

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**

**Vyhodnocení efektu regenerací
z čerpací a stoupací zkoušky**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Diplomant: Bc. Martin Čáp

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Čáp

Voda v krajině

Název práce

Vyhodnocení efektu regenerací z čerpací a stoupací zkoušky

Název anglicky

Evaluation of regeneration effect from pumping and build-up test

Cíle práce

Popis problematiky hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech.

Vyhodnotit účinek regenerace na reálných vrtech.

Porovnat vypočtené hodnoty dodatečných odporů z čerpací a stoupací zkoušky.

Metodika

Zpracovat literární rešerši k vyhodnocování dodatečných odporů na vrtech, kdy je brán v úvahu i vliv objemu vody ve vrtu v počáteční části hydrodynamické zkoušky.

Popis zkoumané lokality a regenerace provedené na vrtu.

Vyhodnocení čerpacích a stoupacích zkoušek před a po regeneraci.

Zhodnocení efektu regeneračního zásahu.

Diskuse.

Závěr.

Doporučený rozsah práce
cca 40-50 str.

Klíčová slova

studna, regenerace, čerpací zkouška, stoupací zkouška

Doporučené zdroje informací

Jelmert, T. A. Introductory Well Testing. 2013. ISBN 978-87-403-0445-9
Pech, P.: Speciální případy hydrauliky podzemních vod. 2010. ČZU-VÚV TGM.
Valentová, J. Hydraulika podzemních vod. Skripta. 2002. ČVUT.

Předběžný termín obhajoby
2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce
prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Garantující pracoviště
Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 31. 3. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 4. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Ing. Pavla Pecha, CSc., a že jsem uvedl všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Bohutíně 15. 4. 2019

.....

Bc. Martin Čáp

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Pavlu Pechovi, CSc., za odborné vedení práce, za věcné připomínky, trpělivost a vstřícnost při konzultacích. Za poskytnuté materiály k vypracování diplomové práce děkuji podniku Vodní zdroje a.s.

Abstrakt

Diplomová práce pojednává o zhodnocení efektu regenerace z čerpacích a stoupacích zkoušek, které jsou řešené na vybraných jímacích vrtech v regionu Bela Crkva v severovýchodní části Srbské republiky. Výsledky jsou vypracovány pro situaci před a po regeneraci vybraných vrtů.

V práci je nastíněna nejprve teoretická část, která se věnuje problematice proudění podzemních vod, charakterizaci jednotlivých prostředí, ve kterých se vody pohybují, a popisu jednotlivých vlastností kolektorů podzemních vod. Poslední úsek teoretické části je věnován popisu výpočetních metod, se soustředěním na problematiku Jacobovy semilogaritmické metody přímky, která je pro diplomovou práci stěžejní. Hlavní část práce zahrnuje konečné výpočty a porovnání vybraných parametrů řešených hydrodynamických zkoušek, které jsou vyhodnoceny před a po regeneraci jednotlivých jímacích vrtů.

Výsledné hodnoty dokazují po provedení regenerace jasné zlepšení, kdy jsou vlivy dodatečných odporů a dodatečného snížení o více jak třetinu nižší než před regenerováním. Specifická vydatnost je zlepšena o přibližně třetinu pouze v prvním případě. Ve druhém vrtu zlepšení není tolik výrazné, protože nebylo možné provést regenerační práce v celé jeho délce. Výsledky jsou dále shrnuty v diskusi a závěru diplomové práce.

Prostudováním teoretické části lze získat základní povědomí o problematice nejen proudění podzemních vod, ale i vlastností a typů různých zvodnělých prostředí. Přečtením práce je dále získán přehled o praktickém řešení problematiky dodatečných odporů a jejich vlivu na účinnost jímacích vrtů a kontrast těchto hodnot za stavu před a po regeneraci těchto studní.

Klíčová slova:

Studna, vrt, zvodeň, dodatečné odpory, podzemní voda

Abstract

The diploma thesis addresses the evaluation of the regeneration effect of pumping and build-up tests, which are focused on selected wells in the Bela Crkva region, in the northeastern part of the Republic of Serbia. The results are processed for the state before and after the regeneration of selected wells.

Firstly, the theoretical part is discussed. This part of the thesis deals with the types of groundwater flow, characterization of individual environments in which the water is moving and the description of individual characteristics of groundwater collectors. The last aspect of the theoretical part is devoted to the description of computational methods, with the focus on the Jacob's semi-logarithmic method, which is crucial for the thesis. The main part of the thesis includes final calculations and comparisons of selected parameters of solved hydrodynamic tests. Aforementioned results are evaluated before and after regeneration of individual collecting wells.

The resulting values show a clear improvement after regeneration, with the effects of additional resistances and additional reductions of more than one third lower than before regeneration. The specific yield of the borehole rate is improved by approximately one third only in the first case. The improvement in the second borehole is not so pronounced, since it was not possible to carry out regeneration process over the entire its length. The results are further summarized in the discussion and conclusion of the thesis.

By studying the theoretical part, can be obtained knowledge of the basic problems of not only groundwater flow, but also of properties and types of various aquifers. Further reading of the thesis provides an overview of the practical solution of the problems of skin effect and its influence on the efficiency of the wells. Following, comparison of the acquired values before and after the regeneration of these wells is portrayed.

Keywords:

Well, borehole, aquifer, skin effect, groundwater

Obsah

1	ÚVOD	- 1 -
2	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	- 2 -
3	METODIKA	- 3 -
4	LITERÁRNÍ REŠERŠE	- 4 -
4.1	Horninové prostředí	- 4 -
4.2	Podzemní vody a jejich dělení	- 5 -
4.2.1	Dělení podle výskytu v půdě - podpovrchová voda	- 6 -
4.2.2	Dělení podzemních vod podle vzniku	- 7 -
4.2.3	Dělení podzemních vod podle propustnosti horninového prostředí .	- 8 -
4.2.4	Dělení podzemních vod podle hydraulických poměrů	- 9 -
4.3	Vlastnosti zvodnělého prostředí	- 12 -
4.3.1	Pórovitost	- 12 -
4.3.2	Propustnost	- 13 -
4.3.3	Storativita	- 14 -
4.3.4	Transmisivita	- 15 -
4.3.5	Hydraulická vodivost.....	- 15 -
4.3.6	Efektivní napětí.....	- 16 -
4.4	Proudění podzemní vody	- 17 -
4.4.1	Darcyho zákon.....	- 17 -
4.4.2	Ustálené proudění	- 20 -
4.4.3	Ustálené radiální proudění k vrtu	- 21 -
4.4.4	Neustálené radiální proudění k vrtu	- 23 -
4.4.5	Dodatečné odpory	- 27 -
4.4.6	Regenerace vrtu	- 30 -
4.4.7	Čerpací zkoušky	- 31 -
4.4.8	Stoupací zkoušky	- 32 -

5	VYHODNOCENÍ DODATEČNÝCH ODPORŮ PŘED A PO REGENERACI JÍMACÍCH VRTŮ.....	- 34 -
5.1	Charakteristika lokality	- 34 -
5.2	Geologie oblasti.....	- 35 -
5.3	Výsledky.....	- 36 -
5.3.1	Vrt B - 3.....	- 37 -
5.3.2	Vrt B - 6.....	- 45 -
6	DISKUSE.....	- 52 -
7	ZÁVĚR	- 54 -
8	PŘEHLED LITERATURY A PŘEHLED POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 55 -
9	SEZNAM PŘÍLOH	- 58 -
10	PŘÍLOHY.....	- 59 -

1 ÚVOD

Nedílnou součástí života na Zemi je voda. Ve svých mnoha formách je voda základní kámen veškerých organických forem, které se na naší planetě vyskytují. Ne nadarmo je voda označována jako životodárná tekutina.

Již odnepaměti každý živý tvor přirozeně vyhledává a sídlí v blízkosti vodních zdrojů. K usazení si lidé a jiní živočichové volí mořská pobřeží, břehy řek, pramenné oblasti a údolí nebo okolí dalších vodních ploch.

Dnes je voda tak běžnou součástí života každého jedince, že je většinou chápána jako samozřejmý, nedílný prvek našeho života. Většinou se ani neuvědomujeme, jak by to vypadalo, kdyby voda z našeho každodenního prostředí a činností najednou zmizela. Samotná hodnota vody je podceňována, nedoceňována. Nedostatek pitné vody se v současné době stává stále výraznějším tématem. Dříve nezávadná voda, kterou bylo možno odebírat přímo z řek a dodávat do vodovodní sítě s minimální úpravou, se dnes musí pečlivě a draze upravovat. Z uvedených a mnoha dalších důvodů se stále více obyvatel rozhoduje pro získávání vody z podzemí vlastních pozemků. V dnešní době se tak poptávka po realizaci jímacích objektů stále navyšuje. Proto je důležité znát dobře zákonitosti proudění podzemní vody, geologické vlastnosti daného prostředí, technologické možnosti a různé způsoby realizace jímacích vrtů.

Nezbytné je tedy provedení důkladného průzkumu a zajištění následných prací spojených s řešením, které zajistí dostatek vody ať už pro potřeby obyvatel malého rodinného domku, nebo potřeby zásobování celé vodovodní sítě.

Vzhledem ke své aktuálnosti je pro mě uvedené téma velmi poutavé. Z tohoto důvodu je diplomová práce zaměřena na jednu ze součástí každého projektu, zabývající se realizací nebo obnovou jímacích vrtů. Tím jsou čerpací a stoupací zkoušky a jejich rozdíly na vybraných vrtech před a po provedení jejich regenerace.

2 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je nejprve seznámit se základní problematikou chování podzemních vod v různých prostředích a za různých podmínek. Nejdůležitějším bodem práce pak bylo nejen vyhodnocení, ale i porovnání dodatečných odporů, dodatečného snížení a specifické vydatnosti v průběhu čerpací a stoupací zkoušky, realizované na skutečných jímacích objektech, které probíhají před a po regeneraci řešených vrtů.

S ohledem na celkové zaměření práce, je zde především snaha o popis chování podzemních vod v oblasti jímacího vrtu, popis metod, které se využívají pro zpracování využívaných dat, a také popis použitých hydrodynamických zkoušek.

3 METODIKA

V této práci jsem se nejdříve snažil vysvětlit základy pro pochopení chování podzemních vod. Popisoval jsem jednotlivé typy horninového prostředí, jejich příklady a způsob, jak jimi podzemní vody proudí.

Dále jsem popsal podzemní vody a jejich dělení, kde jsem se věnoval především charakterizaci jednotlivých druhů kolektorů a podmínky jejich výskytu.

Pro následující část jsem zvolil podrobnější popis jednotlivých určujících vlastností pro zvodnělá prostředí, jako jsou transmisivita, storativita, hydraulická vodivost a další.

Po vysvětlení jednotlivých vlastností zvodnělého prostředí jsem začal popisovat jednotlivé typy proudění podzemních vod a jejich podrobnější zákonitosti, týkajících se zejména radiálního proudění k jímacím vrtům.

V praktické části diplomové práce jsem nejprve přiblížil řešenou lokalitu. Charakterizací a popisem území jsem uvedl do souvislosti situaci v terénu a popsal použitý postup při výpočtech všech potřebných údajů.

Jako poslední jsem pak zhodnotil celkovou situaci obou řešených vrtů a porovnal vliv regenerace na budoucí produktivitu těchto studní.

4 LITERÁRNÍ REŠERŠE

4.1 Horninové prostředí

Povaha a rozložení geologického prostředí je pro vytvoření vodní zásoby zásadní. Výskyt zvodněného prostředí (kolektorů a izolátorů – viz níže, kapitola 3.2 Podzemní vody) závisí na druhu horniny či zeminy, struktury, textury, zrnitosti atd., dále je podstatné stáří prostředí, způsob jeho uložení vzhledem k okolním horninám či zeminám (stratigrafie) a posledním určujícím faktorem je rozmístění různých zlomů, vrás, přesmyků a jiných tektonických porušení (struktura).

Litografie a stratigrafie mají nejvyšší váhu, pokud se prostředí skládá z nezpevněných sedimentárních hornin. Ve většině oblastí je při dostatečné znalosti litologie, stratigrafie a struktury geologického prostředí možné přímo porozumět uložení kolektorů a izolátorů (Freeze a Cherry 1979).

Charakter kolektoru (zvodnělé vrstvy) a okolního prostředí je možné zjišťovat dvěma postupy; přímým a nepřímým.

Přímý postup je laboratorní rozbor vzorků z vrtného jádra. Výsledek této metody ale zahrnuje poznatky pouze z omezené oblasti.

Nepřímé jsou pak parametry odvozené z protokolování (záznamy z karotážních metod, analýza horninového prostředí). Výsledkem je pak průběžný tok informací, které jsou vyobrazeny jako křivka, přičemž tak nejsou vyjádřeny přímo vlastnosti rezervoáru (ložiska), jako je například pórovitost nebo permeabilita. Je tedy zapotřebí tyto údaje transformovat do samotných vlastností rezervoáru (ložiska) v podobě kalibrací těchto záznamů pomocí porovnání s laboratorními výsledky testů či dat.

Z toho vyplývá, že je pro plnohodnotný průzkum zvodněného prostředí důležité využívat obou způsobů. Jak přímých - vrtné jádro, tak nepřímých - karotážní měření (Schön 2015).

Nezpevněné sedimenty

Až 90 % ze všech existujících zvodněných kolektorů je pravděpodobně složeno z nezpevněných aluviálních sedimentů, zejména z písků a štěrků. Tyto sedimenty se nachází v blízkosti vodních toků, na rovných pláních nebo v údolích již vyschlých řek. Jejich pórovitost je výhradně průlinová.

Mezi podobné oblasti s vysokou propustností, které jsou vhodné pro jímání podzemních vod, rozhodně nepatří nezpevněné sedimenty charakteru jílovitých zemin, které jsou tak malé zrnitosti, že se chovají jako izolant. I když póry jílovitých zemin dokážou pojmout velké objemy vody, nejsou schopny tyto objemy efektivně propouštět.

Studny, které jsou realizovány v oblastech s takto vysoce propustnými zeminami, jsou schopny produkovat velká množství vody (Freeze a Cherry 1979, Todd a Mays 2005).

Zpevněné sedimenty

Zpevněné sedimenty, jako jsou pískovce, břidlice nebo brekcie, mají oproti nezpevněným sedimentům průlino-puklinovou a puklinovou propustnost. Další zpevněnou sedimentární horninou, která je pro vedení vody významná, jsou karbonátové sedimenty, což jsou například vápence a dolomity, které mají propustnost krasovou a v závislosti na stavu horniny jsou schopny vést vodu podobně jako povrchové vodní toky (Freeze a Cherry 1979).

Magmatické a metamorfované horniny

Ve zpevněném stavu jsou horniny tohoto typu v podstatě nepropustné, tudíž nejsou dobrým prostředím pro vedení podzemní vody. Pokud jsou ale vrstvy těchto hornin u povrchu a jsou vystaveny procesům zvětrávání, mohou se rozpadat a poruchy v jejich celistvosti mohou poskytovat určité vodní zásoby (Todd a Mays 2005).

4.2 Podzemní vody a jejich dělení

Podzemní vody jsou velmi důležitým zdrojem vody po celém světě. Poptávka po podzemní vodě jako zdroje pro zavlažování, průmysl nebo městské a venkovské domácnosti je stále vyšší. Vysoké požadavky na podzemní vody mají například i systémy chlazení a klimatizace, které využívají její charakteristickou stejnoměrnost v teplotě. Nedostatek vody v oblastech, kde docházelo k nadměrnému čerpání, jasně prokazuje potřebu pro přesné odhady dostupných zdrojů podzemní vody a důležitost řádného plánování proto, aby se do budoucna zajistila trvalá dostupnost vodních zdrojů.

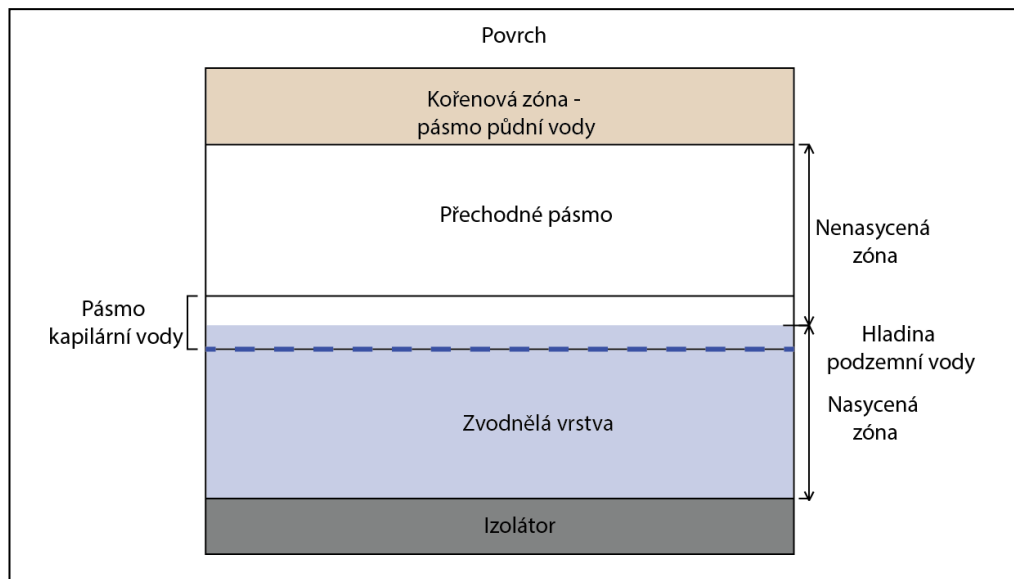
Podzemní voda není jen zdrojem pro povrchovou vodu (prameny) nebo pro člověka v suchých oblastech (studně), ale slouží také jako důležitý prvek ve všech klimatických regionech jako součást hydrologického cyklu. Snadná dostupnost v řadě oblastí, vynikající kvalita a relativně levný vývoj dostupných metod pro její nalezení a využívání jsou důvodem stoupající poptávky po podzemní vodě (Todd a Mays 2005, Valentová 2010).

Pro průzkumné práce za účelem získání vody je velmi důležitá znalost prostředí, kterým se říká kolektor či zvodnělé prostředí. Voda je nahromaděna v pórech nebo puklinách hornin a vlastnosti tohoto prostředí rozhodují, jaký postup bude zvolen při jejím získávání. Důležité je znát typy a vlastnosti zvodnělého prostředí.

4.2.1 Dělení podle výskytu v půdě - podpovrchová voda

Nejblíže povrchu můžeme vodu rozdělit podle toho, v jaké hloubce pod terémem se nachází. Příkladem lze uvést půdní profil, který bude reprezentovat část půdního prostředí. Voda se zde bude nacházet v určitých úrovních, které jsou následně popsány a rozděleny.

- a) Pásmo půdní vody - Počátek má na povrchu a prostupuje do hloubky, kam dosahují kořenové systémy rostlin. Mocnost tohoto pásma je závislá na úrovni hladiny podzemní vody, typu zeminy v dané oblasti a velikosti kořenových systémů, tedy na druhu vegetace.
- b) Přechodné pásmo - objevuje se pod pásmem půdní vody a dosahuje k počátku pásma kapilární vody. Jedná se o oblast, která je proměnlivě nasycená, v závislosti na podmínkách.
- c) Pásmo kapilární vody - Vyskytuje se na přechodu mezi pásmem nasycení a nenasycení, přičemž spodní část oblasti kapilární vody může být satureovaná.
- d) Pásmo podzemní vody - Oblast ohraničená pásmem kapilární vody, zde je zeminové prostředí satureované vodou. Zóna saturace pokračuje hlouběji až k hornině či zemině, která se bude projevovat jako izolátor (Pech 2010).



Obr. 1. Voda v půdním profilu (Autor 2019).

4.2.2 Dělení podzemních vod podle vzniku

Juvenilní (hlubinná) voda

Tyto vody vznikají ve velkých hloubkách pod povrchem kondenzací vodních par, které jsou produktem procesu tuhnutí magmatu. Tyto vody nejsou zapojeny do oběhu vody (Máca 2014, Starý 2005).

