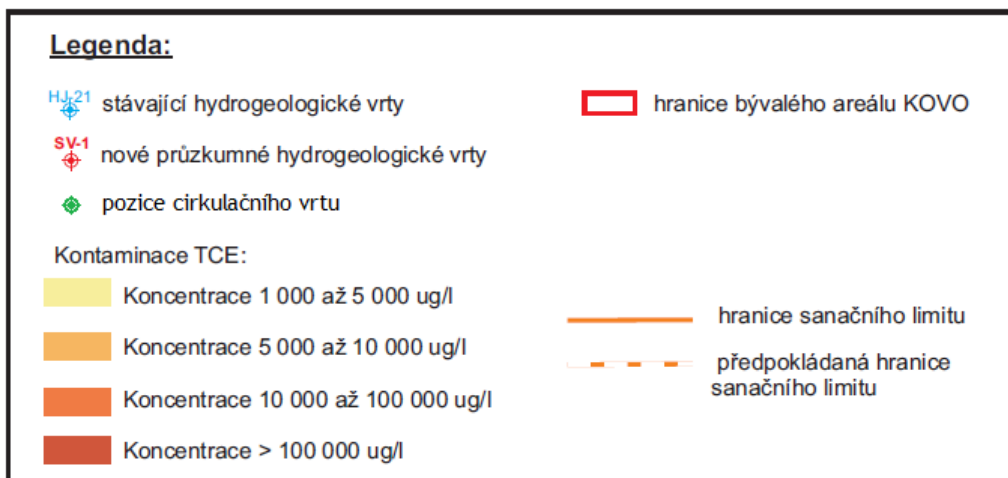
hranice bývalého areálu KOVO

hranice sanačního limitu

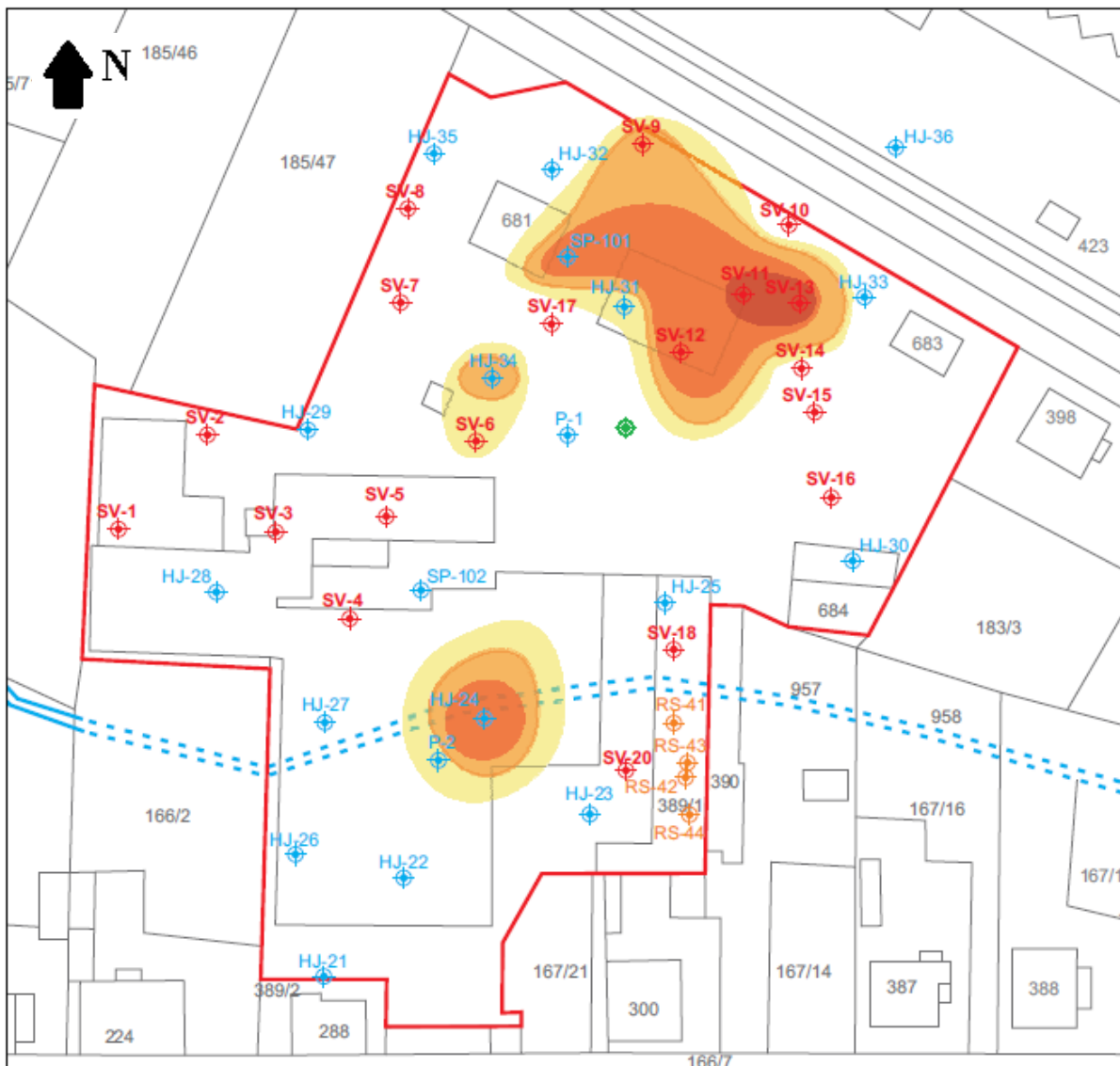
Obrázek 5 a: Rozsah kontaminace látkami benzen, toluen, ethylbenzen, xylen (souhrnné označení BTEX), měřítko 1:1000, převzato a upraveno z (Kubricht, 2012).



Obrázek 5 b: Rozsah kontaminace tetrachlorethylenem (zkratka PCE), měřítko 1:100, převzato a upraveno z (Kubricht, 2012).



Obrázek 5 c: Rozsah kontaminace trichlorethylenem (zkratka TCE), měřítko 1:1000, převzato a upraveno z (Kubricht, 2012).



Legenda:

HJ-21 stávající hydrogeologické vrtý

SV-1 nové průzkumné hydrogeologické vrtý

pozice cirkulačního vrtu

Kontaminace 1,2 cis DCE:

Koncentrace 1 000 až 3 000 ug/l

Koncentrace 3 000 až 10 000 ug/l

Koncentrace 10 000 až 100 000 ug/l

Koncentrace > 100 000 ug/l

hranice bývalého areálu KOVO

hranice sanačního limitu

předpokládaná hranice sanačního limitu

Obrázek 5 d: Rozsah kontaminace dichlorethylenem (zkratka DCE), měřítko 1:1000, převzato a upraveno z (Kubricht, 2012).

5. Jednoduché modely cirkulačního vrtu

Proudění v okolí cirkulačního vrtu obecně závisí na mnoha okolnostech, a proto jsem se rozhodl, že nejprve vytvořím jednoduchý model cirkulačního vrtu v homogenním izotropním prostředí, pomocí kterého budu zkoumat proudění v okolí vrtu při změnách různých parametrů.

Na proudění kolem vrtu mají vliv hlavně tyto dvě věci - konstrukce vrtu a vlastnosti okolního prostředí:

Vliv konstrukce vrtu:

- množství přečerpávané vody
- délka perforací vrtu
- vzdálenost perforací vrtu
- asymetrie perforací (tzn. rozdílná délka jednotlivých perforací)
- počet perforací

Vliv prostředí:

- hydraulická vodivost prostředí
- anizotropie prostředí
- homogenita a heterogenita prostředí (výskyt jílových čoček, propustnějších poloh)
- proudění podzemní vody v okolí vrtu
- mocnost zvodnělé vrstvy

Jednotlivé kombinace těchto faktorů ovlivňují tvar cirkulační cely a tím i na dosah proudění (tzn. největší vzdálenost, ve které činnost vrtu ještě výrazněji ovlivňuje přirozené proudění). Z výčtu vidíme, že odhadnout chování vrtu nebude snadné. Později se však ukáže, že některé faktory budeme moci zanedbat, nejsou to ale zdaleka všechny, a proto jsem vytvořil jednoduchý model, ve kterém jsem vždy malými změnami parametrů zkoumal jeho reakce. Jednalo se v podstatě o analýzu citlivosti modelu.

Z výše uvedených faktorů jsem zkoumal všechny kromě počtu perforací.

5.1 Zadání úlohy

Zabývejme se tímto problémem:

Pomocí numerických modelů zjistí, jaký bude mít cirkulační vrt vliv na proudění podzemní vody za těch nejjednodušších podmínek, tj. v homogenním a izotropním prostředí. Jaká bude změna proudění za podmínek méně jednoduchých (anizotropní prostředí, heterogenní prostředí)? Jaké konstrukční prvky vrtu mají největší vliv na vyvolanou cirkulaci a jaké mají naopak vliv mizivý? Cirkulační vrt je především sanační zařízení, proto mimo jiné věnuj pozornost i velikosti cirkulační cely (resp. dosahu cirkulace).

5.2 Koncepční model

Koncepční model jsem vytvořil tak, abych pomocí něj mohl co nejlépe zkoumat proudové pole v okolí vrtu. Nejvíce mě zajímalo proudění v saturované zóně, proto jsem problém řešil pouze jako stacionární nasycené proudění.

Nejprve bylo nutné zvolit geometrii oblasti. Z důvodu homogenního a izotropního prostředí jsem se rozhodl pro válec o poloměru podstavy 50 metrů a výšce 14 metrů. Mohl jsem použít válec, neboť z definovaného problému vyplývá, že bude platit radiální symetrie úlohy. Poloměr válce 50 metrů jsem zvolil na základě odborných článků (Herrling a Stamm, 1992; EPA, 1998; Johnson et al., 2007) a výšku válce jsem zvolil 14 metrů, protože to odpovídá výšce zvodně na pilotní lokalitě Velká Hleďsebe. Předpokládal jsem, že zvodně je zdola ohraničena nepropustným podložím. Hodnotu hydraulické vodivosti pro celý válec jsem zvolil $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s, neboť tato hodnota také odpovídá pilotní lokalitě.

Za souřadný systém jsem zvolil válcové souřadnice tak, že vertikální osa z byla totožná s osou válce a počátek souřadného systému se nacházel ve středu dolní podstavy modelového válce.

Na různých částech povrchu válce jsem předepsal různé okrajové podmínky, a to následujícím způsobem: Na celém plášti válce jsem předepsal Dirichletovu okrajovou podmínku - hodnotu hydraulické výšky 14 metrů. Dolní podstava válce představovala nepropustné podloží, a proto jsem na ní předepsal Neumannovu okrajovou podmínku - hodnotu průtoku. Jelikož se jednalo o nepropustné podloží, byla hodnota průtoku nula. Horní podstava válce pak představovala volnou hladinu, zde lze předepsat okrajovou podmínku více způsoby (nulový průtok nebo tlaková výška rovna nule, tzn. hydraulická výška rovna geodetické).

Zbývalo už jen předepsat do modelu cirkulační vrt, který byl umístěn do osy válce do míst odpovídajících potřebám konkrétních jednotlivých modelů v podobě zdrojového členu.

V několika málo případech, např. když jsem testoval anizotropii, jsem změnil hodnoty některých parametrů, ale vždy na to u daného modelu předem upozorním, stejně jako na konkrétní hodnoty a prostorovému umístění dalších parametrů.

5.3 O programu Feflow

Před popisem samotného řešení bych rád věnoval pár vět programu Feflow, který jsem použil k realizaci svých modelů.

Feflow (zkratka Finite Element subsurface FLOW system) je počítačový program, který slouží k simulaci proudění podzemní vody, transportu látek podzemní vodou a přenosu tepla v porézním a puklinovém prostředí. Program pomocí metody konečných prvků řeší parciální diferenciální rovnice proudění podzemní vody v saturované i nesaturované zóně, lze pomocí něj řešit složitější problémy, jako je například vliv hustoty na proudění či transport více komponent podzemní vodou (zdroj - <http://en.wikipedia.org/wiki/FEFLOW>).

Poprvé byl tento v Německu vytvořený program představen v roce 1979. Od té doby byl neustále vylepšován a v současnosti je verze Feflow 6.2 jeho nejaktuálnější verzí. Já jsem své modely realizoval ve verzi 5.2. Abych mohl dále v této práci používat některé termíny z Feflow, popíšu je nyní.

V dalším textu využiji termín „okrajová podmínka čtvrtého typu“. Navzdory názvu se nejedná o skutečnou okrajovou podmínku, v programu lze pomocí tohoto příkazu vytvořit vrt/studnu. Matematicky se jedná o zdrojový člen v obecné rovnici proudění podzemní vody (viz rovnice 1). Do programu se zadává do jednoho bodu síť v jednotkách m^3/den . Pokud je zadaná hodnota kladná, značí čerpání, pokud je záporná, značí injektáž.

Několikrát použiji funkci Fluid flux analyser. Po spuštění numerického řešení modelu lze pomocí funkce zjistit množství vody, která proudí skrze určitou část modelu. Mohu určit horizontální či vertikální průtok určitou vrstvou modelu (plocha oddělující dvě vrstvy modelu se v programu nazývá „slice“), horizontální průtok všemi vrstvami modelu, průtok jedním bodem sítě, jedním i více elementy sítě (element je plocha vymezené spojnicemi jednotlivých bodů sítě) nebo dokonce libovolnou úsečkou/ lomenou čarou, kterou mohu nakreslit kamkoliv do oblasti modelu.

Užitečnou funkcí je také funkce particle tracking. Tato funkce po kliknutí myši do jakéhokoliv bodu uvnitř modelové oblasti vykreslí trajektorii, kterou prošla (případně kterou projde) částice vody, které se nachází v označeném bodě. Funkce má více možností nastavení, umožňuje například vykreslení proudnic v okolí čerpaného vrtu pomocí jediného kliknutí na bod sítě, ve kterém se vrt nachází.

Záložky Halt&view results či 3D Projection obsahují několik funkcí (jednou z nich je výše popsaná particle tracking), které umožňují vizuálně zobrazit výsledky modelu.

5.4 Řešení

Řešení jsem uskutečnil v programu Feflow.

Nejprve jsem pomocí upraveného textového souboru s koncovkou dxf vložil hranici oblasti. Hranicí oblasti byla kružnice o poloměru 50 metrů. Další vložený textový soubor, tentokrát se třiatvaceti menšími kružnicemi o různém poloměru, jsem použil ke zjišťování dosahu proudění.

V takto definované oblasti jsem nechal program vygenerovat trojúhelníkovou síť s počtem bodů 2000.

Modelový válec jsem rozdělil na 15 vrstev (pomocí 16 ohraničujících ploch). Tyto vrstvy nepředstavovaly vrstvy geologické, jednalo se pouze o vrstvy numerické sítě. Horní hranice nejvyšší vrstvy byla ve výšce 14 metrů (popis dle souřadného systému zavedeného v koncepčním modelu, tedy 14 metrů znamená 14 metrů nad nepropustným podložím, které je v úrovni $z = 0$), dolní hranice této vrstvy byla ve výšce 13,5 metru. Následovala půl metru mocná vrstva, jejíž dolní hranice byla ve výšce 13 metrů, každá další vrstva pak byla mocná jeden metr. Poslední vrstva měla svou dolní hranici v úrovni 0 metrů.

Všechny hraniční plochy vrstev až na hraniční plochy první vrstvy jsem označil jako fixed (nepohyblivé). Horní hraniční plochu první vrstvy jsem označil jako free&moveable, což znamená, že se plocha bude chovat jako volná hladina, a dolní hraniční plochu horní vrstvy jsem označil jako unspecified. Přítomnost této unspecified plochy je doporučována v manuálu k programu (Diersch, 1998).

Do celé oblasti jsem vepsal hodnotu hydraulické vodivosti $K = 1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Do takto připravené oblasti jsem poté zadal okrajové podmínky. Dolní podstavě jsem nezadal nic, což si program převede jako nulový průtok, horní podstavu jsem definoval jako volnou hladinu. Dirichletovu okrajovou podmínku jsem zadal na plášť modelového podle koncepčního modelu, tedy jako hodnotu hydraulické výšky čtrnáct metrů.

Nakonec jsem zadal samotný cirkulační vrt. Provedl jsem to pomocí funkce vložení tzv. okrajové podmínky čtvrtého typu, která v programu značí studnu/vrt, ze kterého je čerpána voda, matematicky se však jedná o zdrojový člen q_s z obecné rovnice proudění podzemní vody (rovnice 1). Jedná se o rovnici ustáleného proudění v saturevané zóně (Bear, 1979). Tuto rovnici program numericky řešil, aby mohl nasimulovat situaci vzniklou z mnou zadaných podmínek.

$$(1) \quad K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + q_s = 0$$

K zde představuje hydraulickou vodivost, x, y, z představují osy kartézského souřadného systému, h je hydraulická výška. K je funkcí polohy, tedy $K=K(x,y,z)$, i když tak v rovnici pro přehlednost není uvedeno. Podrobnější předepsání cirkulačního vrtu vždy popisují v odpovídajících dílčích podkapitolách. Všechny níže uvedené modely byly vytvořeny jako simulace stacionárního proudění, pokud není napsáno jinak.

5.4.1 Zjišťování dosahu vrtu

Používaný program (Feflow) nemá žádný nástroj, kterým by bylo možno okamžitě zjistit, kam až sahá vliv proudění vyvolaného cirkulačním vrtem, proto bylo nutné zjišťovat dosah vrtu jiným způsobem. Program však umožňuje zjistit průtok vrstvou modelu či její hraniční plochou a jelikož jsem znal množství přečerpávané vody, mohl jsem použít následující postup.

Na poloviční vzdálenosti mezi dvěma perforacemi jsem měřil velikost vertikálního proudění. Vzdáleností perforací mám na mysli vzdálenost od dolního konce horní perforace k hornímu konci dolní perforace. Pokud bych v dané výškové úrovni měřil vertikální průtok skrze celou plochu (hraniční plochu jedné z vrstev), získal bych přečerpávané množství, ale nezjistil bych nic o dosahu proudění. Postupoval jsem tak, že jsem v poloviční vzdálenosti mezi dvěma perforacemi zjišťoval průtok skrze množství soustředných kruhů o poloměrech 2, 3, 4...20 metrů a se středem v ose válce. Čím větší byl poloměr kruhu, tím více vody jím protékalo. Průtok skrz kruhy se zpočátku rychle zvětšoval, ale s postupně se zvětšujícími poloměry se průtok snižuje méně, nakonec se nezvětšuje téměř vůbec a s vyššími poloměry kruhů se průtok blíží přečerpávanému množství vody. Pokud si vyjádřím poloměry kruhů vůči odpovídajícím průtokům v grafu, získám kumulativní křivku, ze které mohu odečíst, kolik procent přečerpávané vody teče v určité vzdálenosti od vrtu.

