

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO  
MODELOVÁNÍ



Česká  
zemědělská  
univerzita  
v Praze

## **Vyhodnocení efektu regenerací z hydrodynamických zkoušek**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce:

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Autor:

Bc. Monika Olmrová

PRAHA 2022

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Monika Olmrová

Environmentální modelování

Název práce

**Vyhodnocení efektu regenerací z hydrodynamických zkoušek**

Název anglicky

**Evaluation of regeneration from hydrodynamics tests**

---

### Cíle práce

Přehled používaných regeneračních technologií.

Popis vyhodnocení skinového faktoru z hydrodynamické zkoušky se zaměřením na počáteční část zkoušky, kdy nebylo dosaženo přímkového úseku vyhodnotitelného Cooper-Jacobovou semilogaritmickou aproximací.

Vyhodnocení efektů regeneračních zásahů na alespoň třech vrtech.

Výsledky porovnat s vyhodnocením klasickou Cooper-Jacobovou semilogaritmickou aproximací.

### Metodika

Zpracování literární rešerše na vyhodnocování dodatečných odporů na reálných vrtech a technik regenerací.

Popis metod vyhodnocení regeneračního zásahu z počátečního úseku hydrodynamické zkoušky. Vyhodnocení skutečných regenerací z počátečního úseku stoupací zkoušky

a pomocí Jacobovy semilogaritmické aproximace.

Zhodnocení a porovnání výsledků získaných z počátečního úseku a Cooper-Jacobovy aproximace.

Diskuse.

Závěr.

## **Doporučený rozsah práce**

40-50 str.

## **Klíčová slova**

Podzemní vody

---

## **Doporučené zdroje informací**

Agarwal, R.G.; Al-Hussainy R.; Ramey, H.J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. Society of Petroleum Engineers Journal 1970, 10, 279-291.

KRUSEMAN G. P., De RIDDER N. A., 2000 (přetisk): Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Nizozemsko.

PECH P., 2010: Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Česká zemědělská univerzita Praha, Praha

---

## **Předběžný termín obhajoby**

2021/22 LS – FZP

## **Vedoucí práce**

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

## **Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

## **Konzultant**

Ing. Václav Ficař

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2022

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

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2022

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2022

### **Čestné prohlášení**

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma: Vyhodnocení efektu regenerací z hydrodynamických zkoušek vypracovala samostatně a citovala jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použila a které jsem rovněž uvedla na konci v seznamu použitých informačních zdrojů.*

*Jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.*

*Jsem si vědoma, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek obhajoby.*

*Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.*

V Praze dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Bc. Monika Olmrová

## **Poděkování**

*Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Pavlu Pechovi, CSc. za cenné rady a věcné připomínky při jejím zpracování.*

**Abstrakt:** Práce se zabývá vyhodnocením efektů regeneračních zásahů na pěti vrtech za pomoci hydrodynamických zkoušek. Je vyhodnocován skin faktor z hydrodynamické zkoušky se zaměřením na počáteční část zkoušky, kdy ještě nebylo dosaženo přímkového úseku, a pro srovnání byla k vyhodnocení využita rovněž metoda Cooper-Jacobovy semilogaritmické aproximace.

Rešeršní část práce se zabývá nezbytnými znalostmi pro vyhodnocení hydrodynamické zkoušky a regenerace vrtu.

Analytická část práce vyhodnocuje data regenerace vrtu z hydrodynamických zkoušek, které byly provedeny na pěti reálných vrtech.

**Klíčová slova:** podzemní vody, hydrodynamické zkoušky, vrt, regenerace

## **Evaluation of the effect of regenerations from hydrodynamic tests**

**Abstract:** *The work deals with the evaluation of the effects of regenerative interventions on five wells using hydrodynamic tests. The skin factor from the hydrodynamic test is evaluated with a focus on the initial part of the test, when the straight line section has not yet been reached, and the Cooper-Jacob semilogarithmic approximation method was also used for evaluation.*

*The research part of the thesis deals with the necessary knowledge for the evaluation of the hydrodynamic test and well regeneration.*

*The analytical part of the work evaluates the well regeneration data from hydrodynamic tests, which were performed on five real wells.*

**Keywords:** *groundwater, hydrodynamic tests, well, regeneration*

# OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce .....	2
3	Metodika.....	3
4	Rešerše .....	4
4.1	Hydrogeologický vrt .....	4
4.1.1	Konstrukce vrtu .....	4
4.1.2	Ideální vrt .....	5
4.1.3	Reálný vrt .....	6
4.2	Podzemní voda.....	6
4.2.1	Rozdělení podpovrchových vod podle vzniku .....	6
4.2.2	Vertikální rozdělení podpovrchových vod .....	7
4.2.3	Typy zvodnělých vrstev a jejich vlastnosti.....	7
4.2.4	Pórovitost .....	8
4.2.5	Hydraulická vodivost.....	9
4.2.6	Propustnost .....	10
4.2.7	Storativita .....	10
4.2.8	Transmisivita .....	10
4.3	Proudění podzemních vod .....	10
4.3.1	Rovnice kontinuity .....	11
4.3.2	Darcyho zákon .....	12
4.3.3	Proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou.....	14
4.3.4	Proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou .....	15
4.4	Proudění podzemních vod k ideálnímu vrtu .....	15
4.4.1	Nestacionární proudění .....	15
4.4.2	Theisova metoda typové křivky.....	18
4.4.3	Jacob semilogaritmičká metoda přímky .....	19

4.5	Proudění podzemních vod ke skutečnému vrtu .....	22
4.5.1	Bezrozměrné parametry .....	22
4.5.2	Dodatečné odpory .....	25
4.5.3	Storativita – zásobnost vrtu .....	27
4.6	Hydrodynamické zkoušky .....	27
4.6.1	Čerpací zkoušky .....	27
4.6.2	Stoupací zkoušky .....	28
4.7	Regenerace vrtu .....	28
5	Analytická část.....	29
5.1	Postup výpočtu .....	29
5.2	Vrt KV-2 a KV-9 – Veletov .....	31
5.2.1	Kamerová prohlídka vrtu KV-2.....	33
5.2.2	Kamerová prohlídka vrtu KV-9.....	33
5.2.3	Popis hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2 .....	33
5.2.4	Popis hydrodynamické zkoušky vrtu KV-9 .....	35
5.2.5	Shrnutí výsledků vrtu KV-2 a KV-9 .....	36
5.3	Vrt RD-2 Radouň.....	37
5.3.1	Kamerová prohlídka vrtu RD-2 .....	38
5.3.2	Hydrodynamická zkouška vrtu RD-2 před regenerací .....	38
5.3.3	Hydrodynamická zkouška vrtu RD-2 po regeneraci .....	40
5.3.4	Shrnutí výsledků vrtu RD-2.....	41
5.4	Vrt B-1 a B-3 Srbsko.....	42
5.4.1	Kamerová prohlídka vrtu B-3 .....	42
5.4.2	Kamerová prohlídka vrtu B-1 .....	43
5.4.3	Regenerace vrtu B-3 .....	43
5.4.4	Regenerace vrtu B-1 .....	43
5.4.5	Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 před regenerací.....	43



5.4.6	Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B–3 po regeneraci .....	44
5.4.7	Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 před regenerací.....	46
5.4.8	Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B–1 po regeneraci .....	47
5.4.9	Shrnutí výsledků vrtu B-3 a B-1 .....	48
6	Závěr .....	50
	Přehled literatury a použitých zdrojů .....	51
	Seznam obrázků.....	55
	Seznam tabulek .....	56
	Seznam příloh .....	58

# 1 Úvod

Světový oceán pokrývá 70 % povrchu Země, ale zásobu pitné vody tvoří přibližně ze 70 % podzemní voda. Podzemní voda hraje tedy velmi důležitou roli, jak pro životní prostředí, tak i pro i ekonomiku. Podzemní voda je hlavním zdrojem pitné vody pro městské i venkovské obyvatelstvo, stejně jako pro průmysl (Where is Earth's Water?, 2018).

Pro správné využívání podzemních vod musíme znát jejich povahu, zdroje, pohyb a chování (Torres, 2011). Jedním z vědců, již definovali pohyb podzemní vody, je francouzský technik a inženýr Henry Philibert Gaspard Darcy. Ten roku 1856 odvodil na základě experimentu zákon laminárního režimu proudění podzemní vody v porézním prostředí, tzv. Darcyho zákon.

Podzemí vodu lze získat ze studní nebo vrtů. Pro co nejefektivnější zisk vody je důležité správně určit vlastnosti prostředí, ve kterém se vrty nacházejí (Torres, 2011). K ovlivnění funkčnosti vrtu může dojít již při instalaci nebo v průběhu využívání, kdy dochází k postupné degradaci vrtu či studně.

Již dnes jsou na světě místa, kde při zajišťování pitné vody spoléhají výhradně na využití podzemních vod. V budoucnu bude těchto oblastí stále přibývat. Udržení funkčnosti vrtu po co nejdelší dobu bude velmi významné. Proto je důležité věnovat se této problematice již dnes (Treidel, 2011).