Vadózní voda

Tato voda do horninového či zeminového prostředí infiltruje z povrchu. Jedná se o vody, jejichž největší zdroj jsou atmosferické srážky. Do vadózních vod se také zařazují zkondenzované vodní páry, které se nacházejí v pórech zemin či puklinách hornin (Starý 2005).

Vadózní může být nazývána i voda, která se vyskytuje v nenasyceném zeminovém prostředí těsně pod povrchem (viz na obr. č. 1, kde se jedná o přečhodné pásmo). V pórech půdního prostředí se v tomto případě vyskytuje i vzduch (Máca 2014).

Fosilní podzemní voda

Voda, která vznikla již před dlouhou dobou a nezasahuje do hydrologického cyklu, protože byla od té doby uzavřena nepropustnými vrstvami (Máca 2014).

4.2.3 Dělení podzemních vod podle propustnosti horninového prostředí

Průlinová propustnost

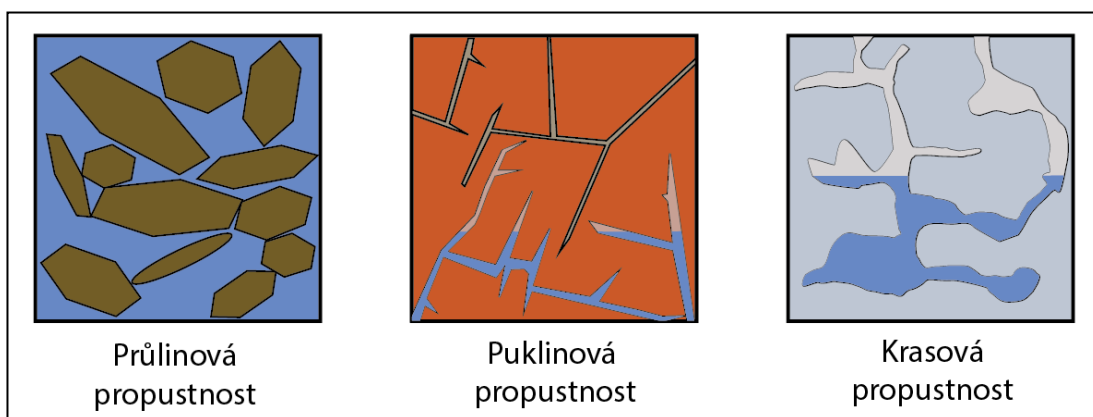
Horniny průlinového prostředí jsou typicky sedimentární horniny, jako jsou například pískovce, prachovce či jílovce a další sedimenty, které se vyznačují různorodou pórovitostí. Voda se ve zvodněných prostředích tohoto charakteru pohybuje zejména v pomalých rychlostech a je povětšinou ustálena v souvislé hladině. Objem vody v prostředí s průlinovou propustností je závislý na velikosti a četnosti pórů, přičemž záleží, do jaké míry jsou tyto póry vodou zaplněny (Freeze a Cherry 1979).

Puklinová propustnost

S puklinovou propustností se setkáváme u hornin magmatického nebo metamorfovaného původu, kde se voda vymezuje především na pukliny, trhliny nebo zlomy vytvořené přirozenými geologickými procesy. Rychlost proudění vod v tomto typu horninového prostředí je větší než u proudění v průlinovém prostředí (Todd a Mays 2005).

Krasová propustnost

Krasové vody vznikají v krasovém prostředí. Tím jsou vápence nebo dolomity, které jsou vodou rozpouštěny. Krasová propustnost se vyznačuje vysokou rychlostí proudění (Freeze a Cherry 1979). Pohyb vod se v prostředí s krasovou propustností řídí stejnými zákonitostmi jako proudění vody na povrchu.



Obr. 2. Propustnost horninového prostředí (Autor 2019).

4.2.4 Dělení podzemních vod podle hydraulických poměrů

Označení zvodnělá vrstva nebo zvodnělé prostředí je obecně chápáno jako geologické prostředí, které je schopno vést (propouštět) vodu v takovém množství, které je významné z hlediska jeho využití.

Z tohoto důvodu je velmi důležité vědět, zdali má dané geologické prostředí dostatečnou schopnost vodu poskytovat. Pokud je schopnost geologické prostředí propouštět vodu významná, nazývá se kolektorem. Naopak, pokud prostředí není schopno propouštět vodu, nazýváme ho izolátorem. Třetí variantou je tzv. poloizolátor či propustné prostředí s přetékáním, který je (pouze v porovnání s více propustnou vrstvou) schopen propouštět pouze malá množství vody (Freeze a Cherry 1979).

Je důležité zmínit, že správné určení propustnosti pokaždé záleží na okolí zájmového prostředí. Pokud je jedna vrstva více propustná než druhá, bude se první vrstva chovat vždy jako kolektor a druhá jako izolátor.

Zároveň, zeminy či horniny ať už sedimentární, metamorfované nebo magmatického původu nejsou nikdy zcela propustné nebo nepropustné. Vždy bude záležet na tom, v jaké míře dokážou vodu propouštět (Pech 2010).

S volnou hladinou

Toto prostředí je vodou vyplněno pouze do určité výšky (spodní část kolektoru). Svrchu na hladinu podzemní vody (HPV) působí pouze atmosférický tlak, zesponu se naopak nachází "těsnění" v podobě nepropustné vrstvy (izolátoru).

Ve svrchní části kolektoru (nad HPV) jsou póry vyplněny vzduchem, což se nazývá "pásma aerace" neboli provzdušnění. Samotná HPV je nazývána také hydrogeologickou hranicí, která může být proměnlivá (Marschalko et. al. 2002, Pech 2010).

Zvodně s volnou hladinou jsou často k zemskému povrchu uloženy blíže, než zvodně s napjatou hladinou. Tím pádem je jejich HPV přímo ovlivnitelná vnějšími vlivy. Tím rozumíme nestabilní stav, kdy je voda dotována, nebo naopak odváděna pryč ze systému. Výsledkem je kolísání hladiny vody v systému.

Hlavním zdrojem přirozené dotace vody do zvodnělého prostředí s volnou hladinou jsou srážky, ale záleží také na dalších typech obnovy zásob. Například v oblastech, kde se hojně využívá závlahových systémů, je podstatné procento

vodních zásob využito na zalévání. Podstatná část vody se poté infiltuje a klesne zpět do kolektoru, ze kterého byla odebrána. Za zmínku stojí také fakt, že nadbytky při zavlažování jsou účelově směřovány ke kořenům rostlin, za účelem výluhu nahromaděných solí z kořenových systémů.

Jiným zdrojem mohou být i vyčištěné odpadní vody, které jsou rozlity po povrchu a nechají se zasakovat, nebo jsou přímo napumpovány do země. Tím se vhodně spojuje účelné nakládání s vyčištěnými odpadními vodami a dotace HPV.

Přirozená dotace vody závisí na klimatických podmínkách daného regionu. V teplých obdobích se část srážek odpařuje, a tak je do kolektoru dotováno vody méně. V zimním období je zase v některých regionech půda často zamrzlá, což dotace vody také zmírňuje. Největší množství zásob je do kolektoru dodáváno v jarních a podzimních měsících. V tuto dobu jsou srážky na maximech, přičemž je výpar nízký. Zároveň je snazší infiltrace, protože není zmrzlá půdní vrstva (Thompson 1999, Valentová 2010).

Spodní část kolektoru, která má téměř všechny póry zaplněné vodou (pod HPV) se nazývá "pásma saturace" neboli nasycení. Tato část je ohraničena již výše zmíněnou nepropustnou vrstvou. Izolátor je označován jako geologická hranice, která je stabilní, bývá určena způsobem uložení vrstev.

Do kolektoru s volnou HPV také zařazujeme část, tzv. pásma kapilární vody, které se nachází na přechodu mezi pásmy nasycení - saturace a nenasycení - aerace (Marschalko a kol. 2002).

Kvůli svému umístění jsou zvodně s volnou hladinou velmi náchylné i k negativním antropogenním vlivům. Jakákoliv lidská činnost, umístěna blízko kolektoru a která produkuje odpadní látky (polutanty), může vyústit v kontaminaci zdroje podzemní vody. Náchylnost zvodně ke kontaminaci závisí na hloubce HPV a schopnosti polutantů pronikat skrz vadózní zónu (viz podkapitola dělení podzemních vod podle vzniku).

Urbanizace má na dostupnost podzemní vody dvojitý dopad. Navyšování potřeby vody v daném regionu závisí na růstu populace, což obvykle znamená budování stále komplexnější infrastruktury. Více obyvatel na jednom místě vede ke zvyšování objemu odebírané podzemní vody. Více zastavěného území se rovná vyššímu množství zpevněných ploch. Tímto se pak dále snižuje nepropustnost povrchu, což vede ke snížení schopnosti kolektoru doplnit chybějící rezervy (Thompson 1999).

S napjatou hladinou

Zvodnělé prostředí s napjatou hladinou je vždy ohraničeno nepropustnou či polopropustnou vrstvou jak v nadloží, tak i v podloží kolektoru. Veškeré póry této zvodně jsou naplněny vodou o větším tlaku, než je tlak atmosférický (Pech 2010, Walton 2006).

Nepropustné vrstvy (izolátory) zamezují nebo alespoň významně zpomalují pohyb vody mezi kolektorem a vodou obsaženou v okolním horninovém prostředí.

Dotace zásob do kolektoru je možná pouze v místě, kde zvedeň s napjatou hladinou vystupuje blíže k zemskému povrchu. Za předpokladu, že je kolektor obklopen pouze poloizolátory, může se kolektor zásobovat v menší míře vodou, která prosakuje skrz (Polopropustné prostředí s přetékáním). Mimo skutečnost, že jsou takovéto kolektory pod vyšším tlakem je určující také absence HPV, z důvodu již výše zmíněného vyplnění všech dostupných pórů vodou a jejich ohraničení nepropustnými nebo polopropustnými vrstvami. Jediná oblast, ve které se v kolektoru s napjatou hladinou vyskytuje HPV, je v místě, kde je zvedeň dotována vodou z povrchu.

Tlakové podmínky v oblasti těchto zvodní jsou dány tzv. piezometrickou hladinou podzemní vody. Což je úroveň, na kterou vystoupá hladina podzemí vody, pokud narazíme napjatou zvedeň. Jinak se také nazývá výtlačná výška, jejíž hodnotu lze zjistit také pomocí piezometru. Piezometr je trubice, jejíž konce jsou otevřené. Pokud je piezometr zasazen do zvodně s napjatou hladinou, voda vstupuje spodním otvorem do piezometru a postupně vystoupá na úroveň piezometrické hladiny podzemní vody (Thompson 1999, Valentová 2010).

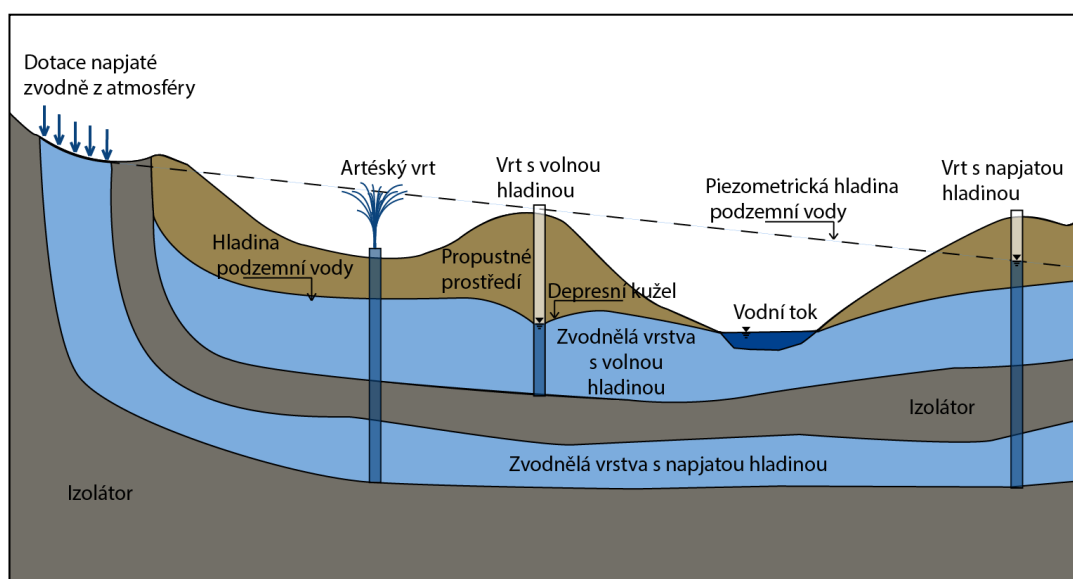
Pokud se tedy průzkumný vrt nachází ve zvodni s napjatou hladinou, voda je schopna samovolně vystoupat nad úroveň nadložního izolátoru.

Dalším projevem napjaté hladiny ve vrtu je tzv. artéský vrt (artéská studna). V tomto případě se piezometrická hladina nachází nad úrovní terénu v místě vrtu. Tím, po naražení na napjatou zvedeň, vzniká vývěr vody pod tlakem, jehož velikost závisí na nadmořské výšce piezometrické hladiny a vrtané studny (Marschalko et. al. 2002, Pech 2010).

Polopropustné prostředí s přetékáním

Toto zvodnělé prostředí může být s napjatou i volnou hladinou, přičemž je jejich vodní zásoba dotována nebo naopak odebírána, pokud jsou okolní izolátory polopropustné (Thompson 1999, Pech 2010).

Polopropustné zvodně jsou méně časté a obvykle se vyskytují na pláních, v místech vyschlých jezer nebo aluviálních údolích. V těchto oblastech byly dobře propustné vrstvy překryty polopropustným materiálem, který se zde chová jako izolant. Když budeme čerpat vodu z této vrstvy, bude tedy voda doplňována skrz nadložní či podložní poloizolátory (Todd a Mays 2005).



Obr. 3. Schéma zvodnělého prostředí (Autor 2019).

4.3 Vlastnosti zvodnělého prostředí

4.3.1 Pórovitost

Pórovitost je vysvětlena jako podíl objemu všech pórů a objemu pevných částic zvodnělého prostředí. Výsledná pórovitost je bezrozměrná nebo se dále přepočítává do procentuální hodnoty (Schön 2015).

Pro správnou charakterizaci kolektoru je důležité rozlišení jednotlivých druhů pórovitosti (Pech 2010, Schön 2015).

- Celkovou pórovitost $n [-]$ tedy chápeme jako objem všech pórů v daném prostředí (vzorku) $V_p [m^3]$ ku celkovému objemu vzorku, viz rovnice 4.3.1.

$$n = \frac{V_p}{V_t} \quad [-] \quad (4.3.1)$$

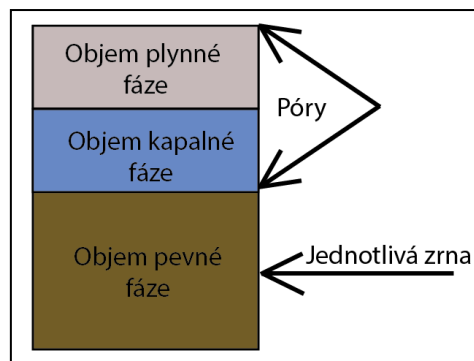
- Efektivní pórovitost $n_e [-]$ pak představuje celkový objem všech pórů, které jsou schopny vést (propouštět) vodu $V_{pe} [m^3]$, tedy pórů, kde se voda skutečně pohybuje, ku celkovému objemu vzorku $V_t [m^3]$, viz rovnice 4.3.2. Efektivní pórovitost je podstatný parametr, který se využívá při výpočtech proudění podzemní vody.

$$n_e = \frac{V_{pe}}{V_t} \quad [-] \quad (4.3.2)$$

- Aktivní pórovitost $n_a [-]$ představuje objem pórů ve vzorku, ze kterých voda odtéká pouze působením gravitačních sil $V_{pa} [m^3]$ ku celkovému objemu vzorku $V_t [m^3]$, viz rovnice 4.3.3 (Pech 2010).

$$n_a = \frac{V_{pa}}{V_t} \quad [-] \quad (4.3.3)$$

Pórovitost může být určena přímo, pomocí vzorků vrtných jader v laboratoři nebo nepřímo ze záznamů z karotážního měření – pomocí jaderných a akustických metod (Schön 2015).



Obr. 4. Složky ve vzorku zeminy o určitém objemu – kolektor s volnou HPV (Autor 2019).

4.3.2 Propustnost

Propustnost čili permeabilita vyjadřuje schopnost horninového nebo zeminového prostředí propouštět vodu, přičemž nezáleží na fyzikálních vlastnostech kapalin. Propustnost se týká pouze pevné části (zrn) zvodněného prostředí, z čehož vyplývá, že vlastnosti kapaliny zde nejsou určující (Pech 2010, Schön 2015).

Určování propustnosti se může vykonávat buď přímo, nebo nepřímo. Přímo metodou může být například rozbor získaných vzorků (jader) nebo testování pomocí studňových čerpacích zkoušek. Nepřímo metodou pak propustnost zjišťujeme

pomocí parametrů zrnitosti a pórovitosti (využíváno zejména v nezpevněných sedimentech). Další nepřímou metodou je zjišťování přesné propustnosti karotážním měřením.

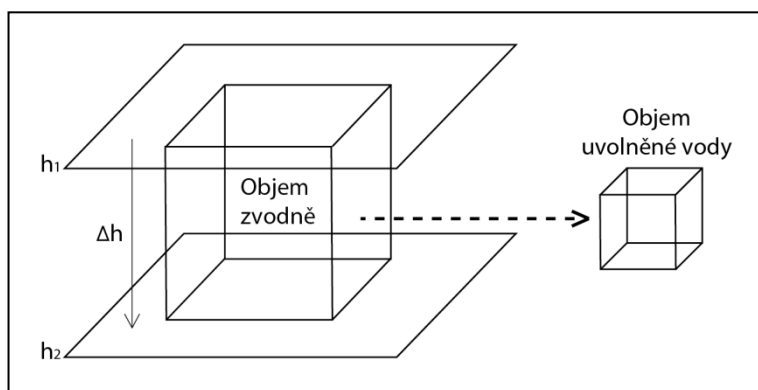
Mimo jiné lze propustnost vyjádřit i vzorcem, kde výslednou permeabilitu značíme jako $k_p [m^2]$. Tato hodnota vychází ze součinu konstanty $C [-]$, která zahrnuje vliv možných činitelů na proudění vody a průměrem zrn $d_{10}^2 [m]$, viz rovnice 4.3.4 (Freeze a Cherry 1979, Schön 2015).

$$k_p = C d_{10}^2 [-] \quad (4.3.4)$$

4.3.3 Storativita

Je vlastnost, typicky označována velkým písmenem S , která vyjadřuje schopnost zvodnělého prostředí pojmout nebo uvolnit daný objem vody. Pro zvodnělé prostředí s napjatou hladinou je využíván tzv. koeficient pružné storativity, který vyjadřuje množství vody, jež se uvolňuje z jednotkové plochy ($1 m^2$) napjaté zvodně o určité výšce (mocnosti) při jednotkovém poklesu hydrostatického tlaku.

V případě zvodně s volnou hladinou se jedná o tzv. koeficient volné storativity (Pech 2010). Stejně jako pórovitost je koeficient storativity vyjádřen bezrozměrně nebo procentuálně.



Obr. 5. Objem vody uvolněný z kolektoru po změně hydrostatického tlaku (Autor 2019).

Na obrázku 5 je znázorněna situace, kde koeficient storativity odpovídá objemu vody, která je uvolněna z jednotkové plochy zvodnělého prostředí o dané mocnosti při změně hydrostatického tlaku Δh (Thompson 1999).