Dosah cirkulačního vrtu zjišťovaný tímto postupem je tedy taková kolmá vzdálenost od vrtu, kdy se hodnota průtoku (měřená v úrovni odpovídající poloviční vzdálenosti mezi horní a dolní perforací) při zvětšení poloměru kruhu již nemění. Nicméně samotný termín dosah cirkulačního vrtu, či spíše správněji dosah proudění vyvolaného cirkulačním vrtem, je poněkud nejednoznačný a neurčitý. Bližšímu rozboru tohoto termínu jsem věnoval kapitolu 5.6.1.

5.5 Výsledky

Za pomoci numerického modelování jsem zkoumal proudění v okolí cirkulačního vrtu v homogenním izotropním prostředí. Prováděl jsem analýzu citlivosti modelu pro jednotlivé faktory, které mají vliv na proudění v okolí vrtu. Vliv konstrukce vrtu popisují v podkapitolách 5.5.1 až 5.5.4. Vliv prostředí popisují v podkapitolách 5.5.5 až 5.5.9.

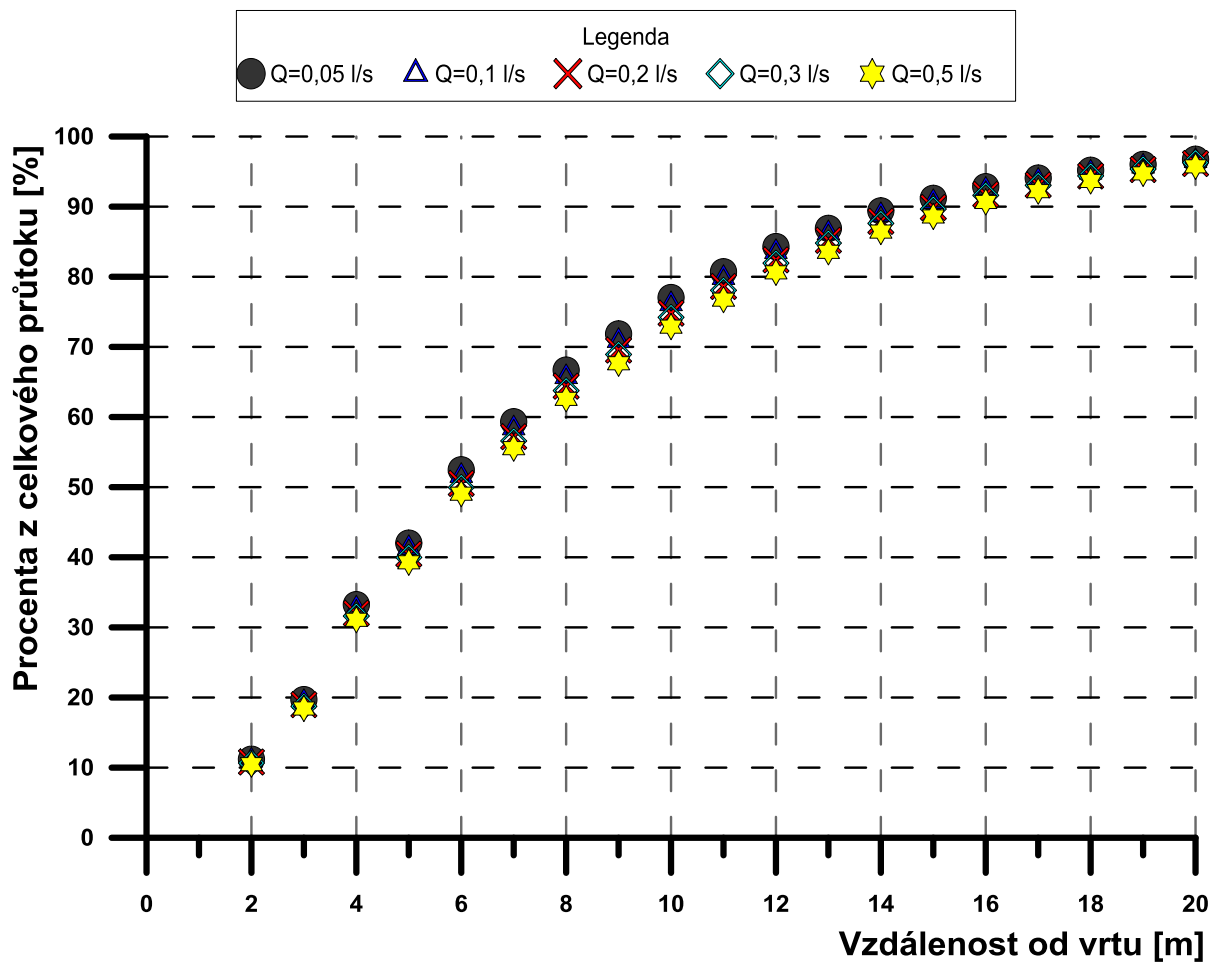
5.5.1 Množství přečerpávané vody

Při prvotních úvahách o dosahu cirkulačního vrtu jsem předpokládal, že bude výrazně záviset na množství čerpané vody. Tuto myšlenku však vyvrátil již Stamm (1995). Ve své práci ukazuje, že pro napjatý homogenní kolektor konstantní výšky při ustáleném proudění a radiálně symetrických vlastnostech prostředí je dosah vrtu nezávislý na velikosti čerpání. Pomocí numerických modelů jsem zjistil, že podobně to platí i pro zvodeň s volnou hladinou, jak můžeme vidět na obrázku 6.

Při tvorbě modelu jsem se řídil koncepčním modelem. Vrt čerpal dolní a zasakoval horní perforací, obě perforace byly dlouhé dva metry a vzdálené šest metrů. Měnil jsem pouze hodnotu čerpání, a to postupně z hodnoty 0,05 l/s až na hodnotu 0,5 l/s.

Na obrázku 6 vidíme, že při různých průtocích nepozorujeme žádnou výraznou změnu v průběhu kumulativních křivek. Největší rozdíl byl zjištěn ve vzdálenosti 9 metrů od vrtu pro čerpání 0,05 a 0,5 l/s a činil 4,2 % z celkového průtoku. Zdá se tedy, že pro dané průtoky nezávisí dosah nijak výrazně na čerpaném množství. Bylo by možné namítnout, že zkoumané průtoky byly příliš malé a při jejich zvětšení by mohl být pozorovatelný větší rozdíl, nicméně průtoky musí být malé (v řádu maximálně prvních decilitrů), a to z několika důvodů:

- 1) V cirkulačním vrtu bude umístěn čistící reaktor, jehož průtoková kapacita je omezená a pro jeho maximální účinnost jím může protékat jen určité množství vody za daný čas.
- 2) Při velkých čerpáních dochází k ovlivnění tvaru hladiny v okolí vrtu a to by mohlo vést k sekundární zvýšení mobility možných přítomných LNAPL's látek (Stamm, 1995).
- 3) Pokud čerpáme velké množství vody, nemusí nám tato voda nutně stíhat odtékat horní perforací a může se stát, že voda začne vytékat z vrtu ven jeho ústím, což by vedlo k nežádané redistribuci kontaminace z podzemní vody zpět do nenasycené zóny.



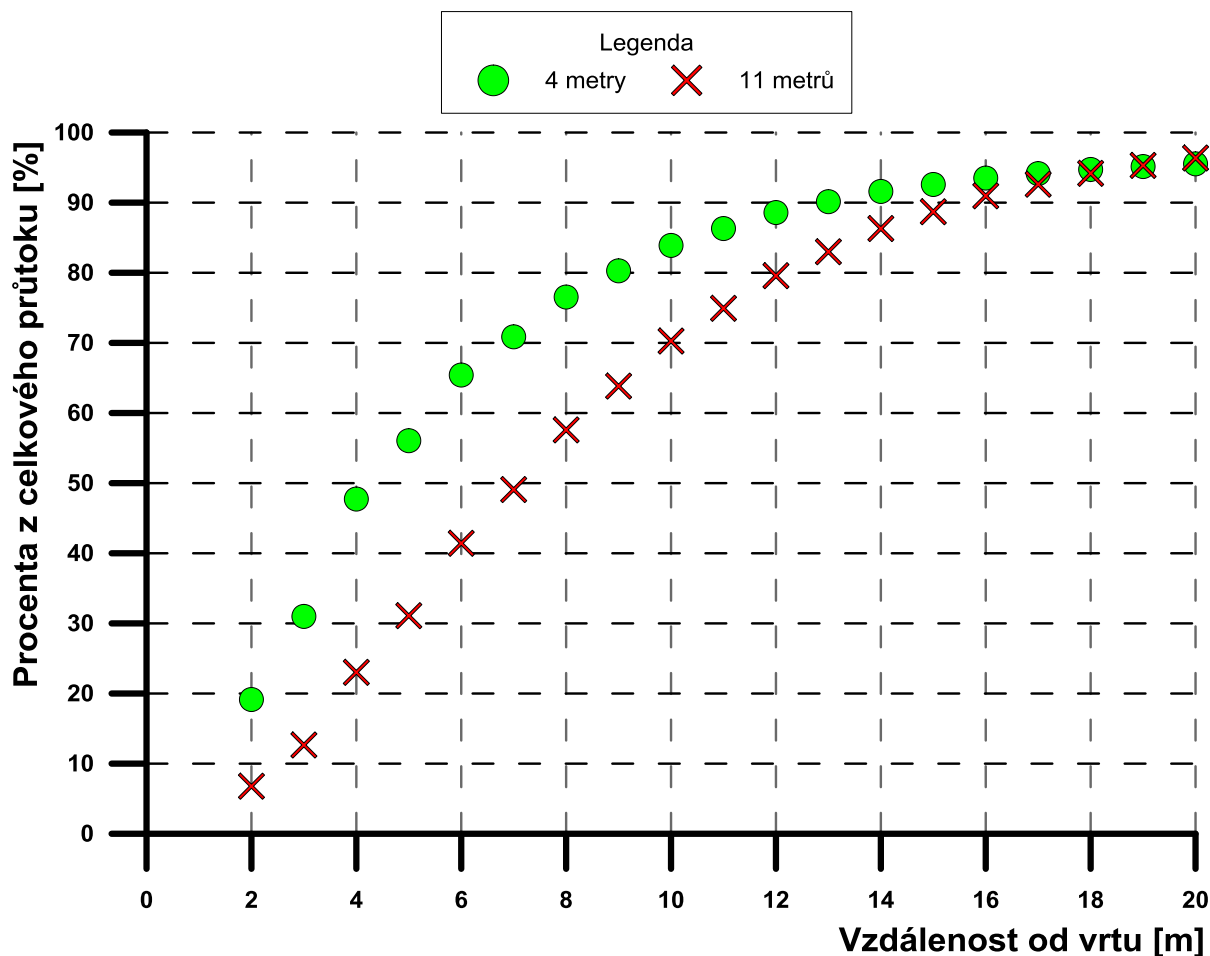
Obrázek 6: Závislost dosahu cirkulační cely na množství přečerpávané vody.

Ještě je důležité objasnit jednu věc. Dokazují dosah vrtu výše popsaným způsobem podle kumulativních křivek. V této kapitole jsem v grafu uvedl pro srovnání všechny získané kumulativní křivky, nicméně v dalších grafech budu uvádět pouze některé z nich, nejlépe pouze dvě. Dělán to proto, že kupř. v další podkapitole jsem postupně spočetl deset kumulativních křivek, které by všechny v grafu působily pouze zmatek a nepřehlednost. Proto jsem vybral vždy dvě až tři, které daný jev ilustrují mnohem přehledněji. Méně je někdy více.

5.5.2 Vzdálenost perforací

Dalším z faktorů ovlivňující dosah vrtu je vzdálenost jeho perforací. Působení této okolnosti jsem zkoumal v modelu, ve kterém jsem v oblasti předepsal vrt o délce perforací jeden metr a vzdálenosti jedenáct metrů. Hodnota čerpání byla 0,1 l/s.

Obvyklou metodou jsem pak zjišťoval dosah takto definovaného vrtu a následně jsem o jeden metr zmenšil vzdálenost mezi perforacemi, a to tím způsobem, že horní perforace zůstala nezměněna a dolní jsem posunul o metr výše (pomocí předepsání části zdrojového členu o vrstvu výše). Opět jsem zjistil dosah a dolní perforaci posunul o metr výše. Tento postup jsem opakoval, dokud nebyla dosažena vzdálenost 2 metry mezi perforacemi (přesně taková vzdálenost mezi perforacemi je i na vrtech CV-1 a CV-2 ve Velké Hleďsebi). Ze získaných kumulativních křivek jsem zjistil, že čím menší je vzdálenost mezi perforacemi, tím více vody proudí v blízkém okolí vrtu. To můžeme vidět na obrázku 7, kde je zřejmé, že kupř. v kolmé vzdálenosti čtyři metry od vrtu protéká při vzdálenosti perforací 4 metry téměř 50% (konkrétně 48%) celkového čerpaného množství, zatímco ve stejné vzdálenosti od vrtu při vzdálenosti perforací 11 m zde protéká něco přes 20 % (konkrétně 23%). Je otázkou, nakolik je ten který způsob výhodný. Pokud umístíme perforace blíže k sobě, budeme mít jistotu, že větší část vody nám protéká v blízkosti vrtu, ale za cenu menšího dosahu - museli bychom tedy umístit vrty blíže k sobě. Při větší vzdálenosti perforací budeme mít větší dosah vrtu a budeme tak moci vrty umístit dále od sebe, nicméně to může být na úkor rychlosti sanace, neboť při větších vzdálenostech perforací musí částice vody zdolat delší vzdálenost a neprojde tedy opakovaně vrtem tak často, jako kdybychom měli perforace blíže u sebe.



Obrázek 7: Závislost dosahu vrtu na vzdálenosti perforací.

5.5.3 Délka perforací

Dalším konstrukčním prvkem je samotná délka perforací. Pro tento případ jsem musel upravit geometrii oblasti tak, že jsem oproti koncepčnímu modelu z kapitoly 5.2 přidal ještě dvě metrové vrstvy, čímž se výška modelového válce zvýšila na 16 metrů. Ostatní zůstalo zachováno.

Cirkulační vrt jsem předepsal podle upraveného koncepčního modelu a zároveň tak, že vzdálenost mezi perforacemi byla vždy šest metrů, horní perforace vždy začínala 1 metr pod horní hranicí modelové oblasti (1 metr „pod hladinou“) a čerpané množství bylo 0,1 l/s. Postupně jsem prodlužoval perforace na 2, 3 a 4 metry.

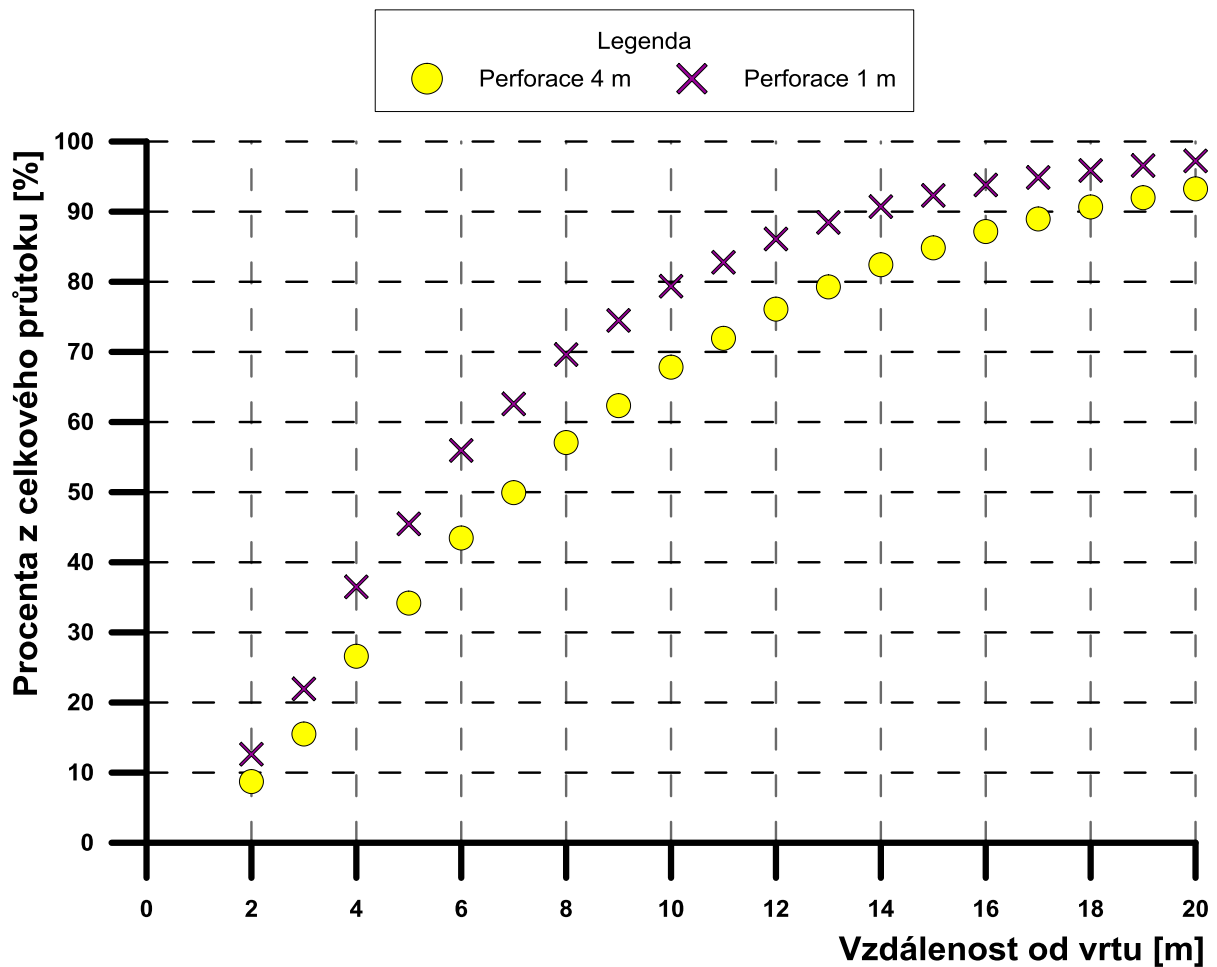
Delší perforací jsem dosáhl větší plochy, skrze kterou mohla voda proudit ven z vrtu/dovnitř do vrtu, což by se mělo projevit i na jeho dosahu. Z obrázku 8 je zřejmé, že určitý účinek je

pozorovatelný. Po prodloužení perforace pozorujeme při daných vzdálenostech a délkách perforací podobný vliv, jaký jsme viděli v předchozí podkapitole při oddalování perforací, pouze není tak výrazný (v obrázku 7 je ve vzdálenosti 6 metrů od vrtu rozdíl v průtocích asi 25%, zatímco v obrázku 8 je to přibližně „pouhých“ 12%). Větší délka perforací má tedy podobný vliv jako oddalování perforací se všemi výše zmíněnými klady i zápory. Delší perforací navíc odebíráme vodu z větší části zvodně, což nám umožňuje odstraňovat kontaminant z rozsáhlejší části kolektoru, než by tomu bylo při kratších perforacích.