## 2 Cíl práce

Cílem této práce je vyhodnotit koeficient dodatečných odporů (skin factor) na vrtu KV2, KV9 a účinnost regenerací vrtů B-1, B-3 a RD2 z hydrodynamické zkoušky (čerpací), jak za pomoci klasické Cooper-Jacobovy semilogaritmické metody, tak i metody odvozené z počátečních úseků čerpací zkoušky (Pech-Kahuda-2018). Využít vyhodnocení skin faktoru jako ukazatele „úspěšnosti“ provedené regenerace vrtu. Dále porovnat určení koeficientu dodatečných odporů z Cooper-Jacobovy metody (je-li k dispozici semilogaritmický úsek u čerpací zkoušky) a vyhodnocení z 1. přímkového úseku metodou Pech-Kahuda, 2018.

### 3 Metodika

Práce využívá kvalitní informační zdroje, je kladen důraz na přesnost výpočtů.

V rešeršní části jsou vysvětleny základní pojmy, které jsou důležité k pochopení problematiky. Je strukturována od obecných pojmů ke konkrétní výpočtové problematice.

V analytické části je pracováno s konkrétními daty pěti vrtů, které poskytnul vedoucí této diplomové práce prof. Ing. Pavel Pech, CSc.. Každý vrt je zpracován podle jednotné pracovní osnovy. Nejprve popsán vrt a lokalita jeho výskytu. Dále jsou představena naměřená data před regenerací a jejich vlastnosti. Poté přichází na řadu výpočty pomocí Cooper-Jacobovy semilogaritmické aproximace a výpočty z prvního přímkového úseku (metoda I-SPPU) podle Pech, Kahuda, 2018, která vychází z řešení základní rovnice proudění k reálnému vrtu (Agarwal, 1970). Tento postup je zopakován i s daty po regeneraci vrtu. Následně jsou porovnány rozdíly mezi stavem před a po provedené regeneraci.

V závěru je shrnuto vyhodnocení jednotlivých vrtů a celkové výsledky práce a otevřeny nové otázky k dané problematice.

## 4 Rešerše

Kapitola rešerše popisuje důležité pojmy využití v této práci. Jejím cílem je vysvětlení a přiblížení důležitých pojmů pro vyhodnocení regenerace vrtů z hydrodynamických zkoušek.

### 4.1 Hydrogeologický vrt

Hydrogeologické vrty můžeme dělit dle jejich účelu na jímací, odvodňovací, průzkumné a monitorovací.

Účelem jímacích vrtů je zásobování obyvatelstva, zemědělství a průmyslu vodou. Tento styl zisku vody má mnohé výhody. Podzemní voda je uchráněna proti povrchovým a podložním vlivům a vyznačuje se stálou teplotou (Jedlička, 1981).

Méně časté jsou vrty odvodňovací, které se nejvíce vyskytují v zemědělství a průmyslu. Slouží k odvodnění například hornických a podzemních děl, podzemních staveb a stavebních jam. Je důležité maximálně snížit hladinu podzemní vody při co nejmenším čerpání (Jedlička, 1981).

Průzkumné geologické vrty se využívají v oblasti geologické a hydrogeologické (Pražský, 1964).

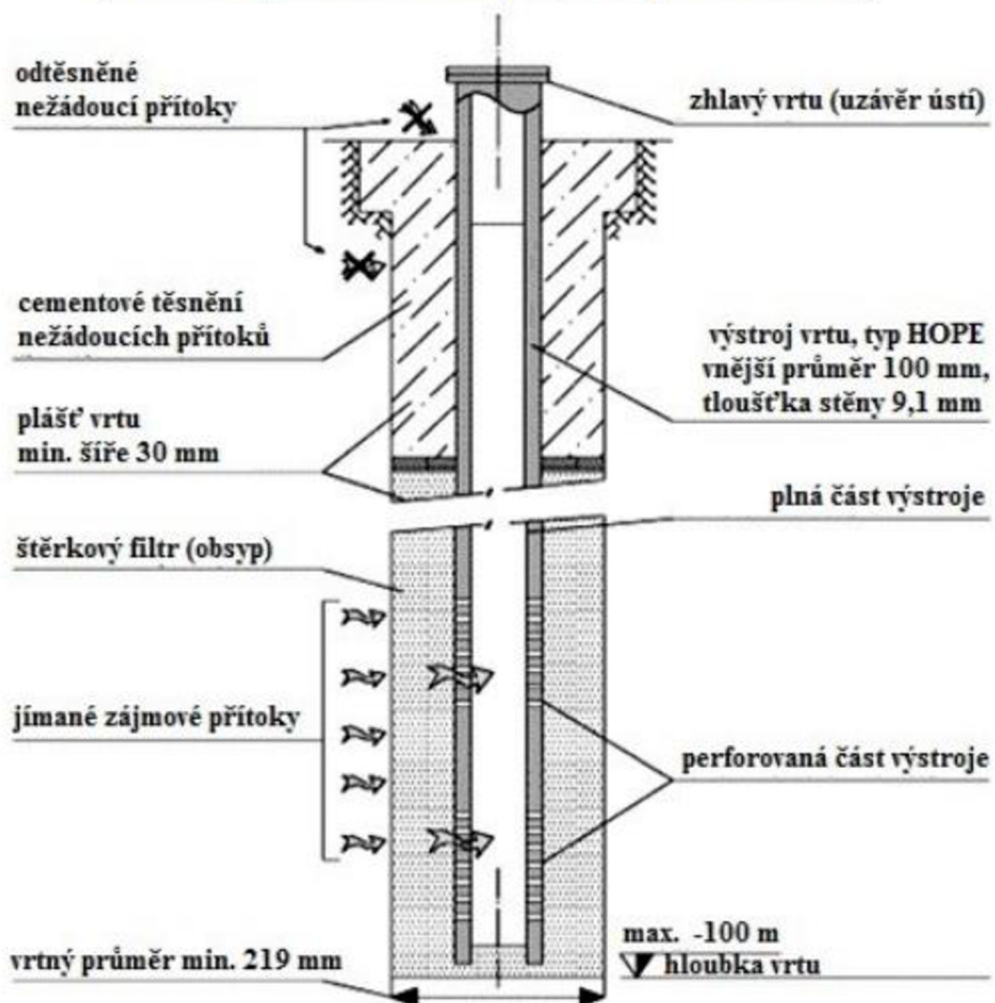
Posledním typem jsou vrty monitorovací. Tyto vrty mají za úkol zjistit geologické, hydrogeologické a hydraulické poměry daného území a poskytnout informace o jejich změnách v čase (Klempa, 2011).

U hydrologických vrtů je důležité dosáhnout vodonosné vrstvy a realizovat stěnu vrtu tak, aby byl zajištěn tok do vrtu bez migrace jemnozrné frakce hornin z okolí vrtu (Jedlička, 1981).

#### 4.1.1 Konstrukce vrtu

Na obrázku 1 je zobrazena konstrukce jednoduchého vrtu pro jímání podzemní vody s popisem.

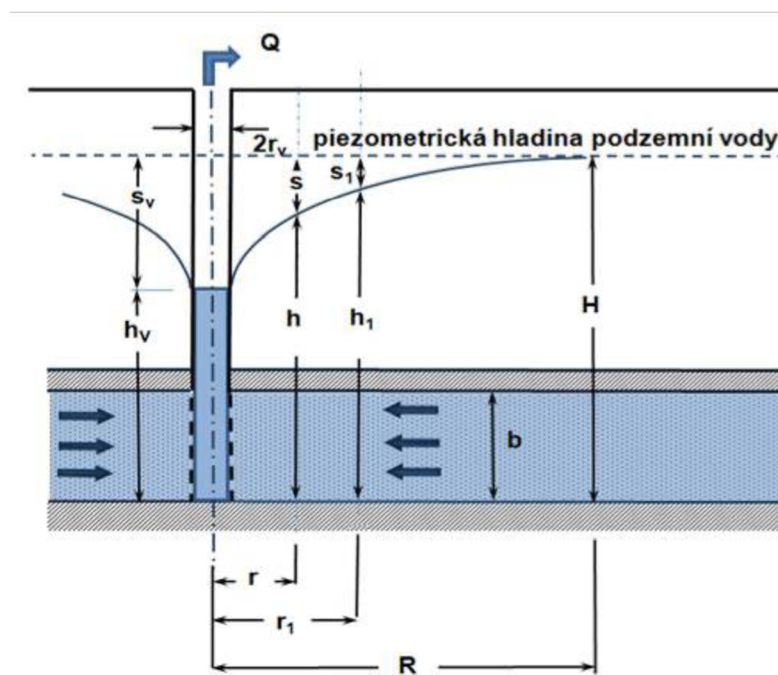
### Standardní provedení vrtu pro jímání podzemní vody



Obrázek 1: Konstrukce vrtu pro jímání podzemní vody (Univerzita Masarykova, 2011)

#### 4.1.2 Ideální vrt

Ideální vrt je takový vrt, u kterého neuvažujeme dodatečné odpory. Tyto odpory nejsou uvažovány ve vlastním vrtu ani v jeho nejbližším okolí (cca 5 m). Nebereme v úvahu vliv objemu vody ve vrtu na počátek čerpací zkoušky. Na obrázku 2 můžeme vidět, že depresní křivka začíná na hladině vody v čerpaném vrtu (Pech, 2015).