Pro zjištění storativity S zvodnělého prostředí se také používá tzv. specifická storativita S_s , kde je storativita zvodnělého kolektoru přepočtena na standardní 1 m výšky vrstvy (mocnosti kolektoru) b , viz rovnice 4.3.5.

$$S = S_s b \quad [-] \quad (4.3.5)$$

Přičemž je specifická storativita S_s dána vztahem mezi hustotou kapaliny $\rho [kg/m^3]$, tíhovým zrychlením $g [m/s^2]$, stlačitelností zvodně $\alpha [Pa]$, pórovitostí nasyceného kolektoru n a stlačitelností kapaliny $\beta_v [Pa]$, jak je uvedeno v rovnici 4.3.6.

$$S_s = \rho g (\alpha + n \beta_v) \quad [-] \quad (4.3.6)$$

Voda je ze systému odváděna dvěma různými principy. Jednou z možností je zhutnění zvodnělého prostředí vlivem efektivního napětí, což se děje na základě stlačitelnosti vlastní zvodnělé vrstvy (viz podkapitola 3.3.6 Efektivní napětí). Druhou je pak rozpínavost kapaliny (vody), která je následkem její stlačitelnosti (Pech 2010).

4.3.4 Transmisivita

Transmisivita $T [m^2/s]$ (průtočnost) představuje schopnost zvodnělého prostředí propouštět vodu nebo jinou kapalinu. Pokud se jedná o homogenní (stejnorodé) prostředí, zjišťujeme jeho hodnotu transmisivity pomocí součinu koeficientu hydraulické vodivosti $K [m/s]$ a výšky (mocnosti) zvodnělé vrstvy $b [m]$, viz rovnice 4.3.7.

$$T = b \cdot K \quad [m^2/s] \quad (4.3.7)$$

4.3.5 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost je konstanta, která je využívána v Darcyho rovnici (viz podkapitola 4.4 Proudění podzemní vody). Tato konstanta (označována velkým písmenem "K") udává, jak dobře dokáže kapalina proudit skrz kolektor podzemní vody. Hodnotu hydraulické vodivosti můžeme určit v terénu pomocí dat z čerpací zkoušky (Thompson 1999).

Dále je možné koeficient hydraulické vodivosti $K [m/s]$ vypočítat, pokud známe propustnost daného prostředí, viz rovnice 4.3.8. Vynásobíme známou propustnost $K_p [m^2]$ s hustotou vody $\rho [kg/m^3]$ a tíhovým zrychlením $g [m/s^2]$ a podělíme dynamickou viskozitou $\mu [kg/m^3]$.

$$K = \frac{K_p \rho g}{\mu} \quad [m/d] \quad (4.3.8)$$

(Pech 2010)

Hydraulická vodivost je uváděna v jednotkách délky a času, například v metrech za den. U porušených skalních hornin je tento parametr je závislý zejména na hustotě poruch (puklin). Poruchy horninového prostředí jsou schopny koeficient zvýšit o několik řádů (Kruseman a De Ridder 2000).

4.3.6 Efektivní napětí

Každé pevné těleso je do určité míry stlačitelné. Tudíž se tento fakt může aplikovat i na těleso zvodně. Zvodnělé vrstvy jsou také stlačitelné, zejména se to projevuje u kolektorů s napjatou hladinou (Bear 1979).

Rozdíl mezi běžným pevným tělesem a zvodnělým prostředím je podíl pevných částic a pórů v kolektorech. Pokud totiž působí napětí na kolektor s volnou či napjatou hladinou, je možné částečně zmenšit objem několika způsoby:

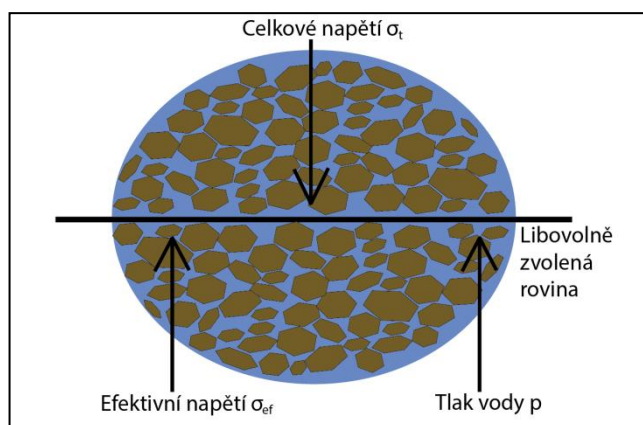
Tím, že - bude stačena voda v pórech kolektoru

- budou stlačena jednotlivá zrna (pevné částice) materiálu v kolektoru (téměř nestlačitelná)
- bude změněna pozice jednotlivých zrn tak, aby byla, vzhledem k ostatním částicím, v těsnější formaci - tím se zmenší pórovitost

Míra stlačení v případě první možnosti vyplývá ze stlačitelnosti kapaliny. Druhou variantu je možno zanedbat z důvodu prakticky nestlačitelných pevných částic (zrn) ve zvodnělém prostředí. Třetím způsobem stlačitelnosti zvodně je princip efektivního napětí (Pech 2010).

Efektivní napětí popisuje stav napínání mezi kapalnou a pevnou složkou zvodnělého kolektoru a vychází ze změn v celkovém napětí, které vychází z hmotnosti jednotlivých zrn kolektoru (váha zeminy) a tlaku vody v mezerách - pórech (Terzaghi 1923).

Příkladem je situace, kde předpokládáme libovolnou rovinu pro daný kolektor, a která se nachází v určité hloubce. Na zvolenou rovinu působí celkové napětí σ_t (součet tlaku způsobeného váhou zeminy a vody) směrem shora dolů. Tento tlak z části stlačuje pevné částice a vytváří napětí σ_{ef} mezi pevnými zrny prostředí. Zbytek pak působí na vodu v pórech prostředí. Tlak vody je značen p (viz Obr. 6).



Obr. 6. Efektivní napětí v kolektoru (Autor 2019).

Celkové napětí σ_t je tedy rovnovážné se součtem efektivního napětí σ_{ef} a tlaku vody p viz rovnice 4.3.9.

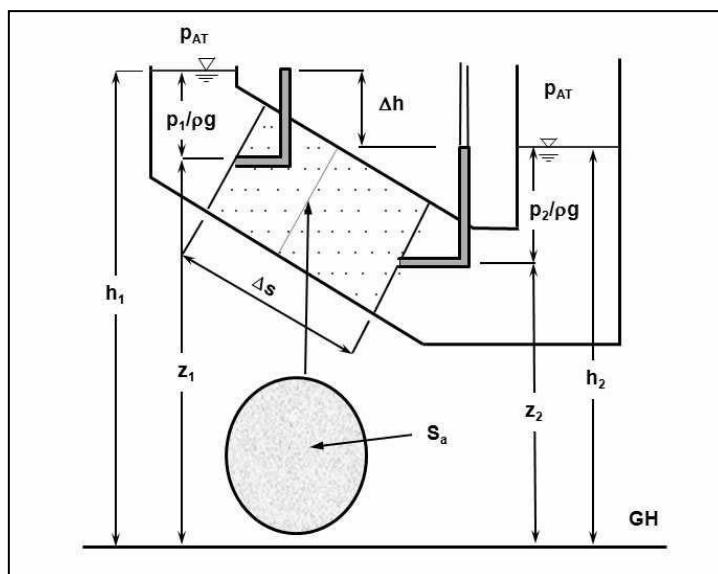
$$\sigma_t = \sigma_{ef} + p \quad (4.3.9)$$

Efektivním napětím je zde takové napětí, které původem nepochází z tlaku vodního sloupce. Je to tedy napětí, které je vyvíjeno na pevné částice (zrna) kolektoru. Z toho vyplývá, že za přemísťování pevných částic a z toho pramenící změny v objemu (stlačení zrn) zvodnělého prostředí jsou odpovědné právě změny efektivního napětí (Freeze a Cherry 1979).

4.4 Proudění podzemní vody

4.4.1 Darcyho zákon

Popisuje zákonitosti odporu při proudění vody v porézním prostředí – závislost průtoku a piezometrické výšky. Autorem tohoto experimentu je francouzský konstruktér Henry Darcy, který tento zákon popsal při sledování proudění vody ve válci naplněným pískem a o určeném průměru (viz obr. 7).



Obr. 7. Schéma Darcyho pokusu (převzato od Pecha 2010).

Zjistil, že je průtok Q [m^3/s] při rovnoměrném proudění skrz toto prostředí lineárně závislý na hydraulické vodivosti K [m/s] rozdílu v piezometrické hladině na počátku a konci průřezu $h_1 - h_2$ [m], ploše průřezu S_a [m], a vzdáleností mezi vstupním a výstupním průřezem Δs [m] (viz rovnice 4.4.1). Vstupní a výstupní průřez je chápán jako okraje pískové výplně válce (Pech 2010, Rybakov a Semenova 2017).

$$Q = K \cdot S_a \cdot \frac{h_1 - h_2}{\Delta s} \quad [m^3/s] \quad (4.4.1)$$

Darcyovská rychlost

Ze vztahu 4.4.1 je možné odvodit veličinu zvanou Darcyovská rychlost v [m/s], viz rovnice 4.4.2, která je pomyslnou hodnotou a která reprezentuje průtok vody v celé ploše průřezu. Tím jsou myšleny veškeré póry, kde se voda pohybuje, stejně tak i póry zavzdušněné nebo zaslepené, a kde se bere v úvahu i pevná složka porézního prostředí (zrna). Rovnice 4.4.2 popisuje řešení Darcyovské rychlosti, přičemž jsou používány stejné členy jako v rovnici 4.4.1 výše.

$$v = K \frac{\Delta h}{\Delta s} \quad [m/s] \quad (4.4.2)$$

Pro skutečnou rychlost vody v pórech daného prostředí v_{sk} je nutné získanou Darcyovskou rychlost podělit efektivní pórovitostí n_e viz rovnice 4.4.3.

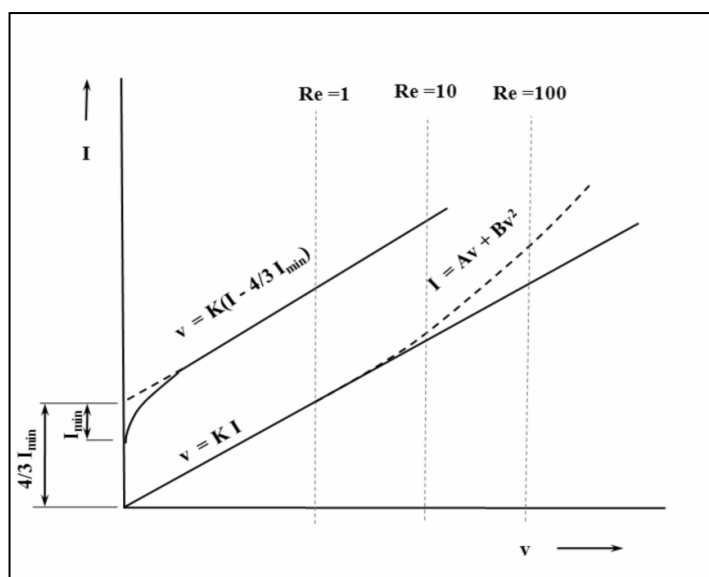
$$v_{sk} = \frac{v}{n_e} \quad [m/s] \quad (4.4.3)$$

Tato závislost je ale platná pouze za určitých podmínek. Tyto podmínky jsou známy v podobě pravidla, kterému se říká „meze platnosti Darcyho zákona“. Tyto meze znázorňují různé rychlosti filtrace a vyznačují stav, kdy není rychlost proudění dosažena, nebo je naopak překročena, a Darcyho rychlost neplatí. Stejně tak musí být dosažen minimální rozdíl v hydraulických výškách na začátku a konci válce (Todd a Mays 2005, Pech 2010).

Tyto meze rozdělují proudění vody na laminární a turbulentní. Přechod mezi těmito stavy určuje hodnota tzv. Reynoldsova čísla, které je bezrozměrné. Pokud Reynoldsovo číslo nabývá určité kritické hodnoty (od 1 do 10 - viz obr. 8), je možné s jistotou předpokládat, že Darcyho rychlost platí. Pokud je tato hodnota mezi 10 a 100, jedná se o přechodnou oblast, a pokud Reynoldsovo číslo nabývá hodnot vyšších než 100, je proudění turbulentní.

O. Reynolds stanovil hranice mezi turbulentním a laminárním prouděním pomocí experimentu, když do trysky, která byla ponořena do nádrže s kapalinou a zasunuta do skleněné trubice, pouštěl obarvenou vodu o různých rychlostech. Zjistil, že čím vyšší rychlostí proudí obarvená voda z trysky, tím nepravidelněji se částice vody pohybují (Todd a Mays 2005, Walton 2006).

Na platnost Darcyho zákona se v průlinovém prostředí lze spolehnout. K turbulentnímu proudění podzemních vod dochází vzácně, například pokud se jedná o horninové prostředí s většími puklinami nebo o krasové horniny, jako jsou vápence či dolomity (Pech 2010).



Obr. 8. Meze platnosti Darcyho zákona (převzato od Pecha 2010).

Reynoldsovo filtrační číslo (viz rovnice 4.4.4) se stanovuje pomocí rychlosti kapaliny v porézním prostředí v , dynamické viskozity μ a průměru zrn d_{10} , který se určuje tak, aby bylo alespoň 10 % z celkového množství zrn ve vzorku menších, než je hodnota d_{10} .

$$Re_f = \frac{\rho v d_{10}}{\mu} \quad [-] \quad (4.4.4)$$

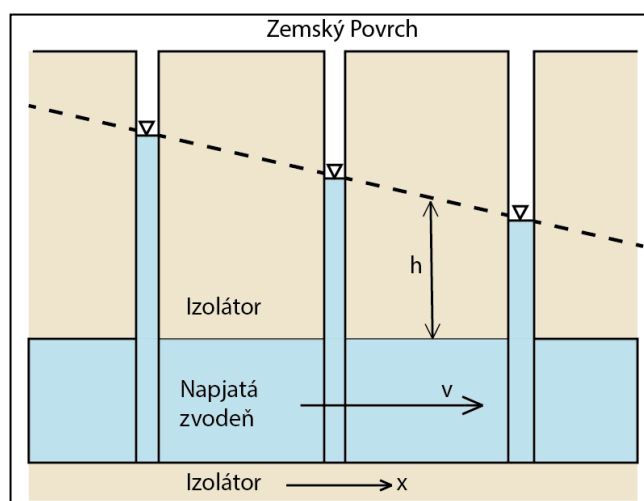
4.4.2 Ustálené proudění

Darcyho zákon a základní rovnice, které popisují pohyb podzemních vod, mohou být aplikovány do mnoha situací. Nejdůležitější z nich je proudění podzemní vody do studní. Koeficienty storativity a transmisivity jednotlivých zvodní mohou být zjištěny z jednotlivých čerpacích zkoušek. Pokud jsou tyto parametry známé, je možné vypočítat budoucí pokles HPV v oblasti studně, pokud bude docházet k pravidelnému odběru (Todd a Mays 2005).

Ustálené proudění je v čase neměnné. Podmínky toku jsou pro napjaté a volné zvodně rozdílné, proto je potřeba je jasně rozlišovat.

Ustálené proudění ve zvodni s napjatou hladinou

Pokud voda ve zvodni o jednotné mocnosti proudí určitou rychlostí v [m/s] v daném směru x [m], piezometrická výška h [m] klesá se vzdáleností lineárně ve směru proudění (viz obr. 9). Tuto skutečnost lze zjistit pomocí rovnice 4.4.5, kde K [m/s] značí hydraulickou vodivost. Pórová rychlost (půsak) v_{sk} [m/s] je pak vypočítána podílem rychlosti proudění v [m/s] a efektivní pórovitostí n_e [-] (Todd a Mays 2005).



Obr. 9. Rovnoměrné proudění v napjaté zvodni (Autor 2019).

$$h = - \frac{v x}{K} \quad [m] \quad (4.4.5)$$

Ustálené proudění ve zvodni s volnou hladinou

Podobná situace vyvstává při řešení proudění ve zvodních s napjatou hladinou. Vzhledem k tomu, že přímé řešení pomocí rovnice 4.4.3 není možné, musí se pracovat s jiným řešením. Problém spočívá ve tvaru HPV, který je v případě zvodně s volnou hladinou zakřivený. Tvar HPV určuje distribuci proudění, ale ve stejný moment distribuce proudění ovlivňuje tvar HPV (Todd a Mays 2005, Pech 2010).

Řešením jsou tzv. Dupuitovy předpoklady, které pracují s podmínkou, že je hydraulický gradient proudění totožný se sklonem (tvarem) HPV a že je proudění horizontální a stejnoměrné v celém řešeném profilu. Toto řešení je možné tehdy, pokud je sklon HPV malý (asi 1/10). V tomto ustanovení mohou být proudnice chápány jako vodorovné a na ně kolmé ekvipotenciály jako vertikální. Ekvipotenciály (čáry konstantního tlaku) jsou vždy kolmé na proudnice, které představují znázornění proudění v daném prostředí (Pech 2017).

4.4.3 Ustálené radiální proudění k vrtu

Před tím, než se začne odebírat voda ze studně (jímacího vrtu), je voda udržována na určité úrovni. Buď je to piezometrická výška (v případě napjaté zvodně), nebo hladina podzemní vody (v případě volné zvodně). Jakmile se ale začne voda odebírat, tato výška, respektive hladina se začne snižovat. Tento jev se nazývá depresní křivka nebo depresní kužel (pokud se zabýváme prouděním trojrozměrně).

Velikost deprese je dána objemem čerpané vody a frekvencí čerpání, přičemž se tato deprese směrem od čerpaného vrtu snižuje a nabývá původní úrovně. V těchto místech je pak definován limit depresního kužele, tedy limit dosahu vlivu jímacího vrtu (Todd a Mays 2005, Pech 2010).

Kolektor s napjatou hladinou

Pro odvození rovnice ustáleného proudění k vrtu pro napjatou zvodně je předpokládáno proudění vody ke studni, která dosahuje na celou mocnost kolektoru v homogenním a izotropním prostředí. Proudění je tedy stejnoměrné a horizontální, tudíž lze bezchybně využít Dupuitových předpokladů.

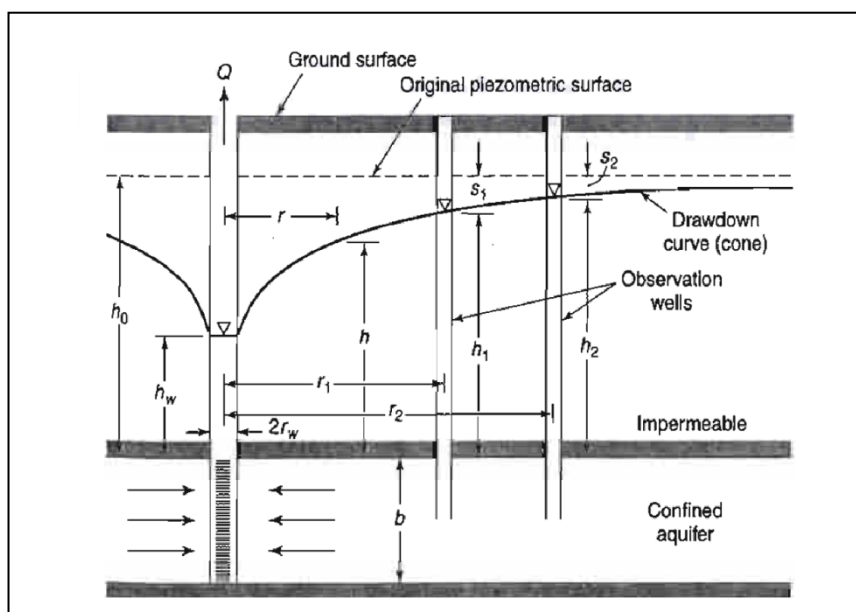
Pokud použijeme střed vrtu jako výchozí bod, můžeme, při určité vzdálenosti r [m], určit množství čerpané vody Q [m^3/s]. Pomocí hodnot hydraulické vodivosti K [m/s], mocnosti zvodně b [m] a nastavením okrajových podmínek pro hranice vlivu depresního kuželu $h = h_0$ a $r = r_0$ a studny $h = h_w$ a $r = r_w$ získáme rovnici 4.4.6.

$$Q = 2 \pi K b \frac{h_0 - h_w}{\ln\left(\frac{r_0}{r_w}\right)} \quad [m^3/s] \quad (4.4.6)$$

Pokud chceme zjistit hodnotu transmisivity či hydraulické vodivosti dané zvodně, je nutné využít rovnici 4.4.7, kde h_1 a h_2 jsou hladiny vody ve dvou pozorovacích vrtech (pro praktické využití se ale řeší spíše snížení s_1 a s_2 , viz rovnice 4.4.8) a r_1 a r_2 jsou jejich vzdálenosti od osy hlavního vrtu (viz obr. 10).

$$T = K b = \frac{Q}{2 \pi (h_2 - h_1)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad [m^2/s] \quad (4.4.7)$$

$$T = \frac{Q}{2 \pi (s_2 - s_1)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad [m^2/s] \quad (4.4.8)$$



Obr. 10. Rovnoměrné radiální proudění k vrtu (převzato od Todda a Mayse 2005).