Poznámka:

Je možné namítnout, že takovéto srovnávání je nekorektní a že srovnávám nesrovnatelné, protože pokud jsem například neměnil mocnost kolektoru a zároveň jsem nechával horní perforaci ve stejné vzdálenosti od hladiny podzemní vody, muselo zákonitě dojít k tomu, že v modelu s kratšími perforacemi (případně perforacemi blíže u sebe - předchozí podkapitola) docházelo k tomu, že jsem při čerpání dolní perforací odčerpával vodu i z té části kolektoru, která se nacházela pod vrtem, neboť u kratších vrtů nedosahovala dolní perforace až na nepropustné podloží. Tomuto jevu jsem se věnoval v podkapitole 5.5.9.

Jiný přístup by mohl být takový, že dolní perforace by vždy končila na nepropustném podloží a tím pádem by se se změnou délky perforace změnila i mocnost kolektoru. To je ovšem v našem případě nepoužitelné, neboť v daných hydrogeologických podmínkách máme určitou vodivou vrstvu (kolektor), který má určitou konečnou neměnnou mocnost, a je pouze na nás, abychom v závislosti na rozšíření kontaminace a vlastnostech prostředí rozhodli, jakou délku perforací zvolíme a do jaké vzdálenosti je umístíme.



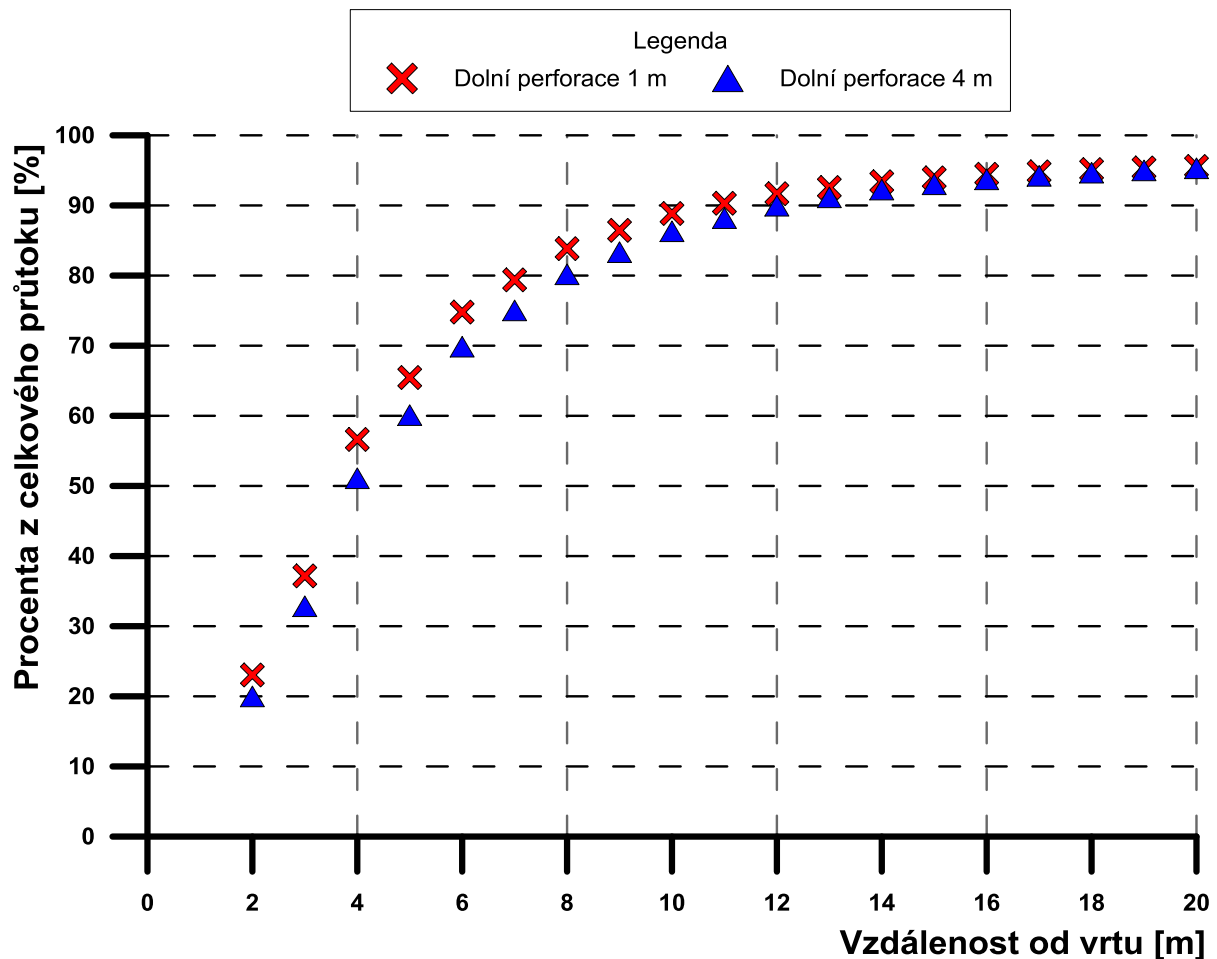
Obrázek 8: Vliv délky perforací na dosah proudění.

5.5.4 Asymetrie perforací

Asymetrií perforací je rozuměno uspořádání, kdy je jedna z perforací delší než druhá. V našem případě jsem vždy měnil délku dolní perforace a horní zůstávala zachována. Řídil jsem se koncepčním modelem a jediný parametr, který jsem měnil, byla délka dolní perforace. Horní perforace byla dlouhá jeden metr a začínala vždy jeden metr pod horní hranicí oblasti, dolní perforace měla délku nejprve jeden, pak dva, tři a nakonec čtyři metry, přičemž vzdálenost mezi perforacemi byla vždy 4 metry.

Zjistil jsem, že asymetrie perforací za daných vzdáleností a délek perforací nemá příliš výrazný vliv na dosah proudění vyvolané čerpáním v cirkulačním vrtu, jak je možné vidět i z obrázku 9. Po prodloužení dolní perforace o tři metry byl rozdíl v průtoku v určité vzdálenosti maximálně 6%, což je sice pozorovatelný rozdíl, není však zřejmě tak důležitý jako vzdálenost či délka perforací, zkoumané v předešlých podkapitolách.

Asymetrii perforace tedy můžeme vyřadit z hlavních činitelů, které mají dopad na dosah cirkulačního vrtu, budeme mít ale na paměti, že určitý vliv přece jen má a k jejímu využití může dojít v závislosti na předpokládaném charakteru a rozsahu kontaminace.



Obrázek 9: Vliv asymetrie perforací na dosah cirkulačního vrtu.

5.5.5 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost sama o sobě nemá na tvar cirkulační cely vliv, bude mít vliv pouze na rychlost proudění (Stamm, 1995; Mls, 2013). Přesto ji musíme brát v potaz v souvislosti s jedním jevem - pohybem hladiny ve vrtu při spuštění čerpání. Při standartním chodu vrtu čerpáme vodu dolní perforací a zasakuje horní perforací. Přitom dochází v horní části vrtu, resp. v dolní části vrtu, ke zvýšení, resp. ke snížení hydraulické výšky. Díky tomu stoupá hladina vody v horní části vrtu a v méně propustném prostředí, kde voda nestačí zasakovat,

může dojít k přetečení vrtu. Může k němu dojít také v případě, že přečerpáváme velké množství vody.

Přetečení vrtu má za následek redistribuci kontaminantu, proto bychom měli vždy z parametrů prostředí odhadnout či numerickým modelem ověřit, zda na dané lokalitě toto nebezpečí nehrozí.

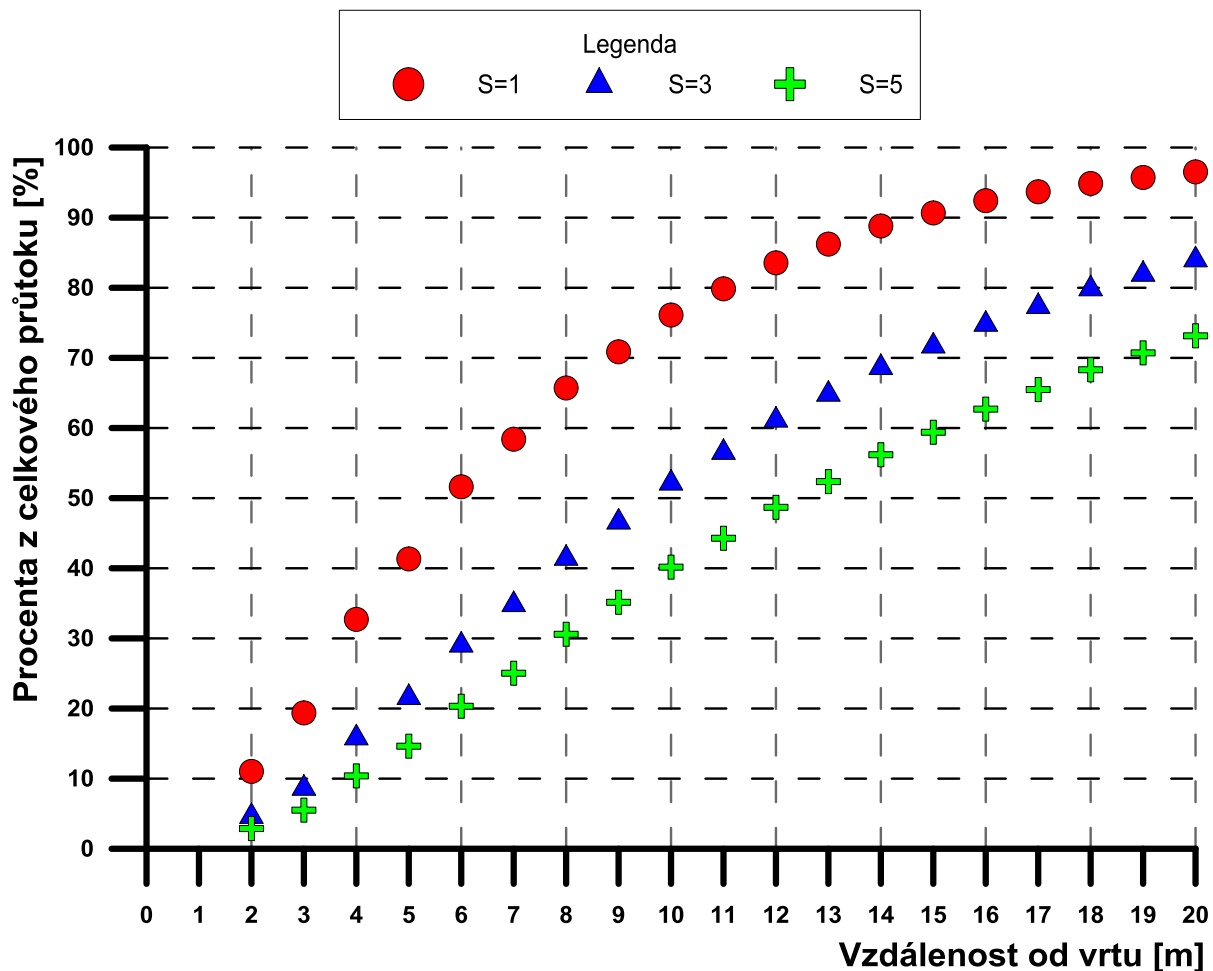
5.5.6 Anizotropie prostředí

Prostředí je k nějaké vlastnosti (v našem případě hydraulické vodivosti) izotropní, pokud je tato vlastnost nezávislá na směru. Pokud je závislá na směru, mluvíme o anizotropii. V hydrogeologii je obvykle vertikální hydraulická vodivost (K_z) menší než horizontální hydraulická vodivost (K_h , $K_h=K_x=K_y$), tento stav vznikl během sedimentace horniny. V odborných publikacích bylo dokázáno (Herrling a Stamm, 1992; Stamm, 1995; Cunningham et al., 2004), že čím větší bude horizontální hydraulická vodivost oproti vertikální, tím větší bude dosah proudění cirkulačního vrtu.

Vycházel jsem z koncepčního modelu a za nezměněné velikosti čerpání a konstrukce vrtu jsem pouze zvyšoval stupeň anizotropie a zapisoval výsledky. Stupeň anizotropie S je definován takto:

$$S=K_h/K_v,$$

kde K_h je horizontální hydraulická vodivost a K_v je vertikální hydraulická vodivost. Stupeň anizotropie nám ukazuje, kolikrát je hodnota horizontální vodivosti rozdílná oproti vertikální. V hydrogeologii obvykle platí, že horizontální hydraulická vodivost je vyšší než vertikální, proto je stupeň anizotropie číslo větší než jedna. Z obrázku 10 vidíme, že čím je stupeň anizotropie větší, tím větší je dosah cirkulačního vrtu. Zkoumal jsem pouze stupně anizotropie 1 až 5, i když u jílových materiálů mohou hodnoty stupně anizotropie dosahovat hodnot i 10 a více, naopak v píscích bývá stupeň anizotropie 1,5 – 3 (Bear, 1972).

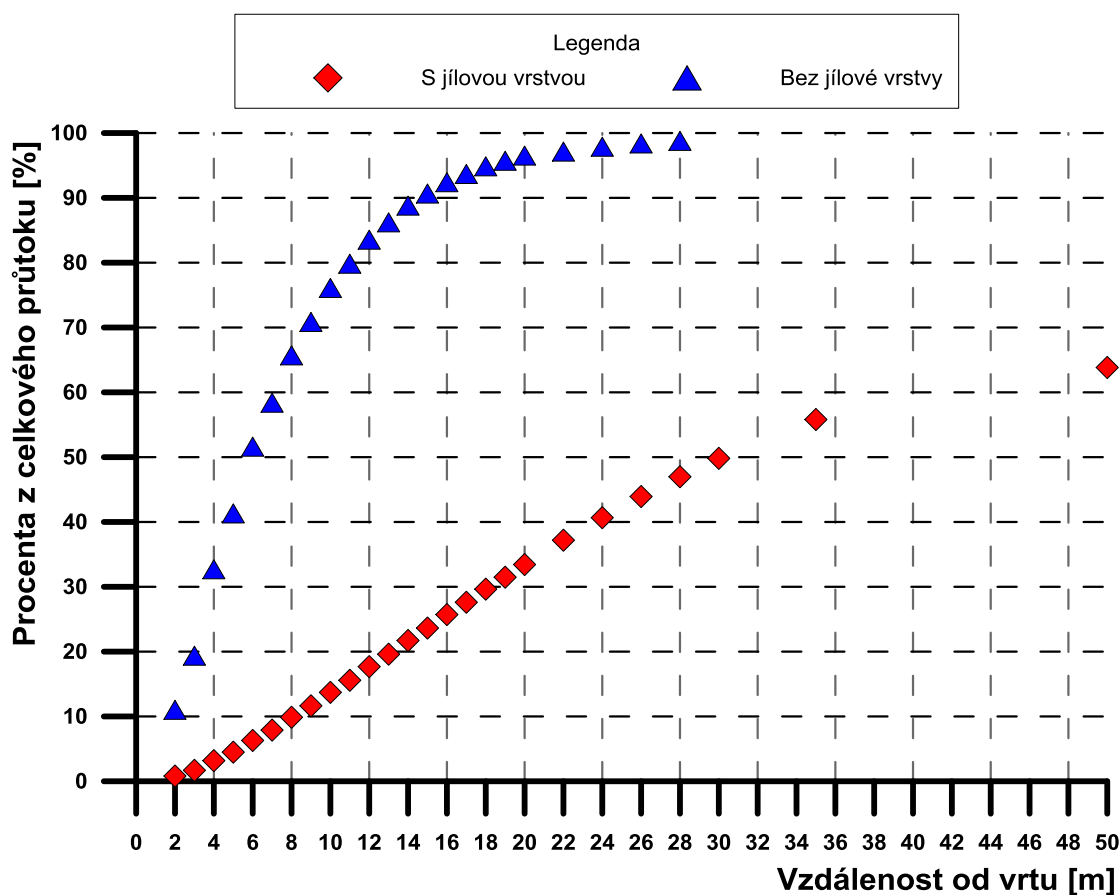


Obrázek 10: Vliv anizotropie prostředí na dosah vrtu.