Obrázek 2: Ideální vrt (Pech, 2015)

### 4.1.3 Reálný vrt

Reálný je takový vrt, ve kterém jsou dodatečné odpory nenulové stejně jako v jeho blízkém okolí. V počátečních časech nezanedbáváme odčerpaný objem vody z vrtu (Hálek, 1979).

## 4.2 Podzemní voda

Podle zákona Sb. 254/2001 O vodách je podzemní voda definována jako „vody, které se přirozeně vyskytují pod zemským povrchem v pásmu nasycení (saturace) v přímém styku s horninami. Jedná se o cenný přírodní zdroj, který by měl být chráněn před znečištěním a udržitelně využíván. Podzemní vody jsou největším a zároveň nejcitlivějším sladkovodním zdrojem, jehož primárním využitím by mělo být zásobování obyvatelstva pitnou vodou“ (Česká republika, 2001).

### 4.2.1 Rozdělení podpovrchových vod podle vzniku

Podle Price (2004) lze podpovrchovou vodu dělit podle vzniku na:

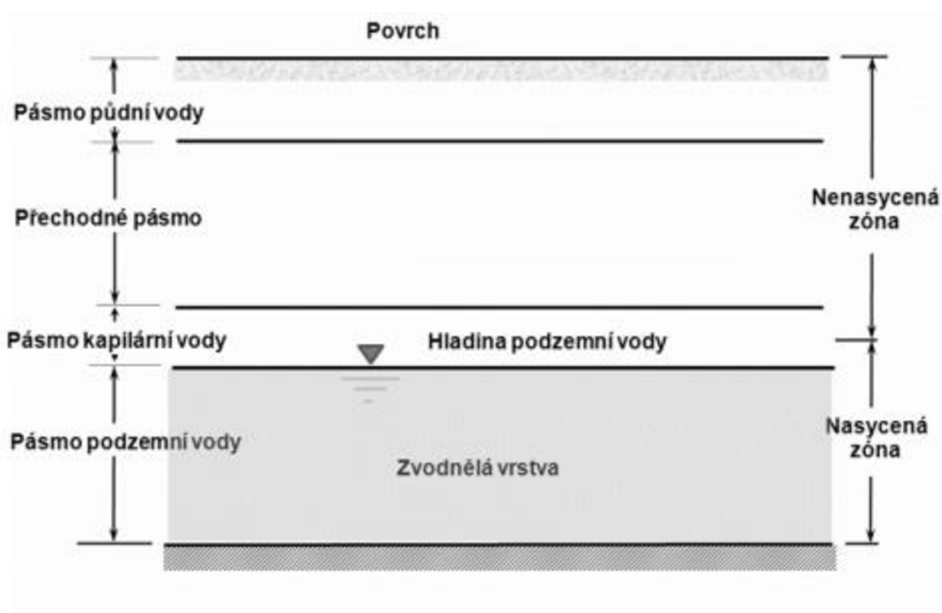
- Vadózní voda – tato voda je do horninového prostředí infiltrována z povrchu. Jejím nejčastějším zdrojem jsou atmosférické srážky.

- Juvenilní voda – tato voda vzniká ve velkých hloubkách pod povrchem kondenzací vodních par, které jsou produktem procesu tuhnutí magmatu.
- Fosilní vody nezasahují do oběhu vody.

#### 4.2.2 Vertikální rozdělení podpovrchových vod

Pásmo podzemní vody se ve vertikálním profilu nachází nejhluběji. Je součástí nasycené zóny. Obrázek 3 zobrazuje vertikální rozdělení podpovrchových vod, které můžeme rozdělit do čtyř pásem.

- Pásmo půdní vody – toto pásmo má rozsah od povrchu ke konci kořenové zóny.
- Přechodné pásmo – toto pásmo se vyznačuje proměnlivostí nasycení. Ze spodní strany je ohraničeno kapilární zónou.
- Pásmo kapilární vody – toto pásmo je nazýváno kapilární lem. Je přechodem nasycené a nenasycené zóny.
- Pásmo podzemní vody – z horní strany je toto pásmo ohraničeno kapilární zónou. Jedná se o takzvanou zvodnělou vrstvu (Pech, 2010).



Obrázek 3: Vertikální rozdělení podpovrchových vod (Pech, 2010)

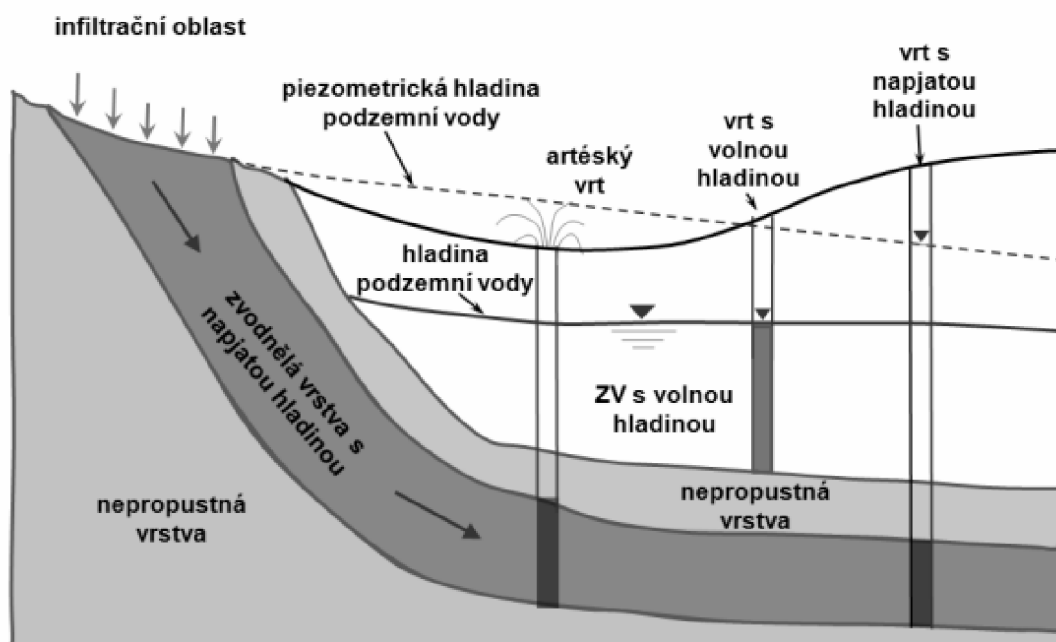
#### 4.2.3 Typy zvodnělých vrstev a jejich vlastnosti

Zvodnělá vrstva se nachází v nasycené zóně pásma podzemní vody (viz obr.3). Zvodnělé vrstvy dělíme podle typu hladiny na:



Zvodnělá vrstva s volnou hladinou je vrstva shora ohraničená volnou hladinou, na niž působí atmosférický tlak. Podle obrázku 3 můžeme vidět, že reálně se nad touto vrstvou nachází kapilární zóna, jejíž část se připočítává k zóně podzemní vody (Mays, 2001).

Zvodnělá vrstva s napjatou hladinou je vrstva, která je shora i zdola ohraničená nepropustnou nebo polopropustnou vrstvou. Na obrázku 4 můžeme vidět, že voda v pozorovacím vrtu, který je zapuštěný ve vrstvě s napjatou hladinou vystoupá nad horní úroveň polopropustné nebo nepropustné zvodnělé vrstvy. Může nastat i situace, kdy se piezometrická hladina nachází nad zemským povrchem. Takovéto vrtů nazýváme artéskými (Mays, 2001).



Obrázek 4: Typy zvodnělých vrstev (Pech, 2010)

#### 4.2.4 Pórovitost

Pórovitost  $n$  zvodnělého prostředí je určena jako podíl celkového objemu pórů, jež se nacházejí ve vymezeném objemu zvodnělého prostředí (Pech, 2010).

$$n = \frac{V_p}{V_t} \quad [-] \quad [1]$$

$V_p$ .....objem pórů [m<sup>3</sup>]

$V_t$ .....celkový objem vzorku [m<sup>3</sup>]

#### 4.2.4.1 Aktivní pórovitost

$$n_a = \frac{V_{pa}}{V_t} \quad [2]$$

$V_{pa}$ .....objem pórů, ve kterých se pohybuje voda vlivem gravitace [m<sup>3</sup>]

$V_t$ .....celkový objem vzorku [m<sup>3</sup>]

(Kovács, 1981)

#### 4.2.4.2 Efektivní pórovitost

$$n_e = \frac{V_{pe}}{V_t} \quad [3]$$

$V_{pe}$ .....suma objemu pórů, ve kterých se voda skutečně pohybuje [m<sup>3</sup>]

$V_t$ .....celkový objem vzorku [m<sup>3</sup>]

(Kovács, 1981)

### 4.2.5 Hydraulická vodivost

Schopnost porézního prostředí transportovat vodu vyjadřuje koeficient hydraulické vodivosti. Jeho definice vyplývá z Darcyho zákona a jeho rozměrem je rychlost [m/s] (Kodešová, 2005). Podle Beara (1979) lze hydraulickou vodivost vyjádřit jako:

$$K = \frac{k_p \rho g}{\mu} \quad [4]$$

$k_p$ .....permeabilita [m<sup>2</sup>]

$\rho$ .....měrná hmotnost vody [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$ .....dynamická viskozita [kg/m.s]

$g$ .....tíhové zrychlení [m/s<sup>2</sup>]

## 4.2.6 Propustnost

Propustnost je míra schopnosti materiálu v porézním prostředí propouštět vodu bez ohledu na její fyzikální vlastnosti. Je to vlastnost pevné složky prostředí.

$$k_p = C d_{10}^2 \quad [5]$$

C.....konstanta proporcionality [-]

d.....průměr zrna [m]

(Freez, 1979)

## 4.2.7 Storativita

Storativita vodonosné vrstvy je objem vody, který vodonosná vrstva uvolňuje nebo přijímá do zásoby za jednotku plochy povrchu zvodnělé vrstvy na jednotku poklesu nebo vzestupu spádu (Todd, 1980).