Kolektor s volnou hladinou

U tohoto typu zvodně je možno situaci řešit aplikací Dupuitových předpokladů. Pokud budeme pracovat s úrovní hladiny a vzdáleností dvou kontrolních vrtů od hlavního, bude platit rovnice 4.4.9, kterou vyřešíme množství čerpané vody.

$$Q = \pi K \frac{h_2^2 - h_1^2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [m^3/s] \quad (4.4.9)$$

Upravením rovnice 4.4.9 získáme možnost výpočtu hydraulické vodivosti dané zvodně, viz rovnice 4.4.10.

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad [m/s] \quad (4.4.10)$$

Pokud je snížení hladiny vzhledem k mocnosti saturované zvodně méně významné, Transmisivita zvodně může být dále odhadnuta na základě rovnice 4.4.10 jako:

$$T \cong K \frac{h_1 + h_2}{2} \quad [m^2/s] \quad (4.4.11)$$

V opačném případě, pokud je snížení při čerpání ve vrtu výrazné, využijeme rovnici 4.4.12a. Členy h_1 a h_2 z rovnice 4.4.10 jsou zde nahrazeny tvary $(h_0 - s_1)$ a $(h_0 - s_2)$. Tím dostáváme hodnotu transmisivity pro celou saturovanou mocnost zvodně (Todd a Mays 2005).

$$T = kh_0 = \frac{Q}{2\pi\left[\left(s_1 - \frac{s_1^2}{2h_0}\right) - \left(s_2 - \frac{s_2^2}{2h_0}\right)\right]} \ln\frac{r_2}{r_1} \quad [m^2/s] \quad (4.4.12a)$$

4.4.4 Neustálené radiální proudění k vrtu

Ideální vrt

Pro řešení neustáleného proudění k ideálnímu vrtu pracujeme s jednotným prouděním vody v horizontálním směru k danému vrtu. Toto proudění postupuje zvodněným kolektorem s napjatou hladinou. Mocnost tohoto kolektoru je předpokládána konstantní.

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + r \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{s \partial s}{T \partial t} \quad (4.4.12b)$$

Řídící podmínky, které povolují řešení rovnice 4.4.12b jsou (Theis 1935):

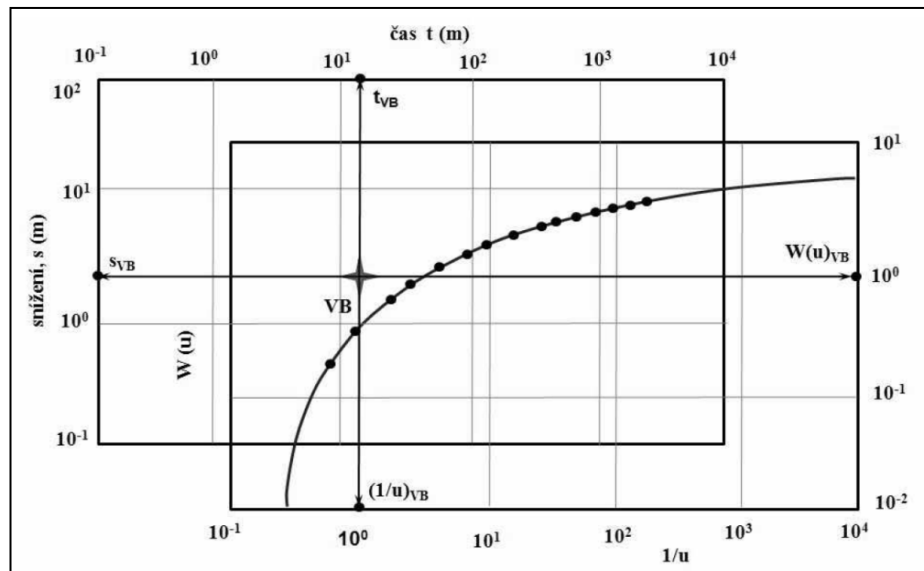
- Mocnost zvodnělé oblasti je konstantní (pro celé řešené území)
- Je počítáno s nestlačitelnou kapalinou
- Kolektor je izotropní a homogenní
- Velikost transmisivity a storativity je při realizaci čerpací zkoušky stále stejná
- Jedná se o ideální vrt

- Z vrtu je čerpáno konstantní množství vody
- V kolektoru platí Darcyho zákon

Theisova metoda typové křivky

Tato metoda může být použita pro určení transmisivity a storativity z čerpacích zkoušek. Jedná se o zkoušky za neustáleného proudění, přičemž je rychlost čerpání konstantní a známe zbylé hodnoty.

Tyto hodnoty získáme tak, že získané hodnoty z čerpací zkoušky vykreslíme do grafu v log-log měřítku (logaritmované hodnoty na obou osách). Tuto křivku s naměřenými hodnotami porovnáme s grafem Theisovy křivky a přiložíme je na sebe tak, aby se křivky obou grafů překrývaly. Poté se zvolí libovolný vztážný bod (VB) (viz obr. 11).



Obr. 11. Meze platnosti Darcyho zákona (převzato od Pecha 2010).

Pomocí Theisova řešení tak po vynesení vodorovné spojnice (hodnoty $W(u)_{VB}$ a s_{VB}) získáme potřebné hodnoty pro výpočet transmisivity (viz rovnice 4.4.13).

$$T = \frac{Q}{4 \pi s_{VB}} W(u)_{VB} \quad [m^2 / s] \quad (4.4.13)$$

Při řešení transmisivity je dále využívána tzv. Theisova studňová funkce $W(u)$, která je vyjádřena jako:

$$W(u) = -0,577216 - \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^n}{n!n} \quad n = 1,2,3 \dots \quad (4.4.14)$$

Na bezrozměrnou hodnotu u ve studňové funkci byla aplikována teorie podobnosti, čímž pro u vzniká rovnice 4.4.15, jejíž členy jsou storativita S [-], radiální vzdálenost r [-], koeficient transmisivity T [m^2/s] a čas t [s] (Švec, Hálek 1979).

$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad [-] \quad (4.4.15)$$

Přičemž má Theisova základní rovnice pro velikost snížení ve vrtu podobu rovnice (viz rovnice 4.4.16)

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} W(u) \quad [m] \quad (4.4.16)$$

Vytvořením svislé spojnice (hodnoty $(1/u)_{VB}$ a t_{VB}) získáme potřebné hodnoty pro výpočet storativity (viz rovnice 4.4.17).

$$S = \frac{4 T u_{VB} t_{VB}}{r^2} \quad [-] \quad (4.4.17)$$

Jacobova semilogaritmická metoda přímky

Pokud výše zmíněné hodnoty $1/u$ nabývají hodnot větších než 100 a zároveň mají chybu menší než 0,25 %, je možné zjednodušit Theisovu studňovou funkci $W(u)$ tak, že ponecháme pouze první dva členy, viz rovnice 4.4.18.

$$W(u) \cong -0,577216 - \ln u \quad (4.4.18)$$

Toto řešení je tzv. semilogaritmická aproximace studňové funkce (Jacob 1947).

Využitím argumentu u Theisovy studňové funkce (viz rovnice 4.4.15) a Theisovy základní rovnice pro velikost snížení ve vrtu (viz rovnice 4.4.16) získáme nový tvar pro velikost snížení 4.4.19.

$$s = \frac{Q}{4 \pi T} \ln \frac{2,246 T t}{r^2 S} \quad [m] \quad (4.4.19)$$

Pokud je třeba zjistit snížení pro jakoukoli vzdálenost pro daný čas, pozměníme přirozený logaritmus na dekadický (viz rovnice 4.4.20).

$$s = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,246 T t}{r^2 S} \quad [m] \quad (4.4.20)$$

Tuto rovnici lze dále pozměnit na následující tvar:

$$s = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,246 T}{S} + \log \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{t}{r^2} \quad [m] \quad (4.4.21)$$

Z celého odvození nám vyplývá skutečnost, že pokud bude graficky znázorněna křivka čerpací zkoušky, bude poté postupně přetvořena do přímky, přičemž křivka tohoto efektu nabývá až od určitého časového úseku (viz obr. 12).

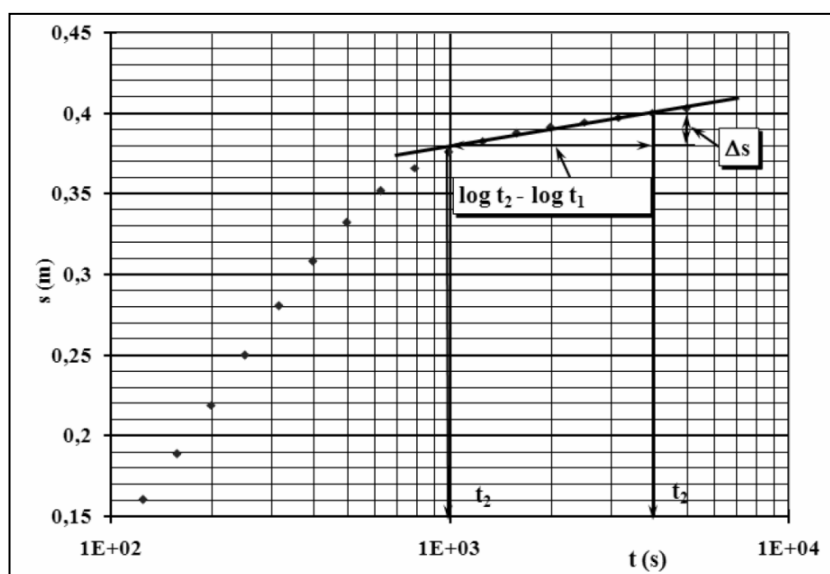
Samotná transformace je vyjádřena rovnicí 4.4.22.

$$i = (s_2 - s_1) / (\log t_2 - \log t_1) \quad (4.4.22)$$

Z rovnic 4.4.21 a 4.4.22 určíme hodnotu transmisivity prostředí.

$$T = 0,183 \frac{Q}{i} \quad [m^2/s] \quad (4.4.23)$$

(Pech 1988)

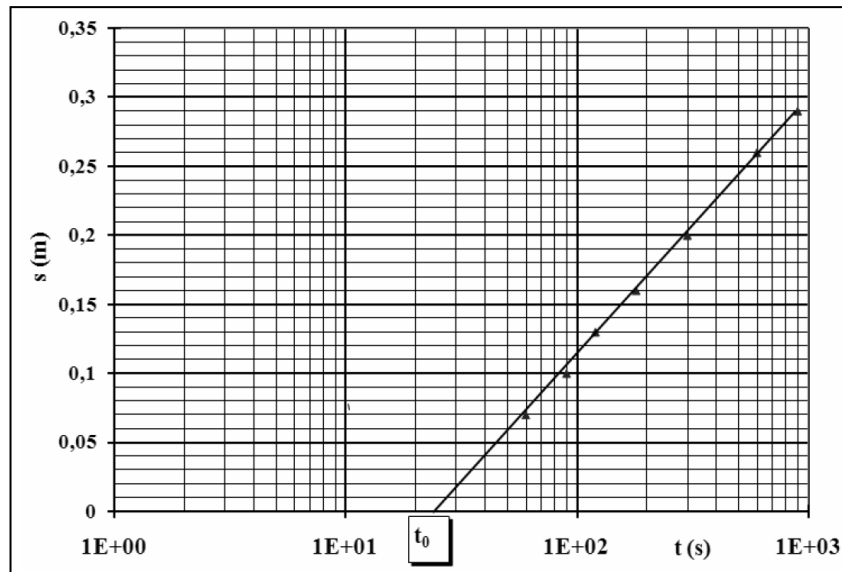


Obr. 12. Graf čerpací zkoušky s transformací do přímky (převzato od Pecha 2010).

Pokud máme dostupná data nejméně z jednoho pozorovacího vrtu, můžeme stanovit hodnotu storativity daného prostředí. Storativitu určíme pomocí rovnice 4.4.23, kdy použijeme $t_0 [s]$ jako čas, kdy se extrapolovaná přímka protнула s osou $\log t [s]$.

$$S = 2,246 \frac{T t_0}{r^2} \quad [-] \quad (4.4.24)$$

(Cooper a Jacob 1946, Todd a Mays 2005, Pech 2010)



Obr. 12. Graf snížení v pozorovacím vrtu s vynesným t_0 (převzato od Pecha 2010).

4.4.5 Dodatečné odpory

Při řešení reálného vrtu je důležité brát v úvahu odpor zvodnělého kolektoru, do kterého je studna realizována. Tento odpor zahrnuje celou řadu aspektů, které se souhrnně nazývají dodatečné odpory. Vliv těchto jevů má za následek odchylky měřených údajů o snížení vody ve vrtu, které nekorespondují s teoretickými předpoklady založenými na situaci u tzv. ideálního vrtu (takový vrt, kde se vliv dodatečných odporů neuvažuje). Efektem dodatečných odporů je pak snížení hladiny v odběrovém vrtu větší než snížení, které bylo vypočítané s předpokladem, že se jedná o ideální vrt (Pech 1987,2010).

Určité typy dodatečných odporů vznikají vlivem stárí a užívání studně, nedokonalostí technického postupu či využitím nevhodného typu technologie při realizaci vrtu. Příkladem může být snížení propustnosti v těsném okolí vrtu vlivem zhutnění (nárazové vrtání). Správné určení velikosti dodatečných odporů vody v reálném vrtu je zásadní pro správné určení storativity z měřených hodnot snížení hladiny získané z daného vrtu při nestacionárním proudění nebo koeficientu filtrace při stacionárním proudění (Wattenbarger a Ramey 1970).

Určitý díl snížení, který způsobuje vliv dodatečných odporů je možno rozdělit na několik následujících kategorií.

Jedním z prvních složek dodatečných odporů je tzv. Kolmatace vrtu s_K , která se projevuje zanášením prostor mezi zrn v blízkosti vrtu. Celková schopnost

prostředí propouštět vodu je zde snížena, nebo je poškozena přirozená struktura tohoto prostředí.

V závislosti na způsobu realizace vrtu může být původcem tohoto efektu například průnik výplachové tekutiny do okolního prostředí (rotační vrtání) nebo hutnění materiálů (a tím i zmenšení prostoru mezi zrny v blízkosti vrtu) vlivem metody nárazového vrtání.

Dalším efektem pro dodatečné odpory je zmenšení aktivního průřezu stěny vrtu s_F . Tímto efektem rozumíme situaci, kdy je stěna vrtu (která do studny propouští vodu) zpevněna pažnicí s otvory pro vtok vody nebo je opatřena filtrem. Tato opatření v určité míře snižují průtok vody do vrtu.

Neúplný průnik s_P je třetí z efektů, který je způsoben tím, že naražený zvodnělý kolektor není navrtán v celé své mocnosti. V případě, že je studna realizována navrtáním zvodně, aniž by pronikla až na spodní izolační vrstvu, nazývá se neúplným vrtem.

Jiným efektem je takzvané ucpávání s_I , které se projevuje vlivem hromadění horninového nebo obsypového materiálu v mezerách filtru. Možným projevem je také takzvaná chemická inkrustace nebo usazování různých bakterií a mikroorganismů, které se v otvorech filtru usazují.

Tření s_T , je efekt, který pramení z pohybu vody vrtem a kde se projevuje vnitřní tření kapaliny nebo samotné tření vody o stěny vyvrtané studny. Tímto efektem jsou myšleny také dodatečné odpory, které jsou vyvolány turbulentním prouděním ve vrtu.

Na snížení hladiny vody ve vrtu má podíl také turbulentní režim proudění s_{TP} , který představuje proudění v kolektoru, především pak v blízkosti čerpaného vrtu.

Další druhy dodatečných odporů s_O , je poslední kategorie, která představuje souhrn vlivů, které se mohou vyskytnout, ale nejsou zařazeny do kategorií zmíněných výše (Pech 2010).

Když se tato snížení shrnou dohromady, dostaneme celkové snížení hladiny vody ve vrtu vlivem dodatečných odporů s_w , viz rovnice 4.4.25.

$$s_w = s_K + s_F + s_P + s_I + s_T + s_{TP} + s_O \quad [m] \quad (4.4.25)$$

Vzhledem ke složitému postupu při identifikaci specifických druhů dodatečných odporů, je k jejich popisu možné využít tzv. sumární bezrozměrný koeficient dodatečných odporů W [-].

V návaznosti na snížení, definovaného podle Jacobovy semilogaritmické metody přímkou (viz rovnice 4.4.19), můžeme koeficient dodatečných odporů W zahrnout do rovnice 4.4.26.

$$s_v = \frac{2\pi T s_v}{Q} \left(\ln \frac{2,246 T t}{r_v^2 S} + 2W \right) \quad [m] \quad (4.4.26)$$

Kde je $s_v [m]$ dodatečné snížení, $T [m^2/s]$ transmisivita, $S [-]$ storativita a $r_v [m]$ je poloměr vrtu.

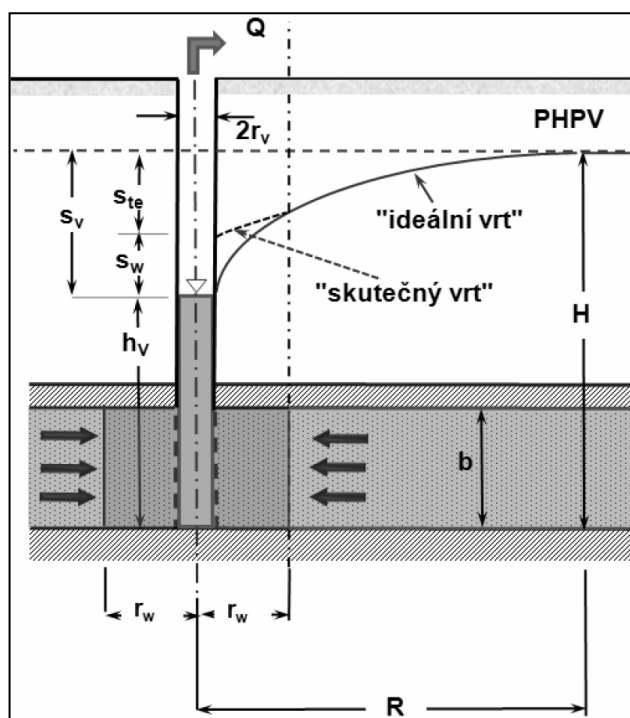
Samotný koeficient dodatečných odporů W poté vyjádříme v rovnici 4.4.27, kde vycházíme z rovnice 4.4.26 výše.

$$W = \frac{2\pi T s_v}{Q} - \frac{1}{2} \left(\ln t + \ln \frac{T}{r_v^2 S} + 0,8091 \right) \quad [m] \quad (4.4.27)$$

V závislosti na čerpaném množství $Q [m^3/s]$ můžeme efekt dodatečných odporů na jímací vrt a bezprostřední okolí definovat tvarem 4.4.28 pro dodatečné snížení s_w .

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} W \quad [m] \quad (4.4.28)$$

(Pasandi a kol. 2008, Pech 2010)



Obr. 13. Efekt dodatečných odporů na snížení ve vrtu (převzato od Pecha 2010).