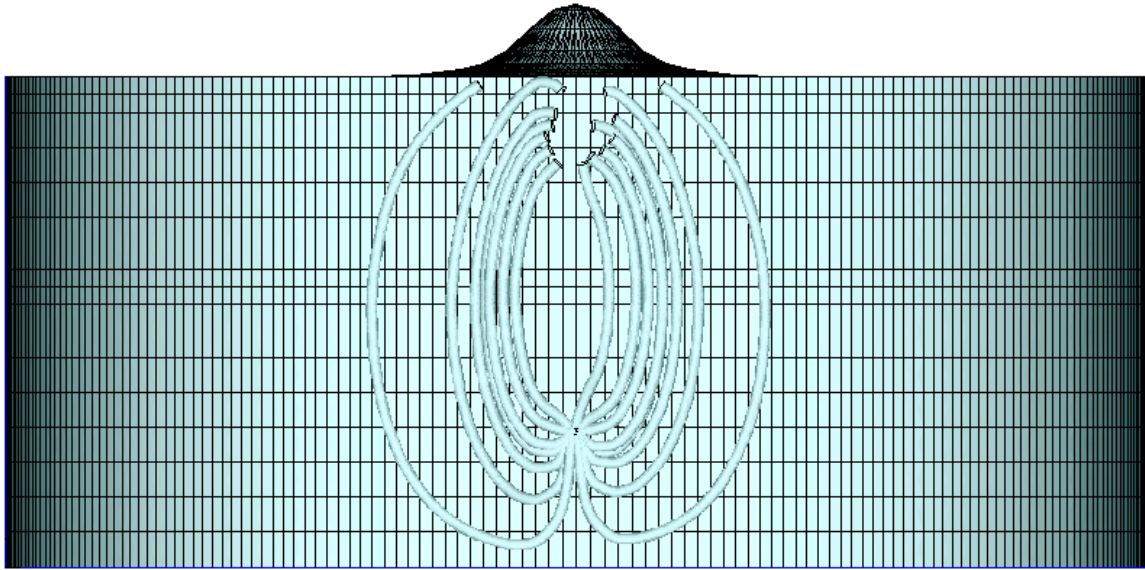
5.5.7 Heterogenita prostředí

V hydraulice podzemní vody hovoříme o homogenitě k dané vlastnosti (hydraulická vodivost) v případě, že je tato vlastnost ve všech bodech stejná. Jestliže se vlastnost mění v závislosti na poloze, je prostředí nehomogenní (heterogenní). V případě pilotní lokality se jedná o nehomogenní subhorizontálně zvrstvené prostředí eluvia skalní horniny. Jednotlivé vrstvy eluvia mají díky rozdílnému množství písčité a šterkové příměsi různé hodnoty hydraulické vodivosti, důležitá je však informace, že v hloubce 9 metrů pod povrchem se nachází jeden metr mocná vrstva tvořená pouze jílem, který vzhledem k nadložním a podložním vrstvám funguje jako poloizolátor (Bruthans, 2014). Přítomnost této vrstvy bude mít jistě vliv na proudění v okolí vrtu, proto jsem se rozhodl tento vliv posoudit nejprve pomocí jednoduchého modelu. Do základního vstupního modelu jsem mezi dvě dvoumetrové perforace vzdálené šest metrů od sebe umístil jeden metr mocnou vrstvu s hydraulickou vodivostí $1 \cdot 10^{-8}$ m/s tak,

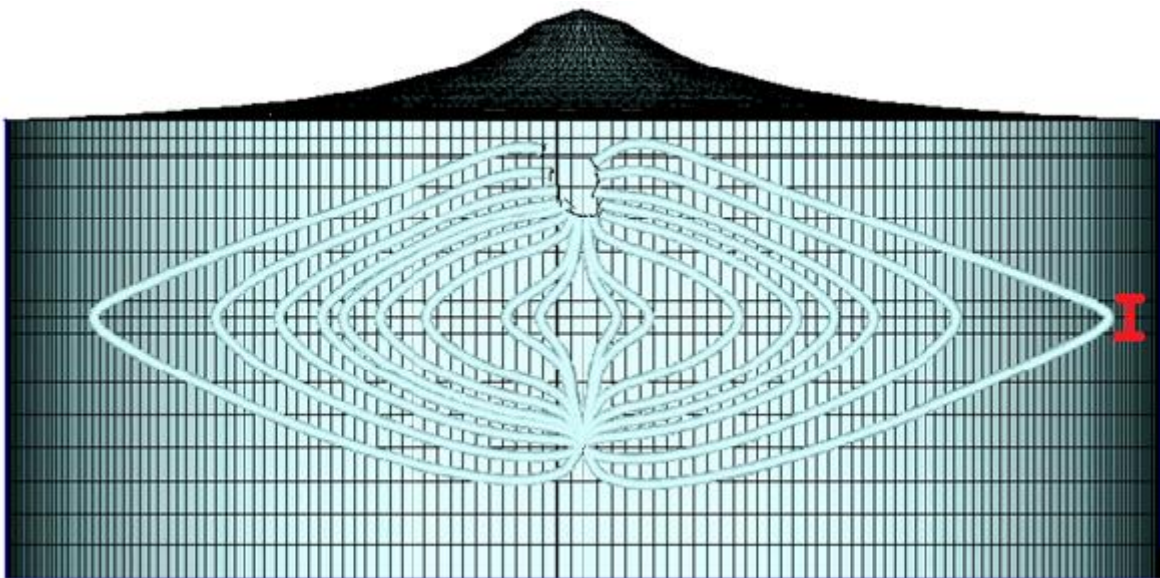
že se nacházela přesně v poloviční vzdálenosti mezi perforacemi. Poté jsem opět zkoumal dosah proudění pomocí metody kumulativní křivky, a to uprostřed jílové vrstvy. Obrázku 11 je zřejmé, že přítomnost méně vodivé vrstvy má za následek zvětšení dosahu cirkulačního vrtu, neboť díky snížené možnosti proudit přímo od horní perforace k dolní perforaci dochází k většímu proudění směrem do stran (voda se více plošně „rozlije“ nad nepropustnou vrstvou). Jako důkaz ještě použiji obrázky proudnic vypočtené programem Feflow, protože jsou v tomto případě výmluvnější než kumulativní křivky. Na obrázcích 12 a 13 můžeme vidět přibližný vzhled cirkulační cely bez přítomnosti jílové vrstvy a s přítomností jílové vrstvy.



Obrázek 11: Kumulativní křivky s a bez přítomnosti jílové vrstvy mezi perforacemi.



Obrázek 12: Tvar cirkulační cely bez přítomnosti jílové vrstvy, 3x převýšeno.



Obrázek 13: Tvar cirkulační cely v přítomnosti jílové vrstvy, 3x převýšeno (mocnost jílové vrstvy je naznačena v obrázku červenou úsečkou).

5.5.8 Přirozené proudění podzemní vody v okolí vrtu

Z matematického hlediska bylo dokázáno (Herrling et al., 1991), že dosah cirkulační vrtu může být nekonečný, pokud se vrt nachází v napjatém kolektoru nekonečného plošného rozsahu a v tomto kolektoru nedochází k dalšímu proudění podzemní vody. Účinku proudění podzemní vody v okolí cirkulačního vrtu se věnovaly již první odborné články o cirkulačních vrtech (Herrling a Stamm, 1992; Stamm, 1995). Z těchto publikací jsou také převzaty obrázky

14 a - c, na kterých je zobrazen tvar cirkulační cely vrtu umístěného v napjatém kolektoru v homogenním proudovém poli. Z nákresů je jasně zřejmé, že čím je větší laterální objemová hustota toku v kolektoru, tím menší je rozsah cirkulační cely a dochází i k narušení její symetrie - část vody prošlé vrtem a opouštějící ho horní perforací se díky přítomnosti přírodního proudění dostává mimo dosah cirkulační cely vrtu a tudíž neprojde vrtem vícekrát než jednou či dvakrát, což může mít nepříznivý vliv na sanaci. Z tohoto důvodu bývá v takovýchto případech zvolena varianta, kdy máme umístěno několik cirkulačních vrtů za sebou.

(a) Nulový přírodní gradient, $v=0$ m/den



(b) Nenulový přírodní gradient, $v=0,3$ m/den



(c) Nenulový přírodní gradient, $v=1$ m/den



Obrázek 14: Cirkulační vrt v proudovém poli pro různé hodnoty objemové hustoty toku (Stamm, 1995).

Pro tento typ problému nebyla vhodná válcová oblast, proto jsem musel upravit koncepční model.

Namísto válce o poloměru 50 metrů jsem zvolil kvádr o délce 100 metrů, šířce 60 metrů a výšce 14 metrů. Orientace kvádru byla taková, že stěny 100 krát 60 metrů tvořili horní a dolní podstavu oblasti.

Oblast byla znovu homogenní a izotropní, hydraulická vodivost byla $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s.

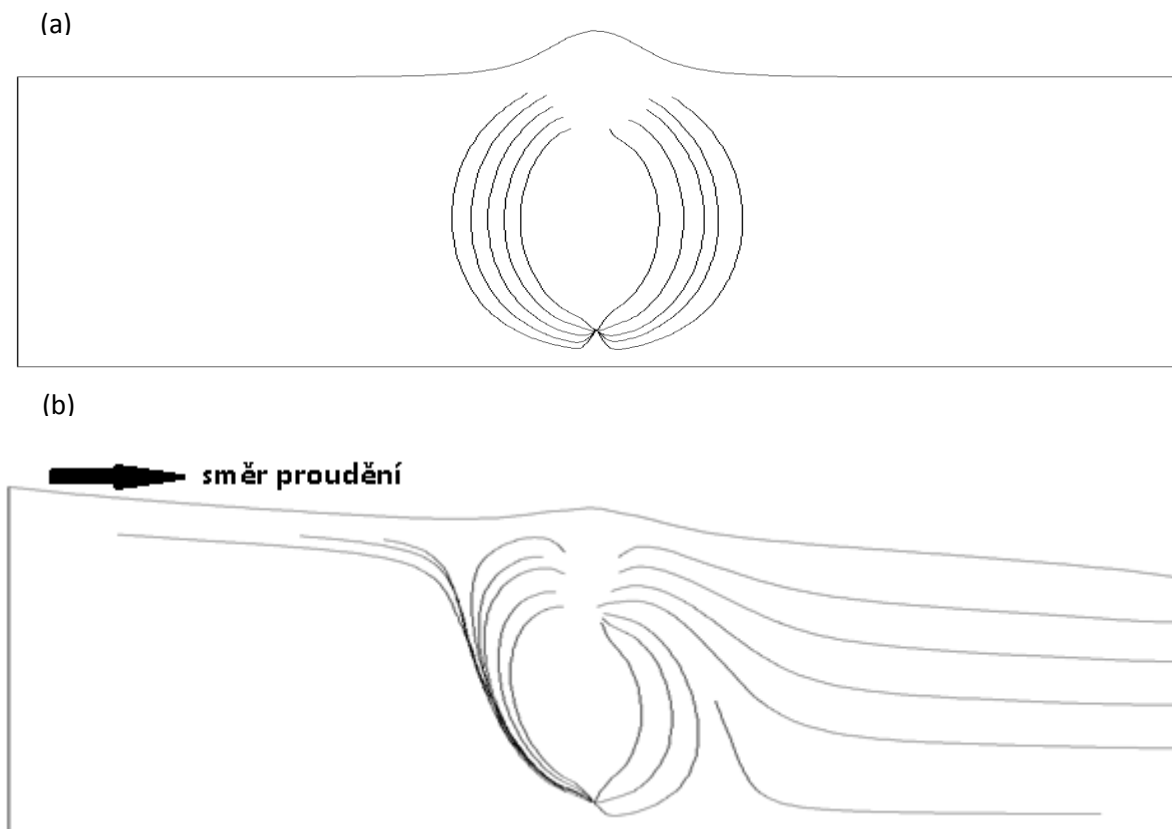
Okrajové podmínky jsem upravitel pro odlišnou geometrii oblasti. Pro horní a dolní podstavu zůstaly nezměněné (volná hladina, respektive nepropustné podloží), musel jsem ale změnit

okrajové podmínky na zbývajících stěnách kvádru. Na protilehlé stěny kvádru o rozměrech 100 krát 14 metrů jsem předepsal nulový průtok a na zbylé dvě protilehlé stěny o rozměrech 60 krát 14 metrů jsem předepsal hodnoty hydraulické výšky, v jedné stěně vždy vyšší než v druhé. Díky rozdílu hladin docházelo v kvádru k proudění, které deformovalo cirkulační celu.

Jelikož od sebe byly stěny kvádru s rozdílnými hladinami vzdáleny 100 metrů, bylo snadné spočítat gradient proudění – stačilo rozdíl hladin (v absolutní hodnotě) na protilehlých stěnách kvádru vydělit stem. Prováděl jsem simulace pouze pro gradienty 0,05 a nižší, protože vyšší gradienty na pilotní lokalitě nejsou (Kubricht, 2012).

Cirkulační vrt jsem předepsal pomocí zdrojového členu doprostřed kvádru tak, že vzdálenost od protilehlých stěn byla vždy stejná (30 metrů od bližších stěn, 50 metrů od vzdálenějších stěn). Vrt měl dvoumetrové perforace vzdálené šest metrů od sebe, horní perforace začínala jeden metr pod horní podstavou kvádru.

Výstupy z provedené simulace můžeme vidět na obrázku 15 ve formě vertikálních řezů modelovou oblastí. Řez je veden paralelně s prouděním tak, aby v rovině řezu ležel i cirkulační vrt. Z obrázků je patrné, že cirkulační cela je za přítomnosti přírodního proudění užší a asymetrická. Při gradientu 0,05 se snížil dosah vrtu přibližně o třetinu.



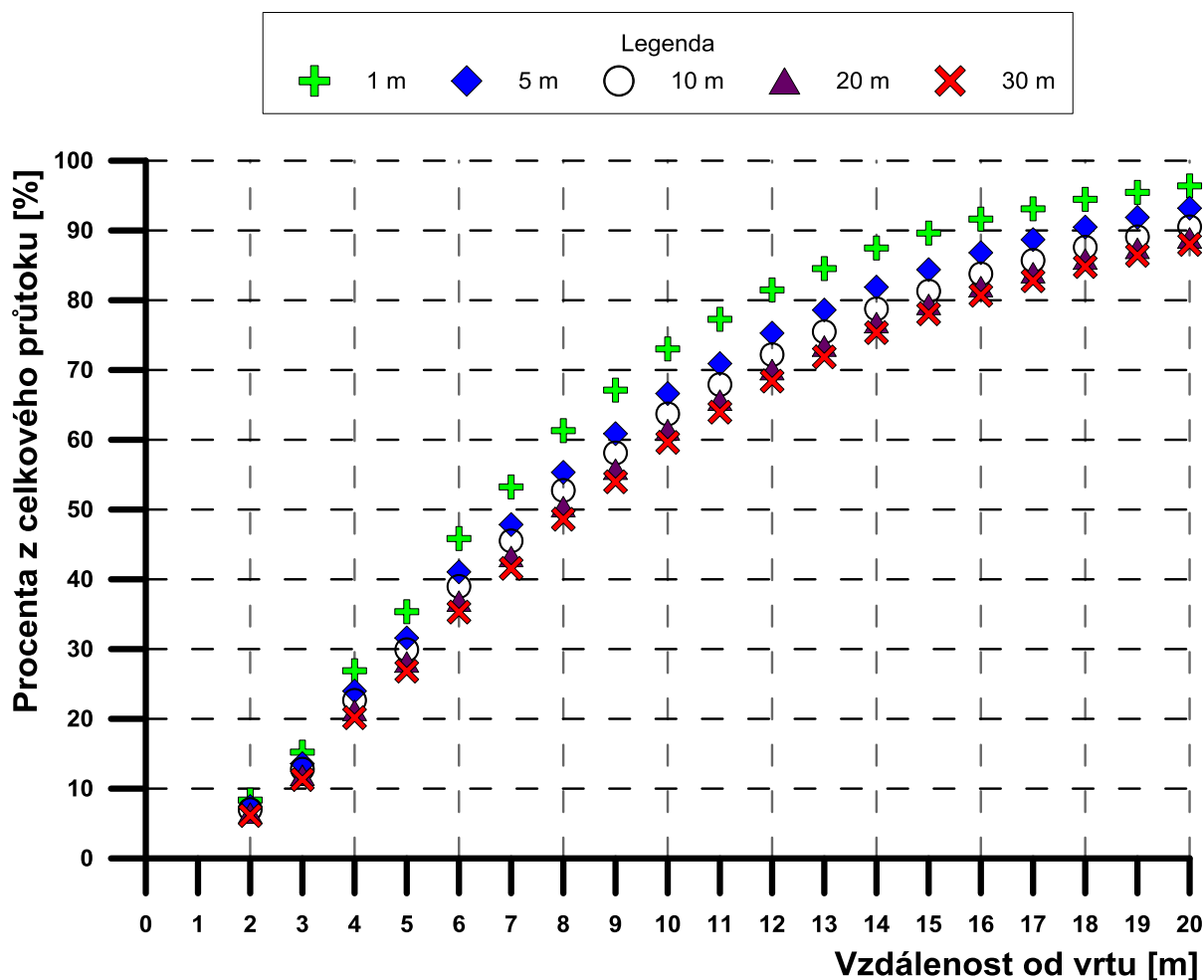
Obrázek 15: Cirkulační cela přinulovém (a) a nenulovém (b) gradientu (0,05), 2x převýšeno.

5.5.9. Vzdálenost nepropustného podloží od konce dolní perforace

Poslední z hlavních vlivů prostředí je mocnost kolektoru, v němž je cirkulační vrt umístěn. Nejnižší mocnost, která je v publikacích (Miller et al., 1997) doporučována jako minimální pro efektivní cirkulaci, je 3 metry. Na pilotní lokalitě Velká Hled'sebe tento požadavek na mocnost bezpečně splňujeme (zvodeň je minimálně 14 metrů mocná), neznáme však přesnou polohu nepropustného skalního podloží, proto jsem se rozhodl zjistit, jakou chybu bude do modelu tato neznalost zanášet.

Znovu jsem použil původní koncepční model s oblastí ve tvaru válce o průměru 100 m a výšce 14 m. Předepsaný cirkulační vrt měl délku perforací 2 metry a vzdálenost perforací 8 metrů. Horní perforace začínala jeden metr pod hladinou. Dolní podstava modelového válce byla v první kroku jeden metr pod koncem dolní perforace, postupně jsem ji ale v modelu posouval níž, tzn. že jsem zvětšoval mocnost nejnižší vrstvy, a pokaždé jsem přitom stanovil dosah cirkulačního vrtu. Vybrané výsledky jsem shrnul v obrázku 16. Z kumulativních křivek je možné zjistit, že čím hlouběji je nepropustné podloží, tím větší je dosah vrtu. Jednotlivé křivky jsou si vcelku blízké, největší rozdíl lze pozorovat mezi křivkou 1 m a 5 m (což značí vzdálenost nepropustného dna od konce dolní perforace), dále již rozdíly nejsou tak patrné. Přibližně od vzdálenosti deseti metrů a více už není pozorovatelný téměř žádný účinek (změny v hodnotách jsou v řádu maximálně prvních procent). Hloubka nepropustného podloží pod vrtem tedy hraje roli převážně v prvních několika metrech, při větších hloubkách nad 10 metrů na ní již nezáleží.

Toto zjištění je důležité, protože přesně neznáme hloubku nepropustného podloží na pilotní lokalitě, nyní však díky jednoduchému modelu víme, jakou chybu nám to do modelu přibližně zanes - bude se jednat o chybu v hodnotách vyšších jednotek procent. Pokud by někdy později byly vrtány vrty, které by zastihly skalní podloží na lokalitě, a pokud by toto podloží bylo v jiné hloubce než v našem modelu, můžeme alespoň odhadnout, zda jsme naším modelovým řešením podcenili či přecenili skutečnou situaci.



Obrázek 16: Vliv hloubky nepropustného podloží na dosah cirkulačního vrtu.

5.6 Diskuse

V předchozích kapitolách jsem prezentoval výsledky jednoduchých modelů cirkulačního vrtu. Z modelů se ukazuje, že větší vliv na tvar a dosah cirkulační cely mají spíše vlastnosti prostředí než konstrukce vrtu.

Nejvýraznější je zřejmě přítomnost nevodivé vrstvy mezi perforacemi. Díky ní se sice výrazně zvětší dosah proudění, ale zároveň se tím velmi prodlouží dráha, kterou musí částice urazit, aby mohla znovu projít vrtem, takže celkový dopad na rychlost proudění a sanaci samotnou je negativní.

Výraznější přírodní proudění v okolí vrtu také není pro sanaci vhodné. Cirkulační cela v proudovém poli je deformovaná a menší, než jaká by byla v prostředí s minimálním prouděním. Při gradientu okolního proudění 0,05 se zmenší dosah vrtu o přibližně třetinu.

