

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A  
ENVIROMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**

**VYHODNOCOVÁNÍ  
HYDRODYNAMICKÝCH ZKOUŠEK**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**VEDOUCÍ PRÁCE:**

**prof. ING. PAVEL PECH, CSc.**

**BAKALANT:**

**PAVEL ČERNÝ**

**2017**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Pavel Černý

Vodní hospodářství

Název práce

Vyhodnocování hydrodynamických zkoušek

Název anglicky

Evaluation of Hydrodynamic Tests

---

### Cíle práce

Cílem práce je zpracovat přehled vyhodnocení čerpacích zkoušek na ideálních a reálných vrtech a na základě vyhodnocení konkrétní hydrodynamické zkoušky na vrtu vyhodnotit změnu velikosti dodatečných odporů na vrtu a jeho blízkém okolí při regeneraci.

### Metodika

prostudování literatury týkající se vyhodnocování hydrodynamických zkoušek prováděných za neustáleného režimu na ideálních i reálných vrtech

- popis zkoumané lokality
- vyhodnocení hydrodynamických zkoušek před a po regeneraci Jacobovou metodou semilogaritmické aproximace na daném vrtu
- diskuze a závěr

## Doporučený rozsah práce

30-40 str.

## Klíčová slova

hydrodynamika, hydrologie, zkouška, podzemní voda

---

## Doporučené zdroje informací

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE, – PECH, P. *Speciální případy hydrauliky podzemních vod*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G. Masaryka, 2010. ISBN 978-80-87402-04-7.

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

MLS, J. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STAVEBNÍ FAKULTA. *Hydraulika podzemní vody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1988.

VALENTOVÁ, J. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STAVEBNÍ FAKULTA. *Hydraulika podzemní vody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02404-0.

---

## Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

## Vedoucí práce

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

## Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

## Konzultant

Ing. Jiří Holub

---

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2017

**doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

---

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2017

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2017

---

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce. Veškerá literatura a zdroje, ze kterých jsem čerpal v průběhu tvorby, uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze, dne: .....

.....

### **Poděkování**

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce profesoru Ing. Pavlu Pechovi, CSc. a konzultantovi Ing. Jiřímu Holubovi za odborné vedení a cenné rady při zpracování této práce, a také podniku Vodní zdroje, a.s. za poskytnuté materiály a data.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá vyhodnocením hydrodynamických zkoušek. Je zde uvedena a řešena základní problematika podzemní vody, především proudění v porézním prostředí a k vrtu. Samostatnou kapitolu mají vyhrazené hydrodynamické zkoušky, kde nalezneme podrobný popis nejběžněji používaných v praxi. V praktické části je vyhodnocena transmisivita a storativita z dat reálných čerpacích zkoušek, před a po regeneraci, pomocí Jacobovy semilogaritmické metody a Theisovy typové křivky. Výsledky jsou shrnuty v závěru. V diskuzi je řešena změna velikosti dodatečných odporů na vrtu a jeho blízkém okolí při regeneraci. Prostudováním literární rešerše student získá základní znalosti z problematiky podzemní vody a dovednosti, které uplatní při vyhodnocení hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech.

### **Klíčová slova:**

hydrodynamika, hydrologie, zkouška, podzemní voda

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the evaluation of hydrodynamic tests. There is mentioned basic issues of groundwater, especially flow in porous media and the wells. A separate chapter are dedicated hydrodynamic testing, where you can find a detailed description of the most frequently used tests in practice. The practical part is evaluated transmissivity and storativity data from real pumping tests, before and after regeneration, using a semi-log methods and Theis type curve. The results are summarized in the conclusion. The discussion is solved resizing additional resistance at the well and it is surroundings at regeneration. Studying literature research student acquire basic knowledge of groundwater issues and skills that apply in the evaluation of hydrodynamic tests on real wells.

### **Keywords:**

hydrodynamics, hydrology, test, underground water

## **Obsah**

Úvod	9
Cíle práce	10
Metodika	11
<b>1. Podzemní voda</b>	<b>12</b>
1.1. Klasifikace zvodní	12
1.2. Pórovitost	13
1.3. Propustnost	14
1.4. Hydraulická vodivost	15
1.5. Transmisivita	16
1.6. Specifická storativita	16
1.7. Homogenita a anizotropie půdního prostředí	17
1.8. Izotropní a anizotropní prostředí	19
<b>2. Proudění podzemní vody v porézním prostředí</b>	<b>21</b>
2.1. Darcyho zákon	21
2.2. Zobecnění Darcyho zákona	21
2.3. Meze platnosti Darcyho zákona	22
2.4. Prelineární proudění	23
2.5. Postlineární proudění	24
2.6. Rovnice kontinuity	24
2.7. Dupuitovy postuláty	25
<b>3. Hydrodynamické zkoušky</b>	<b>27</b>
3.1. Čerpací zkouška	27
3.2. Odběrové zkoušky	28
3.3. Stoupací zkouška	28
3.4. Trubková zkouška	30

3.5. Expresní zkouška – metoda jednorázového nálevu	31
<b>4. Proudění podzemní vody k vrtu</b>	<b>32</b>
4.1. Neustálené rotačně symetrické proudění k ideálnímu vrtu	32
4.2. Theisova metoda typové křivky	33
4.3. Jacobova semilogaritmická metoda přímky	34
<b>5. Vyhodnocení hydraulických parametrů z dat čerpací zkoušky</b>	<b>38</b>
5.1. Popis zájmové lokality a horninového prostředí	38
5.2. Vyhodnocení transmisivity a storativity z dat ČZ	39
<b>6. Závěr</b>	<b>43</b>
<b>7. Diskuze</b>	<b>44</b>
Přehled literatury a použitých zdrojů	45
Seznam příloh	46
Přílohy	47



## Úvod

Během 21. století se zájem o vodu zvýšil v důsledku ubývání pitné vody a dlouhotrvajících extrémně suchých období. Důležitou součástí světových zásob vody je podzemní voda. Lidé již od nepaměti využívali právě tyto zdroje, ať už v podobě vytékající artézské studny na povrch, nebo hloubením prvních studní. Významnou osobou v tomto odvětví byl bezpochyby Henri Darcy, který roku 1856 na základě svých experimentů s prouděním vody ve válcích s pískem stanovil zákon pro laminární režim proudění vody v porézním prostředí. Dnes známý jako Darcyho zákon. Postupem času vědci pochopili princip proudění podzemní vody a mohli se začít věnovat další podkapitole; a to proudění podzemní vody k vrtu. Poznatky vycházely z pevných základů předchůdců a docházelo pouze k drobným úpravám řešených rovnic. V průběhu 20. století se hydrologové, jmenovitě například C. V. Theis, zaměřili na hydrodynamické zkoušky.

K výběru tématu bakalářské práce jsem se rozhodl, abych lépe pochopil problematiku hydrodynamických zkoušek a s nimi spojené zákonitosti pohybu podzemní vody.

## **Cíle práce**

Zpracování literární rešerše, která má přiblížit základy a problematiku proudění podzemní vody.

Vyhodnocení hydrodynamických zkoušek z dat měření na reálných vrtech pomocí Jacobovy semilogaritmické přímky a Theisovy metody typové křivky (transmisivita a storativita).

## Metodika

Nejprve bylo potřeba popsat základní problematiku podzemní vody jako klasifikaci zvodní, izotropního a anizotropního prostředí, výpočty pro stanovení pórovitosti, propustnosti a specifické storativity.

Další část se věnuje ustálenému proudění podzemní vody v porézním prostředí, kde je podrobně vysvětlen Darcyho zákon pro laminární režim proudění podzemní vody a jsou zde uvedeny meze platnosti Darcyho zákona; kritické hodnoty Reynoldsova čísla. Po prostudování ustáleného proudění je vhodné přejít k problematice neustáleného proudění podzemní vody k vrtu, do které byla zahrnuta Theisova metoda typové křivky a Jacobova semilogaritmická metoda přímkou pro stanovení hydraulických parametrů z dat čerpací zkoušky.

Následuje získání základních informací o hydrodynamických zkouškách. Pro účely práce jsou vybrány nejběžněji používané v praxi.

Závěrečné vyhodnocení hydraulických parametrů z dat čerpacích zkoušek před a po regeneraci se skládá z popisu zájmové lokality a způsobu vyhodnocení. Důležité je důkladné seznámení s naměřenými daty, které po analýze vynášíme do grafů. V závěru uvedeme dosažené hodnoty a v diskuzi vědecky porovnáme výsledky zkoušek před a po regeneraci.

## 1. Podzemní voda

Veškerá voda pod zemským povrchem, nazývána též podpovrchová voda, je nedílnou součástí vodní bilance hydrologických cyklů. Podpovrchová voda je důležitou součástí světových zásob sladké vody na světě (VALENTOVÁ, 2010).

Dotace podpovrchové vody probíhá prostřednictvím srážek, které jsou sněhové nebo dešťové, kde část srážek odtéká po povrchu a část se infiltruje do půdy. Infiltrace probíhá vlivem gravitační síly - voda se akumuluje nad nepropustným podložím. Naopak odtok probíhá evapotranspirací a evaporací.

Vlastnosti podzemního materiálu jsou důležité při posuzování velikosti infiltrace, která se projeví zvýšenou tvorbou povrchového odtoku.

### 1.1. Klasifikace zvodní

Kolektor je definovaný jako propustné horninové prostředí, kde dochází k pohybu gravitační vody snáze, než za jiných hydraulických podmínek sousedního prostředí. Propustnost můžeme stanovit pomocí křivky zrnitosti, nebo laboratorně pomocí hydrodynamických zkoušek. Vodní útvar v kolektoru se nazývá zvoďeň<sup>1</sup>.

Kolektory rozdělujeme v závislosti na existenci volné hladiny na kolektory: s napjatou hladinou, volnou hladinou a kolektory s přetékáním.

Kolektor s **napjatou hladinou** (confined aquifer) je zásobován z oblastí s větší infiltrací povrchové vody; shora i zdola omezen nepropustnou vrstvou. Hladina vody v pozorovacích vrtech tohoto kolektoru vytvoří piezometrickou plochu (VALENTOVÁ, 2010). V případě, že piezometrická plocha vystoupí nad zemský povrch, jedná se o artézský kolektor. Pokud studna odvádí vodu z artézského kolektoru, voda samovolně vytéká na povrch, a tím pádem hovoříme o artézské studni.

Kolektor s **volnou hladinou** (unconfined aquifer) bývá ohraničen pouze spodní nepropustnou vrstvou, v horní části se nachází volná hladina. Může být dotován shora nebo zdola z vrstev, které tvoří hranice kolektoru.

---

<sup>1</sup> Souvislá vrstva podzemní vody, která vytváří v nasyceném pásmu vodní útvar.

**Kolektory s přetékáním** (leaky aquifer) se vyznačují polopropustnými vrstvami, které umožňují přetékání vody. Tento typ kolektoru je dotován shora i zdola ležících kolektorů. Stanovení množství a směru přetékající vody udává hodnota piezometrických výšek okrajů pozorované polopropustné vrstvy.

Obecně nelze přesně definovat druh konkrétní vrstvy, která ohraničuje kolektor, protože záleží na vlastnostech daného prostředí.

## 1.2. Pórovitost

Pórovitost je definována jako: „Přítomnost jakýchkoliv pórů a dutin v horninách. Podíl objemu pórů ( $V_p$ ) na celkovém objemu horniny ( $V$ ), tj.  $V_p/V$ ; takto vypočítaná pórovitost se nazývá koeficient pórovitosti ( $m$ ).“<sup>2</sup>

K této definici dodám, že výsledný koeficient pórovitosti  $m$  je bezrozměrné číslo menší než 1, často vyjadřované v procentech.