Obrázek 13 výše znázorňuje vliv dodatečných odporů na snížení v daném vrtu, kde je vyznačeno také předpokládané snížení na vrtu bez dodatečných odporů s_{te} [m], tzv. ideální vrt (Agarwal R. G. a kol. 1970).

4.4.6 Regenerace vrtu

Kvůli zvyšující se ceně realizací studní je dnes regenerace jímacích vrtů poměrně zásadní pojem, který má velký vliv na dnešní uživatele.

Aby mohl jímací vrt sloužit k odběru vody v požadovaném množství, i po delší době, je nutné provádět údržbu. Neudrží-li se studna v kvalitním stavu, její produktivita klesá až do chvíle, kdy je v některých případech nutná její kompletní obnova. Jednou z příčin může být stáří vrtu, jak v průběhu času proudí voda do vrtu, jednotlivé součásti systému studně jsou postupně zanášeny, korodovány nebo přestanou pracovat. Jiným případem snižování životnosti vrtu může být i nesprávné navržení (Soulsby 2010).

Jímací vrt by se měly pravidelně udržovat, aby nedošlo k situaci, kdy již není možné studnu plně obnovit ani těmi nejtěžšími zásahy. Téměř havarijní situace nastává v případě, kdy specifická vydatnost studně klesne o více než 15 - 20 % své původní hodnoty (Butt 2017).

Obecný proces regenerace jímacího vrtu je rozdělen do několika fází. Nejprve je důležité určit, o jaký typ studně se jedná, z důvodu zvolení odpovídajícího postupu. Následujícím krokem je inspekce vrtu pomocí kamerového systému. Poté se naruší veškeré usazeniny a povlaky na stěnách a pomocí vzduchu, kdy se voda s rozbitým materiálem vynese na povrch. Pak následuje dezinfikování (sterilizace) celého vrtu pomocí chemických dezinfekčních prostředků přidaných do vody ve vrtu. Posledním krokem je čerpací zkouška, která ověří úspěšnost provedené regenerace a poslouží i jako materiál k možným budoucím zkouškám efektivity studně.

Samotné odstranění usazenin nebo povlaků je vykonáváno různými technikami. Lze postupovat chemickou cestou nebo zvolit řešení mechanického rázu (Soulsby 2010).

Chemické metody se používají spíše v případě, že se ve vrtu nachází čerpadlo, jež brání volnému přístupu ke spodní části vrtu. Využívá se typicky chlor, povrchově aktivní činidla nebo kyseliny. Účinnost těchto látek a jejich kombinací je závislá na jejich koncentraci, distribuci i na korektní volbě a namíchání směsi. Pokud

je postup chemickou cestou vhodný, může být studna obnovena až na 80 - 90 % svého původního stavu.

Mechanické metody jsou velmi účinné, když je odstraněno čerpací zařízení regenerované studně. Dojde-li k zahájení mechanické metody regenerace ve stabilním vrtu, kde jsou stěny vrtu stabilní, používají se drátěné kartáče různých typů, které postupně obrousí stěny vrtu (Butt 2017). Tato metoda se však stává nevyhovující v případech, kdy by mohla stěny studně poškodit.

Dalším způsobem může být čištění za pomoci vodního tlaku nebo dávkami stlačeného vzduchu (tlakový ráz). Tyto metody mohou být volně kombinovány v závislosti na situaci daného jímacího vrtu (Soulsby 2010).

Pokud je studna poškozená do takové míry, že není možné využít žádnou ze stávajících metod, je nutné provést částečnou nebo úplnou obnovu. V tomto případě jsou znehodnocené části studně nahrazeny novými, které mají menší průměr. Pokud je to možné, měly by se zničené části studně odstranit a nahradit kvalitnějšími materiály.

4.4.7 Čerpací zkoušky

Hydrodynamické zkoušky slouží k určení jednotlivých vlastností zvodněného prostředí, do kterého je předmětný jímací objekt zasazen. Provádění hydrodynamických zkoušek je zásadní při stanovení vydatnosti jímacího vrtu, fyzikálních parametrech a hydrogeologických vlastností horninového prostředí kolektoru a jeho celkové vhodnosti vzhledem k budoucímu využití (Jetel 1982).

Ačkoli je těchto zkoušek celá řada, pro účely práce je potřebné uvést pouze dva druhy, které jsou stěžejní.

Čerpacími zkouškami zjišťujeme stav daného jímacího vrtu a za pomoci různých metod je následně možné určit jeho schopnost poskytovat vodu odběratelům (Kříž 1983).

Čerpáním konstantního nebo proměnlivého objemu vody zaznamenáváme postupné snižování vody ve vrtu. Mimo to je zjišťována teplota vody a také se odebírají vzorky pro přesné ověření kvality vody pomocí laboratorního testování. Čerpací zkoušky mohou být prováděny jak za ustáleného tak i neustáleného režimu proudění podzemní vody.

Při ustáleném režimu proudění je postupně čerpáno stále stejné množství vody a zjišťujeme, za jakou dobu je dosaženo rovnováhy mezi čerpaným a přítékajícím množstvím vody do odběrového vrtu.

Za neustáleného režimu proudění řešíme změnu ve snížení hladiny vody ve vrtu v závislosti na čase, přičemž zachováváme objem čerpané vody.

Výstupem čerpacích zkoušek pak jsou stanovení hydraulických parametrů daného kolektoru, vydatnost studny nebo také zhodnocení jakosti vody (Jetel 1982, Kříž 1983)

Určujícím údajem výsledků čerpací zkoušky jsou transmisivita (viz rovnice 4.4.23) a storativita (viz rovnice 4.4.24) zvodnělého prostředí (Jacob 1947), vydatnost jímacího vrtu q [m^3/s] (viz rovnice 4.4.29) a hodnota snížení hladiny v řešeném objektu.

$$q = \frac{Q}{s} \quad [m^3/s] \quad (4.4.29)$$

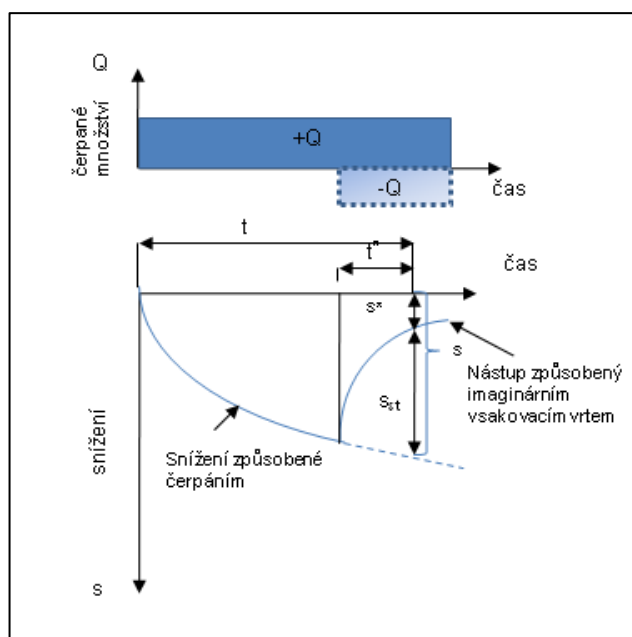
(Pech 2010)

4.4.8 Stoupací zkoušky

Přírozným pokračováním čerpací zkoušky je zkouška stoupací. V momentě, kdy je ukončeno čerpání testovaného vrtu, začne se hladina vody ve vrtu opět zvyšovat. Tento jev je označován jako zbytkové snížení (De Ridder)

Pokud je měření vykonáváno zároveň také v blízkých pozorovacích vrtech, je možné využít metodu superpozice, která spočívá ve vzájemném vztahu mezi snížením hladiny při čerpání a jejímu opětovnému stoupání po přerušení čerpání. V podstatě to znamená stav, kdy čerpáme určitý objem vody v daném časovém rozmezí. Po zastavení čerpání pak snížení odpovídá úrovni, na které by bylo, kdyby čerpání dále pokračovalo, ale zároveň docházelo k dotaci studny tím samým objemem vody. Jinými slovy je možné tvrdit, že se hladina vrací do stavu, v jakém byla před zahájením zkoušky (Theis 1935).

Pokud pro napodobení přítoku vody při stoupací zkoušce použijeme tzv. imaginární vsakovací vrt, využijeme pro vsakování objem stejné množství vody jako při čerpání, ale se zápornými hodnotami (Charbeneau 2006).



Obr. 14. Stav snížení během stoupací zkoušky (převzato od Pecha 2010).

Poté lze definovat zbytkové snížení pomocí Theisovy rovnice viz 4.4.30 jako výsledné snížení ve vrtu v průběhu stoupací zkoušky $s^* [m]$, které je dáno součtem snížení z „pokračující čerpací zkoušky $s [m]$ “ a zvýšení hladiny vody ve vrtu v při čerpací zkoušce $s_{st} [m]$.

$$s^* = s + s_{st} \quad [m] \quad (4.4.30)$$

(Kresic 2006)

Pokud budeme řešit snížení ve vrtu při stoupací zkoušce, kde je parametr Theisovy studňové funkce u menší než 0,05, můžeme zjednodušit Theisovu rovnici pro výpočet velikosti snížení 4.4.16 na rovnici 4.4.31 níže.

$$s^* = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{t}{t^*} \right) \quad [m] \quad (4.4.31)$$

V rovnici výše představuje člen $t^* [s]$, čas, který je naměřený od chvíle, kdy bylo čerpání přerušeno. Hodnota $t [s]$ pak reprezentuje čas, který je naměřen od začátku čerpání. S využitím dekadického logaritmu pak získáme rovnici 4.4.32.

$$s^* = \frac{2,203Q}{4\pi T} \left(\log \frac{t}{t^*} \right) \quad [m] \quad (4.4.32)$$

(Pech 2010)

5 VYHODNOCENÍ DODATEČNÝCH ODPORŮ PŘED A PO REGENERACI JÍMACÍCH VRTŮ

Předmětem této diplomové práce je zhodnocení vlivu dodatečných odporů na snížení hladiny ve dvou vybraných jímacích vrtech (vrty B-3 a B-6) při čerpací a následné stoupací zkoušce. Dále jsou zde tyto efekty porovnány za stavu, kde u řešených vrtů nebyla provedena regenerace, vůči jejich situaci po regeneraci.

Data, která tvoří základ práce, byla získána ze zahraničního projektu společnosti Vodní zdroje a. s., s názvem "Zavedení udržitelného systému zásobování pitnou vodou municipality Bela Crkva". Tento projekt byl zahájen roku 2015 a je součástí zahraniční rozvojové pomoci České republiky.

Cílem je vytvoření spolehlivého systému pro zásobování této oblasti pitnou vodou, spolu s rekonstrukcí, revitalizací a realizací příslušné infrastruktury.

5.1 Charakteristika lokality

Předmětné území (Bela Crkva), potažmo obec Straža, se nachází v severovýchodní části Srbska, v autonomní oblasti Vojvodina (viz příloha č. 1). Bela Crkva je situována v jihovýchodním cípu regionu Jižní Banát, blízko hranice s Rumunskou republikou, asi 90 km východně od hlavního města Srbska, Bělehradu.

Oblast Vojvodina je oproti zbytku Srbska výrazně nížinného charakteru s rozlehlými plošinami, méně pestrým a rovinným až mírně kopcovitým terénem.

Město Bela Crkva je položena do mírně členitějšího terénu, v průměrné výšce 90 m n. m. Oblast leží v Belocrkvanské kotlině, v údolí toků Nera (z jihu) a Karaš (ze severu). Na okraji údolí řeky Karaš se nachází obec Straža (asi 20 km severozápadně od Bela Crkva), kde jsou realizovány řešené vrty (viz příloha č. 2).

Místní půda je velmi úrodná a oblast je poměrně hustě osídlena. Podle posledních informací v oblasti žije přibližně 17 500 obyvatel.

Oblast je zásobována zejména pramenitou vodou, která pochází z okolí obce Straža. Odsud je voda vedena do vodojemu, ze kterého jsou zásobována téměř všechna okolní sídla.

Lokalita Straža je situována na okraji údolí řeky Karaš, která tvoří jižní a jihovýchodní hranici obce. Ze západu je Straža ohraničena umělým kanálem (Dunaj-Tisa-Dunaj). Severní část přechází v rovinné území, zejména využívané pro zemědělskou činnost (Vodní zdroje a.s., 2015).

5.2 Geologie oblasti

Vzhledem k mapovému vyobrazení geologické situace je patrné, že je obec Straža položena v oblasti zejména sedimentárních hornin. Svrchní část horninového prostředí tvoří kvartérní, nezpevněné sedimenty charakteru především eolických zemin, v blízkosti vodních toků pak fluviálních či aluviálních a smíšených sedimentů, které jsou reprezentovány především hlinito-jílovitými až jílovito-hlinitými zeminami a v okolí vodních toků pak hlinito-písčitémi až písčitémi a štěrkovitými zeminami (viz obr 15).

V podložní kvartérních sedimentů se objevují zpevněné sedimenty, které jsou reprezentovány zejména pískovci, jílovci a prachovci třetihorního stáří. Hluběji se pak objevují paleozoické metamorfované a magmatické horniny horniny, podle geologické mapy z období devonu (Petránek 1993).



Obr. 15. Kvartérní sedimenty v okolí obce Straža (převzato od Blagojeviće 2009).

Při průzkumných pracích na řešených vrtech B-3 a B-6 byla provedena geologická dokumentace až do hloubky 120,00 m (celá hloubka vrtu) pod povrchem terénu (viz přílohy 3a a 3b). Geologický popis horninového prostředí je součástí Hydrogeologické dokumentace vrtů B-3 a B-6, provedené českou společností Vodní Zdroje a.s..

V obou dvou vrtech byly zastiženy poměrně homogenní zeminy, charakteru hlín, hlinitých písků, písků a jílovitých písků, přičemž ve vrtu B-6 byly dokumentovány také zeminy štěrkovité až písčito-štěrkovité.

Zeminy dokumentovány ve vrtu B-3

Hloubka (m)	Popis
0,00 - 40,00	Hlína
40,00 - 53,00	Písek hlinitý
53,00 - 57,50	Písek hlinitý se štěrkovitou příměsí
57,50 - 60,50	Písek jemně zrnitý
60,50 - 79,00	Písek jílovitý
79,00 - 110,50	Písek dobře zrněný
110,50 - 120,00	Hlína

Zeminy dokumentovány ve vrtu B-6

Hloubka (m)	Popis
0,00 - 48,00	Hlína
48,00 - 58,00	Štěrk písčitý
58,00 - 80,00	Písek hlinitý se štěrkovitou příměsí
80,00 - 93,00	Písek jemně zrnitý
93,00 - 98,00	Písek jílovitý
98,00 - 110,50	Písek dobře zrněný
110,00 - 120,00	Hlína

5.3 Výsledky

V této podkapitole jsou uvedeny výpočty a výsledná stanoviska pro vybrané jímací vrty B - 3 a B - 6.

Samotná data, která byla poskytnuta pro vypracování této práce, byla shromážděna v programu Microsoft Office Excel, ve kterém je řešeno i celé vyhodnocení.

Vyhodnocování veškerých potřebných dat bylo prováděno pomocí rovnic Jacobovy semilogaritmické metody přímkou.

Vzhledem ke stavu dat, je již známa hodnota storativity zvodně $S [-]$, která je potřebná pro další postup, a není tedy nutné ji vypočítávat. Další dostupné hodnoty jsou množství čerpané vody $Q [l/s]$, poloměr řešeného vrtu $r_v [mm]$, jednotlivé časy pro různý stav snížení $t [s]$ a stav tohoto snížení $s [m]$ po dobu trvání čerpání a po jeho zastavení v průběhu stoupací zkoušky.

Předmětem práce pak bylo z dostupných údajů stanovit koeficient dodatečných odporů v jímacím vrtu $W [-]$, dodatečné snížení hladiny vody ve vrtu $s_w [m]$ a specifickou vydatnost vrtu $q [m^3/s ; l/s]$.

Stejný postup byl proveden pro oba vrty za stavu před jejich regenerací a za stavu po jejím provedení. Následně byly tyto výsledky vzájemně porovnány.

5.3.1 Vrt B - 3

Podle informací z terénního průzkumu vrtu B - 3, poskytnutých společností Vodní zdroje a. s., je patrné, že jsou vnitřní stěny zasaženy vcelku nízkým stupněm kolmatace. Otvory v perforované části studně jsou viditelné a filtry čisté. Menší měrou jsou viditelné železité povlaky ve spodní části filtračního systému (je předpokládáno, že vlivem činnosti bakterií). Podle správce místní vodovodní sítě byl tento vrt již regenerován, přibližně v roce 2010 (Vodní zdroje a.s., 2015).

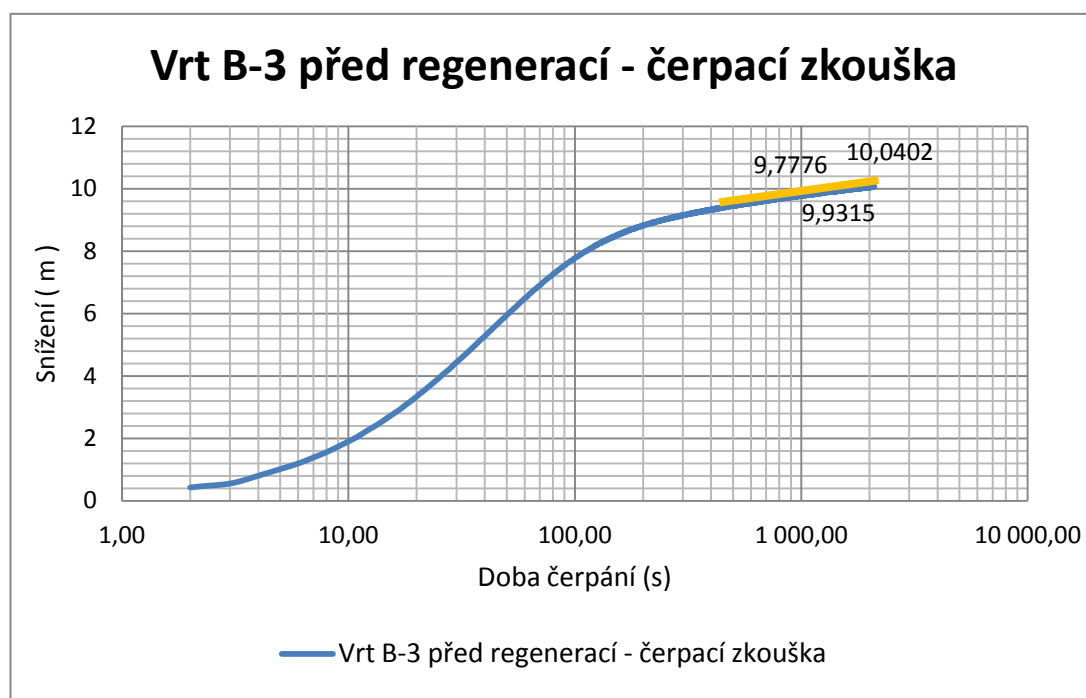
Vrt B - 3 před regenerací

Pro výpočet hodnot, které umožní stanovit dodatečné odpory, jsem nejprve shromáždil potřebná data. Převzal jsem čas čerpání v průběhu čerpací a stoupací zkoušky a údaje o naměřeném snížení ve vrtu. Dále jsem převzal, již zmíněnou, známou hodnotu pro storativitu, viz tabulka 1.

Čerpání	14	Q [l/s]	0,014	Q [m ³ /s]
poloměr vrtu	161,5	r _v [mm]	0,1615	r _v [m]
celkový čas - ČZ a SZ	3130	t [s]		
čas od začátku čerpání - ČZ	2097	t [s]		
čas od zastavení čerpání - SZ	1033	t [s]		
celkové snížení	10,0698	s [m]		
Sklon	0,873979	i [-]		
Transmisivita b-3	0,002931	T [m ² /s]		
Storativita	0,044134	S [-]		

Tabulka 1. Získaná data z terénního měření na vrtu B - 3 před regenerací.