## 4.2.8 Transmisivita

Transmisivita neboli průtočnost je schopnost zvodnělé vrstvy propouštět kapalinu.

$$T = b K \quad [6]$$

b.....výška zvodnělé vrstvy [m]

K.....hydraulická vodivost [m/s]

(Mays, 2001)

## 4.3 Proudění podzemních vod

Aby bylo možné proudění podzemní vody, musí být splněny dvě základní podmínky. První podmínkou je, že existují otevřené efektivní póry. Za druhé musí existovat tak velký hydraulický spád, který překoná odporové síly filtrace (Grmela, 2004).

### 4.3.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity je základní rovnice, která vyjadřuje zákon zachování hmoty (Jandora, 2011) .

Pro využití v oblasti proudění podzemních vod je nutné vymezit si elementární rovnoběžnostěn s rozměry stran  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $d_z$ , viz obr 5. Tyto strany jsou rovnoběžné s jednotlivými souřadnými osami. Rovnici kontinuity v proudu podzemní vody odvodíme za předpokladu, že v uvažovaném tělese není zdroj, ani propad, kde by bilancovaná voda vznikala či zanikala, tedy že objem vody na vstupu se rovná objemu vody na výstupu. Výsledný tvar rovnice můžeme zapsat jako:

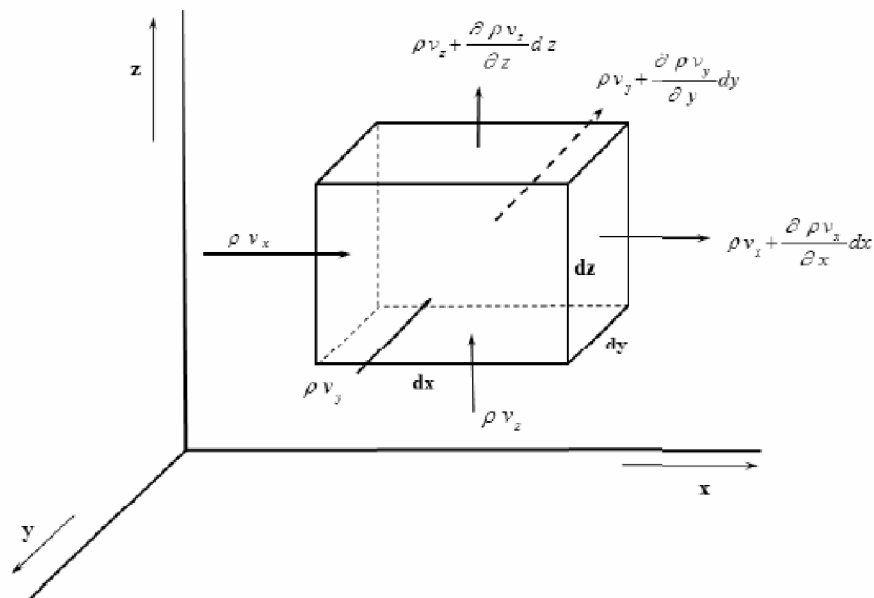
$$\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad [7]$$

$v_x$ ..... rychlost ve směru souřadné osy x [m/s]

$v_y$ ..... rychlost ve směru souřadné osy y [m/s]

$v_z$ ..... rychlost ve směru souřadné osy z [m/s]

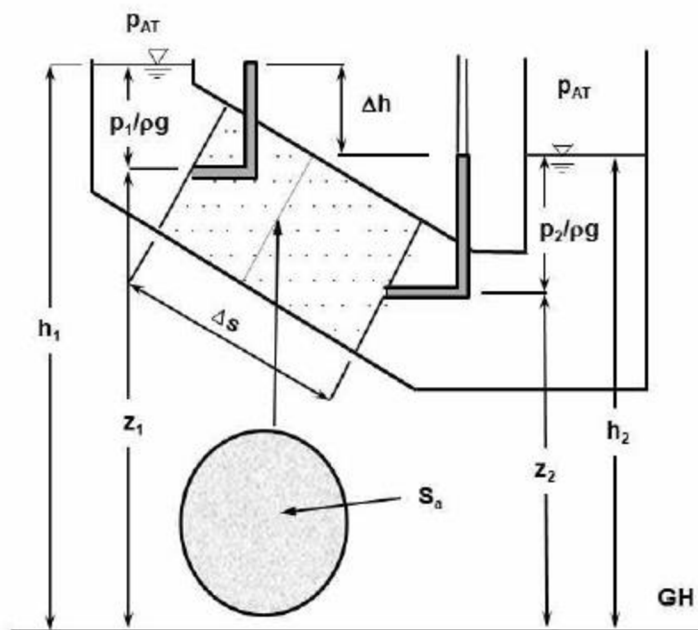
(Pech, 2010) .



Obrázek 5: Elementární rovnoběžnostěn (Pech, 2010)

### 4.3.2 Darcyho zákon

Henry Philibert Gaspard Darcy je jednou z nejvýznamnějších postav v oblasti hydrauliky podzemních vod. Byl to francouzský technik a inženýr, který žil mezi lety 1803 - 1858 ve městě Dijon. V roce 1856 vydal publikaci, ve které popisoval průběhy a výsledky svých experimentů s průsakem vody přes písčité prostředí, viz obr 6 (Simmons, 2008). Jeho experiment byl založen na válci s konstantním průřezem  $S_a$ , který byl naplněn písčítým materiálem.



Obrázek 6: Schéma Darcyho experimentu (Pech, 2010)

Darcy určil, že při rovnoměrném filtračním proudění závisí průtok vody na hydraulické vodivosti, hydraulickém spádu a na ploše průtočného průřezu.

$$Q = K S_a \frac{h_1 - h_2}{\Delta s} \quad [8]$$

Q.....průtočné množství vody [m<sup>3</sup>/s]

K.....hydraulická vodivost [m/s]

$S_a$ .....plocha průtočného průřezu [m<sup>2</sup>]

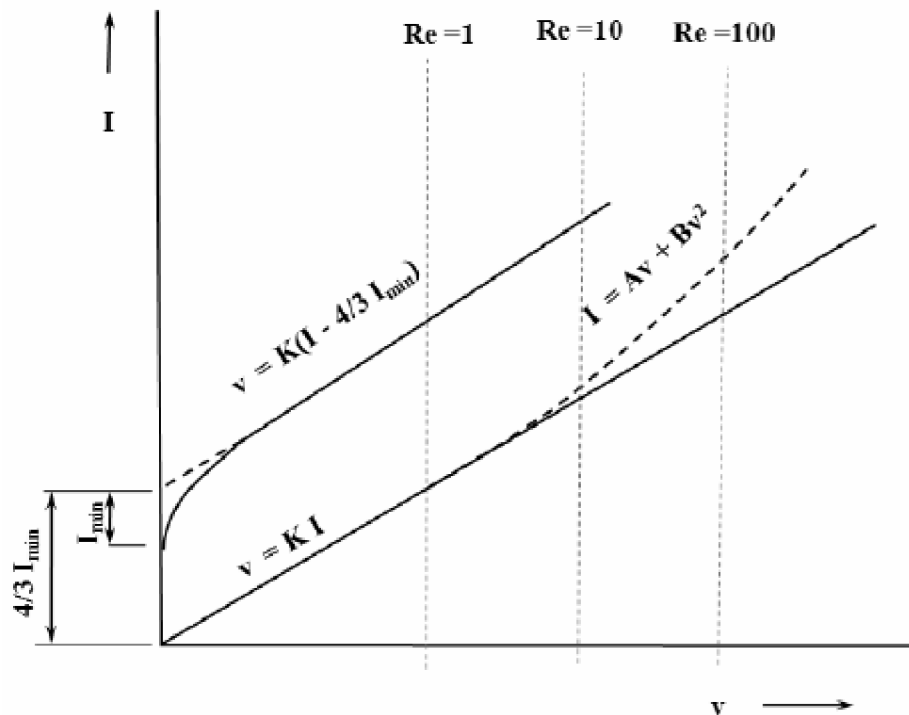
$h_1, h_2$ .....piezometrické výšky v průřezu [m]

$\Delta s$ .....vzdálenost profilů 1 a 2 [m]

(Darcy, 1856)

### 4.3.2.1 Meze platnosti Darcyho zákona

Darcy odvodil lineární vztah mezi hydraulickým gradientem a rychlostí vody, která proudí porézním prostředím. Linearita vztahu je ale omezena. Na obrázku 7 můžeme vidět kritické hodnoty, kdy laminární proudění přechází do proudění turbulentního. Vodorovná osa  $x$  zobrazuje rychlost proudění  $v$  a svislá osa  $y$  zobrazuje hodnoty hydraulického spádu  $I$ .