Průchod tekutin umožňují póry, které jsou navzájem mezi sebou propojené. Známým objemem právě propojených pórů stanovíme tzv. efektivní pórovitost (střední rychlost proudění vody), značí se  $n_{ef}$  a rovnice pro efektivní pórovitost v nasycené zóně (1.2.1) vypadá následovně:

$$1.2.1 \quad n_{ef} = \frac{V_{pe}}{V_t}$$

Kde:  $V_{pe}$  ... součet objemu pórů [ $m^3$ ]

$V_t$  ... celkový objem vzorku [ $m^3$ ]

$n_{ef}$  ... efektivní pórovitost [-]

Oproti efektivní pórovitosti se aktivní pórovitost vyznačuje gravitačním přítokem, nebo odtokem kapaliny při kolísání hladiny podzemní vody; rovnice (1.2.2)

$$1.2.2 \quad n_a = \frac{V_{pa}}{V_{celk}}$$

---

<sup>2</sup> Petránek J., 2007 a): Geologická encyklopedie (online) [cit. 2017.01.03.], dostupné z <<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>>

Kde:  $V_{pa}$  ... objem kapaliny vyteklé z pórů působením gravitační síly [ $m^3$ ]

$V_{celk}$  ... objem vzorku [ $m^3$ ]

$n_a$  ... aktivní pórovitost [-]

Určit velikost pórovitosti lze několika způsoby – zde uvádím nejběžněji používaný postup: Určí se celkový objem  $V$  neporušeného vzorku. Poté zeminu rozdrťme a určí se objem  $V_s$  pevného komponentu pomocí objemu vytlačené vody (MLS, 1988). Průměrnou pórovitost  $n$  získáme rovnicí (1.2.3)

$$1.2.3 \quad n = \frac{V_1 - V_s}{V_2}$$

Kde:  $n$  ... průměrné číslo pórovitosti [-]

$V_1$  ... objem neporušeného vzorku [ $m^3$ ]

$V_s$  ... objem vytlačené vody [ $m^3$ ]

$V_2$  ... objem neporušeného vzorku [ $m^3$ ]

### 1.3. Propustnost

Cizím slovem permeabilita, je schopnost hornin propouštět kapalinu. Propustnost závisí na charakteristikách porézního prostředí a značí se malým písmenem  $k$  v jednotkách  $m^2$ .

Rovnice, které vyjadřují závislost propustnosti na vlastnostech porézního prostředí, mohou být empirické nebo odvozeny pomocí fyzikálních modelů.

Empirický vzorec (1.3.1) pro výpočet propustnosti má tvar:

$$1.3.1 \quad k = cd^2$$

Kde:  $k$  ... výsledná propustnost [ $m^2$ ]

$c$  ... koeficient materiálu prostředí. [-]

$d$  ... efektivní průměr zrna [m]

A k fyzikálně odvozeným vztahům patří rovnice (1.3.2) podle Kozenyho a Carmana.

$$1.3.2 \quad k = C_0 \frac{n^3}{(1-n)^2 M_S^2}$$

Kde:  $C_0$  ... empirická konstanta [-]

$M_S^2$  ... specifický povrch jednotkového porézního prostředí [ $m^2$ ]

$n$  ... pórovitost [-]

$k$  ... výsledná propustnost [ $m^2$ ]

## 1.4. Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost patří mezi základní hydraulické charakteristiky zvodněných vrstev a značí se písmenem  $K$ , v jednotkách m/s. Odbornou literaturou je definována jako: „Hustota toku při jednotkovém hydraulickém gradientu v izotropním prostředí.“<sup>3</sup>

Velikost hydraulické vodivosti určíme několika způsoby, a to: propustoměrem v laboratoři, polní zkouškou, anebo pomocí empirických vzorců. Výsledný výpočet hydraulické vodivosti ovlivňují především vlastnosti porézního prostředí - pórovitost, zrnitostní složení a vlastnosti proudící kapaliny – hustota a viskozita.

Zde uvádím empirický vzorec (1.4.1) pro výpočet hydraulické vodivosti:

$$(1.4.1) \quad K = \frac{k \rho g}{\mu}$$

Kde:  $K$  ... výsledná hydraulická vodivost [m/s]

$\rho$  ... hustota kapaliny [ $kg/m^3$ ]

$\mu$  ... dynamická viskozita kapaliny [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$g$  ... gravitační zrychlení [ $m/s^2$ ]

$k$  ... propustnost porézního prostředí [ $m^2$ ]

---

<sup>3</sup> Valentová J., 2010: Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha, 19 s.

## 1.5. Transmisivita

Transmisivita označuje schopnost propouštět vodu porézním horninovým prostředím a využívá se při řešení úloh dvourozměrného proudění v kolektorech s napjatou hladinou. Rovnice transmisivity homogenního kolektoru (1.5.1) vypadá následovně:

$$(1.5.1) \quad T = Kb$$

Kde:  $T$  ... výsledná transmisivita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$K$  ... hydraulická vodivost [ $\text{m/s}$ ]

$b$  ... mocnost kolektoru [ $\text{m}$ ]

## 1.6. Specifická storativita

Storativita zvodně  $S$  je parametr určující schopnost nasyceného zvodnělého prostředí přijímat nebo uvolňovat určité množství vody, dána vztahem (1.6.1).

$$1.6.1 \quad S = S_s b$$

Kde:  $S$  ... výsledná storativita zvodně [-]

$S_s$  ... specifická storativita [ $\text{m}^{-1}$ ]

$b$  ... výška kolektoru [ $\text{m}$ ]

Ve skutečnosti máme 3 typy kolektorů: kolektor s volnou hladinou, napjatou hladinou a s přetékáním, které jsem popisoval v kapitole 1.1. Množství vody v kolektoru s volnou hladinou se mění v závislosti na výšce podzemní vody a dochází k vyplnění prázdných pórů vodou. Avšak v kolektoru s napjatou hladinou, který je ohraničen nepropustnými vrstvami, dojde ke změně objemu podzemní vody v důsledku stlačitelnosti porézního prostředí.

Na vodorovný řez kolektorem a jeho vodorovnou plochu působí napětí (1.6.2):

$$1.6.2 \quad \sigma = \sigma' + p$$

Vidíme, že celkové napětí  $\sigma$  je v rovnováze s napětím  $\sigma'$ , které má kladnou hodnotu při stlačení, a s tlakem vody  $p$ .



Uvažujme stlačitelnost vody v kolektoru. Tato stlačitelnost se blíží k nule, ovšem má důležitý význam v kolektorech s napjatou hladinou. Změna objemu vody při dané změně tlaku se projeví:

$$1.6.3 \quad \beta = \frac{-1}{V_w} \frac{dV_w}{dp}$$

Rovnicí (1.6.3) lze vypočítat koeficient stlačitelnosti vody  $\beta$  [ $\text{Pa}^{-1}$ ], který je zároveň závislý na teplotě a tlaku. Záporné znaménko ukazuje na zvýšení tlaku, které způsobí zmenšení objemu vody  $V_w$ .

V porézním prostředí je skladba pevných částic nepravidelná a při změně intergranulárního<sup>4</sup> napětí dojde k deformaci (VALENTOVÁ, 2010). Z toho vyplývá, že částice se pootočí nebo přemístí, a dojde tak ke změně pórovitosti, přičemž objem zůstává stejný. Koeficient stlačitelnosti zvodnělé vrstvy  $\alpha$  [ $\text{Pa}^{-1}$ ] je definován vztahem (1.6.4):

$$1.6.4 \quad \alpha = \frac{-1}{V_T} \frac{dV_T}{d\sigma_e}$$

Obdobně, jako u koeficientu stlačitelnosti vody (1.6.3), záporné znaménko označuje zvýšení tlaku,  $V_T$  celkový objem vzorku a  $\sigma_e$  efektivní napětí.

Na začátku kapitoly byla zmíněna storativita  $S$ , nyní definuji specifickou storativitu  $S_s$  včetně empirického vyjádření.

Specifická storativita  $S_s$  porézního prostředí je hodnota představující schopnost nasyceného porézního prostředí akumulovat určité množství vody a je definována jako objem vody, který se uvolní z jednotkového objemu zvodnělé vrstvy při jednotkovém snížení piezometrické výšky  $\Delta H$  (VALENTOVÁ, 2010); rovnice (1.6.5)

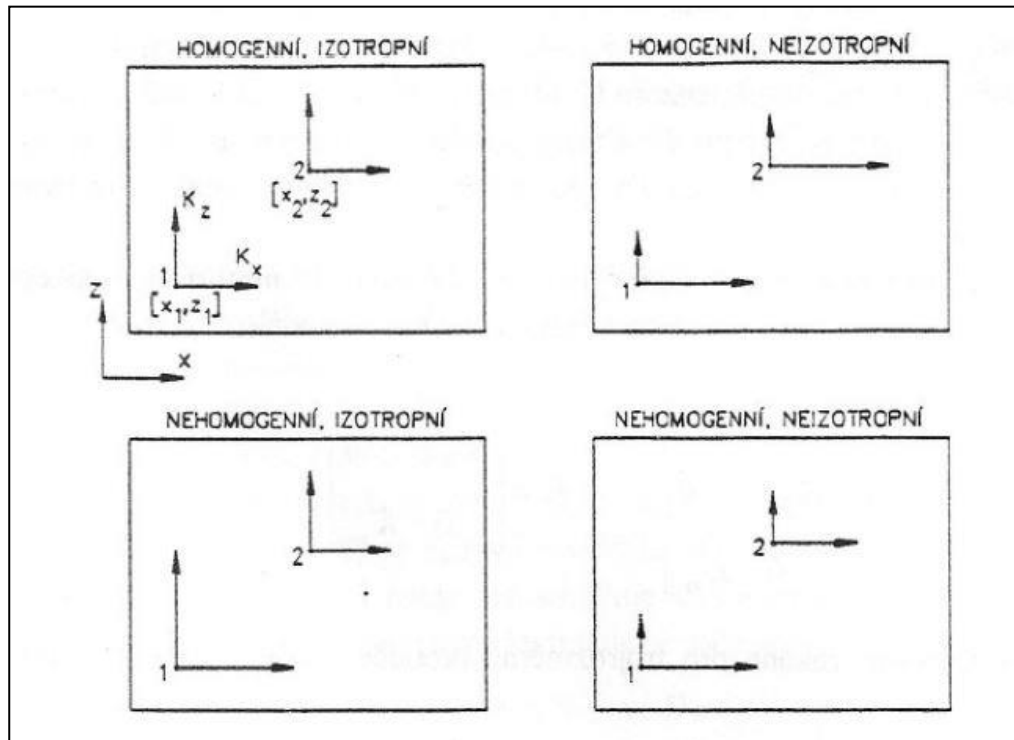
$$1.6.5 \quad S_s = \frac{\Delta V_v}{V \Delta H}$$

---

<sup>4</sup> styčné plochy mezi zrny

## 1.7. Homogenita a anizotropie půdního prostředí

Pokud budeme popisovat vlastnosti porézního prostředí, je zapotřebí stanovit izotropii a homogenitu. Ve skutečnosti mohou nastat 4 kombinace, které jsou uvedeny na obrázku č. 1, kde velikost šipek znázorňuje velikosti hydraulické vodivosti.



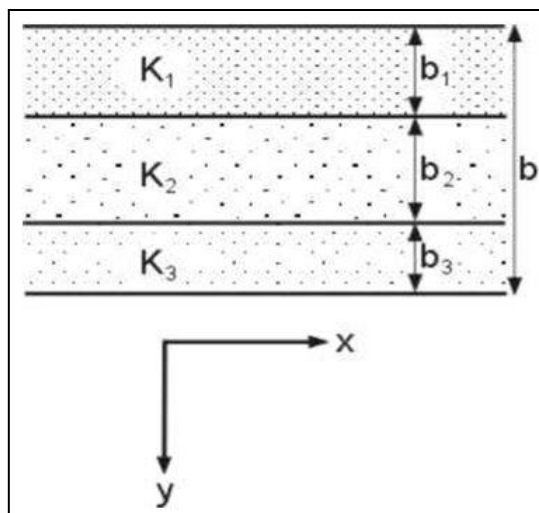
Obrázek č. 1 - Kombinace homogenity a izotropie (VALENTOVÁ, 2010)

Porézní prostředí je homogenní k dané vlastnosti, například k hydraulické vodivosti, kterou posuzujeme za podmínky, že je ve všech bodech stejná. Pokud se vlastnost mění v závislosti na poloze, mluvíme o heterogenním prostředí (VALENTOVÁ, 2010); znázorněné na obrázku č. 2.

V geologickém prostředí rozlišujeme 2 druhy nehomogenity:

### 1. Nehomogenitu s postupnou změnou hydraulické vodivosti.

V tomto případě dochází ke změně hydraulické vodivosti postupně na základně měnících se vrstvách zeminy, a lze ji vyjádřit pomocí prostorových souřadnic  $K = K(x, y, z)$ .