Několik autorů dokázalo (Stamm, 1995; Cunningham et al., 2004), že vyšší stupeň anizotropie vede k většímu dosahu proudění. Numerickými modely jsem tento fakt potvrdil. Konstrukční vlastnosti vrtu nejsou v porovnání s vlastnostmi prostředí tolik důležité. Nejdůležitější je vzdálenost perforací – čím větší vzdálenost, tím větší dosah proudění. Podobný, i když ne tak výrazný efekt má i délka perforací - čím větší délka perforací, tím větší dosah proudění.

Zbylé parametry jako čerpané množství či rozdílná délka perforací jsou méně důležité a na proudění v okolí cirkulačního vrtu mají proti výše vyjmenovaným malý vliv, mohou být nicméně důležité vzhledem k rozšíření kontaminace v prostředí.

5.6.1 Návrh pro zavedení pojmu efektivní poloměr dosahu cirkulačního vrtu

Tato podkapitola je myšlena jako podnět k diskusi, která by měla být na toto téma dále vedená odpovídajícími odborníky, kteří by mohli lépe vymezit daný pojem.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 5.4.1, není stanovení dosahu cirkulačního vrtu jednoznačnou záležitostí. Z výsledků uvedených v předchozích kapitolách je zřejmé, že činnost vrtu ovlivňuje proudění i ve vzdálenosti větší než deset metrů, toto proudění je však velmi pomalé a z hlediska dekontaminace prostředí je nesmyslné počítat s takto vysokou hodnotou dosahu. Proto navrhuji, aby byl zaveden pojem Efektivní poloměr dosahu (efektivní dosah), který bude lépe vyjadřovat použitelnost cirkulačních vrtů při sanacích lokalit. Nicméně definice tohoto pojmu s sebou nese jistá úskalí. Efektivní poloměr dosahu by měla být taková vzdálenost od osy vrtu, ve které je proudění vyvolané chodem cirkulačního vrtu ještě dostatečně rychlé a množství transportované vody takové, že probíhající sanaci je možné považovat za účinnou/smysluplnou. Tato vágní formulace nijak kvantitativně nevyjadřuje, o jakou hodnotu by se mělo jednat. Je to taková vzdálenost od vrtu, ve které protéká 70 % čerpané vody? Nebo 80 %? Účelně jsem zvolil nekonkrétní formu vymezení pojmu efektivního (poloměru) dosahu, neboť se domnívám, že díky různorodostem prostředí a velkému množství možných přístupů k sanaci těchto prostředí ani nemůže existovat univerzální hodnota, kterou by bylo možno dosadit do určitého vzorečku a výstupem by bylo číslo - efektivní dosah cirkulačního vrtu. Stanovení efektivního dosahu by mělo být výsledkem diskuse odborníků v oblasti sanační geologie a hydrauliky podzemní vody a mělo by být dostatečně podloženo daty z čerpacích či stopovacích zkoušek, znalostí geologie prostředí, jeho heterogenity, anizotropie a v neposlední řadě může být přihlédnuto k výsledkům numerických modelů. Při odhadu efektivního dosahu musíme zohlednit také účinnost filtru a ekonomické podmínky.

Musím také poznamenat, že až po sestavení a sepsání této myšlenky jsem objevil kapitolu v práci Stamm (1995), který již navrhoval podobný přístup - definoval obecný dosah cirkulačního vrtu jako vzdálenost, ve které protéká 80-98% čerpaného množství. Toto množství však nemusí univerzálně vyhovovat na všech lokalitách.

6. Matematický model proudění podzemní vody na lokalitě Velké Hleděsebe

Vytvořil jsem numerický model proudění podzemní vody na pilotní lokalitě bez a s přítomností cirkulačního vrtu a získané výsledky pak porovnat s reálnou situací a naměřenými hodnotami.

Pokryv zájmové lokality je tvořen antropogenními navážkami a eluviem skalního masivu. Zvětralínový materiál na celé lokalitě obsahuje velmi mnoho prachových a jílovitých částic (Faflík, 2009), což vede k nízké celkové hodnotě hydraulické vodivosti pro celou oblast. Tento fakt má nepříznivý vliv na rychlost sanace, neboť na lokalitě často dochází k úplnému vyčerpání vrtů a je nutné sanační čerpání přerušit, než do vrtů opět nateče voda. Nízká propustnost a heterogenita prostředí snižují rychlost sanace.

Dalším nepříznivým faktem je, že přesně neznáme polohu nepropustného podloží. Ani v Analýze rizika (Faflík, 2009), ani v žádných dalších dokumentech o průzkumu lokality nebyly zmíněny vrty, které by dosáhly nepropustného podloží. Nejhlubší vrty na lokalitě jsou právě CV- 1 a CV-2, které mají hloubku 18 metrů. V mapové aplikaci Geofondu jsem se pokoušel nalézt nějaké vrty mimo areál oblasti, které by byly hlubší než zmiňované vrty, ale bohužel, zřejmě díky blízké přítomnosti podzemních vod mariánsko - lázeňského systému (Mariánské lázně se nacházejí cca 2 km na východ od Velké Hleděsebe), jsem nenalezl ani v archivu žádný vrt v blízkém okolí, který by byl hlubší než 18 metrů.

Na lokalitě se nacházejí dvě zvodně - mělká zvodně, která je kontaminovaná, a hlubší zvodně mariánskolázeňského systému, která s mělkou zvodně nekomunikuje a nehrozí jí kontaminace (Faflík, 2009). Avšak na základě vlastního pozorování a měření, popisů vrtných jader (Kukačka, 2013), zaměřování hladin v piezometrech a nakonec i na základě stopovací (Bruthans, 2014) a čerpací zkoušky (Pitrák, 2013) je možné dokázat, že zvodně označovaná jako „mělká“ se sama o sobě dá rozdělit na dvě samostatné zvodně, oddělené od sebe jeden metr mocnou vrstvou poloizolátoru. Mezi těmito zvodněmi dochází k přetékání vody z horní zvodně do spodní. Důkazy podporující toto tvrzení jsou:

-prudké zvýšení hladiny vody ve vrtu během vrtání poté, co byla provrtána jeden metr mocná vrstva jílu

-měření hladin v piezometrech, které jsou umístěné nad a pod jílovou vrstvou – měření ukazují, že v horní zvodni je hydraulická výška o 0,5-1 metr výše, než ve spodní zvodni, ale samotná dolní zvodně má výtlačnou úroveň až několik metrů nad jílovou vrstvou poloizolátoru

-pomocí zředřovací zkoušky (Rodovská, 2013) i pomocí karotáže (Pitrák, 2013) bylo ve vrtu prokázáno sestupné proudění o velikosti přibližně 10 l/den

-stopovací zkouška prokázala propojení obou zvodněných horizontů

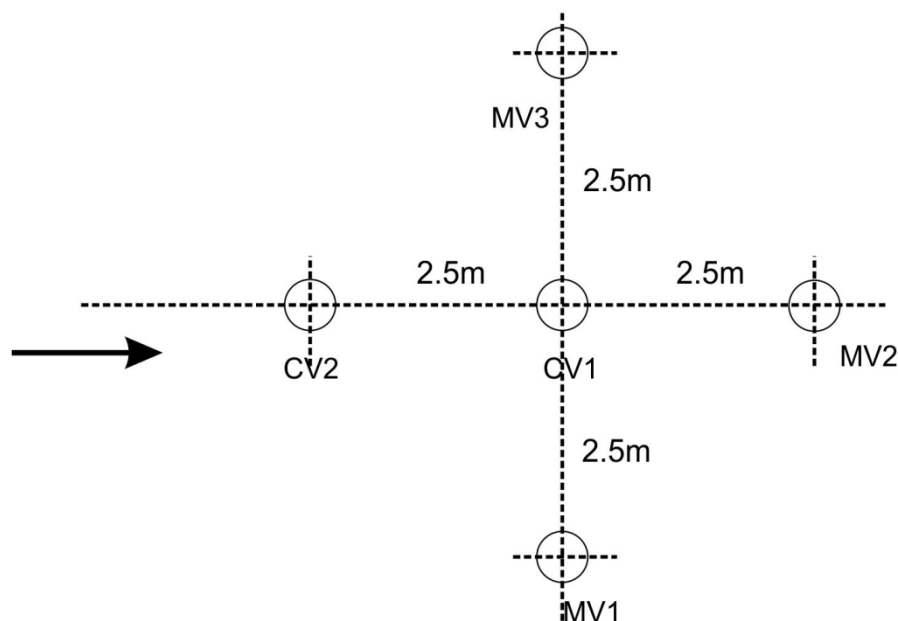
-rychlost hydraulické odezvy spodní zvodně při čerpání/zastavení čerpání ukazuje na její napjatý stav

Stopovací zkouška, která byla na pilotní lokalitě provedena, byla v několika ohledech výjimečná a pomohla lépe objasnit hydrogeologickou situaci na lokalitě, věnuji jí tedy jednu kapitolu.

6.1 Stopovací zkouška na lokalitě Velká Hleděsebe

Zkouška probíhala ve dnech 25.11.2013-9.1.2014. Samotnému jejímu vyhodnocení se věnuje zpráva (Bruthans, 2014), proto zde shrnu jen nejdůležitější informace.

Injektážním vrtem pro stopovač byl vrt CV-1, okolo něj byly do kříže ve vzdálenosti 2,5 metru umístěny vrty MV-1, MV-2, MV-3 a CV-2 (viz obrázek 17). Ve vrtech s označením MV byly umístěny dva piezometry, jeden do každé zvodně. Pokud se jednalo o piezometr v horní zvodni, byl označen písmenem H, pokud byl ve spodní zvodni, nesl označení S (např MV-2S je piezometr MV-2 ve spodní zvodni). Ve vrtu CV-2 byl umístěn pakr, který měl oddělovat obě zvodně, během zkoušky však došlo k jeho porušení a vrt CV-2 dále fungoval jako propojení obou zvodní. Vrt CV-1 měl také pakr oddělující obě zvodně, který byl po celou dobu zkoušky funkční.



Obrázek 17: Schéma rozmístění vrtů při stopovací zkoušce, pohled shora. Šipka naznačuje předpokládaný směr proudění podzemní vody (Bruthans, 2014).

Zkouška probíhala následujícím způsobem: Byla zahájena cirkulace v cirkulačním vrtu tak, že byla ponorným čerpadlem čerpána voda ($Q=0,005$ l/s) ze spodní zvodně a zasakována byla do zvodně horní. Za tohoto stavu byla provedena injektáž stopovacích látek formou obdélníkového pulzu. Jako stopovací látky posloužily chlorid lithný (LiCl), chlorid sodný (NaCl) a chlorid draselný (KCl), které byly do vrtu injektovány postupně. Přítomnost stopovačů byla zjišťována několika způsoby:

- odběrem vzorků 1x denně
- ručním měřením konduktivity na CV-1
- měřením konduktivity pomocí dataloggerů

Dále byla měřena teplota vody, výšky hladin ve vrtech a atmosférický tlak.

Během stopovací zkoušky došlo k několika nehodám (porušení pakru ve vrtu CV-2, výpadek proudu), které nakonec měly pozitivní dopad na výsledky zkoušky a prozradily další informace o hydrogeologické situaci.

Zkouška byla vyhodnocena programem Qtracer2 a bylo z ní získáno několik hodnot, např. podélná disperzivita (0,2-0,4 m) či střední rychlost proudění (0,14-0,32 m/den, střední rychlostí proudění je myšlen medián rychlostí, tedy rychlost, kterou určíme z času, ve kterém dorazilo 50% stopovače). Z hodnot zjištěných díky stopovací zkoušce jsem použil podélnou disperzivitu v modelu transportu látek v okolí vrtu (viz podkapitola 6.5.3.) Zajímavé informace bylo možné zjistit i ze sledování reakcí jednotlivých vrtů na sanační čerpání či výpadky proudu.

Po zahájení čerpání na CV-1 klesla ve spodní zvodni v okolí vrtu hydraulická výška o 20 až 40 cm, zatímco v horní zvodni o podobné hodnoty vzrostla. Pokud ale došlo k výpadku proudu nebo ke zvýšenému čerpání sanační stanice nebo sanačních vrtů, datalogery v dolní zvodni okamžitě zaznamenaly rychlou změnu hladiny, zatímco ty v horní zvodni zaznamenaly změnu později a byla spíše pozvolná. Rychlá změna hladin je jedním z důkazů napjatého charakteru dolní zvodně.

Další ze zajímavých informací poskytlo měření konduktivity spolu s koncentracemi stopovače LiCl (ze vzorků bylo analyzováno pouze Li) a s velikostmi změn hladin. Největší změnu hladiny při zvýšení sanačního čerpání jevil vrt MV-2S, do kterého také dorazila největší koncentrace stopovače. Vrt MV-2S leží po směru předpokládaného proudění a je ze všech vzorkovaných vrtů nejbliže k sanační stanici, kde probíhá sanační čerpání. Očekávalo se, že stopovač (injektovaný v CV-1H) se jako první objeví v CV-1S, ale tam dorazila pouhá 2 % stopovače! Vysvětlení je takové, že sanační čerpání zřejmě vytváří v málo propustném prostředí velké gradienty, které mají spolu s jílovou vrstvou nepříznivý vliv na vytvoření plnohodnotné cirkulační cely. Množství vody 0,005 l/s, které mělo vyvolat cirkulaci v okolí vrtu CV-1, bylo zřejmě příliš malé oproti výraznějšímu a masivnějšímu čerpání z několika blízkých sanačních vrtů.

Z výsledků stopovací zkoušky byly zjištěny některé transportní parametry prostředí a charakter obou zvodní. Dále lze z výsledků vypožorovat nepříznivý vliv sanačního čerpání na vytvoření cirkulační cely a vzhledem k malému množství stopovače, který dorazil z CV-1H do CV-1S lze usuzovat, že ani k vytvoření plnohodnotné cirkulační cely nedošlo.

6.2 Zadání úlohy

Zabývejme se tímto problémem.

Vytvoř numerický model proudění podzemní vody na pilotní lokalitě Velké Hleďsebe tak, aby bylo možné s jeho pomocí zjistit co možná největší množství užitečných informací pro probíhající sanaci lokality. Model by měl pomoci odpovědět na otázky, jaké může být maximální čerpání či jaká bude doby trvání sanace a její účinnosti.

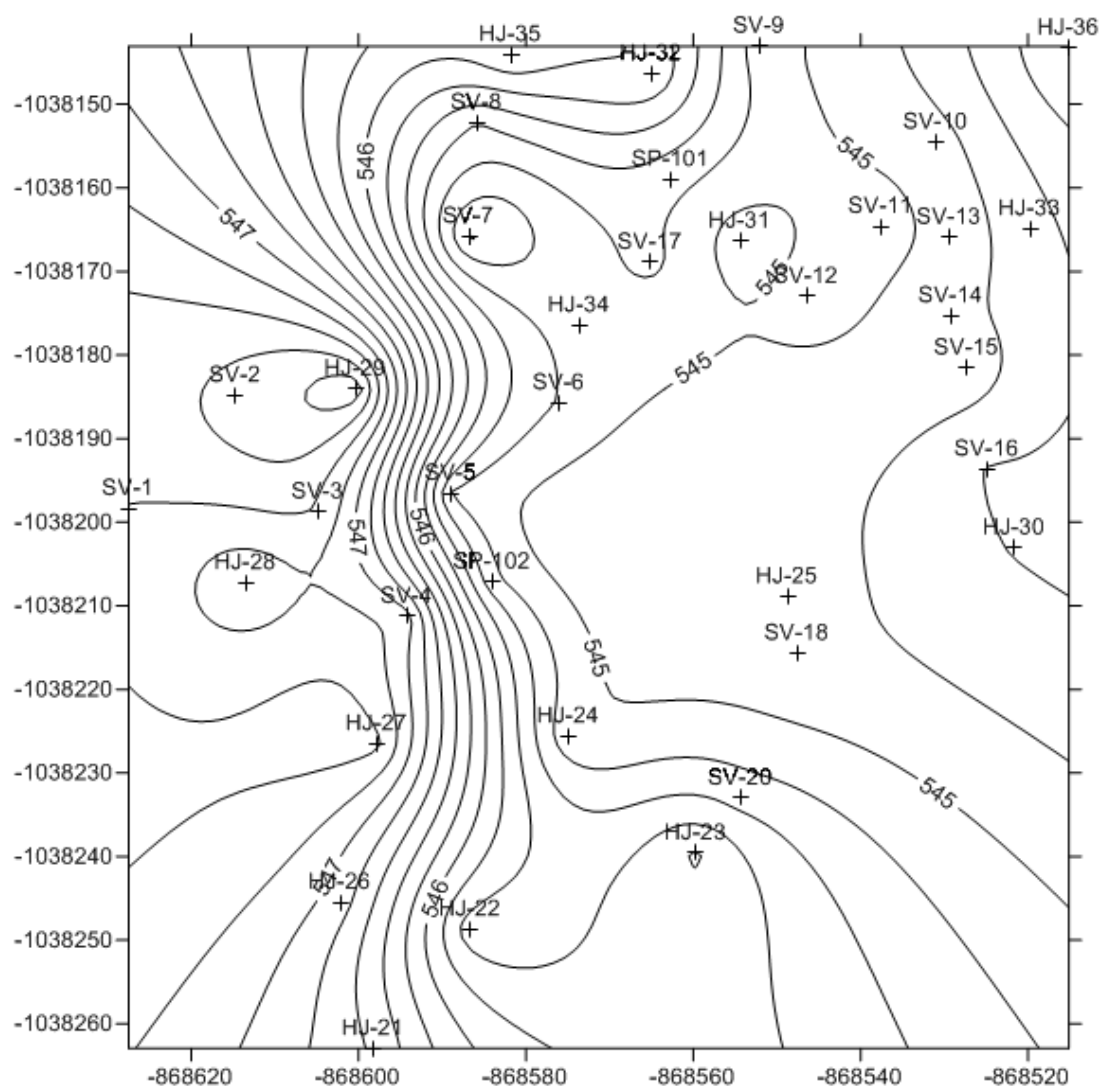
6.3 Konceptní model

Tvorbu konceptního modelu jsem pro přehlednost rozdělil do tří podkapitol 6.3.1 až 6.3.3. Ve všech případech se jedná o modely nasyceného proudění, zda jde o model stacionární či nestacionární vždy upřesním v dané kapitole.

6.3.1 Geometrie oblasti

Na lokalitě se nachází 37 geodeticky zaměřených vrtů, díky kterým máme k dispozici informace o hloubkách hladiny podzemní vody v celém areálu. Výšky hladin byly sjednoceny tak, že naměřené hodnoty hloubek hladin byly odečteny od nadmořské výšky odměrného bodu (zárubnice vrtu), čímž byly všechny hloubky hladin převedeny do formy hydraulické výšky vyjádřené v metrech nad mořem (srovnávací úroveň 0 m n.m.).