Následně jsem získané hodnoty (čas t [s] a snížení s [m]) převedl do grafu čerpací, respektive stoupací zkoušky, viz obr. 16 respektive obr. 17. Tyto hodnoty vytvořily křivku, přičemž byl čas t [s] umístěn na vodorovnou osu x v logaritmovaném měřítku (dekadický logaritmus) a snížení s [m] na na svislou osu y .



Obr. 16. Graf stavu snížení ve vrtu B - 3 před regenerací, během čerpací zkoušky.

Vzhledem k povaze úkolu jsem si v rámci řešení nejprve vypočítal hodnotu Transmisivity, kde jsem použil rovnici 4.4.22 k vypočítání sklonu transformované přímky i [m]. Pro tuto rovnici bylo nutné zjistit hodnoty snížení a času ve dvou libovolných bodech, přičemž se tyto body nachází v oblasti transformované v přímku, viz oranžovou barvou značená úsečka, kopírující koncovou část grafu na obr. 16.

Následně jsem použil vzorec 4.4.23 pro výpočet transmisivity T [m^2/s]. Výsledná hodnota je zapsána na tabulce 1.

Další částí v postupu byl výpočet koeficientu dodatečných odporů W [-]. Pomocí rovnice 4.4.27 jsem vypočítal koeficient dodatečných odporů pro tři zvolené body. Tyto body byly vybrány z výše zmíněné přímkové oblasti grafu na obr. 16, viz tabulka 2.

Před regenerací				
B - 3 - Čerpací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	
Snížení --- s_v [m]	9,7776	9,9315	10,0402	s [m]
Čas --- t [s]	1 000,00	1 500,00	2 000,00	t [s]

Tabulka 2. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů.

Vypočítané koeficienty dodatečných odporů jsou zobrazeny na tabulce 3. Je vidět, že jsou všechny tři hodnoty prakticky stejné, což značí správnost dosavadního postupu. Koeficienty byly zprůměrovány do konečné hodnoty koeficientu dodatečných odporů.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	8,531269668
2	8,530908233
3	8,530002483
PRŮMĚR	8,530726795

Tabulka 3. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 3, při čerpací zkoušce.

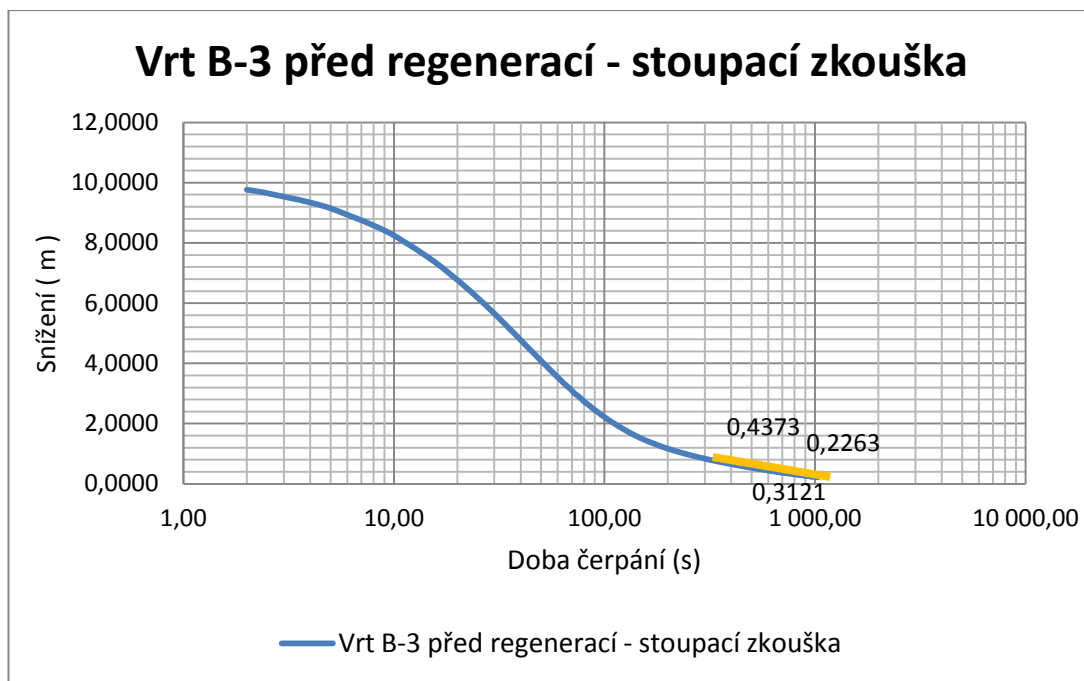
S rovnicí 4.4.28 pak bylo v návaznosti na získaná data možné vypočítat dodatečné snížení hladiny během čerpací zkoušky s_w [m], viz tabulka 4.

Dodatečné snížení hladiny během ČZ	s_w [m]
	6,484192455

Tabulka 4. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 3 před regenerací, při čerpací zkoušce.

Požadované hodnoty pro čerpací zkoušku vrtu B - 3 byly tímto vypočteny a následuje vyhodnocení snížení také pro stoupací zkoušku.

V tomto případě bylo nutné zvolit nejen hodnoty na grafu křivky pro stoupací zkoušku, viz obr. 17, ale bylo nutné je následně přepočítat tak, aby byly použity správně.



Obr. 17. Graf stavu snížení ve vrtu B - 3 před regenerací, během stoupací zkoušky.

Na obr. 17 a na tabulce 5 jsou viditelné hodnoty menší než 1. Protože se při stoupací zkoušce hladina zvedá, jedná se o obrácený postup a musíme získat rozdíl počátečního snížení (stav hladiny ve vrtu na počátku stoupací zkoušky - zastavení čerpání) a snížení ve zvoleném bodě.

Před regenerací					
B - 3 - Stoupací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Snížení na začátku SZ	
Snížení --- sv [m]	0,4373	0,3121	0,2263	10,058	s [m]
Čas --- t [s]	600,00	800,00	1 000,00	0	t [s]

Tabulka 5. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů.

Tímto způsobem jsem pokračoval a dle předchozího postupu jsem získal koeficient dodatečných odporů i pro stoupací zkoušku, viz tabulka 6.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	8,580366505
2	8,601157464
3	8,602408573
PRŮMĚR	8,594644181

Tabulka 6. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 3, při stoupací zkoušce.

Dodatečné snížení hladiny pak bylo vypočítáno stejným postupem jako při čerpací zkoušce, pomocí rovnice 4.4.28, viz tabulka 7.

Dodatečné snížení hladiny během SZ	s^* [m]
	6,532775963

Tabulka 7. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 3 před regenerací, při stoupací zkoušce.

Požadované hodnoty pro stoupací zkoušku vrtu B - 3 byly vypočteny obdobným způsobem. Následuje poslední část, kde je zjištěna hodnota specifické vydatnosti q [m^3/s ; l/s].

Hodnotu získáme podílem čerpaného množství Q [m^3/s] a celkového snížení s [m] ve vrtu v průběhu čerpací a stoupací zkoušky. Výpočet je proveden v jednotkách kubických metrů za sekundu a litrů za sekundu, viz tabulka 8.

Specifická vydatnost ČZ	q
[m^3/s]	0,001390296
[l/s]	1,390295736

Tabulka 8. Výsledná specifická vydatnost vrtu B - 3 před regenerací

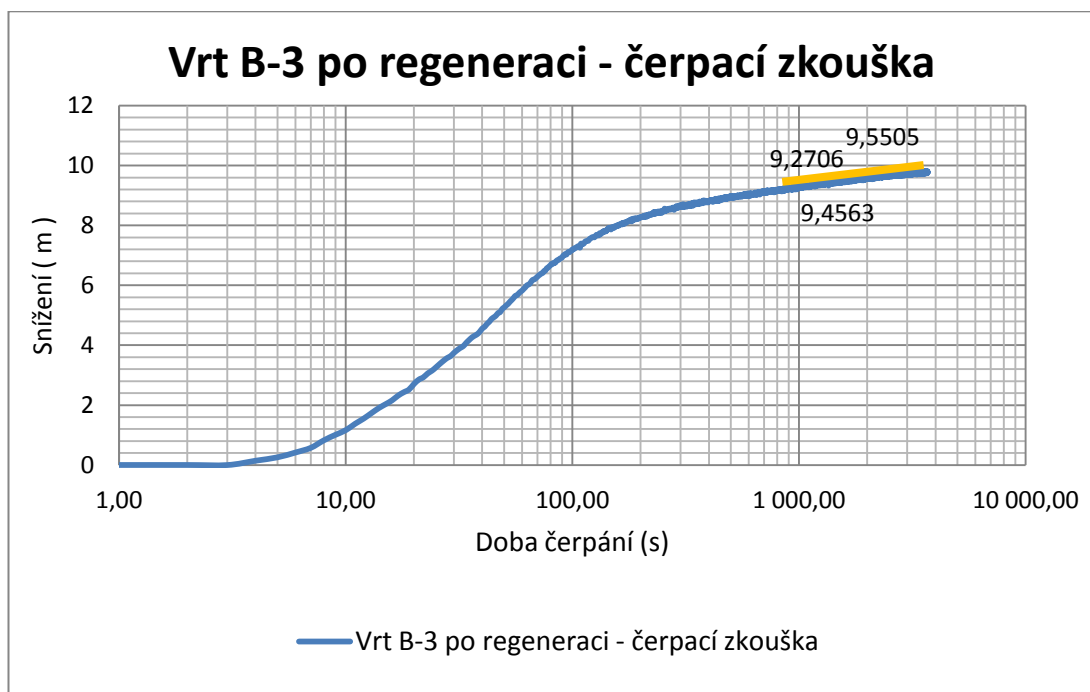
Vrt B - 3 po regeneraci

Vzhledem ke zjištěnému materiálu jímacího vrtu B - 3 (ocelová konstrukce, v dané části perforovaná podélnými oválnými otvory), byla zvolena regenerace formou kombinace chemického čištění a čištění pomocí tlakových rázů, což znamená stlačený vzduch, kterým jsou nečistoty omláceny (Vodní zdroje a.s., 2015).

Vyhodnocení dat na vrtu B - 3 po regeneraci probíhalo obdobně jako vyhodnocení před regenerací výše. Jediný rozdíl byl v naměřených hodnotách čerpaného objemu vody, snížení hladiny vody ve vrtu a doby čerpací a stoupací zkoušky.

Čerpání	18	Q [l/s]	0,018	Q [m ³ /s]
poloměr vrtu	161,5	rv [mm]	0,1615	rv [m]
celkový čas - ČZ a SZ	6099	t [s]		
čas od začátku čerpání - ČZ	3689	t [s]		
čas od zastavení čerpání - SZ	2410	t [s]		
celkové snížení	9,7731	s [m]		
Sklon	1,054566	i [-]		
Transmisivita b-3	0,003123	T [m ² /s]		
Storativita	0,044134	S [-]		

Tabulka 9. získaná data z terénního měření na vrtu B - 3 po regeneraci.



Obr. 18. Graf stavu snížení ve vrtu B - 3 po regeneraci, během čerpací zkoušky.

Po regeneraci				
B - 3 - Čerpací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	
Snížení --- sv [m]	9,2706	9,4563	9,5505	s [m]
Čas --- t [s]	1 000,00	1 500,00	2 000,00	t [s]

Tabulka 10. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů po regeneraci.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	5,745315302
2	5,744953867
3	5,703769585
PRŮMĚR	5,731346251

Tabulka 11. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 3, při čerpací zkoušce.

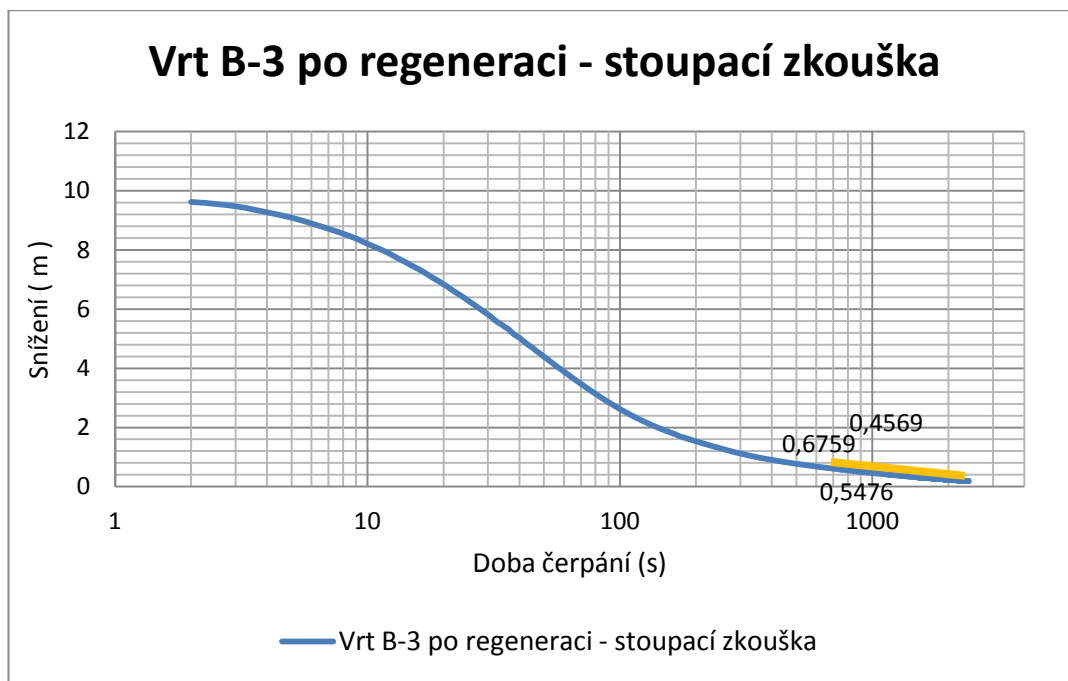
Dodatečné snížení hladiny během ČZ	sw [m]
	5,256537821

Tabulka 12. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 3 po regeneraci, při čerpací zkoušce.

Specifická vydatnost ČZ	q
[m ³ /s]	0,00184179
[l/s]	1,84179022

Tabulka 13. Výsledná specifická vydatnost vrtu B - 3 po regeneraci.

Následná stoupací zkouška byla řešena způsobem, který je totožný s předchozím použitým postupem při výpočtu potřebných hodnot stoupací zkoušky.



Obr. 19. Graf stavu snížení ve vrtu B - 3 po regeneraci, během stoupací zkoušky.

Po regeneraci					
B - 3 - Stoupací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Snížení na začátku SZ	
Snížení --- sv [m]	0,6759	0,5476	0,4569	9,7731	s [m]
Čas --- t [s]	600,00	800,00	1 000,00	0	t [s]

Tabulka 14. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů po regeneraci.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	5,811761222
2	5,807738249
3	5,795009018
PRŮMĚR	5,804836163

Tabulka 15. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 3, při čerpací zkoušce.

Dodatečné snížení hladiny během SZ	s* [m]
	5,323939524

Tabulka 16. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 3 po regeneraci, při čerpací zkoušce.

Potřebné hodnoty pro čerpací a stoupací zkoušku na vrtu B - 3 byly tímto vypočteny a následuje stejný postup výpočtu pro vrt B - 6.

5.3.2 Vrt B - 6

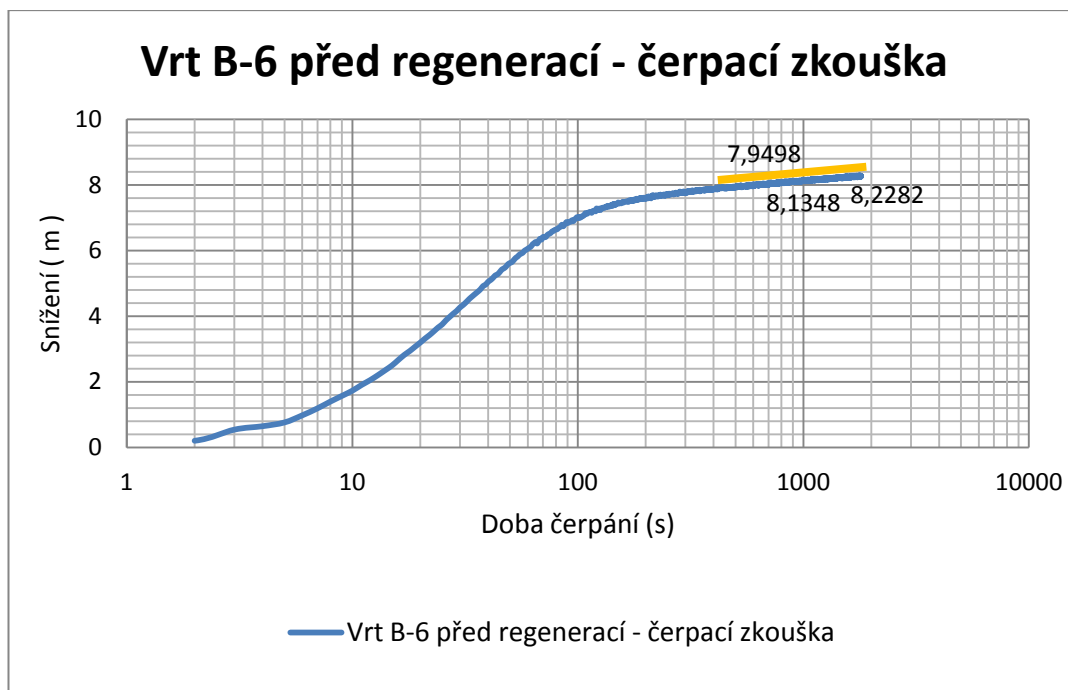
Oproti vrtu B - 3 je zde dokumentována rozvinutá vysoká kolmatace vnitřních stěn vrtu. Zároveň je toto zanesení v porovnání s vrtem B - 3 rozdílné ve svém původu, kdy se v tomto případě jedná o kombinaci zanesení vlivem bakteriálního původu a vysrážením železitých částic. Objevené utržené ocelové lano, které bylo nalezeno ve hloubce 80 m od odměrného bodu, je další překážkou. Vzhledem ke stavu jímacího objektu nebylo možno provést vyčištění vrtu do hloubky větší, než 80 m (Vodní zdroje a.s., 2015).

Vrt B - 6 před regenerací

Jak bylo zmíněno výše, postup při řešení vrtu B - 6 je stejný jako u předchozího vrtu B - 3, s rozdílem v hodnotách transmisivity.

Čerpání	14	Q [l/s]	0,014	Q [m ³ /s]
poloměr vrtu	161,5	rv [mm]	0,1615	rv [m]
celkový čas - ČZ a SZ	2953	t [s]		
čas od začátku čerpání - ČZ	1800	t [s]		
čas od zastavení čerpání - SZ	1153	t [s]		
celkové snížení	8,2867	s [m]		
Sklon	0,61456	i [-]		
Transmisivita b-3	0,00417	T [m ² /s]		
Storativita	0,04413	S [-]		

Tabulka 17. získaná data z terénního měření na vrtu B - 3 po regeneraci.



Obr. 20. Graf stavu snížení ve vrtu B - 6 před regenerací, během čerpací zkoušky.