Obrázek č. 2 – možné schéma heterogenního prostředí (MLS, 1988)

## 2. Nehomogenitu s náhlou změnou hydraulické vodivosti.

Prostředí tohoto typu obsahuje podoblasti, které jsou homogenní, avšak na hranicích těchto oblastí dochází ke skokové změně hydraulické vodivosti. Jako příklad mohu uvést písčité vrstvy, které střídají jílovité vrstvy zeminy.

Homogenní prostředí v přírodě je nemožné najít, protože nesplňuje podmínky homogenního prostředí - pozorovaná vlastnost musí zůstat stejná ve všech bodech, a zároveň pozorované hodnoty musí vykazovat prostorovou variabilitu (VALENTOVÁ, 2010).

### 1.8. Izotropní a anizotropní prostředí

U izotropního prostředí jsou pozorované vlastnosti nezávislé na směru v uvažovaném prostředí. Avšak u anizotropního prostředí je tomu naopak – vlastnosti jsou závislé na směru v uvažovaném prostředí.

Vzhledem k hydraulické vodivosti je anizotropie vyvolána strukturou porézního materiálu, která způsobuje zvýšenou propustnost vody (VALENTOVÁ, 2010). Uvažujme zvoděň, která obsahuje sedimenty. Proces vlastní sedimentace s tlakem horních vrstev v této zvodni způsobí, že částice se uloží svým delším rozměrem rovnoběžně s podložím. Výsledkem tohoto procesu je vyšší hydraulická vodivost ve směru uložených částic.

Pokud budeme měřit hydraulickou vodivost v neizotropním prostředí a v daném bodě, bude hydraulická vodivost funkcí úhlu svírajícího vodorovnou osu se směrem měření. Dále můžeme popsat hydraulickou vodivost pomocí rovnic zobecněného vektoru hydraulické vodivosti  $K$  (1.8.1):

$$1.8.1 \quad K1 = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yz} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad K2 = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix}$$

Pro trojrozměrný případ platí první zápis  $K1$ , kde potřebujeme znát 6 složek tenzoru pro úplný popis hydraulické vodivosti v prostoru. Řešení v rovině znázorňuje druhý zápis  $K2$ , kde potřebujeme znát 3 složky. Tenzory hydraulické vodivosti jsou na sebe symetrické  $K_{xy} = K_{yx}$ ,  $K_{xz} = K_{zx}$ ,  $K_{yz} = K_{zy}$  a význam těchto indexů je následující: například složka  $K_{xy}$  udává příspěvek k hustotě toku  $V_v$ , který je vyvolaný ve směru  $x$  v jednotkovém hydraulickém gradientu ve směru osy  $y$  (VALENTOVÁ, 2010).

## 2. Proudění vody v porézním prostředí

Proudící voda v porézním prostředí překonává odpor prostředí, který je způsobený třecími silami mezi pevnými částicemi a vodou – jedná se o mechanický proces. Z učebnic fyziky víme, že při tomto procesu se mění mechanická energie na tepelnou a proudění probíhá z místa s vyšší mechanickou energií do místa s nižší energií (ROUBÍK a SEDLÁČEK, 2012). K pohybu vody dochází za předpokladu rozdílné hodnoty hydraulické výšky mezi dvěma body.

### 2.1. Darcyho zákon

Henri Darcy roku 1856 stanovil zákon pro laminární režim proudění vody v porézním prostředí. Při pokusech pracoval s několika druhy písku, které plnil do válců různé délky a průměru, a dospěl k tomuto závěru: „Pro daný materiál je průtok vody vzorkem porézního prostředí přímo úměrný rozdílu potenciálů na koncích vzorku a nepřímo úměrný délce vzorku.“<sup>5</sup>

Matematické vyjádření Darcyho zákona (2.1.1) má tvar:

$$2.1.1 \quad Q = KS(H_1 - H_2)/L$$

Kde:  $Q$  ... výsledný průtok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$K$  ... hydraulická vodivost [ $\text{m/s}$ ]

$H_1 - H_2$  ... rozdíl piezometrických výšek [ $\text{m}$ ]

$L$  ... délka sloupce [ $\text{m}$ ]

$S$  ... plocha průtočného průřezu [ $\text{m}^2$ ]

### 2.2. Zobecnění Darcyho zákona

Do válce s porézním materiálem zavedeme souřadnicový systém s kladným směrem rychlosti proudění v ose  $x$  a na základě definice rychlosti proudění získáme rovnici (2.2.1):

$$2.2.1 \quad v = -K \frac{H_1 - H_2}{L} = -K \frac{\Delta H}{\Delta l}$$

---

<sup>5</sup>MLS, J., 1988: Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha, 26 s.

Kde  $v$ , hustota toku je označována jako Darcyho rychlost, má rozměr  $[LT^{-1}]$  a můžeme ji vyjádřit též v diferenciální formě (2.2.2).

$$2.2.2 \quad v = -K \frac{dH}{dl}$$

Poměr  $dH/dl$  vyjadřuje gradient hydraulické výšky. Hodnota hydraulické výšky  $H$  a  $l$  se mění lineárně za předpokladu, že hydraulická vodivost a specifický průtok jsou konstanty.

Pro trojrozměrné proudění platí vztah (2.2.3):

$$2.2.3 \quad \begin{aligned} v_x &= -K \frac{\partial H}{\partial x} \\ v_y &= -K \frac{\partial H}{\partial y} \\ v_z &= -K \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned}$$

Kde vektor  $v$ , je vektor rychlosti se složkami  $v_x$ ,  $v_y$  a  $v_z$  ve směru souřadnicových os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Ale již zde v homogenním prostředí hydraulická vodivost přechází na konstantu  $K(x, y, z)$  (VALENTOVÁ, 2010).

### 2.3. Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon, viz kapitola 2.1, vyjadřuje lineární závislost hustoty toku na hydraulickém gradientu, která nemá platnost pro celou oblast mezi nulou a nekonečnem, ale je omezena na dolní a horní limitní hodnotou.

V mechanice kapalin kritériem pro rozlišení laminárního a turbulentního režimu proudění je tzv. Reynoldsovo číslo  $Re$ . Jedná se o bezrozměrné číslo, které vyjadřuje poměr mezi setrvačnou a vazkou silou působící na proudící kapalinu, a udává hodnoty změny laminárního na turbulentní proudění. Zjistíme ho z rovnice (2.3.1):

$$2.3.1 \quad Re = \frac{vD}{\nu}$$

Kde:  $Re$  ... výsledné Reynoldsovo číslo [-]

$D$  ... střední průměr pórů [m]

$\nu$  ... kinematická viskozita [m<sup>2</sup>/s]

$v$  ... rychlost proudění [m/s]

Zde uvádím kritické hodnoty Reynoldsova čísla (BEAR, 1979):

*0 až 10 laminární proudění*

*10 až 100 přechodná oblast*

*> 100 turbulentní proudění*

Pokud dosadíme hodnoty  $Re=1$ , rychlost  $v=0,25 \text{ cm/s}$  a  $K=1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  do rovnice (2.3.1), které znázorňují nejpřísnější hranici Reynoldsova čísla (MLS, 1988), vyjde nám podmínka platnosti Darcyho zákona (2.3.2):

$$2.3.2 \quad d \leq 5,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Hodnota ve vztahu (2.3.2) odpovídá hodnotě hrubého písku a je nepravděpodobné, že by mohlo dojít k překročení hranic platnosti Darcyho zákona v přírodních zeminách. Avšak výjimky se vyskytují, především v hrubozrnných materiálech, štěrcích a v horninovém prostředí s puklinami (MLS, 1988).

## 2.4. Prelineární proudění

Prelineární proudění probíhá v jemnozrnných materiálech, především v jílu a písku. V tomto prostředí nastane proudění vody při překročení minimální hodnoty hydraulického gradientu vyjádřeného rovnicí (2.4.1).

$$2.4.1 \quad H_0 = \frac{h_1 - h_2}{\Delta l}$$

Poslední neodmyslitelnou součástí při určování rychlosti proudění v prelineární oblasti je Swartzendruberova rovnice (2.4.2) znázorňující závislost rychlosti proudění na hydraulickém gradientu (VALENTOVÁ, 2010).

$$2.4.2 \quad v = K \left( H - \frac{4}{3} H_0 + \exp(\omega H) \right), \text{ kde } \omega = \frac{1}{H_0} \ln \frac{H_0}{3}$$

## 2.5. Postlineární proudění

Při zvyšující se rychlosti proudění, kde  $Re$  je v rozmezí 10 až 100, začínají převažovat síly inerciální nad silami viskózními. V postlineární oblasti dochází převážně k turbulentnímu proudění v pórech, které je zapříčiněno snižující se rychlostí při rostoucím hydraulickém gradientu. V odborné literatuře nalezneme

nespočet vzorců a vztahů, které popisují závislosti při postlineárním proudění; například od autora Jacoba Beara, jenž vztah (2.5.1) publikoval roku 1979.

$$2.5.1 \quad grad\phi = A|v| + B|v|^2$$

Kde  $A$  a  $B$  jsou konstanty. Tento vzorec sdružuje lineární a nelineární zákon proudění a lze zanedbat členy  $B v^2$  pro jejich nízké hodnoty. Rovnice poté přechází na Darcyho zákon (VALENTOVÁ, 2010), kde platí (2.5.2):

$$2.5.2 \quad A = \frac{1}{K}$$

Podobně založený typ vztahu (2.5.3) nalezneme u Kozeného-Carmana, kde  $\alpha$  a  $\beta$  označují tvarové faktory,  $n$  pórovitost,  $\nu$  kinematickou viskozitu,  $d$  průměr zrna a  $g$  gravitační potenciál.

$$2.5.3 \quad grad\phi = 180\alpha \frac{(l-n)^2\nu}{gn^3d^2} v + \frac{3\beta(l-n)}{4gn^3d} v^2$$

## 2.6. Rovnice kontinuity

Jedná se o základní rovnici hydrodynamiky, která vyjadřuje zákon zachování hmotnosti, kde množství akumulované vody za čas  $\Delta t$ , se rovná množství vody přiteklé mínus množství vody vyteklé za stejný časový interval.

Pro rovnoměrné proudění se skutečnou kapalinou platí rovnice (2.6.1):

$$2.6.1 \quad Q = \rho_1 S_1 v_1 = q_x S_x v_x = konst.$$

a pro nestlačitelnou kapalinu (2.6.2):

$$2.6.2 \quad Q = S_1 v_1 = S_2 v_2$$

Zákon kontinuity dále stanovuje hmotnost přitékající vody do elementárního rovnoběžnostěnu znázorněného na obrázku č. 3. Hmotnost přiteklé vody se rovná hmotnosti vody, která opustí uvažovaný elementární rovnoběžnostěn bez ztrát, vyjádřené vztahem (2.6.3).

$$2.6.3 \quad -\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0$$

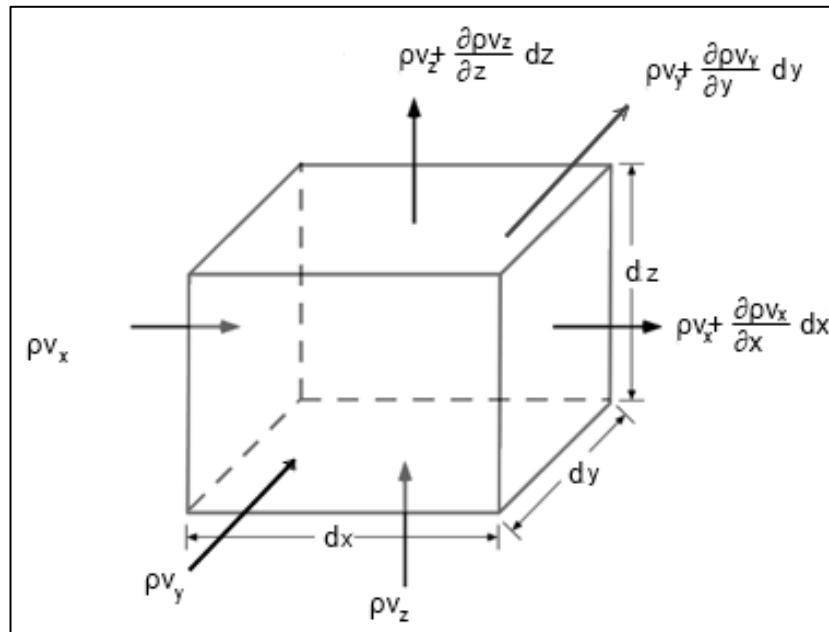
Kde  $v_x$ ,  $v_y$  a  $v_z$  znázorňují složky rychlosti proudění a  $\rho$  hustotu kapaliny. Jedná-li se o nestlačitelnou kapalinu, přejde funkce  $\rho(x, y, z)$  na konstantu. Poté můžeme vztah (2.6.3) upravit do zjednodušené rovnice (2.6.4).



$$2.6.4 \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Základní předpoklady rovnice kontinuity pro porézní prostředí jsou následující: (HÁLEK a ŠVEC, 1973)

1. platí zákon zachování hmoty
2. a jedná se o plně nasycenou zvodnělou vrstvu.