Pomocí vhodného programu (Surfer 9) jsem z hodnot hydraulických výšek vytvořil mapu izolinií hydraulických výšek. Použil jsem k tomu metodu kriging, výsledná mapa izolinií (hydroizohyps) viz obrázek 18.

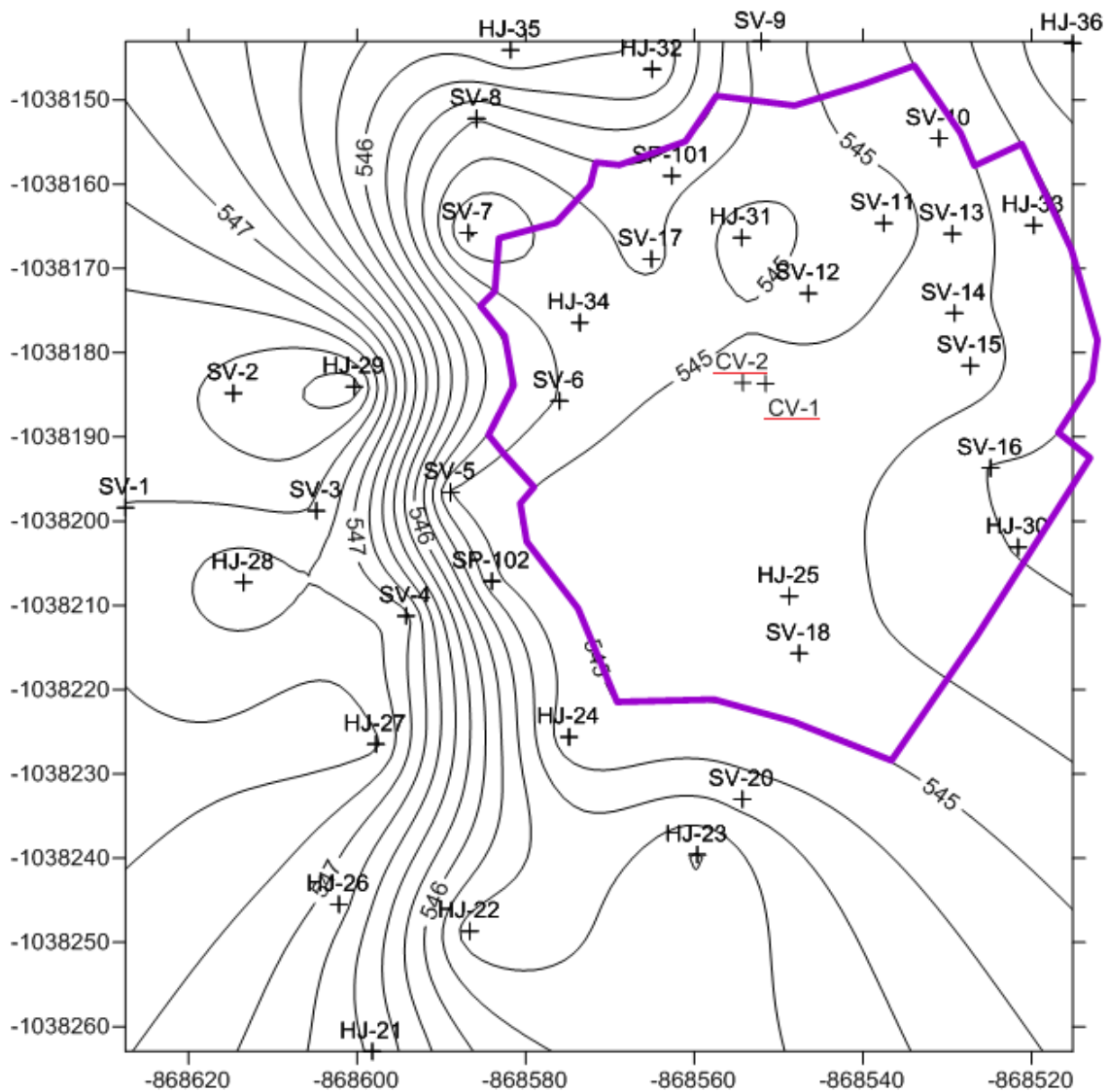


Obrázek 18: Mapa hydroizohyps vygenerovaná programem Surfer na základě měření hladin ve vrttech. Čísla na osách značí souřadnice souřadného systému S-JTSK.

Z obrázku je vidět, že přibližně v jeho levé třetině se nachází hustá koncentrace izolinií. To značí, že zde na poměrně krátkém úseku dochází k velkému snížení hydraulické výšky. Příčina není zcela jasná (uvažovalo se o skokové změně hydraulické vodivosti), proto jsem hranice modelové oblasti vedl tak, aby do ní tento skok hladiny nezasahoval. To jsem si mohl dovolit, neboť cirkulační vrty se nacházejí v pravé části mapy a je možné vést hranici oblasti tak, že do ní skok v hladině zasahovat nebude.

Hranici oblasti jsem se snažil vytvořit tak, aby na ní bylo možné co nejjednodušeji předepsat okrajové podmínky. Proto jsem se řídil následující úvahou - hydroizohypsa jako izolinie spojuje místa se stejnou hodnotou hydraulické výšky, což je ideální pro zavedení Dirichletovy okrajové podmínky - předepsání hodnoty hydraulické výšky. Pokud uvažuji kolmici na hydroizohypsu, získávám proudnici, tedy linii, podél níž proudí podzemní voda, což je vhodné pro zavedení Neumannovy okrajové podmínky - předepsání nulového průtoku. Díky kombinaci těchto dvou úvah jsem vytvořil mnohoúhelník, který buď přibližně aproximoval hydroizohypsu, nebo na ní byl naopak kolmý. Tento mnohoúhelník je možné vidět na obrázku 19 a je ve dvou rozměrech hranicí oblasti pro model přirozeného proudění podzemní vody na pilotní lokalitě Velká Hleďsebe.

Po převedení problému z 2D do 3D bude mnohoúhelník horní a dolní podstavou hranolu. Tento hranol vymezuje oblast modelu a konkrétně se jedná o třicetiboký hranol.



Obrázek 19: V mapě hydroizohyps fialovou čarou zdůrazněna vybraná hranice oblasti, červeně podtrženy vrty CV-1 a CV-2. Čísla na osách značí souřadnice v souřadném systému S-JTSK.

Mocnost modelové oblasti byla zvolena jako mocnost saturované zóny zastižené vrtem CV-1, ke které jsem přičítal 5 metrů (Mls, 2013). Výška oblasti tedy byla rovna zastižené mocnosti saturované zóny (14,8 metru) plus pět metrů, celkem tedy 19,8 metru.

Při rozdělování modelu do vrstev jsem vycházel z popisu jádra na vrtu CV-1 (Kukačka, 2013). V něm byly popsány všechny vrstvy, které se od sebe geologicky lišily. Mě zajímaly pouze ty vrstvy, které se nacházely v saturované zóně - těchto subhorizontálních vrstev bylo patnáct, nicméně některé z nich, které spolu ve vertikálním sledu sousedily, si byly popisem natolik podobné, že jsem se rozhodl je sloučit do jedné vrstvy. Tím jsem snížil počet subhorizontálních vrstev na devět, poslední vrstva končila spolu s vrtem v 18 metrech pod povrchem. Jelikož jsem neznal polohu nepropustného podloží, přidal jsem pod těchto devět

vrstev ještě další čtyři vrstvy (Mls, 2013) o mocnostech 1,1,1 a 2 metry, bráno shora dolů. Tyto vrstvy již nebyly vrstvy geologické, jednalo se pouze o vrstvy modelu. Veškeré mocnosti, hranice mezi jednotlivými vrstvami a nadmořskou výšku těchto rozhraní najdete v tabulce 1.

Po rozdělení modelové oblasti na vrstvy jsem přiřadil každé vrstvě její odpovídající hodnotu hydraulické vodivosti (jejich zjištění viz podkapitola 6.3.2.). Posledním čtyřem vrstvám, které jsem do modelu uměle dosadil a které se již nachází pod vrtem, jsem zanechal hydraulickou vodivost poslední geologické vrstvy, která byla vrtem ještě zachycena.

Číslo vrstvy	Mocnost vrstvy [m]	Vertikální rozsah vrstvy [m] (0=volná hladina)	Litologická rozhraní mezi vrstvami přepočtená na nadmořskou výšku [m n.m.]
1	0,8	0-0,8	544,67
2	3,2	0,8-4	541,47
3	1,8	4-5,8	539,67
4	1	5,8-6,8	538,67
5	3	6,8-9,8	535,67
6	0,2	9,8-10	535,47
7	1,3	10-11,3	534,17
8	0,2	11,3-11,5	533,97
9	2,3	11,5-13,8	531,67
10	1	13,8-14,8	530,67
11	1	14,8-15,8	529,67
12	1	15,8-16,8	528,67
13	1	16,8-17,8	527,67
14	2	17,8-19,8	525,67
SUMA	19,8		

Tabulka 1: Přehled jednotlivých vrstev modelu.

6.3.2 Zjištění parametrů

Z popisu jádra vrtu CV-1 známe geologii jeho blízkého okolí. Prostředí je členěné do subhorizontálních vrstev eluvia o různém granulometrickém složení. Svrchní kvartérní jílovito - písčité vrstva pokračuje v jílovité eluvium, které v sedmi metrech pod povrchem přechází v propustnější písčitou polohu. Tato propustnější vrstva je v devíti metrech pod povrchem ohraničena metrovou jílovitou vrstvou, která má funkci poloizolátoru. Pod touto vrstvou se již nachází pouze méně propustné jílovito-písčité eluvium s občasou propustnější polohou písku či štěrku (v 13,0 metrech a v 14,5 metrech). Jedním z výstupů karotáže provedené na CV-1 dne 6.5.2013 (Pitrák, 2013) byla mimo jiné i hodnota hydraulické

vodivosti celé zvodně. Tato hodnota činila $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s. I když známe celkovou hodnotu hydraulické vodivosti, je tato jediná hodnota pro natolik heterogenní prostředí do modelu nepoužitelná. Proto bylo nutné získat z této jediné hodnoty hodnotu hydraulické vodivosti jednotlivých vrstev. K tomu jsem využil obecně platného základního hydrogeologického vzorce (2) pro výpočet celkové hydraulické vodivosti prostředí složeného z vrstev o různé hydraulické vodivosti.

$$(2) \quad K = [\sum (K_i \cdot b_i)] / (\sum b_i)$$

kde K_i je hydraulická vodivost dané vrstvy, K je celková hydraulická vodivost zvodně a b_i je mocnost dané vrstvy. Tento vzorec se používá pro výpočet celkové hydraulické vodivosti zvodně v případě, že známe mocnosti a hydraulické vodivosti jednotlivých vrstev. My však máme k dispozici opačný případ - známe celkovou hydraulickou vodivost zvodně, známe mocnosti jednotlivých vrstev, ale neznáme jejich hydraulické vodivosti. Proto jsem přistoupil k jakési „odhadovací“ iterační metodě – sepsal jsem si mocnosti jednotlivých vrstev a podle litologického popisu a poznámek k vrtnému jádru jsem odhadl hodnoty hydraulické vodivosti pro jednotlivé vrstvy. Tyto hodnoty jsem pak mezi sebou vynásobil, výsledky jednotlivých součinů jsem sečetl a vydělil součtem mocností všech jednotlivých vrstev. Získal jsem hodnotu, kterou jsem porovnal s číslem, které mi mělo vyjít - $1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s. Poté jsem jednotlivé hodnoty hydraulických vodivostí upravoval tak, abych se více přiblížil žádané hodnotě celkové hydraulické vodivosti. Hodnoty nesměly být nesmyslné, musely přibližně odpovídat popisu jádra. Tímto způsobem jsem se přiblížil k hodnotě $1,41 \cdot 10^{-6}$ m/s a dále jsem se rozhodl v postupu nepokračovat, neboť sama odhadovací úloha má nekonečně mnoho řešení a chybu $8 \cdot 10^{-9}$ (což je rozdíl mnou spočtené hodnoty a hodnoty získané z karotáže) jsem se rozhodl považovat za dostatečně malou. Výpočtová tabulka 2 viz níže.

V modelu přirozeného proudění nebyl uvažován žádný transport látek podzemní vodou, proto nebylo nutné předepisovat žádné migrační parametry. V modelu transportu bylo nutné migrační parametry předepsat, což jsem udělal přímo v odpovídající podkapitole 6.5.3. Migrační parametry jsem získal ze stopovací zkoušky (kapitola 6.1).

Úsek vrtu	vrstva výrazně propustná	Popis vrstvy	Mocnost vrstvy[m]	K[m/s]	T[m ² /s]
5-7,2	Ne	kompaktní eluvium s jílovými vrstvičkami	2,2	1,00E-07	2,20E-07
7,2-8	Ano	rozpadavá jílovito-písčítá vrstva,propustná	0,8	9,00E-06	7,20E-06
10-13	Ne	limonitizované jílovité eluvium	3	1,00E-07	3,00E-07
13-13,2	Ano	písčítá vrstva	0,2	1,00E-05	2,00E-06
13,2-14,5	Ne	jílovité rozpadavé eluvium s příměsí písku	1,3	1,00E-07	1,30E-07
14,5-14,7	Ano	písčítá vrstva se příměsí štěrku	0,2	2,00E-05	4,00E-06
14,7-17	Ne	kompaktní jílovito-písčité eluvium	2,3	1,00E-07	2,30E-07
		SUMA =	10	SUMA =	1,41E-05
			Má vyjít	1,40E-06	
			Vychází	1,41E-06	
			Rozdíl obou hodnot	8,00E-09	

Tabulka 2: Výpočet hydraulických vodivostí jednotlivých vrstev.

6.3.3 Okrajové podmínky

Předepsání okrajových podmínek bylo jednoduché, protože hranice oblasti byla vedena tak, aby na ní byla známa hodnota okrajové podmínky. Na ty části hranice, které přibližně aproximovaly některou hydroizohypsu, jsem předepsal hodnotu hydraulické výšky odpovídající hydroizohypsy. Na zbylé části hranice jsem předepsal nulový průtok. Ten jsem předepsal i na dolní podstavu modelové oblasti (nepropustné podloží), na horní podstavu oblasti jsem předepsal volnou hladinu.

Cirkulační vrt jsem předepsal v podobě zdrojového členu na souřadnice odpovídající jeho skutečné poloze na pilotní lokalitě.

6.4 Řešení

Řešení jsem uskutečnil v programu Feflow a při jeho tvorbě jsem se řídil koncepčním modelem, pouze jsem kvůli vlastnostem programu upravil některé jeho části.

Oproti koncepčnímu modelu jsem musel přidat tři vrstvy, respektive některé z existujících vrstev koncepčního modelu jsem rozdělil na dvě méně mocné vrstvy. Jednalo se o vrstvy 2, 3 a 10. Rozdělil jsem je proto, abych mohl do oblasti zadat cirkulační vrt z hlediska jeho vertikálního umístění co nejpřesněji. Nově vytvořené vrstvy měly stejné parametry jako původní vrstva a všechny vrstvy měly parametry popsané v koncepčním modelu.

Pro řešení jsem zvolil trojúhelníkovou síť s počtem bodů 3500.

Okrajové podmínky jsem zadal podle koncepčního modelu. Přítomnost dvou různých zvodní na lokalitě jsem zohlednil tak, že v těch částech hranice oblasti, na které jsem zadával Dirichletovu okrajovou podmínku a které byly nad jílovou vrstvou, jsem zadal hodnotu hydraulické výšky o 0,5 metru vyšší (Bruthans, 2014) než ve stejné části hranice pod jílovou vrstvou. Tím jsem vytvořil gradient mezi oběma zvodněmi a simuloval tak přetékání z horního do dolního kolektoru.

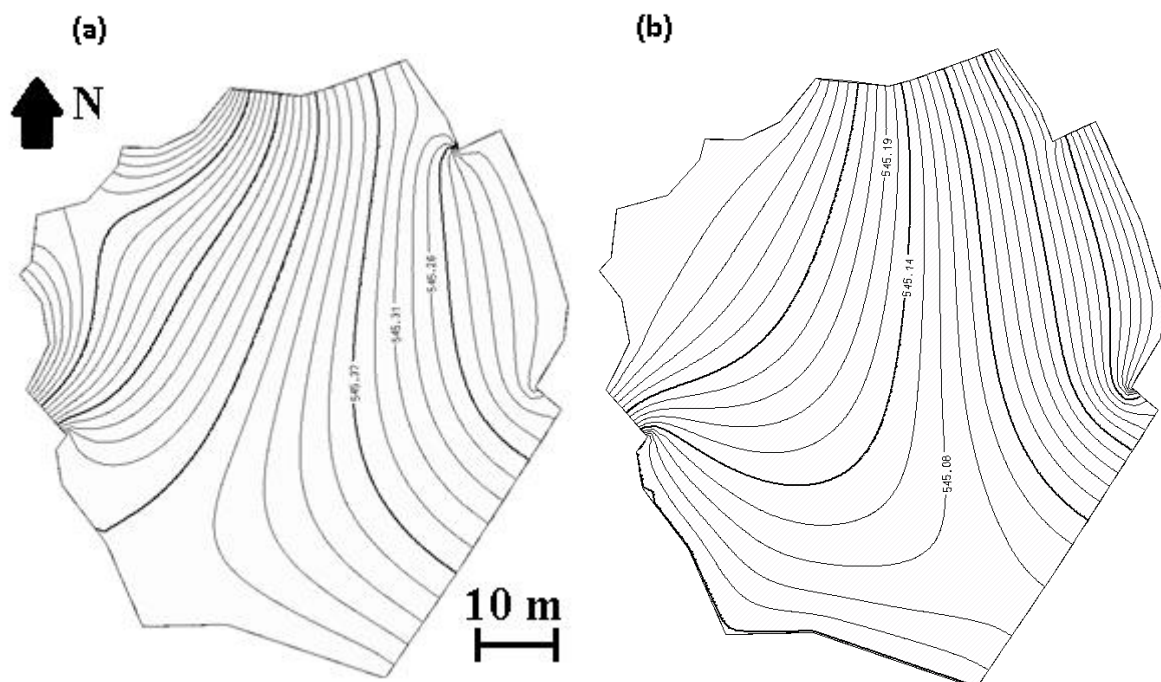
Cirkulační vrt jsem zadal jako zdrojový člen na odpovídající souřadnice.