Před regenerací				
B - 6 - Čerpací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	
Snížení --- s_v [m]	7,9498	8,1348	8,2282	s [m]
Čas --- t [s]	500,00	1 000,00	1 500,00	t [s]

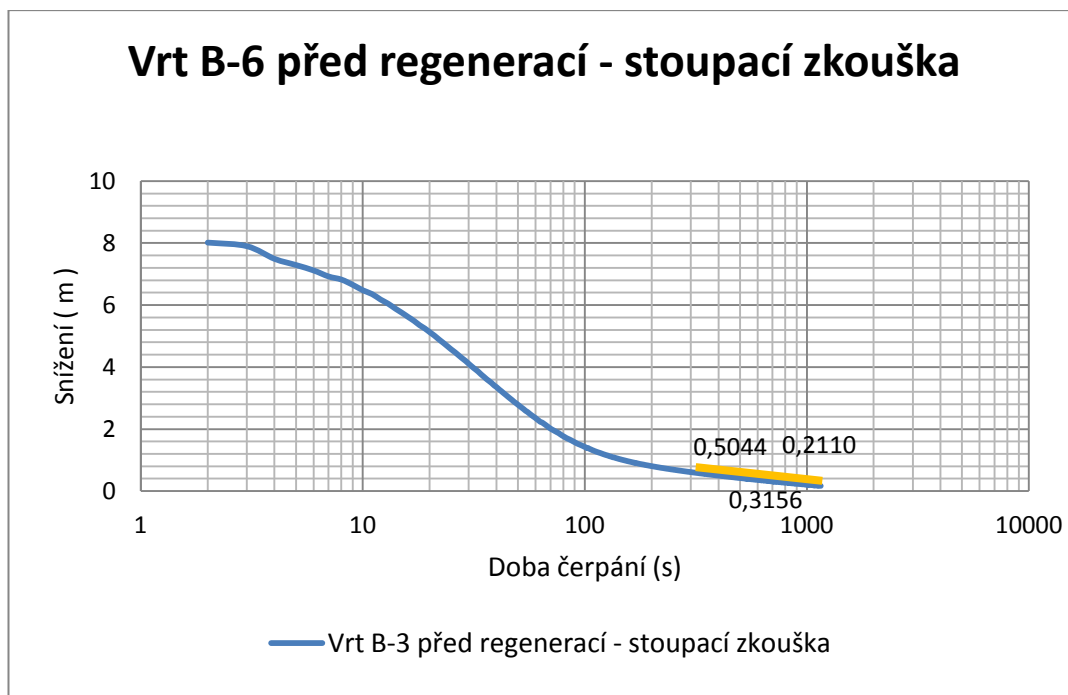
Tabulka 18. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	10,71106231
2	10,71044443
3	10,68237276
PRŮMĚR	10,70129316

Tabulka 19. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 6, při čerpací zkoušce.

Dodatečné snížení hladiny během ČZ	s_w [m]
	5,719621102

Tabulka 20. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 6 před regenerací, při čerpací zkoušce.



Obr. 21. Graf stavu snížení ve vrtu B - 6 před regenerací, během stoupací zkoušky.

Před regenerací					
B - 6 - Stoupací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Snížení na začátku SZ	
Snížení --- sv [m]	0,5044	0,3156	0,211	8,2677	s [m]
Čas --- t [s]	400,00	700,00	1 000,00	0	t [s]

Tabulka 21. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	10,47387332
2	10,47387332
3	10,47387332
PRŮMĚR	10,47387332

Tabulka 22. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 6, při stoupací zkoušce.

Dodatečné snížení hladiny během ČZ	s* [m]
	5,598069875

Tabulka 23. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 6 před regenerací, při stoupací zkoušce.

Specifická vydatnost ČZ	q
[m ³ /s]	0,001689454
[l/s]	1,689454186

Tabulka 24. Výsledná specifická vydatnost vrtu B - 3 před regenerací

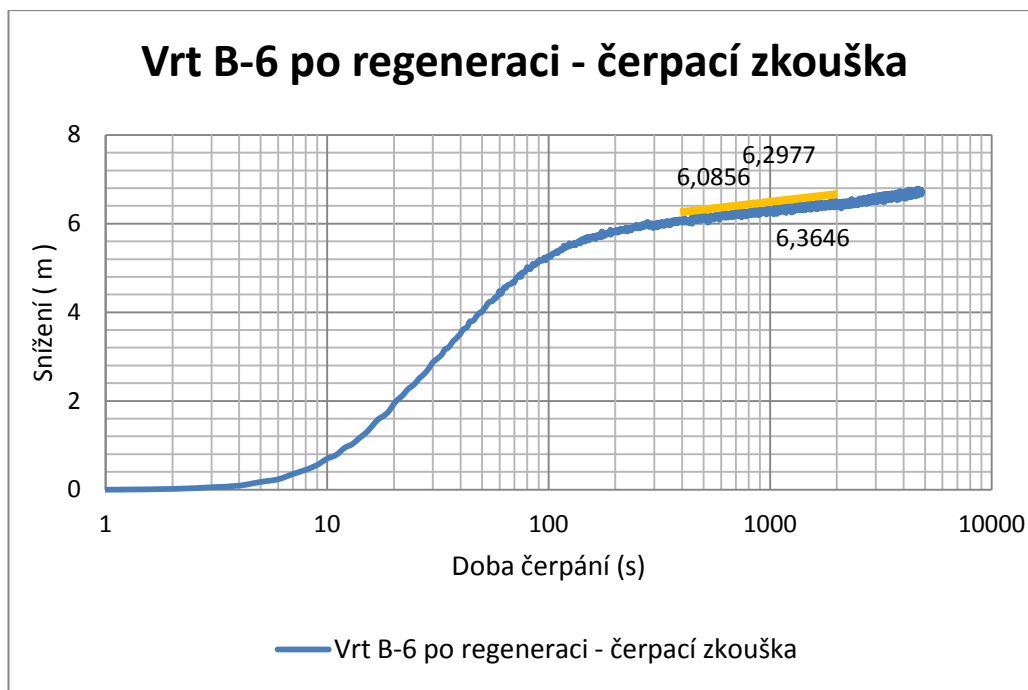
Vrt B - 6 po regeneraci

Pro regeneraci vrtu B – 6 bylo použito stejných metod jako u vrtu B – 3. Z důvodu konstrukce stěny studně bylo tedy použito kombinace chemického čištění a čištění za pomoci tlakových rázů. Nebylo ale dosaženo konečné hloubky, tedy 120 m pod povrchem terénu, z důvodu přítomnosti utrženého ocelového lana, které bránilo průzkumu a následnému čištění od hloubky 80 metrů od odměrného bodu.

Pro následující výpočty je využít opět stejný postup, který byl aplikován na situaci ve vrtu B - 3 po regeneraci.

Čerpání	11,8	Q [l/s]	0,0118	Q [m ³ /s]
poloměr vrtu	161,5	rv [mm]	0,1615	rv [m]
celkový čas - ČZ a SZ	6720	t [s]		
čas od začátku čerpání - ČZ	4827	t [s]		
čas od zastavení čerpání - SZ	1893	t [s]		
celkové snížení	6,6967	s [m]		
Sklon	0,70458	i [-]		
Transmisivita b-3	0,00306	T [m ² /s]		
Storativita	0,04413	S [-]		

Tabulka 25. získaná data z terénního měření na vrtu B - 6 po regeneraci.



Obr. 22. Graf stavu snížení ve vrtu B - 6 po regeneraci, během čerpací zkoušky.

Po regeneraci				
B - 3 - Čerpací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	
Snížení --- sv [m]	6,0856	6,2977	6,3646	s [m]
Čas --- t [s]	500,00	1 000,00	1 500,00	t [s]

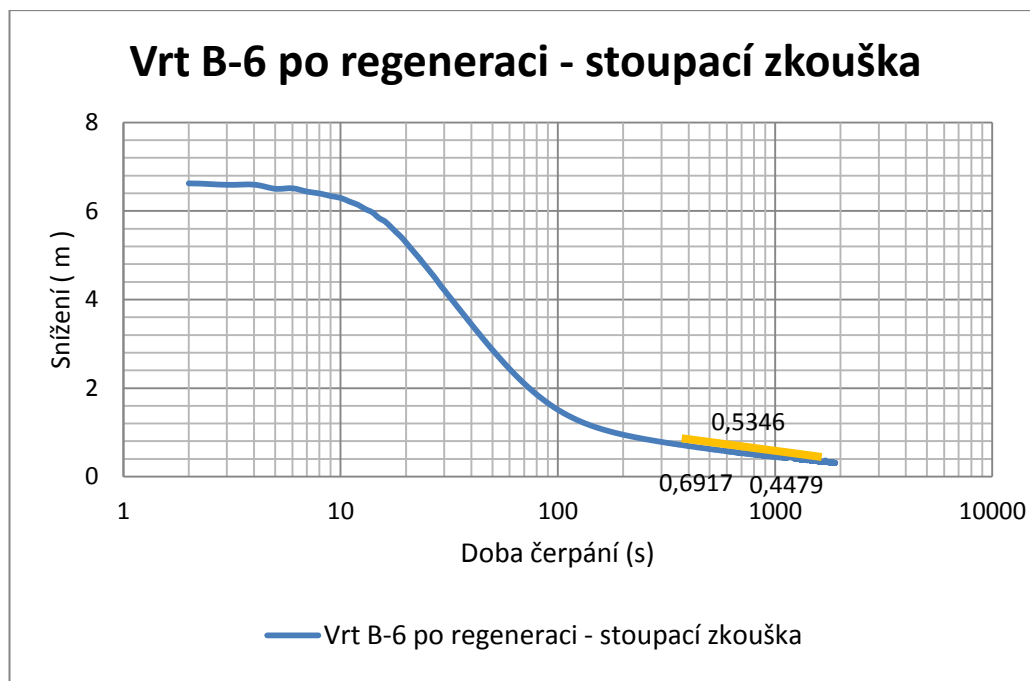
Tabulka 26. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů po regeneraci.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	5,924725768
2	5,92410789
3	5,830495737
PRŮMĚR	5,893109798

Tabulka 27. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 6, při čerpací zkoušce.

Dodatečné snížení hladiny	sw [m]
	3,611141205

Tabulka 28. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 6 po regeneraci, při čerpací zkoušce.



Obr. 23. Graf stavu snížení ve vrtu B - 6 po regeneraci, během stoupací zkoušky.

Po regeneraci					
B - 3 - Stoupací zkouška	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Snížení na začátku SZ	
Snížení --- sv [m]	0,6917	0,5346	0,4479	6,6967	s [m]
Čas --- t [s]	400,00	700,00	1 000,00	0	t [s]

Tabulka 26. Body zvolené pro výpočet koeficientu dodatečných odporů po regeneraci.

Koeficient dodatečných odporů	
Bod	W [-]
1	5,90483111
2	5,881268584
3	5,844347237
PRŮMĚR	5,876815644

Tabulka 27. Výsledné koeficienty dodatečných odporů na vrtu B - 6, při stoupací zkoušce.

Snížení ve vrtu během SZ	s* [m]
	3,60115658

Tabulka 28. Výsledné dodatečné snížení na vrtu B - 6 před regenerací, při stoupací zkoušce.

Specifická vydatnost ČZ	Q
[m ³ /s]	0,001762062
[l/s]	1,762061911

Tabulka 29. Výsledná specifická vydatnost vrtu B - 6 po regeneraci

Získáním specifické vydatnosti vrtu B - 6 jsou všechny potřebné výpočty práce vyřešeny. Vzájemné porovnání jednotlivých hodnot je zahrnuto v následující kapitole.

6 DISKUSE

V diplomové práci jsou řešeny dvě studně ze stejné oblasti, a proto je zřejmé, že některé z výsledných parametrů budou vycházet obdobně nebo budou téměř shodné. Vzájemná vzdálenost mezi vrtů B - 3 a B - 6 činí přibližně 370 m. Dle hydrogeologické dokumentace, která byla provedena Ing. Formánkem z České společnosti Vodní Zdroje a. s., se jedná o víceméně homogenní prostředí.

Tento fakt je také možné potvrdit pomocí mapového listu L34-115 s názvem Bela Crkva. Mapa je dostupná k nahlédnutí online na geologickém informačním systému, který je ve správě Báňské a geologické fakulty Univerzity v Bělehradě.

Vesměs homogenní prostředí odpovídá hodnotám, které vycházejí v odpovídajících rozmezích. Příkladem je možné použít hodnoty dodatečných odporů, které jsou v řešených vrtech téměř totožné, pokud porovnááme výsledky čerpací a stoupací zkoušky. Totéž platí u stejných výpočtů po regeneraci vrtů.

Vyšší rozdíly v hodnotách dodatečných odporů při porovnání jímacích objektů B - 3 a B - 6, je evidentní vyšší rozdíl v hodnotách před regenerací, který je ale po regeneraci eliminován.

Podle dokumentace zaměstnanců společnosti Vodní zdroje a. s., která popisuje stav vrtů za účelem jejich obnovení, byl jímací objekt B - 6 identifikován jako výrazně více znehodnocený (vyšší míra inkrustace) oproti vrtu B - 3. Vzhledem k této skutečnosti je znatelný výraznější kontrast výsledných hodnot u vrtu B-6, vypočítaných před a po regeneraci.

Porovnával jsem hodnoty již zmíněných koeficientů dodatečných odporů $W [-]$ a dodatečných snížení $s^* [m]$ před regenerací a po jejím provedení. Poslední porovnávanou hodnotou je specifická vydatnost $q [l/s]$, která byla (vzhledem ke způsobu výpočtu) vypočítána pouze pro čerpací zkoušku.

Pokud budeme jednotlivé výsledky porovnávat pomocí procentuálních vztahů, můžeme pro vrt B - 3 potvrdit o 32,8 % nižší koeficient dodatečných odporů v průběhu čerpací zkoušky na vrtu po provedené regeneraci, než kdyby byl ponechán v původním stavu. Obdobně jsou výsledky při stoupací zkoušce, kde jsou dodatečné odpory na vrtu po regeneraci o 32,5 % nižší. V případě dodatečného snížení v průběhu čerpací zkoušky po regeneraci se pak jedná o 18,9% nižší hodnotu. U stoupací zkoušky je hodnota dodatečného snížení o 15,5% nižší než za

stavu před obnovou. Specifická vydatnost vrtu B - 3 je pak po regeneraci vyšší o 32,5 %.

Pro vrt B - 6 je pro koeficient dodatečných odporů při čerpací zkoušce na vrtu po regeneraci o 44,9 % nižší než před jeho obnovou. Při stoupací zkoušce, kde jsou dodatečné odpory na vrtu po regeneraci o 43,8 % nižší, je situace opět podobná. Dodatečné snížení je pak v průběhu čerpací zkoušky po regeneraci o 36,9 % nižší a u stoupací zkoušky o 35,7 % nižší než před regenerací. Specifická vydatnost vrtu B - 6 je pak po regeneraci vyšší o 4,3 %.

Hodnoty dodatečných odporů a snížení u čerpací zkoušky jsou v případě obou vrtů natolik podobné, že by bylo možné stoupací zkoušku vynechat a pracovat pouze se zkouškou čerpací, která by mohla být považována za směrodatnou.

Výjimku tvoří hodnota specifické vydatnosti na vrtu B - 6, která se po provedení regenerace liší minimálně. Nižší rozdíl může znamenat, že regenerace na vrtu B - 6 neproběhla s takovým úspěchem jako na vrtu B - 3. Tuto skutečnost také podporuje zápis z průzkumných prací na lokalitě. Ve hloubce od 80 m vrtu B - 6 bylo kamerovým systémem objeveno ocelové lano, které bránilo prohlídce a následnému čištění zbytku vrtu.

Zároveň ale platí, že specifická vydatnost může být ovlivněna množstvím čerpané vody z vrtu, které bylo menší než u čerpání před regenerací. Stejně tak jsou rozdílné délky čerpací zkoušky. To vyústí také v rozdílné snížení.

Pro přehledné znázornění a porovnání vybraných hodnot ve vrtech B - 3 a B - 6 jsou zpracovány odpovídající tabulky a grafy, které jsou do práce zařazeny jako přílohy č. 4 a, 4b a 4c.

7 ZÁVĚR

Terénní práce v lokalitě Straža na území Srbské republiky byly realizovány v rámci projektu České rozvojové agentury. Hlavním vykonavatelem projektu je společnost Vodní zdroje a. s., od které jsem měl zapůjčená data z čerpacích a stoupacích zkoušek na vrtech B - 3 a B - 6 v době před plánovanou regenerací a také po její realizaci.

Výraznější efekt regenerace lze pozorovat na vrtu B - 6, pokud se jedná o dodatečné odpory a snížení. To ale neplatí u hodnoty specifické vydatnosti vrtu, která se liší minimálně. To ale může být ovlivněno postupem při samotné zkoušce, která probíhala jednak v rozdílném časovém úseku a jednak bylo z vrtu čerpáno rozdílné množství vody.

Jiným důvodem může být nedokonalé čištění vrtu B - 6, z důvodu překážky ve vrtu. Vzpříčené ocelové lano zamezilo postupu čistící techniky hlouběji než do 80 m pod povrchem terénu.

Řešené specifické vydatnosti byly počítány pro vrty B - 3 a B - 6 pouze pro čerpací zkoušky.

Výsledné hodnoty nabývají obdobných hodnot, které korespondují s aktuálním stavem řešených jímacích objektů. Z těchto výsledků získáváme potvrzení, že provedené regenerace mají jednoznačně pozitivní vliv na velikost dodatečných odporů, dodatečného snížení i specifické vydatnosti.

Zpracováním této problematiky jsem zamýšlel osvětlit základní problematiku proudění podzemních vod a popsat vlastnosti a typy různých zvodnělých prostředí.

Smyslem práce je předložit náměty pro praktické řešení problematiky dodatečných odporů a jejich vlivu na účinnost jímacích vrtů. Ze zjištěných výsledků je patrný kontrast vypočítaných hodnot za stavu před a po regeneraci existujících studní.

8 PŘEHLED LITERATURY A PŘEHLED POUŽITÝCH ZDROJŮ

AGARWAL R.G., AI-HUSSAINY R., RAMEY H.J., 1970: *Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: I. Analytical Treatment*. Society of Petroleum Engineers Journal, Svazek 10, vydání 3, 279–290.

WATTENBARGER R. A., RAMEY H. J., 1970: *An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: II. Finite Difference Treatment*. Society of Petroleum Engineers Journal, svazek 10, vydání 3, 291–297.

BEAR J., 1972: *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier, INC., New York.

BEAR J., 1979: *Hydraulics of Groundwater*. McFraw-Hill Publishing Company, New York.

BUTTS E., 2017: Well and Pump Rehabilitation, Part 4: Rehabilitation techniques and improving efficiency in wells. *Water Well Journal*, svazek 2017, vydání 8 (August), 50-53.

CHARBENEAU, R. J., 2006: *Groundwater hydraulics and pollutant transport*. WavelandPress, Long Grove, Illinois.

COOPER H.H., JACOB C. E., 1946: *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history*. Transactions American Geophysical Union, svazek 27, vydání 4, 526-534

FREEZE R. A., CHERRY J. A., 1979: *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

GEOLOŠKI INSTITUT SRBIJE ©2009: *Osnovna geološka karta Srbije 1:100.000* (online) [cit.2019.04.03], dostupné http://geoliss.mre.gov.rs/OGK/RasterSrbija/OGKWebOrig/listovi.php?karta=Bela_Crkva.

HÁLEK V., ŠVEC J., 1979: *Hydraulika podzemní vody*. Academia Praha, Praha.

JACOB C. E., 1947: *Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well*. Transactions of the American Society of Civil engineers, svazek 112, vydání 1, 1047 - 1064.

JETEL J., 1982: *Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech*. Academia, nakladatelství Československé akademie věd, Praha.

- VODNÍ ZDROJE A.S., 2015: *Hydrogeologická dokumentace vrtu B3 a B6* „nepublikováno“. Dep.: Vodní zdroje, a.s. Praha 5.
- KRESIC N., 2006: *Hydrogeology and groundwater modeling*. CrC Press, Boca Raton.
- KRUSEMAN G. P., De RIDDER N. A., 2000 (přetisk): *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Nizozemsko.
- KŘÍŽ, H., 1983: *Hydrologie podzemních vod*. Akademia, Praha.
- MÁCA P., 2014: *Úvod do hydrologie*. Česká zemědělská univerzita Praha, Praha.
- PASANDI M., SAMANI N., BARRY D. A., 2008: *Effect of wellbore and finite thickness skin on flow to a partially penetrating well in a phreatic aquifer*. Advances in Water Resources, vydání 2008, svazek 31. 383-398.
- PECH P., 1987: *Vyhodnocování vlivu dodatečných odporů na jímacím vrtu*. Vodní hospodářství, archiv ročníků, řada A, č. 12.
- PECH P., 1988: *Nestacionární proudění kapaliny k úplnému „reálnému“ vrtu s napjatou hladinou*. Vodohospodářský časopis, svazek 36, vydání 1, 71–85.
- PECH P., 2010: *Speciální případy hydrauliky podzemních vod*. Česká zemědělská univerzita Praha, Praha.
- PECH P., 2010: *Využití stoupacích zkoušek k vyhodnocení účinku regenerace vrtů*. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, svazek 52, vydání 1, 23 - 25.
- PECH P., 2017: *Hydraulika podzemních vod*. Česká zemědělská univerzita Praha, Praha.
- PETRÁNEK J., 1993: *Malá encyklopedie geologie*. Nakladatelství JIH, České Budějovice.
- PREISIG G., CORNATON J. F., PERROCHET P., 2013: *Regional Flow and Deformation Analysis of Basin-Fill Aquifer Systems Using Stress-Dependent Parameters*. Ground Water 2013: 1-11.
- RYBAKOV P. Y., SEMENOVA V. N., 2018: *Generalized Darcy's Law in Filtration Theory*. EPJ Web of Conferences, svazek 173, číslo článku 02017, Rusko.
- SCHÖN J., 2015: *Basic Well Logging and Formation evaluation*. Prof. Dr. Jürgen Schön&bookboon.com.