Obrázek č. 3 – Znáornění elementárního rovnoběžnostěnu (FREEZE a CHERRY, 1979)

## 2.7. Dupuitovy postuláty

Jules Dupuit roku 1863 publikuje svá řešení proudění ve zvodni s volnou hladinou, které zakládá na postulátech – znázorněné na obrázku č. 4. Ve většině případů lze směr proudění pokládat za horizontální a můžeme ho vyjádřit vztahem (2.7.1), kde hydraulická výška  $H(x, y, z)$  je rovna výšce podzemní vody  $h(x, y)$ , a proudnice jsou vodorovné přímky a ekvipotenciály<sup>6</sup> svislice (VALENTOVÁ, 2010).

$$2.7.1 \quad \frac{dH}{dx}(x, y, z) = \frac{dh}{dx}(x, y)$$

Při aplikaci Dupuitových postulátů do homogenní izotropní vrstvy s volnou hladinou a vodorovným nepropustným podložím získáme rovnici (2.7.2), která popisuje proudění ve směru osy  $x$ .

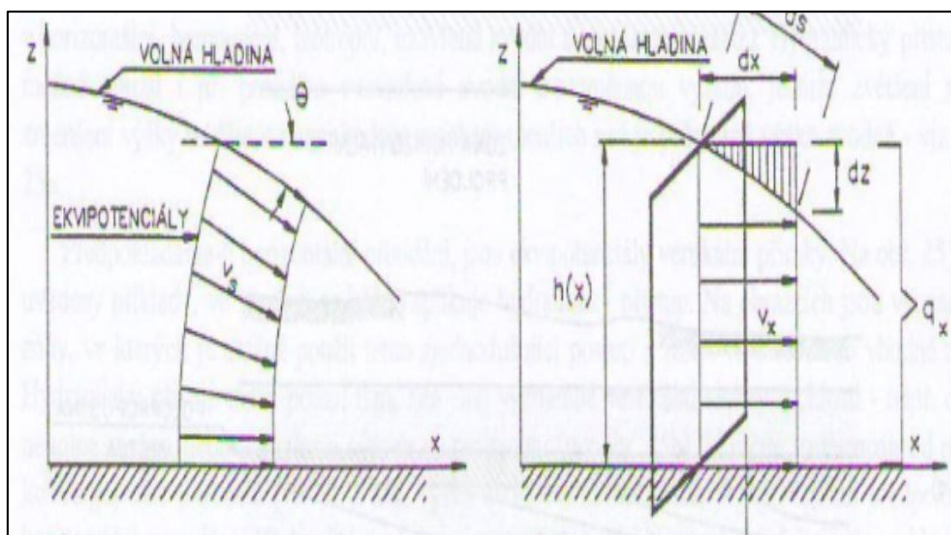
<sup>6</sup> Křivky kolmé na proudnice.

$$2.7.2 \quad \frac{d^2 h^2(x)}{dx^2} = 0$$

V případech stacionárního proudění ve zvodni s volnou hladinou má vektor hustoty toku  $v_s$  tečný směr na proudnici (hladinu). Gradient potenciálu je dán sklonem volné hladiny a je po svislici konstantní. Hodnoty vyjádříme rovnicí (2.7.3), kde úhel  $\sin \theta$  svírá tečnu k hladině s vodorovným směrem.

$$2.7.3 \quad v_s = -K \sin \theta$$

Dupuit vycházel z předpokladu malé hodnoty  $\sin \theta$ , který nahradil sklonem hladiny  $\operatorname{tg} \theta = dh/dx$ . Tím pádem hydraulická výška není funkcí vertikálních souřadnic  $z$ , a ekvipotenciály se stávají svislicí. Postupným zaváděním Dupuitových postulátů se snižují hodnoty vertikálních souřadnic  $z$  a vertikální rychlosti.



Obrázek č. 4 – Znárodnění Dupuitových postulátů (VALENTOVÁ, 2010)

### 3. Hydrodynamické zkoušky

Jedná se o metody pro stanovení hydraulických charakteristik na vrtu, studni nebo šachtě, které se určují pozorováním účinku hydrodynamického zásahu do soustavy těchto kolektorů (JETEL, 1982).

Základní hydrodynamické zkoušky dělíme do těchto skupin:

**1. Čerpací zkouška** - ve zkušebním objektu dochází ke konstantnímu odebírání množství vody, a zároveň pozorujeme pokles hladiny a tlaku zvodnělé vrstvy. Dále lze sledovat konstantní snížení nebo proměnlivost přítoku do objektu.

**2. Odběrové zkoušky** - v objektu dochází k odběru kapaliny konstantně, nebo proměnlivě.

**3. Stoupací zkoušky** - u této zkoušky pozorujeme vzestup hladiny a vývoj tlakových poměrů po zastavení odběru.

**4. Přítokové zkoušky** - při této zkoušce dochází k přítoku podzemní vody do objektu.

**5. Diferenční zkoušky** - zkouška sleduje změny hladiny a tlaku při konstantním odběru po změnách odebíraného množství kapaliny.

**6. Trubkové zkoušky** - jedná se o testovací zařízení, které je na vrtných trubkách zapuštěno do pozorovaného vrtu.

**7. Nálevové zkoušky** - touto zkouškou pozorujeme závislosti hladin v pozorovacích objektech a množství vody, které přiteče do objektu.

**8. Vtlačovací zkoušky** - v objektu pozorujeme závislosti tlaku na základě vtlačované kapaliny přetlakem.

Dále, pro účel této práce, uvedu nejběžněji používané zkoušky v praxi.

#### 3.1. Čerpací zkouška

Definice čerpací zkoušky je obsažena v kapitole 3. Na základě režimu proudění k pozorovanému objektu dělíme čerpací zkoušku na:

**Ustálený režim čerpací zkoušky** – řadí se mezi nejjednodušší způsob vyhodnocení, který vychází z Dupuitových předpokladů. Během zkoušky dochází ke konstantnímu odebírání vody a v okolí vrtu nastává ustálený režim proudění (JETEL, 1982). Hodnotu transmisivity můžeme stanovit rovnicí pro proudění podzemní vody k vrtu s napjatou hladinou (3.1.1).

$$3.1.1 \quad T = \frac{Q}{2\pi s_v} \ln \frac{r_d}{r_v}$$

Kde:  $Q$  ... čerpané množství [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$r_d$  ... dosah deprese vyvolané odběrem ze zvodně [m]

$r_v$  ... poloměr hydrologicky dokonalého vrtu [m]

$s_v$  ... snížení na vrtu [m]

Pokud řešíme vrt s volnou hladinou, použijeme rovnici (3.1.2)

$$3.1.2 \quad H^2 - h_v^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r_v}$$

Kde:  $Q$  ... čerpané množství [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$K$  ... hydraulická vodivost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$R$  ... poloměr dosahu depresního kužele [m]

$r_v$  ... aktivní poloměr studny [m]

$H$  ... mocnost zvodnělé vrstvy [m]

$h_v$  ... výška vody ve studni [m]

**Neustálený režim čerpací zkoušky** – stejně jako při ustáleném režimu čerpací zkoušky je čerpáno konstantní množství podzemní vody. Na objektu pozorujeme pokles hladiny, který v daných časových intervalech zaznamenáváme, a pokud je vyžadováno stanovení storativity, zaznamenáme i snížení na pozorovacím vrtu.

### 3.2. Odběrové zkoušky

Během odběrové zkoušky dochází ke konstantnímu snížení hladiny, kde zaznamenáváme časový průběh odebíraného průtoku (JETEL, 1982). Závislost snížení na časovém průběhu je vyjádřena Jacob – Lohmanovou rovnicí (3.2.1)

$$3.2.1 \quad Q = 2\pi T s_v G(\lambda)$$

Kde:  $T$  ... koeficient průtočnosti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$s_v$  ... konstantní snížení hladiny ve vrtu [m]

$G(\lambda)$  ... Jacobova-Lohmanova studňová funkce

### 3.3. Stoupací zkouška

Při průběhu stoupací zkoušky dojde k přerušení konstantního čerpání ve vrtu a hladina začne stoupat. Ve stanoveném časovém intervalu z vrtu odčerpáme určité množství vody a následným přerušením čerpání bude hladina ve vrtu stoupat stejně, jako kdyby pokračovalo čerpání vody, a zároveň do vrtu z povrchu přitékala stejná vydatnost čerpaného množství.

Vyhodnocením průběhu stoupaní hladiny se zajímal hydrolog C. V. Theis, který roku 1935 definoval metodu superpozice. Metodou superpozice můžeme také určit zbytkové snížení během stoupací zkoušky, jako součet snížení pokračovaného čerpání a záporného snížení na imaginárním vsakovacím vrtu (CHARBENEAU, 2006), nebo také použitím Theisovy rovnice (3.3.1) pro zbytkové snížení stoupací zkoušky.

$$3.3.1 \quad s^* = s + s_{st}$$

Kde:  $s^*$  ... výsledné snížení na vrtu [m]

$s$  ... snížení z probíhající čerpací zkoušky [m]

$s_{st}$  ... vzestup hladiny během stoupací zkoušky [m]

Pro imaginární vsakovací vrt, nebo-li stoupací zkoušku platí rovnice (3.4.2), která vychází z Theisovy studňové funkce (PECH, 2010).

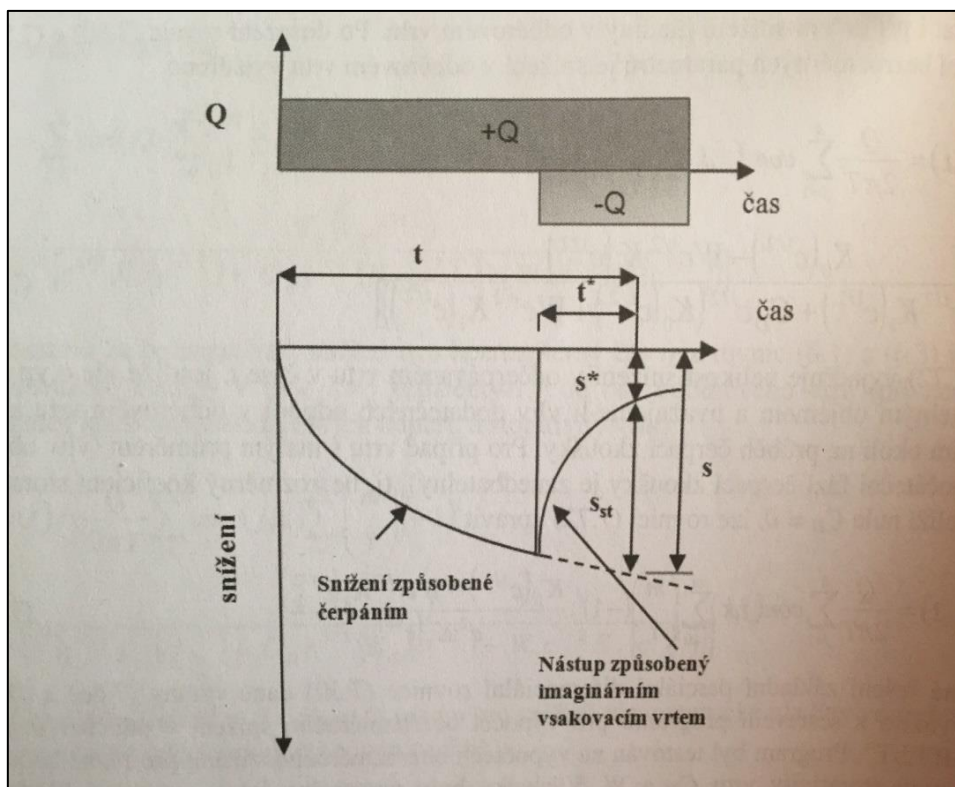
$$3.3.2 \quad u_{st} = \frac{r^2 S'}{4Tt^*}$$