6.5 Výsledky

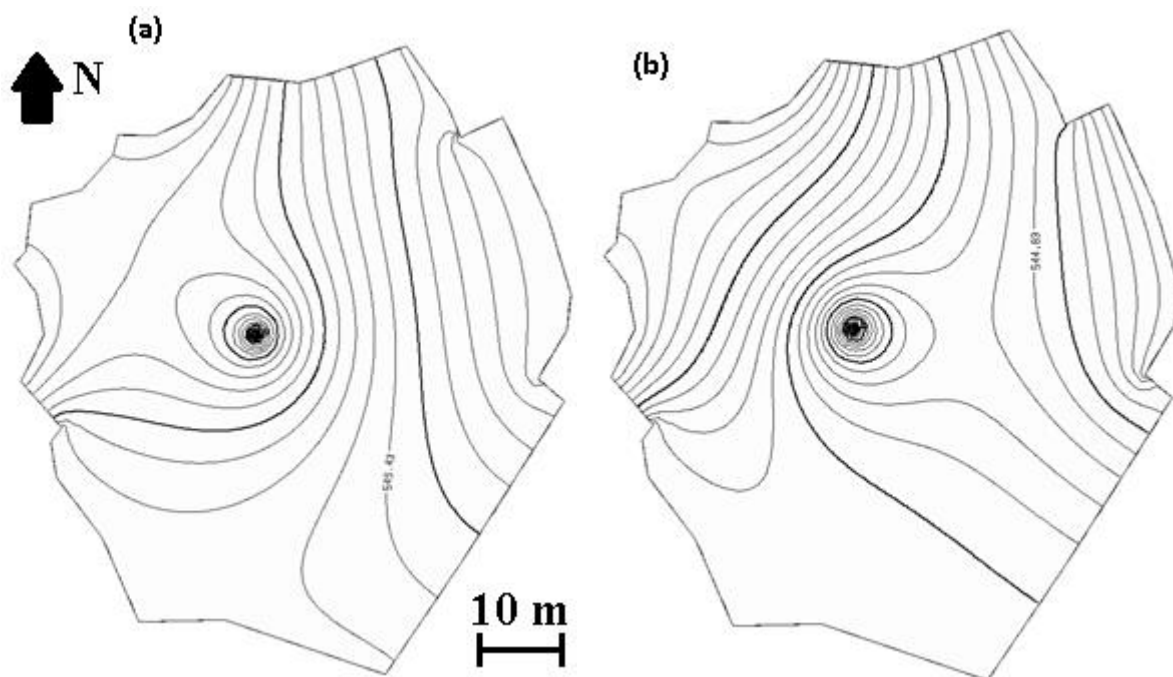
Vytvořil jsem numerický model proudění podzemní vody na pilotní lokalitě Velká Hleďsebe. Z výsledků jsem zjistil, jaké je přirozené proudové pole v okolí vrtu a jaké jsou jeho změny po spuštění cirkulačního vrtu.

Použitý program (Feflow) umožňuje určit průtok oblastí - z modelu vychází přibližně hodnota $6,3 \text{ m}^3$ vody za den. Na obrázcích 20 a 21 můžeme vidět hydroizohypsy v horní a dolní zvodni bez přítomnosti cirkulačního vrtu a s přítomností cirkulačního vrtu a na obrázku 22 můžeme vidět proudnice v okolí cirkulačního vrtu, který dolní perforací čerpá a horní perforací zasakujeme $0,02 \text{ l/s}$.

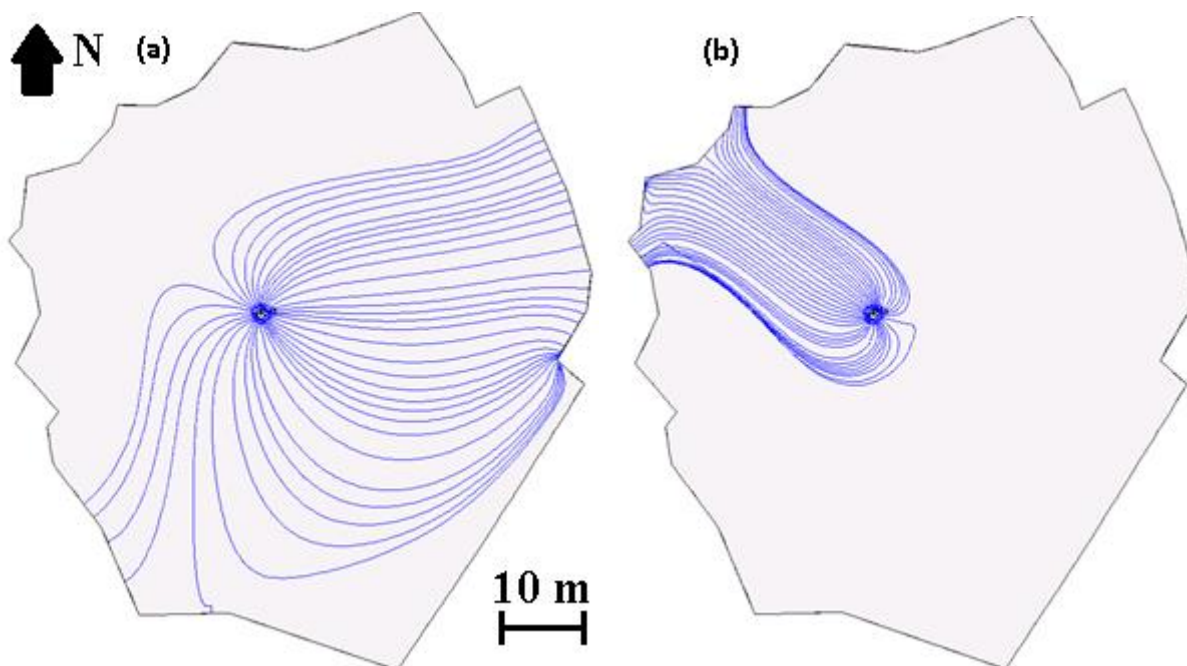
Z obrázku 20 je vidět, že díky přetékání z horního do dolního kolektoru je proudění v nich rozdílné.



Obrázek 20: Obrázek a (s měřítkem a šipkou označující sever) je mapa hydroizohyps v horním kolektoru, obrázek b je mapa hydroizohyps v dolním kolektoru.



Obrázek 21: Obrázek a je mapa hydroizohyps v horním kolektoru za přítomnosti cirkulačního vrtu, obrázek b totéž v dolním kolektoru.



Obrázky 22: Obrázek a ukazuje proudnice v horní zvodni za přítomnosti cirkulačního vrtu, obrázek b ukazuje proudnice v dolní zvodni za přítomnosti cirkulačního vrtu.

6.5.1 Maximální možné čerpání

Jednou z otázek, které jsem si při zadání úlohy pokládal, bylo zjištění velikosti maximálního čerpání. Zhotovený reaktor do cirkulačního vrtu má totiž omezenou průtokovou kapacitu, která nesmí být překročena, pokud má zařízení fungovat správně.

Při stopovací zkoušce bylo vyzkoušeno, že při 0,05 l/s vrt už přetéká, a proto bylo maximální čerpání navrženo na 0,02 l/s. Rozhodl jsem se ověřit, nakolik model odpovídá skutečné situaci tím, že určím, za jakého čerpání začne přetékat vrt v modelu.

Cirkulační vrt jsem předepsal dle koncepčního modelu a nastavil přečerpávané množství na 0,02 l/s a v horním úseku vrtu jsem sledoval hodnotu hydraulické výšky. Za maximální možnou hodnotu čerpání jsem si určil takovou hodnotu hydraulické výšky, při které bude hladina ve vrtu půl metru pod povrchem (nezvolil jsem tedy přímo povrch terénu). Postupně jsem zvyšoval přečerpávané množství vody ve vrtu a zvolená hranice byla překročena při čerpání 0,04 l/s.

Zamýšlené čerpání 0,02 l/s je tedy v reálu proveditelné a nehrozí „přetečení“ vrtu. Zároveň tato shoda vypovídá o tom, že model poměrně dobře vystihuje skutečnou situaci na lokalitě.

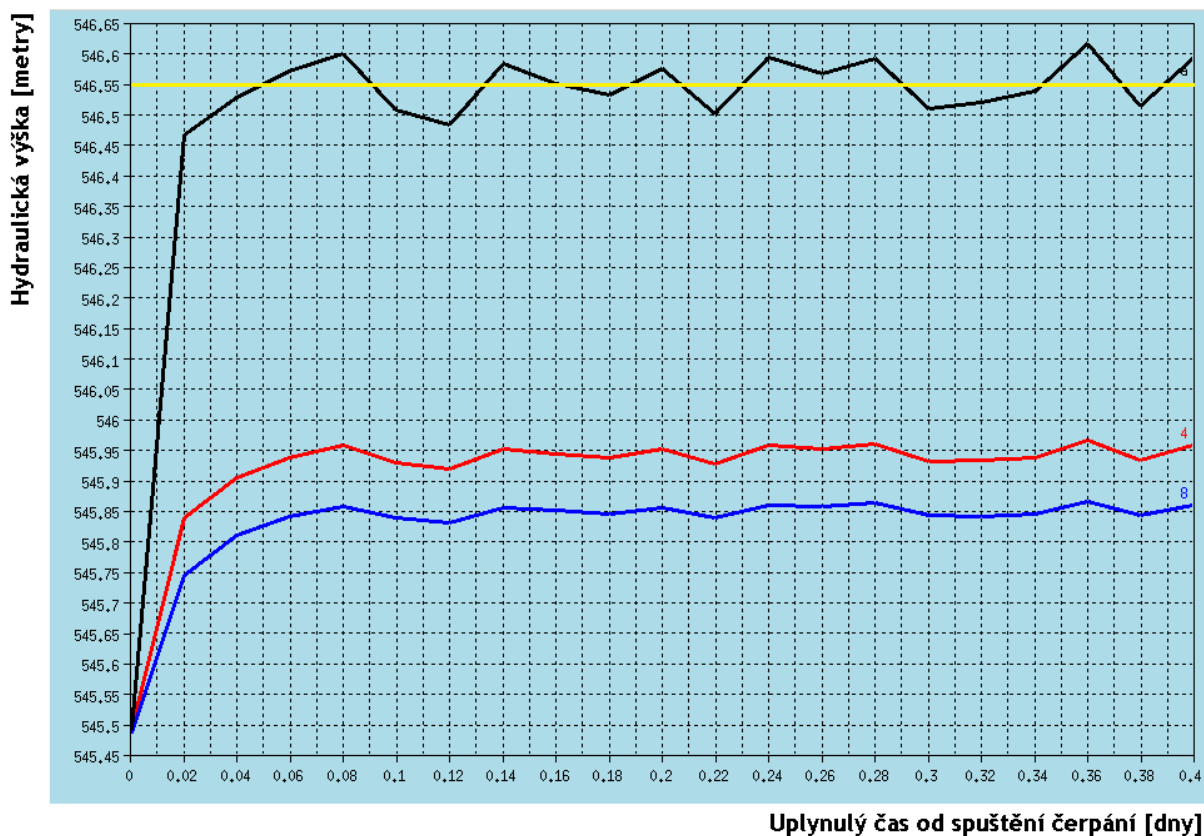
6.5.2 Rychlost vytvoření cirkulační cely

Odběry vzorků a některá měření je třeba provádět za ustáleného stavu proudění, proto jsem řešil otázku rychlosti vytvoření cirkulační cely.

K tomu jsem použil nestacionární model. Za počáteční podmínku jsem považoval přirozené proudění na lokalitě. V čase $t = 0$ jsem zahájil přečerpávání a sledoval změnu hydraulické výšky ve vrtu. Po určité době se hodnoty hydraulické výšky ve vrtu a jeho okolí přestaly měnit. V tomto bodě jsem odečetl hodnotu na časové ose grafu a označil tento čas za dobu, za kterou se proudění ustálilo. K ustálení hydraulických výšek v pozorovacích bodech došlo v poměrně krátkém čase okolo 0,05 dne, tj. asi 1,2 hodiny (viz obrázek 23). Tento výsledek se výrazně neodlišuje od výsledků analytického řešení v práci (Kabala, 1993).

Na obrázku 23 je patrné, že nedojde k úplnému ustálení hydraulických výšek v pozorovacích bodech (hodnoty oscilují nahoru a dolů v rozmezí asi 20 cm a tento stav se nemění nehledě na to, jak dlouho simulace probíhá). Nejprve jsem uvažoval, zda přirozené proudění zpočátku nezabraňuje úplnému ustálení proudění, ale k ustálení nedošlo ani po velmi dlouhé době (100 dní). Oscilace přetrvávají i při různých velikostech časového kroku.

Domnívám se, že díky malému přečerpávanému množství jsem se dostal těsně pod určitou hranici citlivosti modelu, která se projevuje jako neustávající oscilace hydraulických výšek v pozorovacích bodech okolo jedné hodnoty.



Obrázek 23: Křivky ustalování hydraulických výšek v pozorovacích bodech a ve vrtu po spuštění čerpání (černá značí hydraulickou výšku v horní části vrtu, modrá a červená značí hydraulickou výšku v pozorovacích bodech, přičemž bod odpovídající modré křivce je od vrtu vzdálenější). Žlutá čára přibližně značí hodnotu hydraulické výšky, okolo které osciluje hladina ve vrtu.

6.5.3 Transport látek v okolí vrtu

Pro úspěšnou sanaci je důležité vědět, jak rychle a jakým způsobem probíhá transport kontaminantu. Na vytvoření kvalitního přesného modelu transportu látek podzemní vodou je nutné mít k dispozici velké množství dat o rozšíření kontaminace i o prostředí samotném. Měl jsem sice k dispozici data o plošném rozšíření různých druhů kontaminantů, nevěděl jsem však mnoho o jejich vertikální distribuci, neboť ta je komplikována přetékáním mezi kolektory.

O parametrech prostředí jsem neměl zcela podrobné informace (viz kapitola 6.3), a proto jsem se rozhodl, že udělám několik zjednodušujících předpokladů a pokusím se namodelovat celou situaci tak, aby nám simulace poskytla alespoň nějaké spolehlivé informace, namísto velkého množství dat, které bychom získali z modelu zatíženého velkou chybou.

Chybějící parametry prostředí jsem odhadl, konkrétně příčnou disperzivitou, porozitou, koeficient molekulární difuze a sorpci. Hodnotu podélné disperzivity jsem znal ze stopovací

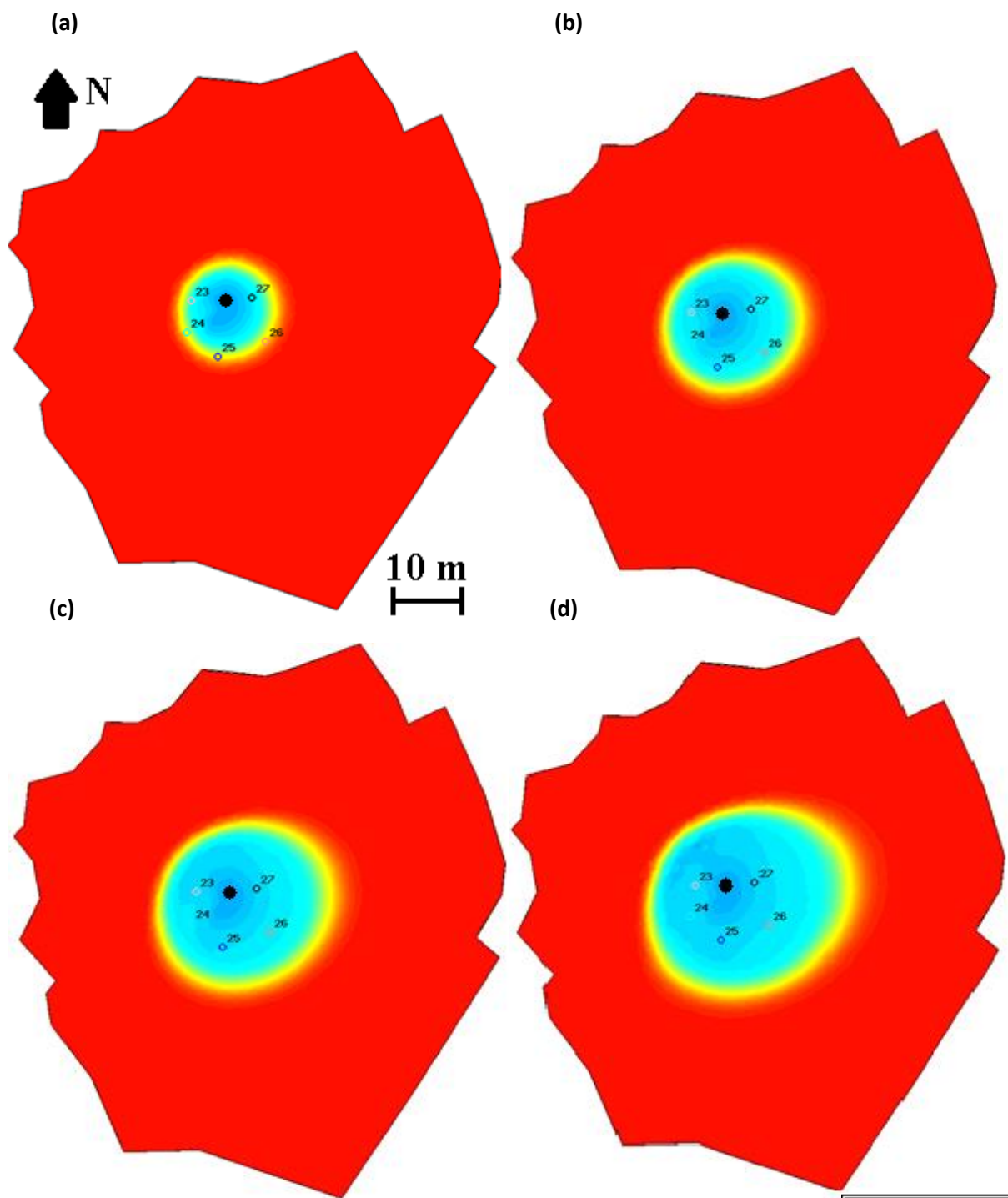
zkoušky (0,2-0,4 m), vybral jsem reprezentativní hodnotu 0,25 metru. Pro porozitu, sorpci a koeficient difuze jsem použil následující hodnoty - pro porozitu 0,3, sorpci jsem zanedbal, koeficient difuze jsem zvolil 10^{-9} m²/s (Fetter, 1999). Příčnou disperzivitou jsem odhadl na 5 cm. Tyto parametry jsem předepsal stejné do všech vrstev modelu.

Z důvodu použitého software jsem musel udělat určité zjednodušení a předpokládat, že čistící reaktor ve vrtu je stoprocentně účinný. Díky tomuto předpokladu jsem mohl cirkulační vrt v modelu předepsat opět pomocí zdrojového členu. Při hodnocení výsledků z modelu tedy nesmím zapomínat na to, že výsledky nejsou díky tomuto zjednodušení přesné.