Obrázek 7: Meze platnosti Darcyho zákona (Pech, 2010)

Pro určení přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním se v mechanice tekutin využívá Reynoldsovo číslo ( $Re$ ). Reynoldsovo číslo je bezrozměrné a vyjadřuje poměr setrvačných a třecích sil. Kritická hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{kr}$  je taková hodnota, kdy dochází k přechodu mezi typem proudění (Vuković, 1992).

- $Re_{kr}$  0-10 proudění laminární
- $Re_{kr}$  10-100 přechodná nelineární oblast
- $Re_{kr}$  >100 turbulentní proudění

Darcyho vztah můžeme považovat za platný i v jemnozrnných materiálech, pokud dojde k překročení kritické hodnoty hydraulického gradientu. Takovýto vztah můžeme zapsat rovnicí podle Muchy (1987).

$$v = K \left( I - \frac{3}{4} I_{min} \right) \quad [9]$$

K..... hydraulická vodivost [m/s]

I..... hydraulický spád [-]

I<sub>min</sub>..... minimální hydraulický spád [-]

Hálek (1979) definuje filtrační Reynoldsovo číslo takto:

$$Re_f = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad [10]$$

ρ..... objemová hmotnost kapaliny [kg/m<sup>3</sup>]

v..... rychlost proudění kapaliny [m/s]

d<sub>e</sub>..... efektivní průměr zrna [m]

μ..... dynamická viskozita [kg/m.s]

Určení hodnoty d<sub>e</sub> v Reynoldsově čísle je obtížné. Velmi často se používá hodnota d<sub>10</sub>, což je hodnota, kdy v daném vzorku je 10 % z celkového množství zrn svým průměrem menších než d<sub>10</sub> (Ward, 1964).

### 4.3.3 Proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou

Hydrodynamické podmínky při proudění kapaliny k vrtu s napjatou hladinou bývají jednodušší než u vrtu s volnou hladinou (Pech, 2010).

Rovnice trojrozměrného neustáleného proudění podzemní vody s napjatou hladinou vychází z Darcyho zákona a z rovnice kontinuity.

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad [11]$$

s..... snížení [m]

t..... čas [s]

T..... transmisivita [m<sup>2</sup>/s]

S..... storativita [-]

#### 4.3.4 Proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou

Hydrodynamické podmínky proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou jsou těžší, neboť pokud zahájíme čerpání z vrtu, tak transmisivita zvodnělé vrstvy není v dosahu depresního kužele konstantní, ale je vyjádřena funkcí vzdálenosti od vrtu (Pech, 2010).

Pro odvození rovnice proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou se využívají rovnice proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou za předpokladu, že průměrná transmisivita  $T_p$ , která se využívá v oblasti ovlivněné čerpáním, je rovna prvnímu přiblížení aritmetického průměru z transmisivity  $T_0$  na obvodě depresní zóny a z maximálně snížené transmisivity  $T_v$  na plášti vrtu.

$$T_p = \frac{T_0 + T_v}{2} \quad [12]$$

Technik výpočtu existuje vícero a jsou voleny podle druhu vstupních dat. Pro účely diplomové práce bude využita varianta, ve které se snížení hladiny ve vrtu upraví opravným snížením  $s_v$  (Pech, 2010).

$$s_c = s_v \frac{H'}{H} = s_v - \frac{s_v^2}{2H} \quad [13]$$

$s_c$ .....opravné snížení [m]

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

$H'$ .....mocnost redukované zvodnělé porézní vrstvy [m]

$H$ .....mocnost zvodnělé vrstvy v dosahu depresního kužele [m]

#### 4.4 Proudění podzemních vod k ideálnímu vrtu

Tato kapitola se zabývá prouděním podzemní vody k ideálnímu vrtu. Pojem ideální vrt byl vysvětlen v kapitole 4.1.2.

##### 4.4.1 Nestacionární proudění

Předpokládáme, že proudění vody zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou je horizontální. Hladina je omezena dvěma nepropustnými vrstvami, jež jsou vzdáleny o konstantní mocnost (Mays, 2001).



Jako výchozí rovnici využijeme rovnici z kapitoly 4.3.3. Z této rovnice můžeme odstranit vertikální složku, jelikož uvažujeme horizontální proudění. Rovnice má nyní tvar:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad [14]$$

Rovnici zderivujeme a upravíme pro převedení do cylindrických souřadnic za pomoci  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ . Platí tedy:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{\partial s \partial r}{\partial r \partial x} = \frac{\partial s}{\partial r \sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\partial s}{\partial r} \frac{x}{r} \quad [15]$$

Následně provedeme druhou derivaci:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 s x^2}{\partial^2 r r^2} + \frac{\partial s y^2}{\partial r r^3} \quad [16]$$

Obdobně vyřešíme derivaci pro y:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 s y^2}{\partial^2 r r^2} + \frac{\partial s x^2}{\partial r r^3} \quad [17]$$

Takto upravené rovnice pro obě osy dosadíme do rovnice [14]. Tímto spojením získáme diferenciální rovnici v cylindrických souřadnicích, která popisuje průsak vody nasyceným porézním prostředím.

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad [18]$$

s.....snížení [m]

r.....radiální vzdálenost [m]

t.....čas [s]

T.....koeficient transmisivity [m<sup>2</sup>/s]

S.....storativita [-]

(Mays, 2001)

Poprvé publikoval řešení základní rovnice neustáleného proudění v cylindrických souřadnicích pro homogenní, izotropní prostředí a tzv. ideální vrt (tj. vrt bez dodatečných odporů) C. V. Theis (1935). Při řešení rovnice vycházel z předpokladů:

- Darcyho vztah pro filtrační rychlost platí po celou dobu čerpací zkoušky.
- Jde o nestlačitelnou kapalinu.
- Zvodnělá vrstva je homogenní a izotropní.
- Čerpané množství vody z vrtu je v čase konstantní.
- Výška zvodnělé vrstvy  $b$  je konstantní v celé řešené oblasti.
- Koeficienty transmisivity a storativity jsou v řešené oblasti konstantní v čase i v prostoru.
- V čase  $t = 0$  je piezometrická výška hladiny podzemní vody ve všech místech zvodnělé vrstvy konstantní a je rovna  $H$ , a rovněž ve vrtu je výška vody  $H$ .
- Na vrtu ani v jeho blízkém okolí nepůsobí dodatečné odpory (jde o tzv. ideální vrt).
- Objem čerpaného vrtu je zanedbatelně malý a nemusí být při řešení brán v úvahu.
- Vrt se nachází v neomezené zvodnělé vrstvě (tj. během celé doby čerpání snížení ve zvodnělé vrstvě vyvolané čerpáním nedosáhne k nepropustné ani napájecí hranici).

Propojení mezi prouděním podzemní vody a přenosem tepla vzal v úvahu Theis a za pomoci profesora C. I. Lubina určil následující tvar pro snížení (Theis, 1935).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad [19]$$

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

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

W(u).....Theisova studňová funkce

Theisova studňová funkce má tvar exponenciálního integrálu. Pro hydrogeologické účely se využívá její aproximace nekonečnou řadou (Theis, 1935).

$$W(u) = -\gamma - \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^n}{n!n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad [20]$$

$\gamma$ .....Eulerova konstanta  $\gamma = 0,577216$

u.....Theisův argument studňové funkce [-]

Theisův argument  $u$  lze vyjádřit jako:

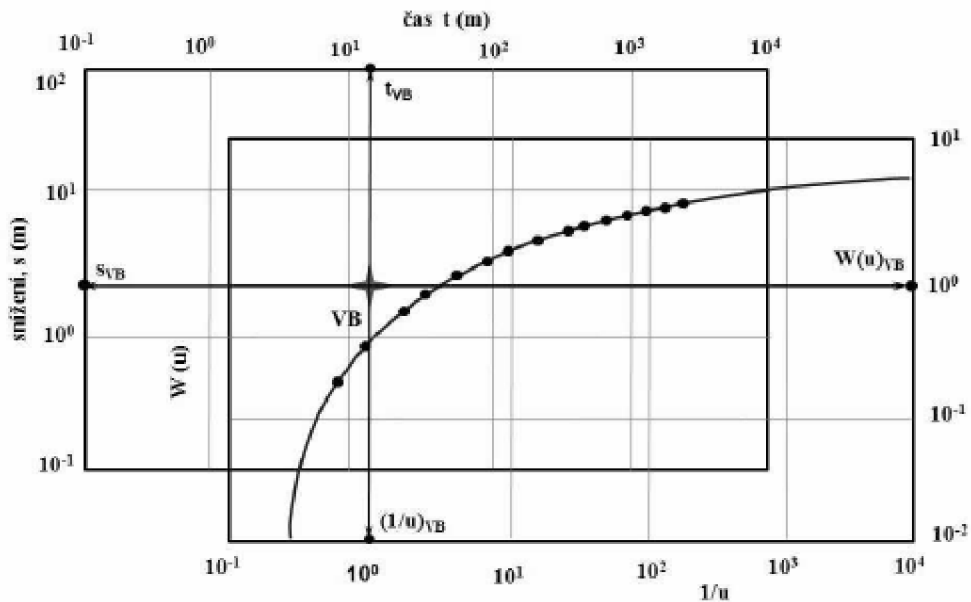
$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad [21]$$