Kde:  $r$  ... radiální vzdálenost od osy odčerpávaného vrtu [m]

$S'$  ... storativita stanovená ze stoupací zkoušky [-]

$T$  ... koeficient transmisivity [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$t^*$  ... měřený čas od zastavení čerpání [t]



Obrázek č. 5 – Průběh stoupací zkoušky (PECH, 2010)

### 3.4. Trubková zkouška

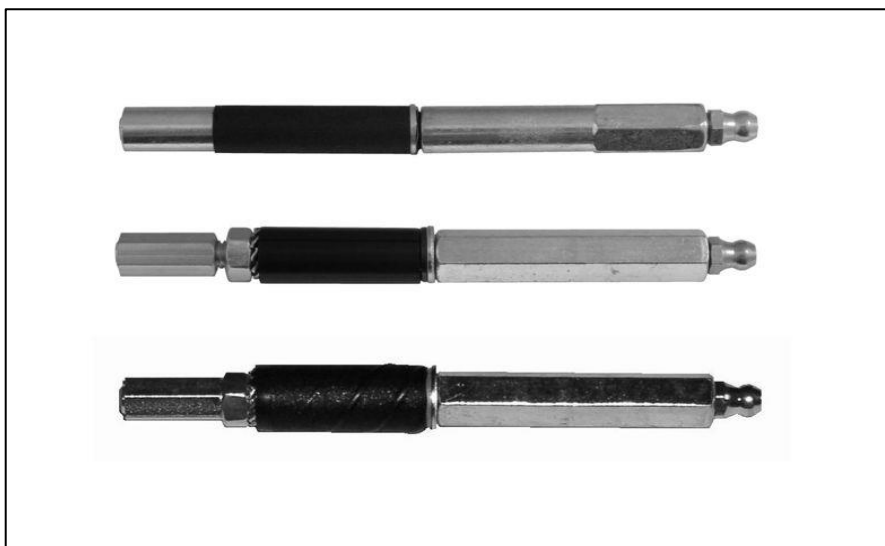
U trubkové zkoušky (drill stem test) využíváme tzv. testeru a princip je následující: přerušíme hloubení vrtu, izolujeme nezapažený úsek, který se odlehčí od tlaku výplachu sloupce a následně dochází k přítoku ze zkoušeného kolektoru.

Různé druhy testerů můžeme vidět na obrázku č. 6 a skládají se z těchto částí:

*gumový pakr* – zapuštěný do izolovaného úseku vrtu,

*přítoková záklopka* – regulace přítoku,

*vyrovnávací záklopka* – regulace tlaku.



Obrázek č. 6 – Druhy testerů používaných při trubkové zkoušce.<sup>7</sup>

Gumový pakr se zapustí do stěn pažnic a otevřením vyrovnávací záklopy dochází k vyrovnání tlaku uvnitř pakru s tlakem atmosférickým. V tomto případě uvažujeme rozdílné hodnoty mezi tlakem atmosférickým a v kolektoru, které vyvolají přítok kapaliny přes tester do vrtných trubek. Tato **1. fáze počátečního přítoku** trvá přibližně 5 až 10 minut (JETEL, 1982).

Následuje **2. fáze – počáteční vzestup tlaku**, u kterého dochází k uzavření přítokové klapky a měří se vývoj tlaku po dobu 30 až 60 minut (JETEL, 1982). Výsledná hodnota naměřená na konci fáze odpovídá úrovni tlaku v kolektoru; jedná se o počáteční tlak v uzavřeném vrtu.

**3. fáze – hlavní přítok**, následuje po překročení hodnoty počátečního tlaku v uzavřeném vrtu a otevře se přítoková záklopka (zaznamenáme počáteční tlak přítoku), která umožní opětovný přítok kolektorové kapaliny do vrtu. Fáze má trvání 60 až 120 minut (JETEL, 1982).

Konečnou fází – **závěrečný vzestup tlaku** se přeruší přítok kapaliny (zaznamenáme koncový tlak přítoku) uzavřením přítokové záklopy a pozorujeme vývoj tlaku minimálně 30 minut; koncový tlak ve vrtu zaznamenáme.

Po skončení měření dochází k otevření vyrovnávací klapky. Tester se opatrně vyjme na povrch společně s obsahem vzorku kolektorové kapaliny.

<sup>7</sup> Vorek, A, 2008 a): Injektážní pakry (online) [cit. 2017.03.02.], dostupné z <  
<http://www.vorek.cz/produkty-spolecnosti/injektazni-pakry/specialni-typy-pakru/jednodenni-pakry/pakr-opk-dv/>>

### 3.5. Expresní zkouška – metoda jednorázového nálevu

Na základě aproximace Theisovy křivky stoupací zkoušky navrhli Ferris – Knowles metodu jednorázového nálevu, kterou znázorňuje rovnice (3.5.1). Při svém pokusu vpustili určitý objem vody  $V$  do soustavy vrtu a následně měřili pokles hladiny v závislosti na čase.

$$3.5.1 \quad V = \pi r_0^2 s_0$$

Kde:  $V$  ... nálev objemu do soustavy vrtu [ $\text{m}^3$ ]

$r_0^2$  ... vnitřní poloměr vrtu [m]

$s_0$  ... zvýšení hladiny dodáním určitého objemu kapaliny [ $\text{m}^2$ ]



## 4. Proudění podzemní vody k vrtu

### 4.1. Neustálené rotačně symetrické proudění k ideálnímu vrtu

Při řešení neustáleného proudění k (ideálnímu vrtu)<sup>8</sup>, pro účel této práce, budeme předpokládat horizontální proudění vody, které probíhá zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou. Uvažovaná zvodnělá vrstva je ohraničena shora i zdola nepropustnou vrstvou s konstantní vzdáleností (PECH, 2010).

V průběhu 20. století se problémem zabýval Theis, jenž definuje rovnici (4.1.1) v cylindrických souřadnicích pro neustálené proudění k hydraulicky dokonalému vrtu.

$$4.1.1 \quad \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S \partial s}{T \partial t}$$

Při řešení rovnice (4.1.1) vycházel z následujících předpokladů (THEIS, 1935):

1. Výška zvodnělé vrstvy je konstantní v celé řešené oblasti,
2. jedná se o nestlačitelnou kapalinu,
3. zvodnělá vrstva je izotropní a homogenní,
4. transmisivita a storativita jsou v řešené oblasti v čase i prostoru konstantní,
5. Darcyho zákon pro filtrační rychlost platí po celou dobu čerpací zkoušky,
6. jde o ideální vrt,
7. čerpané množství vody z vrtu je konstantní.

Neustálené rotačně symetrické proudění prochází všemi osami symetrie, kde toto proudění je konstantní. Pro představu mohu uvést přítok podzemní vody do studny, kde studna je osou symetrie.

K popisu proudění slouží válcová soustava souřadnic neboli cylindrické souřadnice. V proudové oblasti zavádíme svislou osu do symetrie proudění a polární souřadnice poté určí polohu bodu ve vodorovné rovině.

---

<sup>8</sup> Na vrt a v jeho blízkém okolí nepůsobí žádné dodatečné odpory.

## 4.2. Theisova metoda typové křivky

Theisova metoda typové křivky se zabývá stanovením storativity a transmisivity z hodnot čerpací zkoušky za neustáleného proudění. K vyhodnocení používáme základní rovnici ke stanovení hodnot přítokových zkoušek (4.2.1).

$$4.2.1 \quad s = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

Kde:  $s$  ... výsledné snížení [m]

$W(u)$  ... Theisova studňová funkce

$Q$  ... čerpané množství vody [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$T$  ... transmisivita [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

Vyjádření Theisovy studňové funkce můžeme zapsat rovnicí (4.2.2).

$$4.2.2 \quad W(u) = -0,577216 - \ln u + \sum_n^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^n}{n!n} \quad n = 1,2,3$$

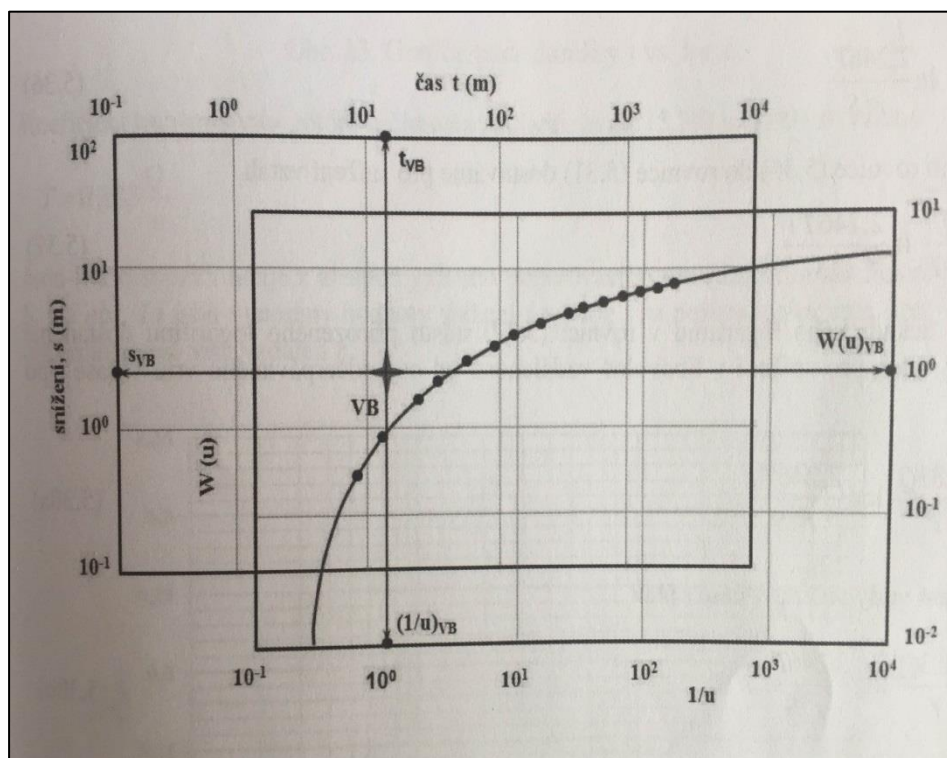
Získané hodnoty z čerpací zkoušky, kde dochází ke snížení vody ve vrtu v závislosti na čase, vynášíme v oddělených grafech se stejným logaritmickým měřítkem. Tato metoda je znázorněna na obrázku č. 7. Poté s grafem pracujeme následovně: křivku, kterou jsme získali z čerpací zkoušky, posuneme po Theisově typové křivce. Dosáhnutím shody zvolíme libovolný vztažný bod - označíme ho  $VB$ . Tento vztažný bod slouží k odečítání hodnot v grafu:  $(1/u)_{vb}$ ,  $s_{vb}$ ,  $t_{vb}$ , a  $W(u)_{vb}$  (THEIS, 1935).