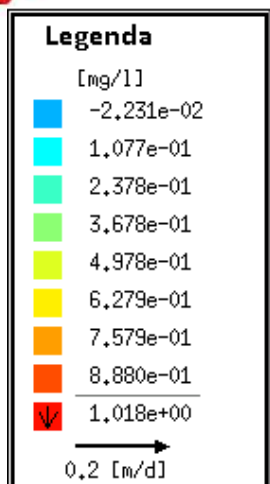
Pro simulaci transportu jsem měl na výběr několik variant, kupř. modelovat stopovací zkoušku nebo vložit do modelu konkrétní kontaminační mrak některého z kontaminantů. Nakonec jsem zvolil jiný přístup a do všech bodů sítě v celé oblasti jsem předepsal konstantní koncentraci 1 mg/l, což je přibližně průměrná koncentrace kontaminantu na lokalitě.

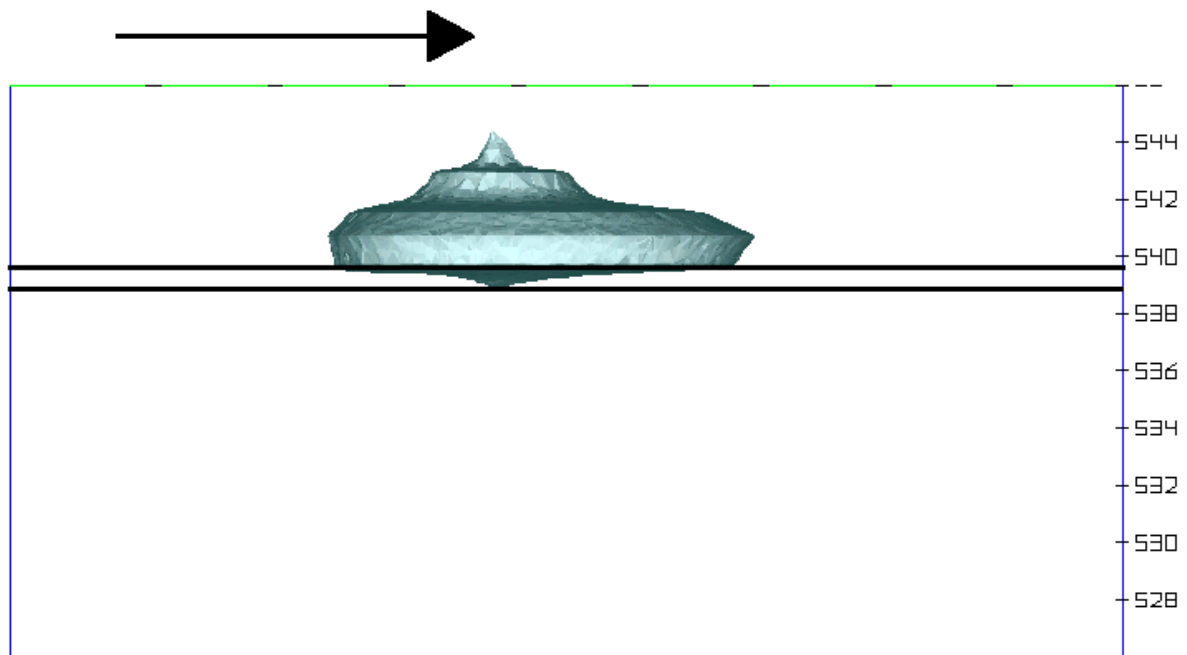
Jako počáteční podmínku jsem zvolil přirozené proudění na lokalitě, v čase $t = 0$ jsem zahájil přečerpávání cirkulačním vrtem. Velikost kroku byla konstantní - 1 den - a délka simulace byla 200 dní.

Výsledky je možné vidět na obrázcích 24 a 25.



Obrázek 24: Obrázky ukazují rozsah zóny snížené kontaminace těsně nad vrstvou poloizolátoru postupně v (a) 50, (b) 100, (c) 150 a (d) 200 dnech od začátku simulace. Čísla v obrázcích jsou pozorovací body, černá tečka značí přibližnou pozici cirkulačního vrtu.





Obrázek 25: Zóna snížené kontaminace (těleso je vymezeno hranicí odpovídající 20 % původní koncentrace) po 200 dnech od začátku čerpání. Šipka znázorňuje přibližný směr proudění, dvojice černých čar ukazuje polohu vrstvy poloizolátoru.

Z obrázků 25 je patrné několik věcí. Předně to, že díky přítomnosti okolního proudění není cirkulační cela okolo vrtu symetrická a zóna přečištění je protažená po směru proudění. To odpovídá jednoduchým modelům v proudovém poli i obrázku 14. Tento efekt je však zřejmě ještě umocněn přítomností jílové vrstvy.

Obrázek 25 zobrazuje situaci po 200 dnech chodu cirkulačního vrtu a modré těleso na obrázku vymezuje oblast, kde koncentrace klesla na 20 % a méně oproti stavu před čerpáním. Je vidět, že téměř celé těleso vymezené nižší koncentrací se nachází nad jílovou vrstvou. To by mohlo znamenat, že díky kombinaci malého čerpání, přítomnosti jílové vrstvy a existenci přírodního proudění nedochází k významnějšímu vertikálnímu proudění, tedy že vrt pouze přečerpá vodu z dolní zvodně do horní, kde pak voda odtéká pryč a díky vrstvě poloizolátoru nedochází ke vzniku cirkulační cely a vrt tak ztrácí právo nazývat se cirkulačním.

Z výsledků stopovací zkoušky nicméně víme, že ke komunikaci mezi zvodněmi skrze poloizolátor dochází, neboť stopovač byl zachycen v monitorovacím piezometru v dolní zvodni asi 2,5 metru po směru proudění. Z modelu ale vyplývá, že množství vody proudící skrze poloizolátor je minimální. Tento rozdíl ve výsledcích by mohl znamenat, že:

- vrstva poloizolátoru není ve skutečnosti vrstva, ale pouze jílová čočka
- vrstva poloizolátoru není souvislá, ale v některých místech porušená např. vrtáním

-stopovací zkouška byla ovlivněna sanačním čerpáním (větší gradienty, rozdílné směry proudění), zatímco model je simulací přirozeného stavu bez sanačního čerpání

-samotný model se díky provedeným zjednodušením a odhadu parametrů příliš liší od skutečné situace

Pro každý z těchto důvodů lze najít argumenty, ale díky nedostatku dat nelze skutečně rozhodnout, který z nich je správný.

Jílová vrstva může být ve skutečnosti jen jílová čočka nebo nevodivá poloha. Nemůžeme však tuto hypotézu nijak blíže potvrdit, protože nevíme nic o jejím plošném rozšíření (viz kapitola 3.4). Na druhou stranu je nutno říci, že pokud by se jednalo o pouhou čočku, pak by musela být zřejmě většího rozsahu, aby mohla efektivně oddělovat obě zvodně rozdílem hydraulických výšek okolo 0,5 metru (viz kapitola 6.1).

Nemůžeme vyloučit ani možnost, že je vrstva rozlehlá a pouze porušená. Mohla být porušena při vrtání některého z vrtů CV-1 nebo CV-2 nebo může sama obsahovat určité preferenční cesty proudění.

Vzhledem k tomu, že stopovací zkouška byla prováděna za jiných podmínek, si nemůžeme zcela dovolit porovnávat její výsledky s výsledky modelu. Sanační čerpání, které probíhalo během stopovací zkoušky, mohlo natolik ovlivnit proudění podzemní vody v oblasti, že nelze její výsledky srovnávat s výstupy z modelu.

Díky různým nejistotám, zjednodušením a odhadu parametrů může být samotný model velmi odlišný od situace na lokalitě, nicméně v současné době nemám k dispozici další data, kterými bych ho mohl upravit a zpřesnit.

Pokud však budou na lokalitě panovat přirozené podmínky (bez sanačního čerpání), pokud budeme čerpat dané množství vody (0,02 l/s) a pokud je jílová vrstva skutečně rozlehlou a neporušenou vrstvou, tak podle výsledků modelu nedojde k vytvoření cirkulační cely a sanace pomocí cirkulačního vrtu bude nejspíš neefektivní.

6.6 Diskuse

Vytvořil jsem model lokality Velká Hleďsebe a s jeho pomocí si bylo možné ujasnit, jak na lokalitě proudí voda za přirozeného stavu a jak tento stav ovlivní chod cirkulačního vrtu. Věrohodnost modelu jsem ověřil jeho porovnáním s hodnotou maximálního možného čerpání a obě hodnoty se lišily pouze o méně než 0,02 l/s. Také jsem díky nestacionárnímu modelu přibližně určil, jak rychle se ustálí proudění po spuštění čerpání v dolní zvodni, a i toto

srovnání se nijak výrazně nelišilo od výsledků publikovaných v odborných člancích (Kabala, 1993).

Jednou z důležitých částí práce bylo nasimulovat transport látky v okolí cirkulačního vrtu. Na základě provedených simulací usuzuji, že cirkulační vrt bohužel není pro použití k sanaci této lokality příliš vhodný. Příčinou je nízká propustnost prostředí, jeho heterogenita a složité hydrogeologické podmínky.

Z modelu transportu se ukázalo, že nedojde k vytvoření plnohodnotné cirkulační cely. Ze stopovací zkoušky však vychází mnohem výraznější komunikace mezi zvodněmi, než jakou ukazuje model. Stopovací zkouška probíhala za sanačního čerpání a ani při ní nedošlo k vytvoření cirkulační cely (viz kapitola 6.1). Pokud tedy cirkulační cely nevznikla ani v jednom z případů, tak je pravděpodobné, že cirkulační vrt jako sanační technologie je pro lokalitu Velká Hleďsebe skutečně nevyhovující.

V době dokončování této práce se nicméně pracuje na vytvoření cirkulace ve větším měřítku, kdy bude voda čerpaná sanačními vrty zpětně injektována do prostředí asi o 100 metrů zpět proti směru proudění podzemní vody. Tento krok jistě velmi ovlivní proudění na lokalitě a není jisté, zda to bude mít pro možnost využití cirkulačního vrtu nějaký přínos. To už je ale nad rámec této práce.

Na závěr bych chtěl neefektivnost cirkulačního vrtu ukázat na příkladu: Maximální možné čerpání je 0,02 l/s, což je 1,728 m³ za den. Průměrné koncentrace kontaminantu jsou okolo 1 mg/l. Pokud budeme pro jednoduchost počítat s touto hodnotou, odčerpáme ze spodní zvodně za den 1728 mg kontaminantu, tedy 1,728 g. Pokud budeme uvažovat účinnost reaktoru 80%, pak za den odstraníme z podzemní vody přibližně 1,4 gramu kontaminantu, ročně pak asi 505 gramů. Ve srovnání s předpokládanými denními úniky TCE z lakovací vany v době provozu (které činily okolo 70 kg/den, viz kapitola 4.1) není toto číslo příliš optimistické.

Nízká propustnost a heterogenita prostředí má negativní vliv na celou sanaci a výrazně omezuje možnost využití cirkulačních vrtů na lokalitě. Proto bych ve Velké Hleďsebi nedoporučoval použití této technologie.

7. Závěr

V úvodu jsem uvedl několik otázek, na které jsem chtěl pomocí této práce odpovědět. Konkrétně jsem si předeslal za cíl vytvořit jednoduchý model cirkulačního vrtu v homogenním izotropním prostředí, malými změnami parametrů modelu zkoumat jejich vliv na proudění kolem cirkulačního vrtu a těchto získaných znalostí pak využít při vytváření modelu konkrétní lokality. Tento jednoduchý model cirkulačního vrtu v ideálních podmínkách jsem vytvořil a zjistil jsem, jaké parametry mají největší dopad na proudění v okolí vrtu. Ukázalo se, že parametry prostředí mají výrazně větší vliv na proudění než konstrukční parametry vrtu.

Následně jsem vytvořil numerický model proudění podzemní vody na lokalitě Velká Hleďsebe a díky němu a nově získaným poznatkům z jednoduchých modelů jsem mohl přibližně nasimulovat a posoudit účinnost sanace na této lokalitě. I když se nakonec ukázalo, že použití cirkulačního vrtu není vzhledem k nízké propustnosti a heterogenitě prostředí, přítomnosti poloizolátoru a k velikosti sanačního čerpání z okolních vrtů příliš vhodná technologie, věřím, že má práce byla přesto přínosná.

Poděkování: Chtěl bych samozřejmě poděkovat spoustě lidí. Předně panu Docentu Jiřímu Mlsovi za trpělivost, s jakou se mi vždy věnoval, doktoru Tomáši Ondovčínovi za snad ještě větší trpělivost, (zatím) magistru Kubovi Šindelářovi za odpovědi na časté dotazy a za cenné rady. Dále chci poděkovat firmě Dekonta a.s. za to, že jsem díky jejich průzkumu a ochotě měl k dispozici dostatek dat, informací a mohl jsem nasbírat nové zkušenosti v terénu. Nesmím zapomínat ani na svou krásnou ženu Lucii a na rodinu a přátelé, kteří mě neváhali podržet, když už jsem toho měl plné zuby.

Díky vám všem.

Literatura:

- Bear, J. [1972] Dynamics of fluid in porous media, Dover publications, INC. New York
- Bear, J.[1979] Hydraulics of groundwater. Dover publications, INC. New York
- Bruthans, J. [2014] Vyhodnocení stopovacích zkoušek a hydraulických reakcí monitorovacích vrtů při cirkulačním čerpání vrtu CV-1 ve Velké Hleděsebi, zpráva o stopovací zkoušce
- Cunningham, J.A., Hoelen, T.P., Hopkins, G.D., Lebron, C.A., Reinhard, M. [2004] Hydraulics of recirculation well pairs for groundwater remediation, , Ground Water vol.42, No. 6, strany 880-889
- Diersch, H. [1998] Feflow- Reference manual, manuál k program Feflow
- Environmental Protection Agency [1998] Field Applications of In-situ Remediation technologies: Ground-water Circulation Wells, informační zpráva EPA 542-R-98-009, October 1998
- Faflík, D. [2009] Analýza rizika, zpráva o hydrogeologickém průzkumu bývalého areálu KOVO ve Velké Hleděsebi, SANO CB s.r.o.
- Fetter, C., W. [1999] Contaminant hydrogeology, Waweland Press, Inc., druhé vydání
- Herrling, B., Stamm, J., Buermann, W. [1991] Hydraulic circulation system for in situ bioreclamation and/or in situ remediation of strippable contamination, International Symposium on In situ and On site bioreclamation, Duben 1991, San Diego, USA
- Herrling, B., Stamm, J. [1992] Numerical Results of Calculated#D Vertical Circulation Flows Around Wells with Two Screen Sections for In-Situ or On-Site Aquifer Remediation, Institute of Hydromechanics, University of Karlsruhe,Germany
- Johnson, L. Richard, Simon, A. Michelle [2007] Evaluation of groundwater flow patterns around a dual screened groundwater circulation well, Journal of Contaminant Hydrology 93 (2007), strany 188-202
- Kabala, Z., J. [1993] The dipole flow test: A new single borehole test for aquifer characterization, Water Resources research, roč. 29, strany 99-107, leden 1993
- Kubricht, J [2012] Předsanační doprůzkum- areal bývalého podniku KOVO Velká Hleděsebe, Dekonta, a.s.
- Kukačka, J [2013] Popis jader vrtů CV-1 a CV-2 v areálu KOVO, Velká Hleděsebe
- Miller, R. Ralinda, Roote, S. Diane [1997] In-Well Vapor Stripping, Ground-water Remediation Technologies Analysis Center report, Technology report No. TO-97-01
- Mls, J [2013] ústní sdělení

- Pitrák, M [2013] Karotáž vrtu CV-1, Velká Hleďsebe- KOVO, Karotážní měření pro zjištění proudění podzemní vody, pro upřesnění geologického profilu vrtu a pro ověření kvality cementace střední části vrtu, Závěrečná zpráva
- Rodovská, Ž. [2013] Využití konduktometru pro charakterizaci proudění vody ve vrtu: Testování pomocí umělého vrtu, bakalářská práce
- Shelley, L. Michael, Goltz, N. Mark, Amon, P. James, Agrawal Abinash, Enwrigh Michael, Slusser Thomas, Ferland Derek, Niekamp Scott, Gardner Bruce, Stoppel Chris, Campbell Jason, Entingh Andrew, Bugg Bradley, Opperman Bryan, Hoefar Colby, Boggs Kevin, Whitney Angela, Fernandez Manny [2002] Treatment of chlorinated aliphatic contamination of groundwater by horizontal recirculations wells and by constructed vertical flow wetlands, Technical report No. AFIT/EN/TR-02-05, March 2002
- Siantar, P. Darsa, Schreier, G. Cindy, Chou Chi-Su, Reinhard Martin [1996] Treatment of 1,2-dibromo 3-chloropropane and nitrate-contaminated water with zero-valent iron or hydrogen/palladium catalyst, Water Resources, vol. 30, No. 10, strany 2315-2322
- Stamm, J. [1995] Vertical Circulation Flow for In-Situ Bioremediations in Aquifers, Institute of Hydromechanics, University of Karlsruhe, Germany

Internetové zdroje:

- <http://en.wikipedia.org/wiki/FEFLOW> (9.3.2014)
- <http://water.epa.gov/drink/contaminants/index.cfm> (27.10.2013)
- <http://www.ieg-technology.com/> (27.10.2013)
- <http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/> (9.3.2014)

Seznam zkratk

BTEX - souhrnný název pro kontaminanty benzen, toluen, ethylbenzen a skupinu xylenů (orto-, meta-, para- xylen)

C-Sparger - typ cirkulačního vrtu využívající injektáž ozonu

CV-1 CV-2- dva vrty na pilotní lokalitě Velká Hleďsebe, které budou použity pro testování technologie cirkulačních vrtů na lokalitě

ČGS - Česká geologická služba

DCE - dichlorethen, kontaminant

DDC - z anglického Density Driven Convection, typ cirkulačního vrtu, který k vyvolání cirkulace využívá pouze injektáž vzduchu

DNAPL – běžný hydrogeologický termín označující kontaminanty těžší než voda

EPA - Environmental protecting agency, americká federální agentura pro ochranu životního prostředí

GCW - zkratka z Groundwater circulation well, základní typ cirkulačního vrtu

LNAPL - běžný hydrogeologický termín označující kontaminanty lehčí než voda

NEL - nepolární extrahovatelné látky, kontaminanty na bázi ropných produktů

NoVOC's - druh cirkulačního vrtu využívající stripování

PCE - tetrachlorethen, kontaminant

SZB - Spulung-Zirkulations Brunnen, cirkulační vrt používaný pro čištění nenasycené zóny

TCE - trichlorethen, kontaminant

UVB - Unterdruck-Verdampfer- Brunnen, typ cirkulačního vrtu využívající stripování