- r.....radiální vzdálenost [m]  
 S.....storativita zvodnělé vrstvy [-]  
 T.....koeficient transmisivity [m<sup>2</sup>/s]  
 t.....čas [s]  
 (Theis,1935)

#### 4.4.2 Theisova metoda typové křivky

Rovnice Theise je využívána pro vyhodnocování přítokových zkoušek za nestacionárního režimu proudění. Tato metoda je nazývána jako Theisova metoda typové křivky. Rovnici lze využít na vyhodnocení transmisivity a storativity z hodnot čerpací zkoušky za neustáleného proudění za předpokladu, že průtok Q = konstantní a jsou známy i ostatní parametry (Pech, 2010).

Hodnoty snížení vody v čerpaném vrtu v čase, které získáme během čerpací zkoušky, vyneseme do grafu ve stejném log-log měřítku separátně. Princip vynesení hodnot je znázorněn na obrázku 8.



Obrázek 8: Theisova metoda typové křivky (Pech,2010)

Křivku získanou z čerpací zkoušky posouváme po Theisově typové křivce, dokud nezískáme shodu. Zvolíme si libovolný vztahový bod VB a odečteme z grafů

hodnoty  $s_{VB}$ ,  $t_{VB}$ ,  $(l/u)_{VB}$  a  $W(u)_{VB}$ . Dosažením parametrů  $s_{VB}$  a  $W(u)_{VB}$  do rovnice [19] vypočteme koeficient transmisivity.

$$T = \frac{Q}{4\pi s_{VB}} W(u)_{VB} \quad [22]$$

$Q$ .....průtok [ $m^3/s$ ]

$s_{VB}$ .....snížení [m]

$W(u)_{VB}$ .....Theisova studňová funkce

Pro získání storativity dosadíme parametry  $(l/u)_{VB}$  a  $t_{VB}$  do rovnice [21].

$$S = \frac{4Tu_{VB}t_{VB}}{r^2} \quad [23]$$

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

$t_{VB}$ .....čas [s]

$u_{VB}$ .....Theisův argument studňové funkce [-]

$r$ .....radiální souřadnice [m]

Pro získání storativity dosadíme parametry  $(1/u)_{VB}$  a  $t_{VB}$ .

(Mays, 2001)

#### 4.4.3 Jacobova semilogaritmická metoda přímky

Theisovu studňovou funkci lze zjednodušit zanedbáním třetího, čtvrtého a dalších členů na pravé straně, pokud je hodnota  $1/u > 100$  s chybou menší než 0,25 %. Tímto zjednodušením dostaneme semilogaritmickou aproximaci funkce podle Jacoba (1946)

$$W(u) = -0,577216 - \ln u \quad [24]$$

$u$ .....Theisův argument studňové funkce [-]

Po dosažení argumentu Theisovy studňové funkce  $u$  z rovnice [21] lze nahradit Theisovu studňovou funkci výrazem

$$W(u) \cong \ln \frac{2,246Tt}{r^2S} \quad [25]$$

T.....koeficient transmisivity [m<sup>2</sup>/s]

r.....radiální souřadnice [m]

t.....čas [s]

S.....storativita zvodnělé vrstvy [-]

Dosazením této rovnice do rovnice [19] získáme vztah pro snížení

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,246Tt}{r^2S} \quad [26]$$

Q.....průtok [m<sup>3</sup>/s]

T.....koeficient transmisivity [m<sup>2</sup>/s]

r.....radiální souřadnice [m]

t.....čas [s]

S.....storativita zvodnělé vrstvy [-]

Pro získání vztahu, který vyjadřuje snížení v jakékoliv vzdálenosti od osy čerpaného vrtu, dosadíme dekadický logaritmus na místo přirozeného logaritmu.

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,246Tt}{r^2S} \quad [27]$$

Q.....průtok [m<sup>3</sup>/s]

T.....koeficient transmisivity [m<sup>2</sup>/s]

r.....radiální souřadnice [m]

t.....čas [s]

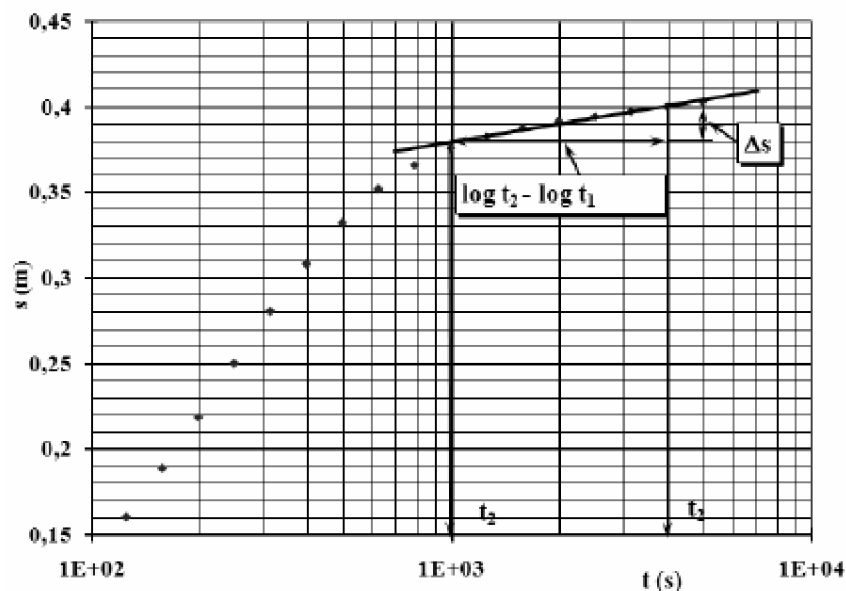
S.....storativita zvodnělé vrstvy [-]

Na obrázku 9 je graf čerpací zkoušky, kde jsou na vodorovné ose x vyneseny hodnoty log t a vertikální ose y hodnoty snížení s. Je patrné, že vykreslení křivky závisí na délce časového úseku. U delších časových úseků se křivka transformuje do přímky se sklonem

$$i = (s_2 - s_1) / (\log t_2 - \log t_1) \quad [28]$$

$s_1, s_2$ .....snížení [m]

$t_1, t_2$ .....čas [s]



Obrázek 9: Graf čerpací zkoušky  $s$  vs.  $\log t$  (Pech, 2010)

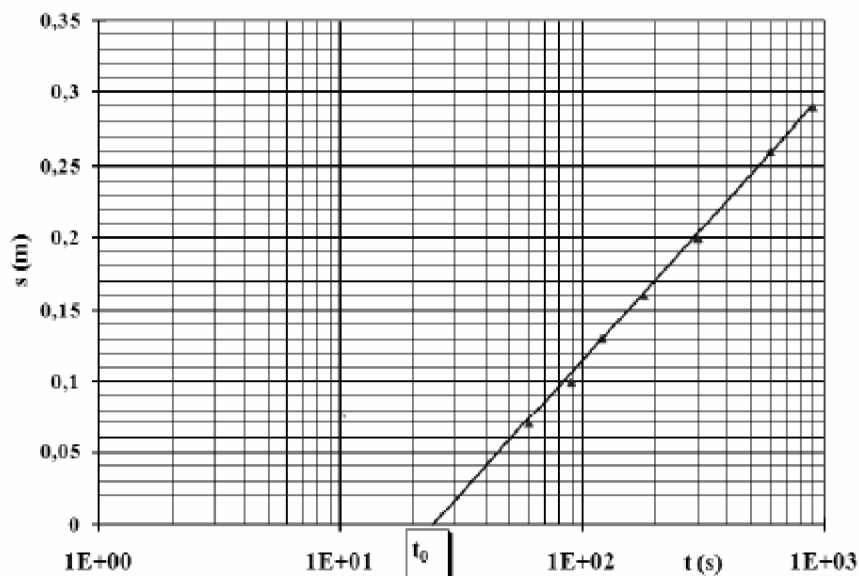
Koeficient transmisivity určíme na základě výše zmíněné rovnice jako

$$T = 0,183 \frac{Q}{i} \quad [29]$$

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

$i$ .....sklon Cooper-Jacobovy přímky [-]

Koeficient storativity lze určit Jacobovou metodou, pokud máme k dispozici údaje z jedno či více pozorovacích vrtů. Koeficient je určen na základě snížení hladiny vody ve vrtu v čase  $t$ . Na obrázku 10 vidíme graf, kde na vodorovné ose  $x$  vyneseme hodnoty logaritmu času  $t$  a na vertikální ose  $y$  hodnoty snížení  $s$ . Bod  $t_0$  udává začátek snížení piezometrické hladiny na pozorovacím vrtu, kde je hodnota snížení zatím nulová. Pozorovací vrt je ve vzdálenost  $r_p$  (Valentová, 2018).