Závěrečným jednoduchým dosazením odečtených hodnot  $W(u)_{VB}$  a  $s_{VB}$  stanovíme rovnici pro koeficient transmisivity (4.2.3).

$$4.2.3 \quad T = \frac{Q}{4\pi s_{VB}} W(u)_{VB}$$

Obdobně vypadá rovnice (4.2.4) pro stanovení hodnot storativity, do které dosazujeme odečtené hodnoty  $(1/u)_{VB}$  a  $t_{VB}$ .

$$4.2.4 \quad S = \frac{4T u_{VB} t_{VB}}{r^2}$$



Obrázek č. 7 – Theisova metoda typové křivky (PECH, 2010)

### 4.3. Jacobova semilogaritmická metoda přímky

Semilogaritmická aproximace studňové funkce, podle Jacoba z roku 1946, vychází ze zjednodušené rovnice Theisovy studňové funkce  $W(u)$ . Jacob při zjednodušení rovnice zanedbával členy pravé strany, kromě prvních dvou, na základě tohoto argumentu: hodnoty  $1/u$  větších než 100 s chybou menší než 0,25 % (PECH, 2010). Předpis studňové funkce můžeme poté vyjádřit vztahem (4.3.1)

$$4.3.1 \quad W(u) \approx -0,577216 - \ln(u)$$

Dosažením za argument Theisovy studňové funkce  $u$ , lze po úpravě vyjádřit výsledný tvar (4.3.2):

$$4.3.2 \quad W(u) \approx \ln \frac{2,246Tt}{r^2S}$$

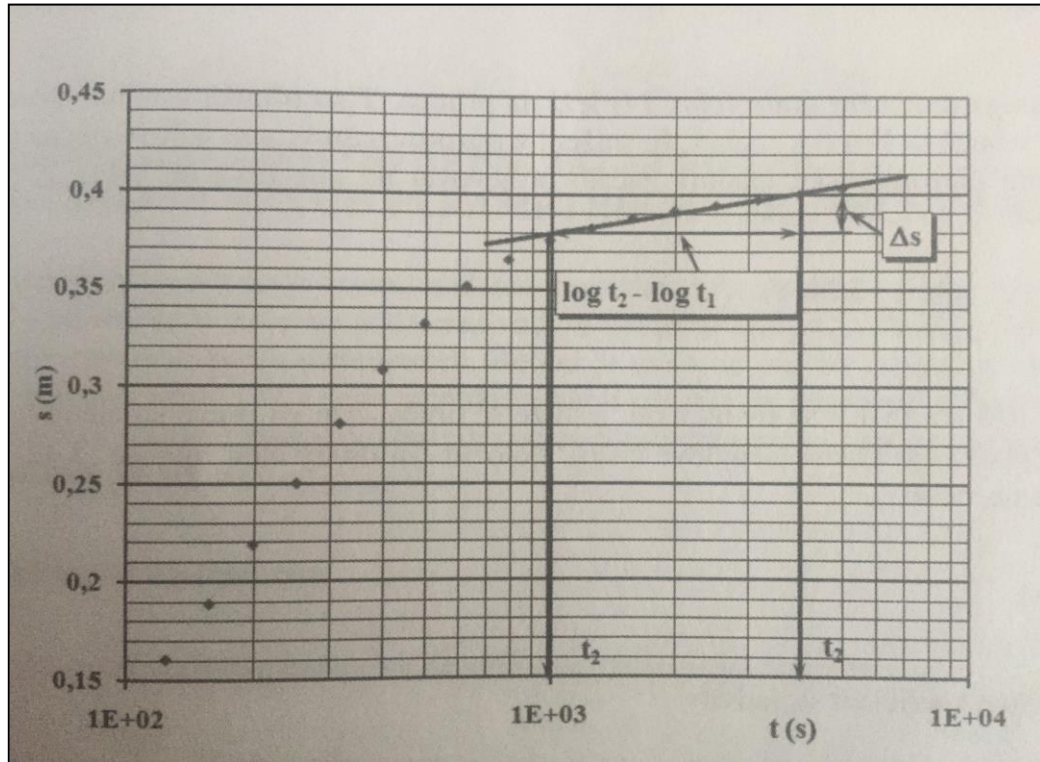
Při vynášení křivky čerpací zkoušky záleží na délce časového úseku, který můžeme vidět na obrázku č. 8. Při delších časových úsecích křivka přechází do přímky se sklonem, který určíme pomocí rovnice (4.3.3).

$$4.3.3 \quad i = (s_2 - s_1) / (\log t_2 - \log t_1)$$

Kde:  $i$  ... výsledný sklon přímky [-]

$s_1, s_2$  ... snížení na vrtu [m]

$\log t_1, \log t_2$  ... logaritmus časového úseku [t]



Obrázek č. 8 – Graf čerpací zkoušky (PECH, 2010)

Výslednou hodnotu  $i$  z rovnice (4.3.3) dosadíme do podílu rovnice pro výpočet koeficientu transmisivity (4.3.4) Jacobovou semilogaritmickou metodou přímky.

$$4.3.4 \quad T = 0,183 \frac{Q}{i}$$

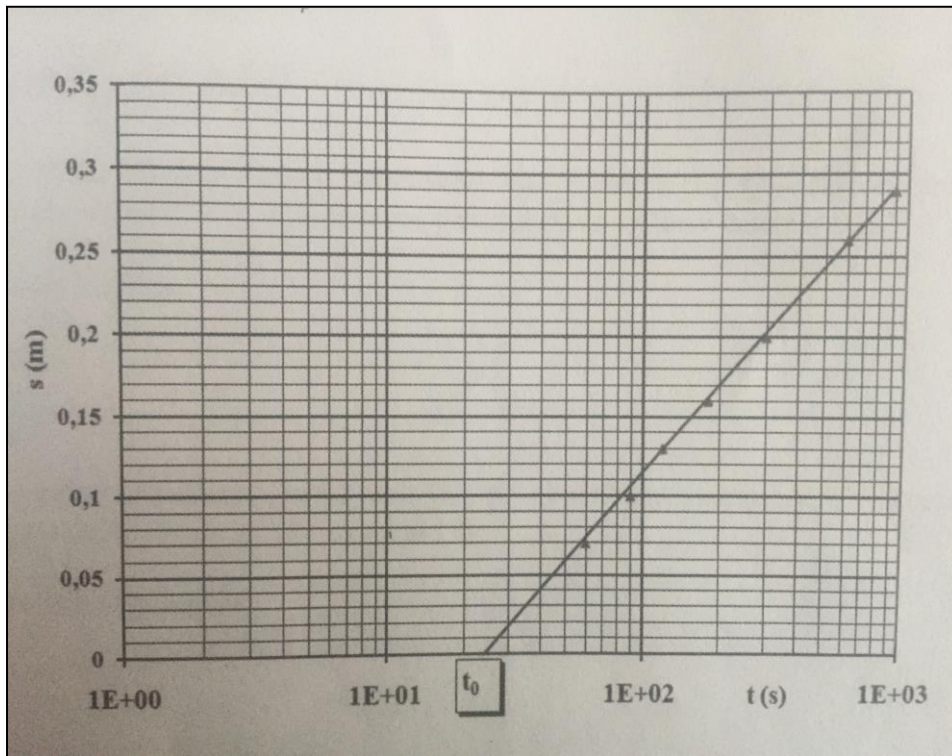
Kde:  $T$  ... koeficient transmisivity [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$Q$  ... čerpané množství [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$i$  ... sklon [-]

Stanovení storativity Jacobovou metodou je možné na základě známých hodnot snížení hladiny v čase  $t$ , které jsou vyneseny v grafu na obrázku č. 9 čerpací zkoušky na pozorovacím vrtu. V grafu: osa x určuje snížení a osa y logaritmus času. Pokud dále budeme pozorovat semilogaritmický graf, zjistíme, že body leží na přímce a tato přímka protíná vodorovnou časovou osu v bodě  $t_0$ , kde snížení hladiny

v pozorovacím vrtu je nulové. Z toho plyne, že se jedná o začátek snížení, projevené na pozorovacím vrtu.



Obrázek č. 9 – Graf čerpací zkoušky, pozorovací vrt (PECH, 2010)

Rovnice pro výpočet koeficientu storativity (4.3.5) má následující tvar:

$$4.3.5 \quad S = 2,246 \frac{Tt_0}{r^2}$$

Kde:  $S$  ... výsledná storativita [-]

$t_0$  ... čas průsečíku extrapolované přímky [t]

$r$  ... vzdálenost pozorovacího vrtu od osy odběrového vrtu [m]

$T$  ... koeficient transmisivity [ $m^2/s$ ]

## 5. Vyhodnocení hydraulických parametrů z dat čerpací zkoušky

### 5.1. Popis zájmové lokality a horninového prostředí

Pro účely této bakalářské práce jsem zvolil k vyhodnocení dva vrty, které jsou podrobněji popsány v hydrogeologické dokumentaci (příloha č. 1 a 2). Vrtý mají pracovní označení B3 a B6, a u každého byly vyhodnoceny údaje před a po regeneraci. Nacházejí se na území Srbska, v okrese Vojvodina, u města Bela Crvka s počtem 8 tisíc obyvatel (mapová příloha č. 3). Oba vrty slouží k zásobování pitnou vodou a mají shodnou hloubku 120 metrů.

Geologické složení jednotlivých vrtů se liší minimálně, zde uvádím podrobný popis vrtu B3:

*0 až 40 m – hlína,*

*40 až 53 m – písek hlinitý,*

*53 až 60,5 m – písek hlinitý, příměs štěrku,*

*60,5 až 79 m – písek jemně zrnitý,*

*79 až 110,5 m – písek dobře zrněný,*

*110,5 až 120 m – hlína.*

A podrobný popis vrtu B6:

*0 až 48 m – hlína,*

*48 až 58 m – štěrk písčité,*

*58 až 80 m – písek hlinitý s příměsí štěrku,*

*80 až 93 m – písek jemně zrnitý,*

*93 až 98 m – písek jílovitý,*

*98 až 110 m – písek dobře zrněný,*

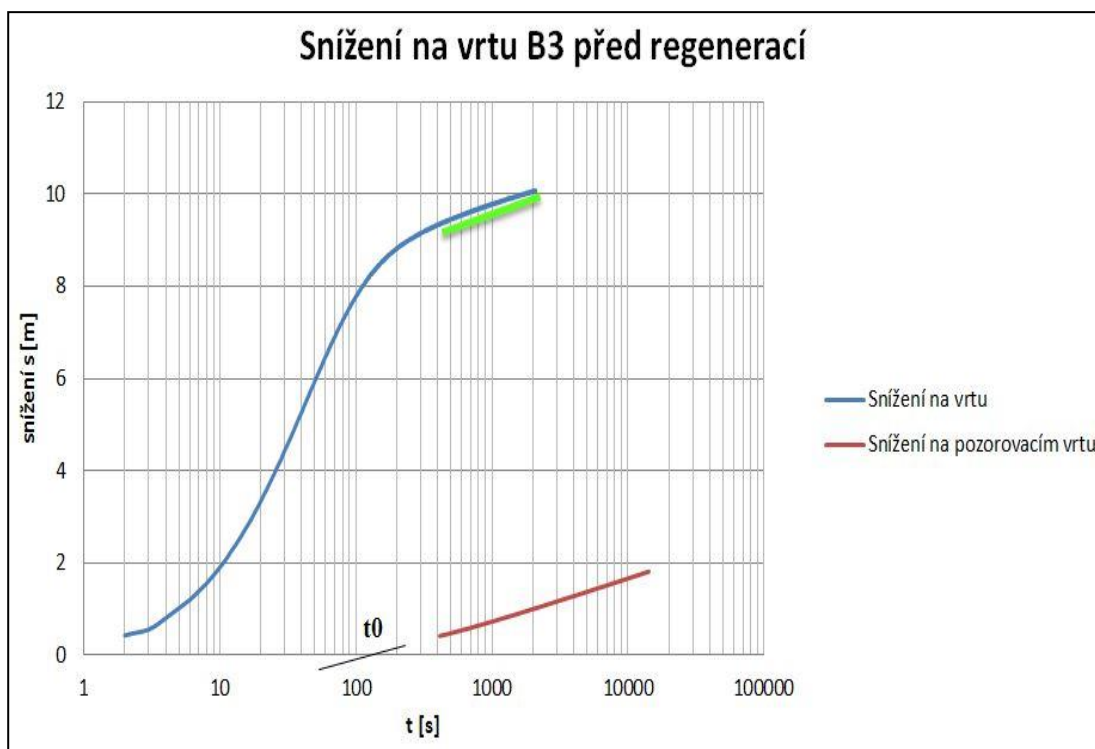
*110 až 120 m – hlína.*

## 5.2. Vyhodnocení transmisivity a storativity z dat ČZ

Při samotném vyhodnocení použijeme vztahy Jacobovy semilogaritmické metody přímky, která je popsána v kapitole 4.3. Budeme především využívat rovnice: pro výpočet transmisivity (4.3.4), storativity (4.3.5) a stanovení sklonu přímky (4.3.3). Z měřených dat lze také stanovit specifickou vydatnost  $s$ , která se vypočte podílem čerpaného množství vody  $Q$  a poklesem hladiny podzemní vody; v jednotkách [l/s/m].

V úvodu 5. kapitoly bylo uvedeno, že vrty mají dvojí měření – před a po regeneraci; stanovené hodnoty z dat budou uvedeny pod grafy, č. 10 až 13, jednotlivých vrtů.