SOULSBY D., 2010: *Technical Review Borehole Drilling and Rehabilitation Under Field Conditions*. International Committee of the Red Cross, Geneva, Switzerland.

STARÝ M., 2005: *Hydrologie*. Vysoké učení technické v Brně, Brno.

TERZAGHI K., 1923: *Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tonen aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungerscheinungen*. Akademie der Wissenschaften, Vídeň.

THEIS, C. V., 1935: *The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage*. Department of the Interior Geological Survey, Water Resources Division, Ground Water Branch, Washington D. C., vydání 5, 1-9.

THOMPSON A. S., 1999: *Hydrology for Water Management*. A. A. Balkema, Rotterdam.

TODD D. K., MAYS L. W., 2005: *Groundwater Hydrology*. John Wiley & Sons, Hoboken, USA.

VALENTOVÁ J., 2010: *Hydraulika podzemní vody*. Nakladatelství ČVUT, Praha

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ ©2002: *Geohydrodynamické systémy* (online) [2019.02.20] dostupné z <http://geologie.vsb.cz/inzgeol/sylaby/08%20Hydrogeologicke%20pomery/Geohydrodynamick%C3%A9%20syst%C3%A9my.htm>.

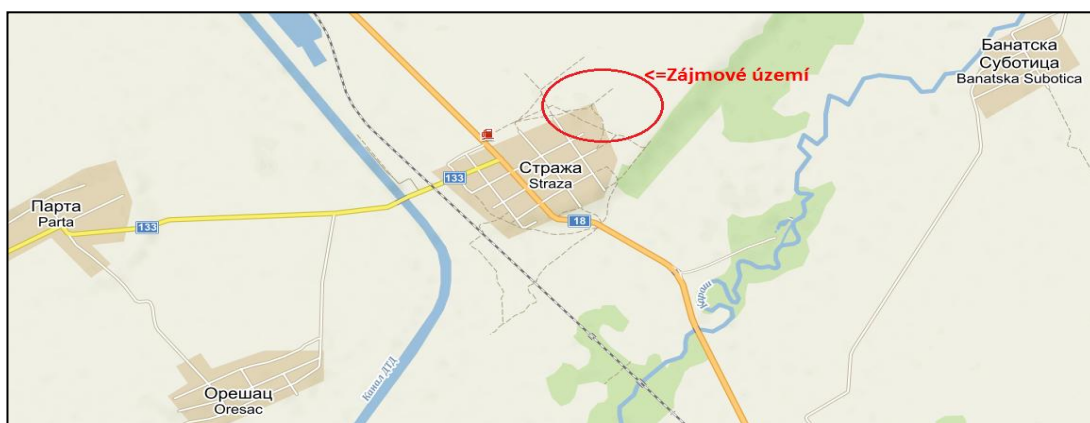
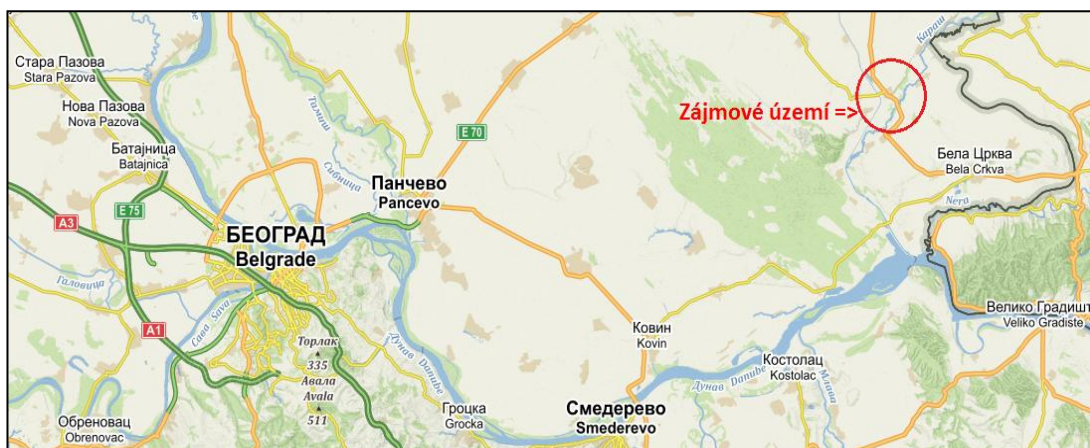
Walton, C. W., 2006: *Aquifer Test Modeling*. CRC Press, Taylor & Francis, NY

9 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 - Přehledná situace zájmového území
- Příloha č. 2 - Přehledná situace řešených vrtů
- Příloha č. 3a - Hydrogeologická dokumentace vrtu B - 3
- Příloha č. 3b - Hydrogeologická dokumentace vrtu B - 6
- Příloha č. 4a - Porovnání stavu před a po regeneraci vrtu B - 3
- Příloha č. 4b - Porovnání stavu před a po regeneraci vrtu B - 6
- Příloha č. 4c - Grafické porovnání stavu před a po regeneraci vrtů B – 3 a B - 6

10 PŘÍLOHY

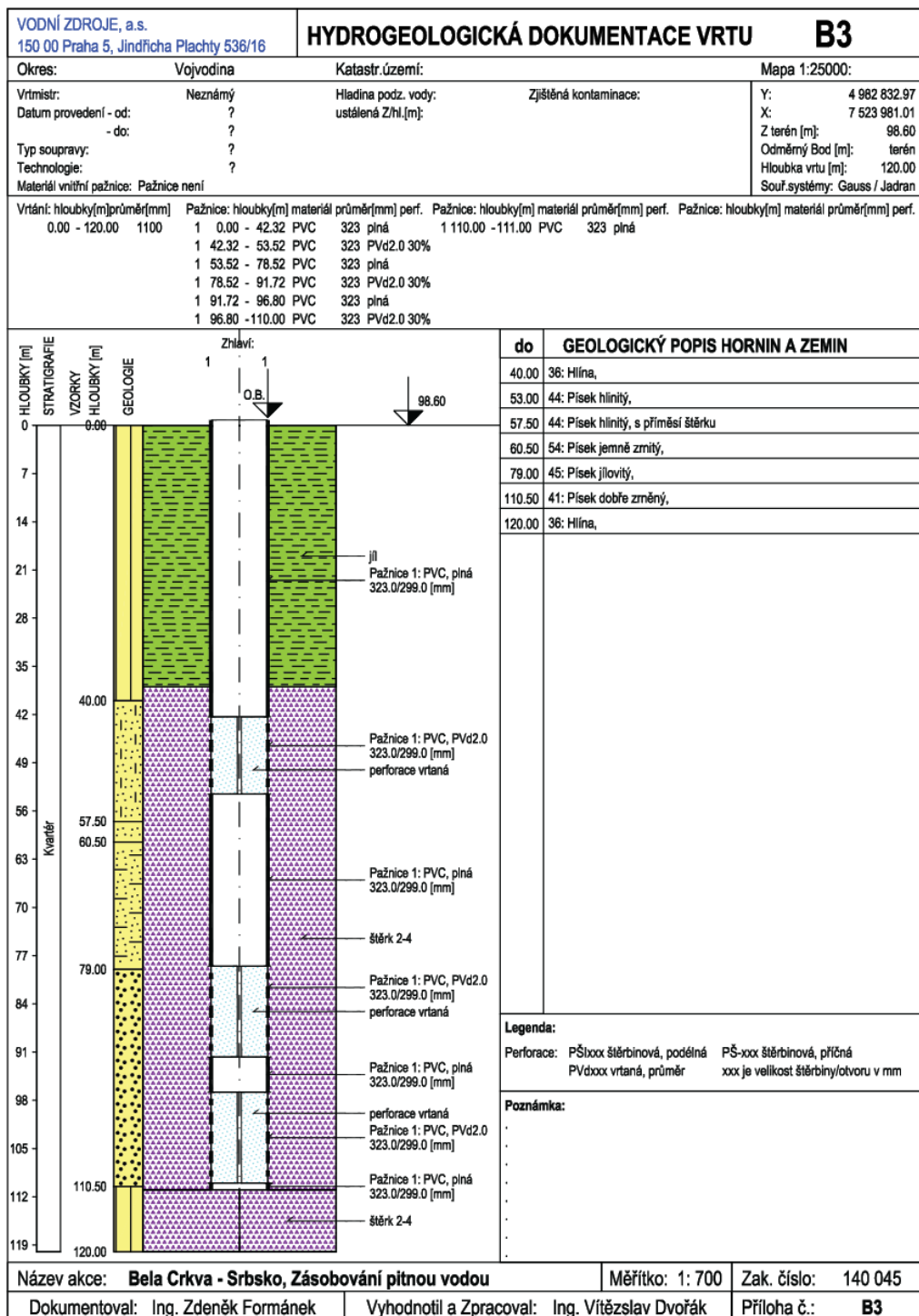
Příloha č. 1 - Přehledná situace zájmového území



Příloha č. 2 - Přehledná situace řešených vrtů



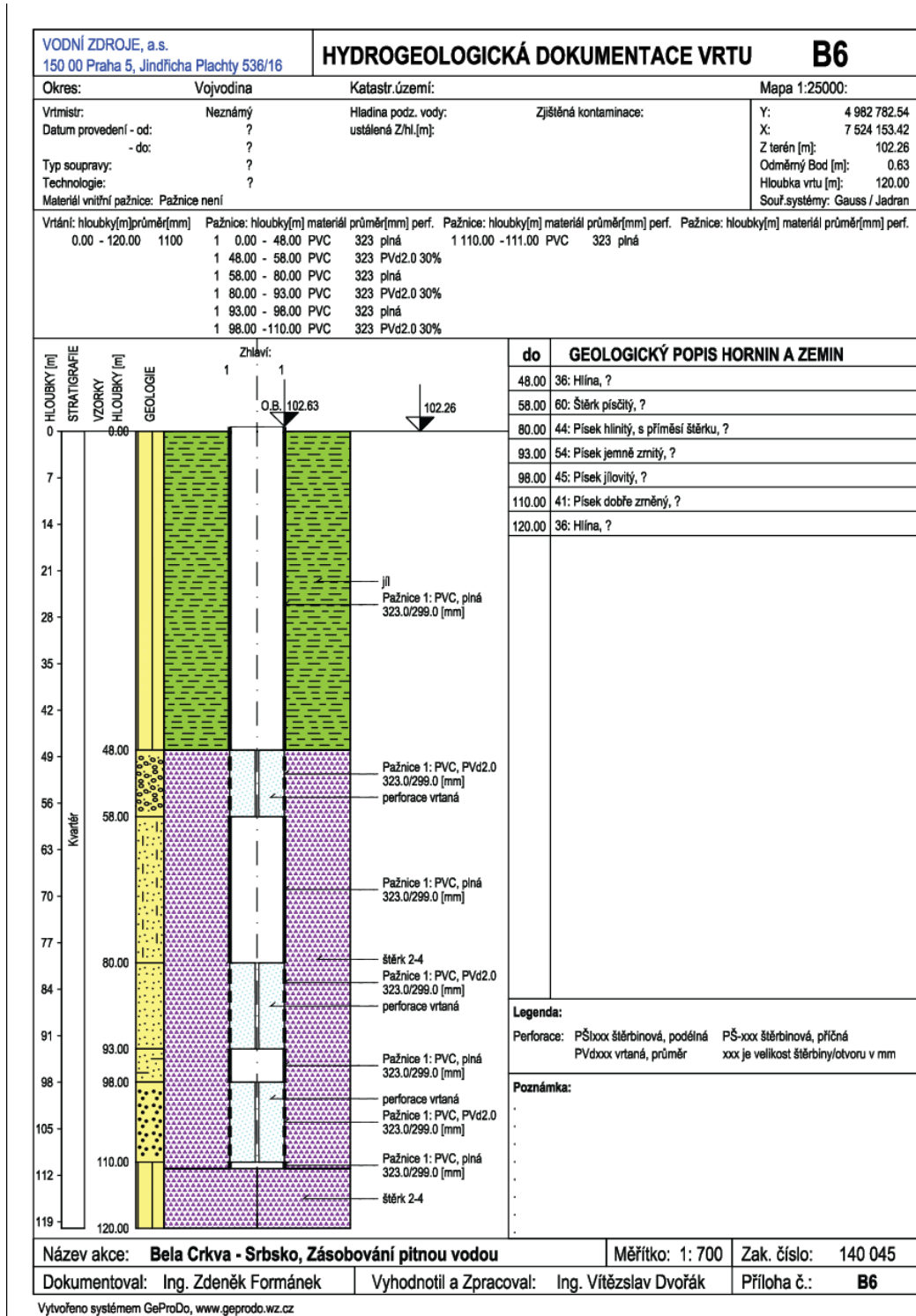
Příloha č. 3a - Hydrogeologická dokumentace vrtu B - 3



Název akce: Bela Crkva - Srbsko, Zásobování pitnou vodou	Měřítko: 1: 700	Zak. číslo: 140 045
Dokumentoval: Ing. Zdeněk Formánek	Vyhodnotil a Zpracoval: Ing. Vítězslav Dvořák	Příloha č.: B3

Vytvořeno systémem GeProDo, www.geprodo.wz.cz

Příloha č. 3b - Hydrogeologická dokumentace vrtu B - 6



Příloha č. 4a - Porovnání stavu před a po regeneraci vrtu B - 3

Porovnání stavu před a po regeneraci - Vrt B - 3		
	Před	Po
Čerpání	0,014 Q [m3/s]	0,018 Q [m3/s]
Poloměr vrtu	0,1615 rv [m]	0,1615 rv [m]
celkový čas - ČZ a SZ	3130 t [s]	6099 t [s]
čas při zastavení čerpání - ČZ	2097 t [s]	3689 t [s]
čas od zastavení čerpání - SZ	1033 t [s]	2410 t [s]
celkové snížení	10,0698 s [m]	9,7731 s [m]
B - 3 - Čerpací zkouška	Před	Po
Sklon	0,873979 i [-]	1,054566825 i [-]
Transmisivita	0,002931 T [m ² /s]	0,003123557 T [m ² /s]
Storativita	0,044134 S [-]	0,044134083 S [-]
V bodě	Před	Po
1	9,7776 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]	9,2706 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]
2	9,9315 Snížení sv [m] 1500 Čas t [s]	9,4563 Snížení sv [m] 1500 Čas t [s]
3	10,0402 Snížení sv [m] 2000 Čas t [s]	9,5505 Snížení sv [m] 2000 Čas t [s]
Koeficient dodatečných odporů	Před	Po
V bodě		
1	8,53127 W [-]	5,745315302 W [-]
2	8,530908 W [-]	5,744953867 W [-]
3	8,530002 W [-]	5,703769585 W [-]
PRŮMĚR	8,530727 W [-]	5,731346251 W [-]
Dodatečné snížení hladiny ve vrtu (ČZ)	Před	Po
	6,484192 sw [m]	5,256537821 sw [m]
B - 3 - Stoupačí zkouška	Před	Po
Sklon	0,873979 i [-]	1,054566825 i [-]
Transmisivita	0,002931 T [m ² /s]	0,003123557 T [m ² /s]
Storativita	0,044134 S [-]	0,044134083 S [-]
V bodě	Před	Po
1	0,4373 Snížení sv [m] 600 Čas t [s]	0,6759 Snížení sv [m] 600 Čas t [s]
2	0,3121 Snížení sv [m] 800 Čas t [s]	0,5476 Snížení sv [m] 800 Čas t [s]
3	0,2263 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]	0,4569 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]
Koeficient dodatečných odporů	Před	Po
V bodě		
1	8,580367 W [-]	5,811761222 W [-]
2	8,601157 W [-]	5,807738249 W [-]
3	8,602409 W [-]	5,795009018 W [-]
PRŮMĚR	8,594644 W [-]	5,804836163 W [-]
Dodatečné snížení hladiny ve vrtu (SZ)	Před	Po
	6,532776 s* [m]	5,323939524 s* [m]
Specifická vydatnost ČZ	Před	Po
	0,00139 q [m3/s] 1,390296 q [l/s]	0,00184179 q [m3/s] 1,84179022 q [l/s]

Příloha č. 4b - Porovnání stavu před a po regeneraci vrtu B - 6

Porovnání stavu před a po regeneraci - Vrt B - 6		
	Před	Po
Čerpání	14 Q [m ³ /s]	11,8 Q [m ³ /s]
Poloměr vrtu	161,5 rv [m]	161,5 rv [m]
celkový čas - ČZ a SZ	2953 t [s]	6720 t [s]
čas při zastavení čerpání - ČZ	1800 t [s]	4827 t [s]
čas od zastavení čerpání - SZ	1153 t [s]	1893 t [s]
celkové snížení	8,2867 s [m]	6,6967 s [m]
B - 3 - Čerpací zkouška	Před	Po
Sklon	0,614557 i [-]	0,704580949 i [-]
Transmisivita	0,004169 T [m ² /s]	0,0030648 T [m ² /s]
Storativita	0,044134 S [-]	0,044134083 S [-]
V bodě	Před	Po
1	7,9498 Snížení sv [m] 500 Čas t [s]	6,0856 Snížení sv [m] 500 Čas t [s]
2	8,1348 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]	6,2977 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]
3	8,2282 Snížení sv [m] 1500 Čas t [s]	6,3646 Snížení sv [m] 1500 Čas t [s]
Koeficient dodatečných odporů	Před	Po
V bodě		
1	10,71106 W [-]	5,924725768 W [-]
2	10,71044 W [-]	5,92410789 W [-]
3	10,68237 W [-]	5,830495737 W [-]
PRŮMĚR	10,70129 W [-]	5,893109798 W [-]
Dodatečné snížení hladiny ve vrtu (ČZ)	Před	Po
	5,719621 sw [m]	3,611141205 sw [m]
B - 3 - Stoupací zkouška	Před	Po
Sklon	0,614557 i [-]	0,704580949 i [-]
Transmisivita	0,004169 T [m ² /s]	0,0030648 T [m ² /s]
Storativita	0,044134 S [-]	0,044134083 S [-]
V bodě	Před	Po
1	0,5044 Snížení sv [m] 400 Čas t [s]	0,6917 Snížení sv [m] 400 Čas t [s]
2	0,3156 Snížení sv [m] 700 Čas t [s]	0,5346 Snížení sv [m] 700 Čas t [s]
3	0,211 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]	0,4479 Snížení sv [m] 1000 Čas t [s]
Koeficient dodatečných odporů	Před	Po
V bodě		
1	10,47387 W [-]	5,90483111 W [-]
2	10,47387 W [-]	5,881268584 W [-]
3	10,47387 W [-]	5,844347237 W [-]
PRŮMĚR	10,47387 W [-]	5,876815644 W [-]
Dodatečné snížení hladiny ve vrtu (SZ)	Před	Po
	5,59807 s* [m]	3,60115658 s* [m]
Specifická vydatnost ČZ	Před	Po
	0,001689 q [m ³ /s] 1,689454 q [l/s]	0,001762062 q [m ³ /s] 1,762061911 q [l/s]

Příloha č. 4c - Grafické porovnání stavu před a po regeneraci vrtů B – 3 a B - 6