Obrázek 10: Graf čerpací zkoušky na pozorovacím vrtu (Pech, 2010)

Storativitu vypočteme ze vzorce

$$S = 2,246 \frac{T t_0}{r^2} \quad [30]$$

T.....koeficient transmisivity [m<sup>2</sup>/s]

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

t<sub>0</sub>.....čas [s]

(Pongmanda, 2020)

## 4.5 Proudění podzemních vod ke skutečnému vrtu

V této kapitole se budeme zabývat popisem a řešením základních parciálních rovnic nestacionárního radiálně-symetrického průsaku podzemní vody k úplnému vrtu, který se nachází ve zvodnělé vrstvě s najatou hladinou v bezrozměrných parametrech. Uvedené řešení je pro reálný vrt. Pojem reálný vrt je vysvětlen v kapitole 4.1.3.

### 4.5.1 Bezrozměrné parametry

Bezrozměrné parametry můžeme rozdělit na:

- Bezrozměrný čas

- Bezrozměrný poloměr
- Bezrozměrné snížení piezometrické výšky ve vzdálenosti r od vrtu
- Bezrozměrné snížení hladiny vody v odběrovém vrtu
- Bezrozměrný koeficient storativity vrtu
- Bezrozměrný koeficient dodatečných odporů (Pech, 2010).

#### 4.5.1.1 Bezrozměrný čas

$$t_D = \frac{Tt}{r_v^2 S} \quad [31]$$

T.....koeficient transmisivity zvodnělé vrstvy [m<sup>2</sup>/s]

t.....čas [s]

S.....storativita [-]

r<sub>v</sub>.....poloměr odčerpávaného vrtu [m]

#### 4.5.1.2 Bezrozměrný poloměr

$$r_D = \frac{r}{r_v} \quad [32]$$

r<sub>v</sub>.....poloměr odčerpávaného vrtu [m]

r.....radiální vzdálenost od osy čerpaného vrtu [m]

#### 4.5.1.3 Bezrozměrné snížení piezometrické výšky ve vzdálenosti r do vrtu

$$s(r_D, t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h(r, t)) \quad [33]$$

Kde

$$T = b K \quad [34]$$

T.....koeficient transmisivity zvodnělé vrstvy [m<sup>2</sup>/s]

K.....hydraulická vodivost [m/s]

b.....mocnost zvodnělé vrstvy [m]

t.....čas [s]



Q.....čerpané množství [m<sup>3</sup>/s]

h(r,t).....piezometrická výška v čase  $t$  ve vzdálenosti  $r$  od odčerpávaného vrtu [m]

H.....piezometrická výška v čase  $t = 0$  [m]

$t_D$ .....bezrozměrný čas [-]

$r_D$ .....bezrozměrný poloměr [-]

#### 4.5.1.4 Bezrozměrné snížení hladiny vody v odběrovém vrtu

$$s_{VD}(t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h_V(t)) \quad [35]$$

Q.....čerpané množství [m<sup>3</sup>/s]

T.....koeficient transmisivity zvodnělé vrstvy [m<sup>2</sup>/s]

H.....piezometrická výška v čase  $t = 0$  [m]

$h_V$ .....výška hladiny vody v odběrovém vrtu v čase  $t$  [m]

#### 4.5.1.5 Bezrozměrný koeficient storativity vrtu

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_v^2 S} \quad [36]$$

C.....jednotkový faktor storativity vrtu [m<sup>2</sup>]

S.....storativita [-]

$r_v$ .....poloměr odčerpávaného vrtu [m]

#### 4.5.1.6 Bezrozměrný koeficient dodatečných odporů

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} \quad [37]$$

Q.....čerpané množství [m<sup>3</sup>/s]

T.....koeficient transmisivity zvodnělé vrstvy [m<sup>2</sup>/s]

$s_w$ .....část snížení ve vrtu, připadající na vliv dodatečných odporů [m]

## 4.5.2 Dodatečné odpory

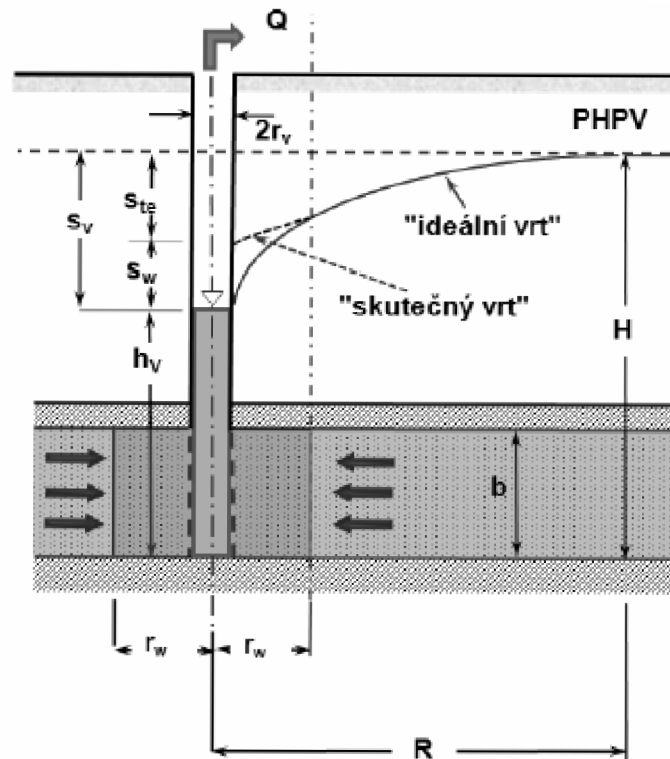
Dodatečné odpory představují soubor jevů, jejichž vlivem dochází k odchýlení naměřených hodnot snížení vody na reálném vrtu oproti teoretickému modelu snížení vody na ideálním vrtu, kdy jsou dodatečné odpory zanedbány. Mezi faktory způsobující dodatečné odpory patří například viskozita, odpor porézního prostředí nasyceného vodou a na dodatečných ztrátách vznikajících ve vrtu, na jeho stěnách i v okolí (Kahuda, 2020).

Výpočtové snížení hladiny vody ve vrtu je z tohoto důvodu nižší než snížení hladiny vody naměřené na reálném (s dodatečnými odpory) odběrovém vrtu.

Dodatečné odpory mohou vzniknout již při realizaci vrtu z důvodu nedokonalosti techniky a technologie hloubení či vystrojení odběrových vrtů. Mezi další příčiny vzniku dodatečných odporů řadíme hydromechanické, biologické, chemické či další jevy, které mohou vzniknout během používání vrtu (HURST, 1953).

Část snížení, které je způsobeno dodatečnými odpory, můžeme rozdělit na snížení způsobené níže uvedenými faktory (Pech, 2010).

- 1) Kolmatací vrtu, tedy ucpáváním pórů, které je způsobeno jemným materiálem. Dochází k narušení původní vnitřní struktury porézního prostředí a ke snížení jeho průtočnosti.
- 2) Zmenšení aktivního průřezu stěny vrtu. Toto poškození vzniká v oblasti, kde je stěna vrtu tvořena perforovanou pažnicí, filtrem apod..
- 3) Neúplným průnikem (tzv. neúplné vrty), který vzniká při neúplném otevření mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem.
- 4) Ucpáváním, které je zapříčiněno zachycováním částic obsypu nebo horniny v otvorech filtru.
- 5) Třením vody o stěny vrtu a vnitřním třením vody.
- 6) Turbulentním režimem proudění v blízkosti odběrového vrtu uvnitř zvodnělé vrstvy.
- 7) Další druhy dodatečných odporů.



Obrázek 11: Snížení na odběrovém vrtu s dodatečnými odpory (Pech,2010)

Celkové snížení způsobené dodatečnými odpory vyjádříme vztahem

$$s_w = s_K + s_F + s_P + s_I + s_{TP} + s_O \quad [38]$$

kde jednotlivá snížení jsou:

$s_K$ .....kolmatací vrtu [m]

$s_F$ .....zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu [m]

$s_P$ .....neúplným průřezem [m]

$s_I$ .....ucpáváním [m]

$s_T$ .....třením vody [m]

$s_{TP}$ .....turbulentním režim proudění [m]

$s_O$ .....dalšími druhy dodatečných odporů [m]

### 4.5.3 Storativita – zásobnost vrtu

Storativitu neboli zásobnost vrtu lze definovat jako dodatečný přítok či prázdnění vrtu. Zásadně ovlivňuje počáteční úsek přítokové zkoušky. Pokud není vliv storativity vrtu brán v úvahu při vyhodnocování přítokových zkoušek dostaneme zkreslené výsledky.

Vlivem objemu vrtu na průběh čerpací zkoušky v počátečním úseku se zabýval Ramey (1970). Ze svých pozorování odvodil tzv. jednotkový faktor storativity vrtu  $C$ .