### 1. B3 před regenerací



Obrázek č. 10 – Snížení na vrtu B3 před regenerací (AUTOR, 2017)

Čerpané množství  $Q$  z vrtu B3 před regenerací = 14 l/s

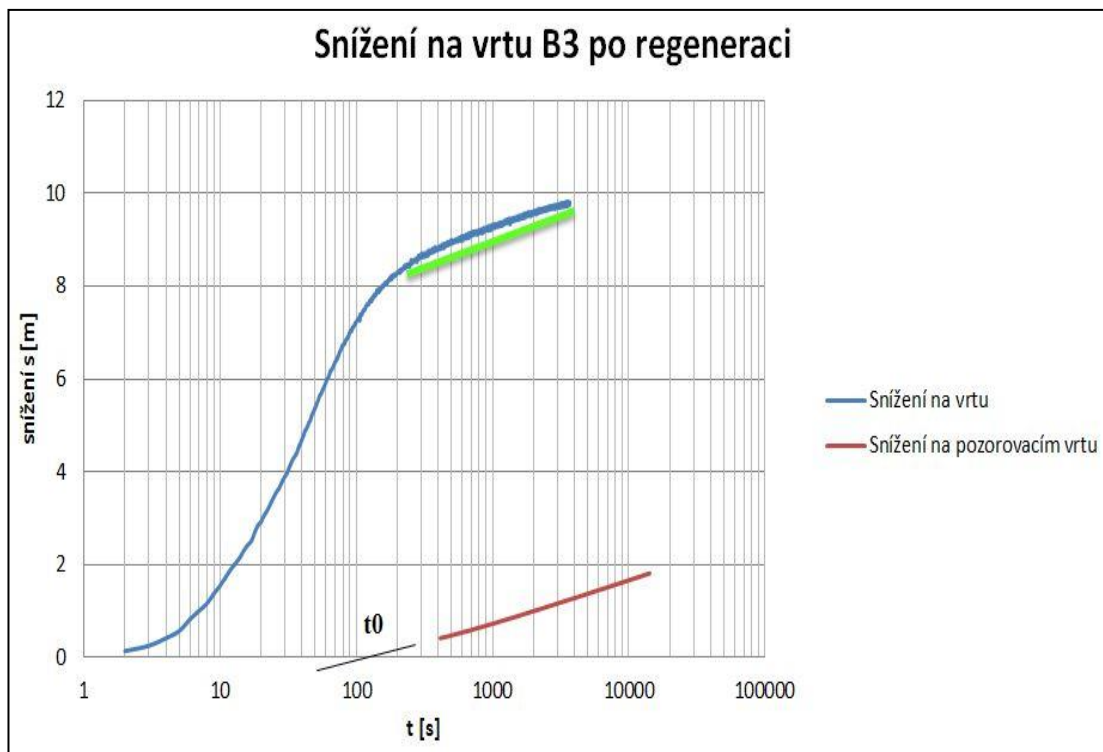
sklon  $i = 0,943$

$T = 0,00271 \text{ m}^2/\text{s}$

$S = 0,0292$

specifická vydatnost  $s = 1,39 \text{ l/s/m}$

## 2. B3 po regeneraci



Obrázek č. 11 – Snížení na vrtu B3 po regeneraci (AUTOR, 2017)

Čerpané množství  $Q$  z vrtu B3 před regenerací = 18 l/s

sklon  $i = 0,854$

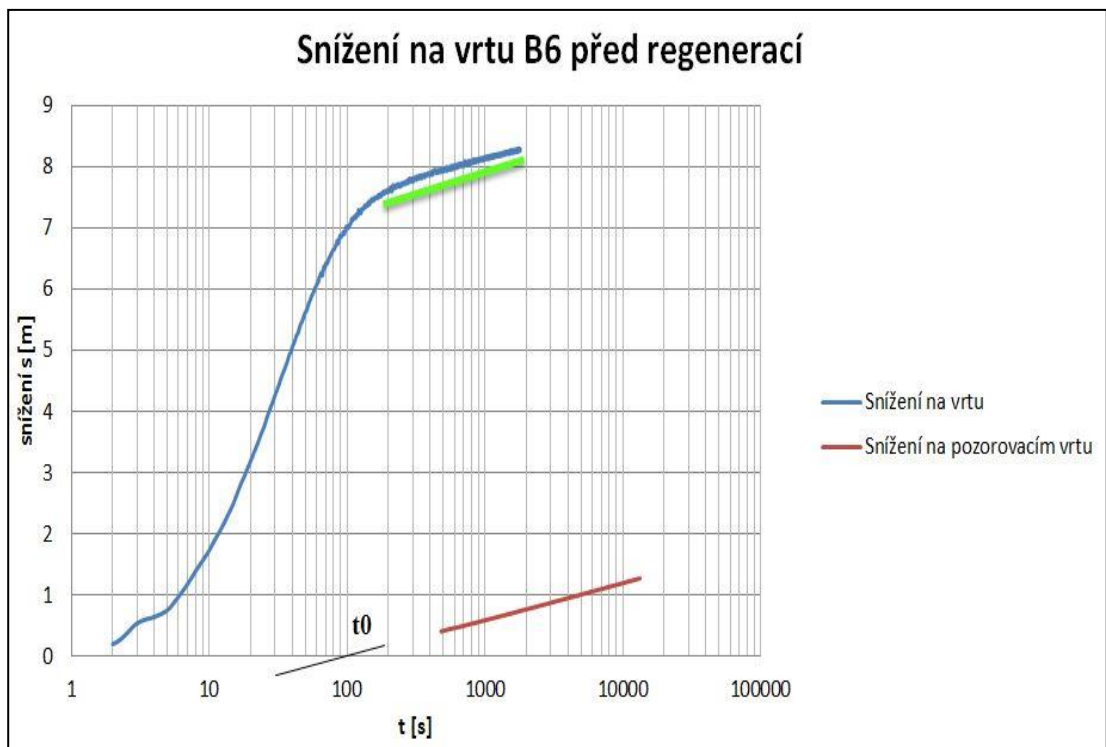
$T = 0,00385 \text{ m}^2/\text{s}$

$S = 0,103$

specifická vydatnost  $s = 1,84 \text{ l/s/m}$



### 3. B6 před regenerací



Obrázek č. 12 – Snížení na vrtu B6 před regenerací (AUTOR, 2017)

Čerpané množství  $Q$  z vrtu B3 před regenerací = 18 l/s

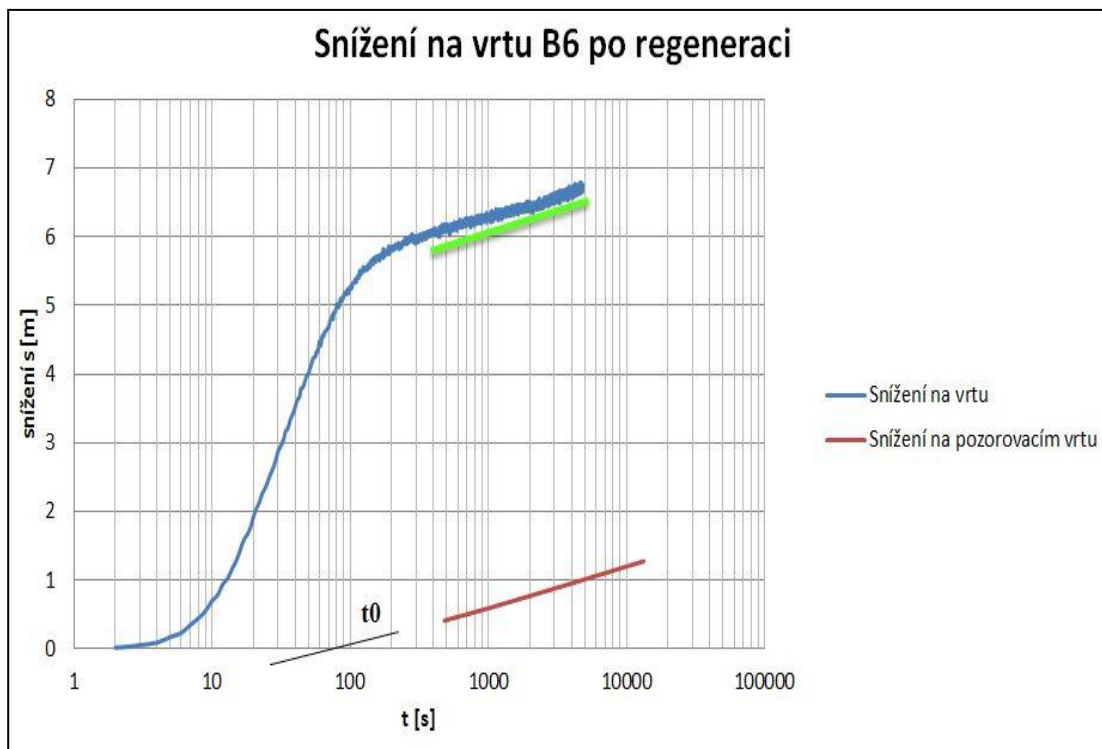
sklon  $i = 0,626$

$T = 0,00408 \text{ m}^2/\text{s}$

$S = 0,0477$

specifická vydatnost  $s = 1,69 \text{ l/s/m}$

#### 4. B6 po regeneraci



Obrázek č. 13 – Snížení na vrtu B6 po regeneraci (AUTOR, 2017)

Čerpané množství  $Q$  z vrtu B3 před regenerací = 11,8 l/s

sklon  $i = 0,6332$

$T = 0,00338 \text{ m}^2/\text{s}$

$S = 0,00861$

specifická vydatnost  $s = 1,76 \text{ l/s/m}$

## 6. Závěr

Před samotným zahájením čerpací zkoušky proběhla kamerová prohlídka, která určila velikost znečištění, a následně probíhalo chemické čištění. Na závěr došlo k vyhodnocení čerpaných dat.

V průběhu hydrodynamické zkoušky vrtu B3 před regenerací bylo čerpané množství 14 l/s, snížení hladiny dosáhlo 10,07 m a specifická vydatnost byla 1,39 l/s/m. U zkoušky po regeneraci se zvýšilo čerpané množství na 18 l/s, pokles hladiny 9,77 m a specifická vydatnost byla vypočtena na 1,84 l/s/m.

Provedená čerpací zkouška před a po regeneraci na vrtu B3 dopadla podle očekávání – vydatnost vrtu byla při regeneraci navýšena přibližně o 25 % a čerpané množství o 4 l/s.

Kamerová prohlídka vrtu B6 před regenerací odhalila velmi vysokou kolmataci vnitřku vrtu, patrně způsobenou nárůstem vysrážených železitých vloček.

Během zkoušky vrtu B6 před regenerací bylo čerpáno 14 l/s, snížení hladiny 8,29 m a specifická vydatnost vrtu byla 1,69 l/s/m. U zkoušky po regeneraci se snížilo čerpané množství na 11,8 l/s, avšak navýšila se specifická vydatnost na hodnotu 1,76 l/s/m, snížení hladiny 6,70 m. Po uvážení rozdílů průtoků, s přihlédnutím na čerpané množství vody u vrtu B6 před a po regeneraci, vychází mírné zlepšení odporových parametrů.

## 7. Diskuze

Pokud porovnáme například čerpané množství u vrtu B3 před a po regeneraci, které je dáno parametry čerpadla, dostaneme rozdíl vyšší o 4 l/s. Tento pozitivní rozdíl je zapříčiněn zmenšením dodatečných hydraulických odporů na vrtu, a tím pádem dochází i ke zvýšení hodnoty specifické vydatnosti vrtu, která charakterizuje průměrnou schopnost dávky vody za stanovený čas při jednotkovém poklesu hladiny.

Důležitou roli také sehrává geologické půdní složení, ve kterém se dané vrty nacházejí. Pozorované vrty B3 a B6 se liší půdním složením minimálně – převládají různé druhy písků. Vyhodnocením hydraulické vodivosti  $K$  můžeme stanovit rychlost kapaliny v daném prostředí. V našem případě převládá písčítý materiál, který má hodnotu hydraulické vodivosti v rozmezí méně jak  $1 \cdot 10^{-6}$  (písčítá hlína) až  $10 \cdot 10^{-4}$  (štěrkopísek).

U vrtu B6 po vyhodnocení transmisivity pozorujeme snížení o  $0,0007 \text{ m}^2/\text{s}$ . Tento rozdíl, v kontextu proudění podzemní vody a chyby měření, je možný označit za stejné hodnoty.

V průběhu čerpací zkoušky se nemohou měnit hodnoty transmisivity a storativity zvodně, maximálně do vzdálenosti 3 až 4 metrů od vrtu po vyčištění. Avšak u vrtu B6 je vidět snížení storativity o  $0,03909$ .

Ze získaných dat není zřejmé, jestli se pozorovací vrt nachází v kolmatační zóně, protože chybí údaj vzdálenosti od čerpaných vrtů.

## Přehled literatury a použitých zdrojů

BEAR J., 1979: Hydraulics of ground water. New York.

COOPER, H. H., Jr. and JACOB C. E., 1946: Generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. AGU, 27.

Freeze A., Cherry J., 1979: Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs. New Jersey.

Hálek V., Švec J., 1973: Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství Academia, Praha.

CHARBENEAU, R. J., 2006: Groundwater hydraulics and pollutant transport. Waveland Press, Long Grove. Illinois, 593p.

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

MLS, J., 1988: Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha, 26s.

PECH, P., 2010: Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Vydavatelství ČZU, Praha, ISBN 978-80-87402-04-7.

PETRÁNEK J., Geologická encyklopedie online [online]. Praha, 2007 [cit. 2017.01.03]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>.

ROUBÍK V., SEDLÁČEK J., 2012: Fyzika v příkladech. Vydavatelství ČZU, Praha, ISBN 978-80-213-2274-5.

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. Trans. AGU, 16.

VALENTOVÁ J., 2010: Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha, 19s.

VODNÍ ZDROJE A.S., 2015: Hydrogeologická dokumentace vrtu B3, B6 „nepublikováno“. Dep.: Vodní zdroje, a.s. Praha 5.

VOREK A., Injektážní pakry [online]. Suchdol nad Odrou, 2008 [cit. 2017.03.02]. Dostupné z: <http://www.vorek.cz/produkty-spolecnosti/injektazni-pakry/specialni-typy-pakru/jednodenni-pakry/pakr-opk-dv/>.

WALTON W. C., 2006: Aquifer Test Modeling. CRC Press. Hardcover: 240 pages,  
ISBN-10: 1420042920

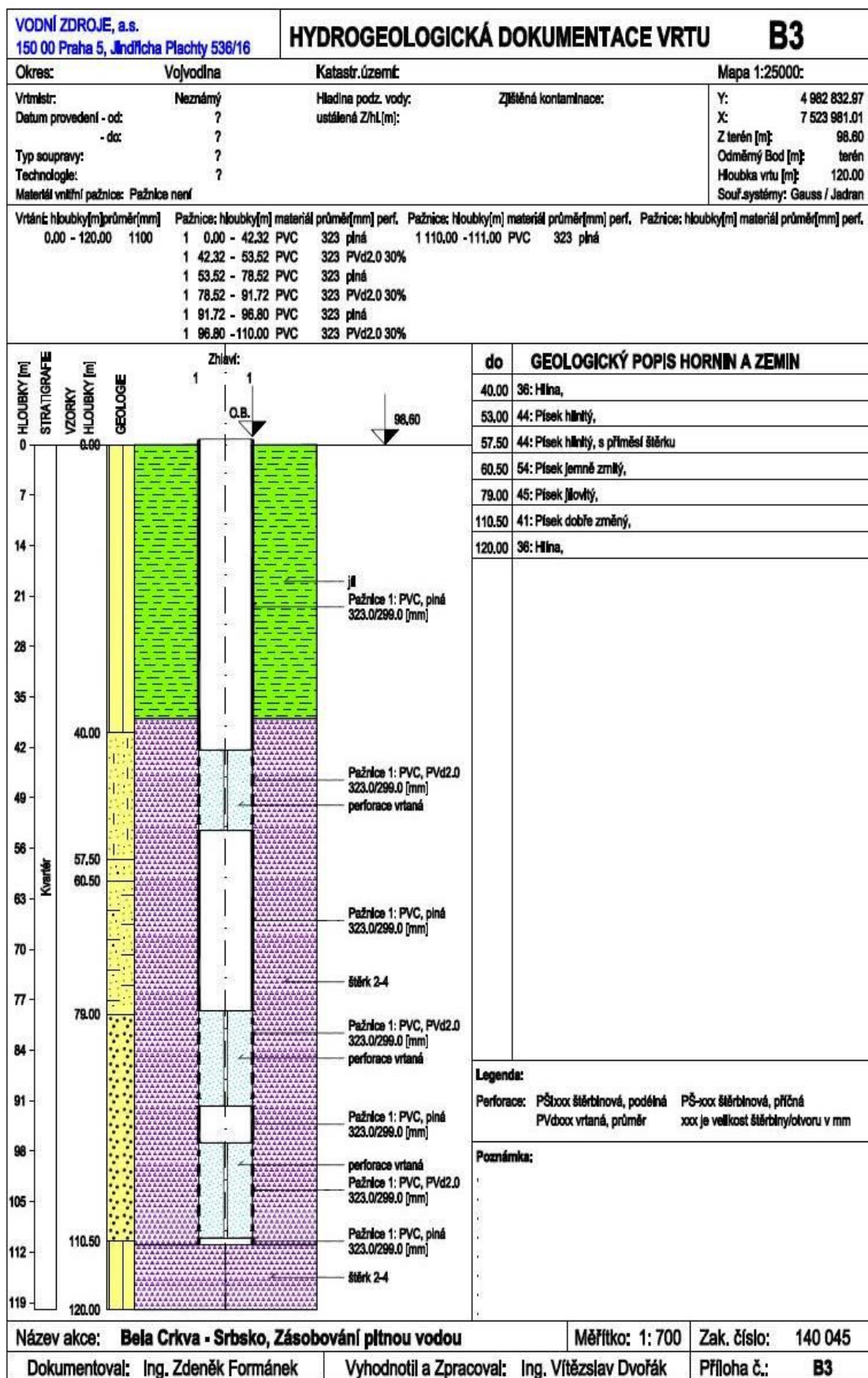
## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 Hydrogeologická dokumentace vrtu B3

Příloha č. 2 Hydrogeologická dokumentace vrtu B6

Příloha č. 3 Situace jímacích vrtů v měřítku 1:4 000

Příloha č. 1 Hydrogeologická dokumentace vrtu B3



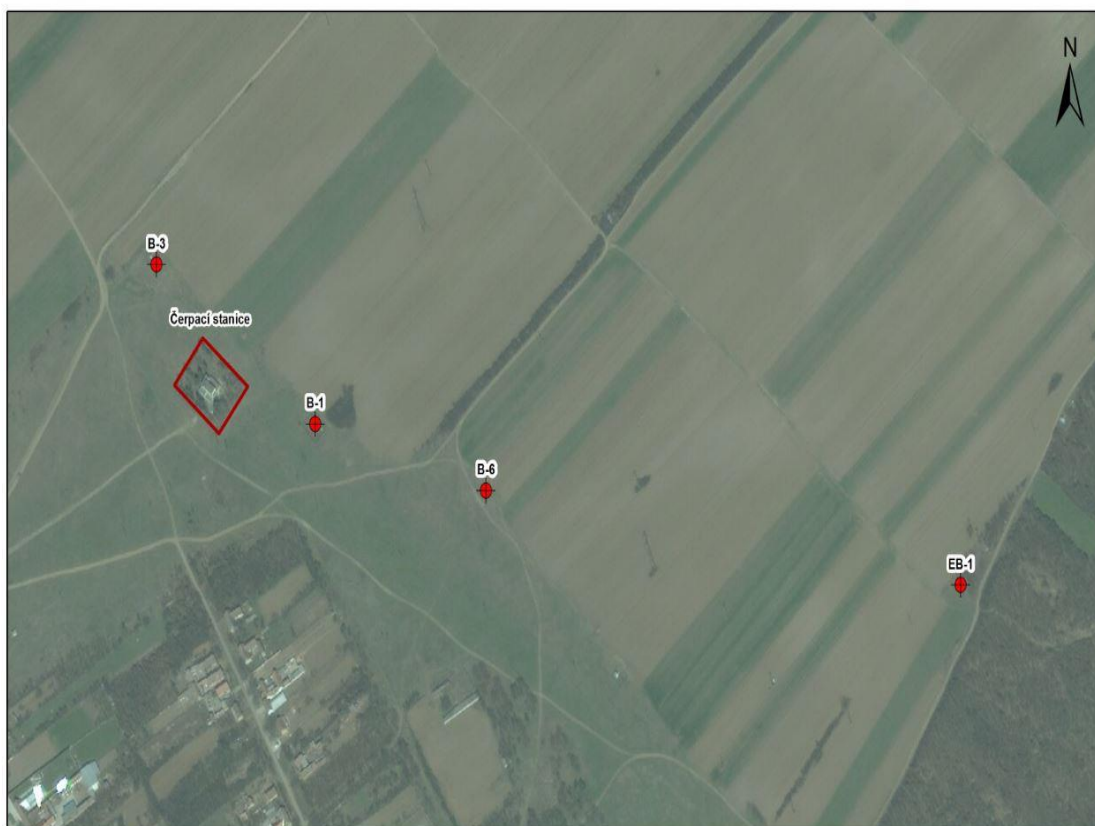


Příloha č. 2 Hydrogeologická dokumentace vrtu B6

VODNÍ ZDROJE, a.s. 150 00 Praha 5, Jindřicha Plachty 536/16		HYDROGEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VRTU		B6	
Okres:	Vojvodina	Katastr.území:	Mapa 1:25000:		
Vrtmistr:	Neznámý	Hladina podz. vody:	Zjištěná kontaminace:	Y:	4 982 782.54
Datum provedení - od:	?	ustálená Z/hl.[m]:		X:	7 524 153.42
- do:	?			Z terén [m]:	102.28
Typ soupravy:	?			Odměrný Bod [m]:	0.63
Technologie:	?			Hloubka vrtu [m]:	120.00
Materiál vnitřní pažnice: Pažnice není				Souř. systémy: Gauss / Jadran	
Vrtání: hloubky[m]průměr[mm]		Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.		Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.	
0,00 - 120,00 1100		1 0,00 - 48,00 PVC 323 plná		1 110,00 - 111,00 PVC 323 plná	
		1 48,00 - 58,00 PVC 323 PVd2.0 30%			
		1 58,00 - 80,00 PVC 323 plná			
		1 80,00 - 93,00 PVC 323 PVd2.0 30%			
		1 93,00 - 98,00 PVC 323 plná			
		1 98,00 - 110,00 PVC 323 PVd2.0 30%			
HLOUBKY [m] STRATIGRAFE VZORKY HLOUBKY [m] GEOLOGIE 0 7 14 21 28 35 42 49 56 63 70 77 84 91 98 105 112 119 120,00	Zhlaví:		do		
	1 1		36: Hlina, ?		
	O.B. 102,63		58,00 60: Štěrka písčité, ?		
	102,26		80,00 44: Písek hlinitý, s příměsí štěrku, ?		
			93,00 54: Písek jemně zrnitý, ?		
			98,00 45: Písek jílovitý, ?		
			110,00 41: Písek dobře zrněný, ?		
			120,00 36: Hlina, ?		
			Ji Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]		
			Pažnice 1: PVC, PVd2.0 323.0/299.0 [mm] perforace vrtaná		
		Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]			
		štěrka 2-4 Pažnice 1: PVC, PVd2.0 323.0/299.0 [mm] perforace vrtaná			
		Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]			
		Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]			
		perforace vrtaná Pažnice 1: PVC, PVd2.0 323.0/299.0 [mm]			
		Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]			
		štěrka 2-4			
Kvantár 0,00 48,00 58,00 80,00 93,00 98,00 110,00 120,00			Legend: Perforace: PŠxxx štěrbinová, podélná PŠ-xxx štěrbinová, příčná PVdxxx vrtaná, průměr xxx je velikost štěrbinovýotvoru v mm		
Poznámka: . . . . .					
Název akce: <b>Bela Crkva - Srbsko, Zásobování pitnou vodou</b>			Měřítka: 1: 700	Zak. číslo: 140 045	
Dokumentoval: Ing. Zdeněk Formánek		Vyhodnotil a Zpracoval: Ing. Vítězslav Dvořák		Příloha č.: B6	

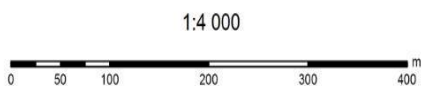
**Příloha č. 3** Situace jímacích vrtů v měřítku 1:4 000

**Situace jímacích vrtů v lokalitě Straža vytipované k regeneraci**



**Legenda**

◆ Jímací vrty    □ Čerpací stanice



Autor: Ing. Vítězslav Dvořák  
Společnost: VODNÍ ZDROJE, a.s.  
Datum: 3. 12. 2015  
Zdroje: ESRI Base maps 2015