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad [39]$$

$\Delta V$ ..... objemová změna [ $m^3$ ]

$\Delta h$ .....změna výšky vody ve vrtu [m]

Tuto rovnici můžeme upravit do tvaru bezrozměrného faktoru storativity.

$$c = Q \frac{t_j}{s_j} \quad [40]$$

$Q$ .....odběr vody z vrtu [ $m^3/s$ ]

$t_j, s_j$ .....dvojice odpovídajících si hodnot na přímém úseku jednotkového sklonu v grafu  $\log s$  vs.  $\log t$ .

Během svého výzkumu Ramey zjistil, že ve vyhodnoceném grafu pro počáteční úsek přítokových zkoušek se nachází jednotkový sklon  $45^\circ$ .

## 4.6 Hydrodynamické zkoušky

Hydrodynamické zkoušky charakterizujeme jako metody pro určení hydraulických charakteristik na hydrogeologickém objektu. Charakteristiky získáváme pozorováním hydraulického zásahu do geohydrodynamického systému (Jetel, 1982).

### 4.6.1 Čerpací zkoušky

Čerpací zkouška s ustáleným režimem čerpaní byla na začátku 20. století nejvíce využívaným typem zkoušky. Její výhodou byla její snadná interpretace.

Princip této zkoušky spočívá v čerpání vody z vrtu, dokud nedojde k ustálení hladiny vody ve vrtu. Nevýhodou této metody je dlouhý čas čerpání do ustálení hladiny (Rivera, 1979) .

U čerpací zkoušky s neustáleným režimem čerpání zaznamenáváme pokles hladiny ve zkoumaném objektu v určitých časových intervalech. I zde čerpáme vodu konstantně. Aby bylo možné vypočítat storativitu, je nutné zaznamenávat snížení i na pozorovacího vrtu (Šráček, 2003).

## 4.6.2 Stoupací zkoušky

Stoupací zkouška je metodicky spojena s čerpací zkouškou. Z pravidla následuje hned po skončení čerpací zkoušky.

Během stoupacích zkoušek přerušíme konstantní čerpání z vrtu. Po přerušení dochází ke stoupání hladiny ve vrtu. Při tomto stoupání přitéká do vrtu ze zvodně totožný objem vody jako je objem vyčerpaný (Čerpací, stoupací a vsakovací zkoušky, 2011).

## 4.7 Regenerace vrtu

Aby bylo možné odebírat z vrtů požadované množství vody i s odstupem času, je důležité nezanedbat jeho údržbu. Důvodem klesání kvality vrtu je jeho zvyšující se stáří, kdy dochází k biologické, chemické či například hydromechanické degradaci vrtu. Další příčinou snížení kvality a životnosti vrtu může být i jeho špatné navržení a provedení. Pokud zanedbáváme údržbu vrtu, můžeme se dostat do situace, kdy jediným řešením bude jeho obnova (Soulby, 2010).

Regeneraci vrtů můžeme rozdělit do několika procesů:

- Zjištění druhu studně pro správný postup regenerace
- Narušení povlaků a usazenin na stěnách vrtu
- Sterilizace vrtu
- Čerpací zkouška pro ověření úspěšnosti regenerace

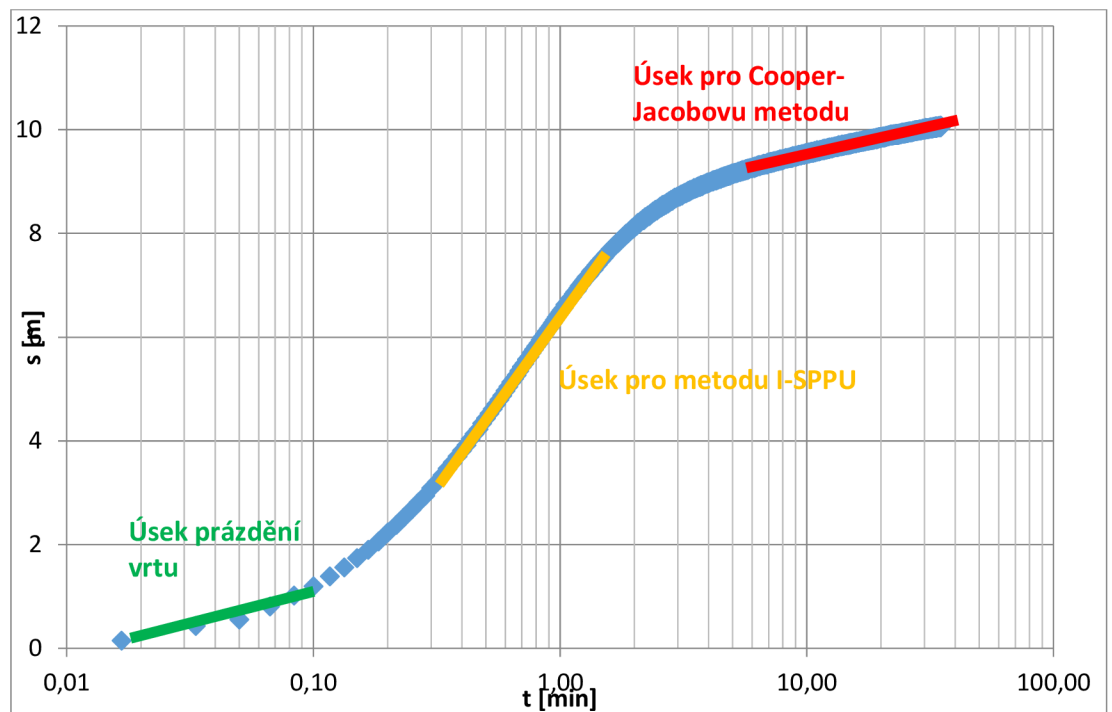
Odstraňování usazenin a povlaků můžeme provádět buď mechanicky, většinou mechanickým rázem, chemicky či za pomoci ultrazvuku (Kahuda, 2020).

## 5 Analytická část

Analytická část práce je tvořena konkrétními daty a reálnými popisy zjištěnými při zpracování práce.

### 5.1 Postup výpočtu

Na obrázku 12 je zobrazeno rozložení přímkových úseků čerpací zkoušky. Zelená oblast prázdnění vrtu slouží k výpočtu bezrozměrného koeficientu storativity vrtu, žlutá oblast pro výpočet skin faktoru podle Agarwala a červený úsek pro výpočet skin faktoru podle Cooper-Jacoba.



Obrázek 12: Rozložení přímkových úseků čerpací zkoušky (Bc. Olmrová, 2022)

- Výpočet z druhého přímkového úseku – Cooper-Jacobovy semilogaritmické aproximace

1) Výpočet skin faktoru  $W$  [-]

$$W = \frac{2 * \pi * T * s_v}{Q} - 0,5 \ln \frac{2,246 * T * t}{r_v * r_v * S}$$

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

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

$S$ .....storativita [-]

$s_v$ .....část snížení ve vrtu odpovídající času  $t$  [m]

$t$ .....čas odpovídající snížení ve vrtu [s]

$r_v$ .....poloměr vrtu [m]

- 2) Výpočet snížení způsobené dodatečnými odpory  $s_w$  [m] dle (van Everdingen, 1953)

$$s_w = \frac{Q * W}{2 * \pi * T}$$

$Q$ .....čerpané množství [m<sup>3</sup>/s]

$T$ .....transmisivita zvodnělé vrstvy [m<sup>2</sup>/s]

$W$ .....skin faktor [-]

- Výpočet z prvního přímkového úseku – metoda I-SPPU

- 3) Výpočet jednotkového faktoru pro storativitu  $C$  [m<sup>2</sup>]

$$C = Q * \left(\frac{t_j}{s_j}\right)$$

$Q$ .....čerpané množství [m<sup>3</sup>/s]

$m$ .....sklon přímkového úseku [-]

$t_j, s_j$ .....dvojice hodnot na přímkovém úseku jednotkového sklonu v grafu  $\log s_v$  vs.  $\log t$

- 4) Výpočet bezrozměrného koeficientu storativity vrtu

$$C_D = \frac{C}{2 * \pi * r_v^2 * S}$$

$C$ .....jednotkový faktor storativity vrtu [m<sup>2</sup>]

$S$ .....storativita [-]

$r_v$ .....poloměr odčerpávaného vrtu [m]

5) Výpočet skin faktoru  $W$  [-]

$$W = \frac{1}{0,86} * \frac{2 * \pi * T * s}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237$$

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

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

$C_D$ .....bezrozměrný koeficient storativity vrtu [-]

6) Výpočet snížení způsobené dodatečnými odpory  $s_w$  [m]

$$s_w = \frac{Q * W}{2 * \pi * T}$$

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

$W$ .....skin faktor [-]

## 5.2 Vrt KV-2 a KV-9 – Veletov

Vrty KV-2 a KV-9 se nacházejí v Žehušické kotlině, která tvoří severozápadní část Čáslavské kotliny. Oblast se vyznačuje rovinným až ploše pahorkatým reliéfem středopleistocenních a mladopleistocenních teras, širokými údolními nivami, pokrivy závějí a drobnými přesypy navátých písků.

Zájmová oblast je odvodňována J, V a mírně i Z směrem do řeky Labe.

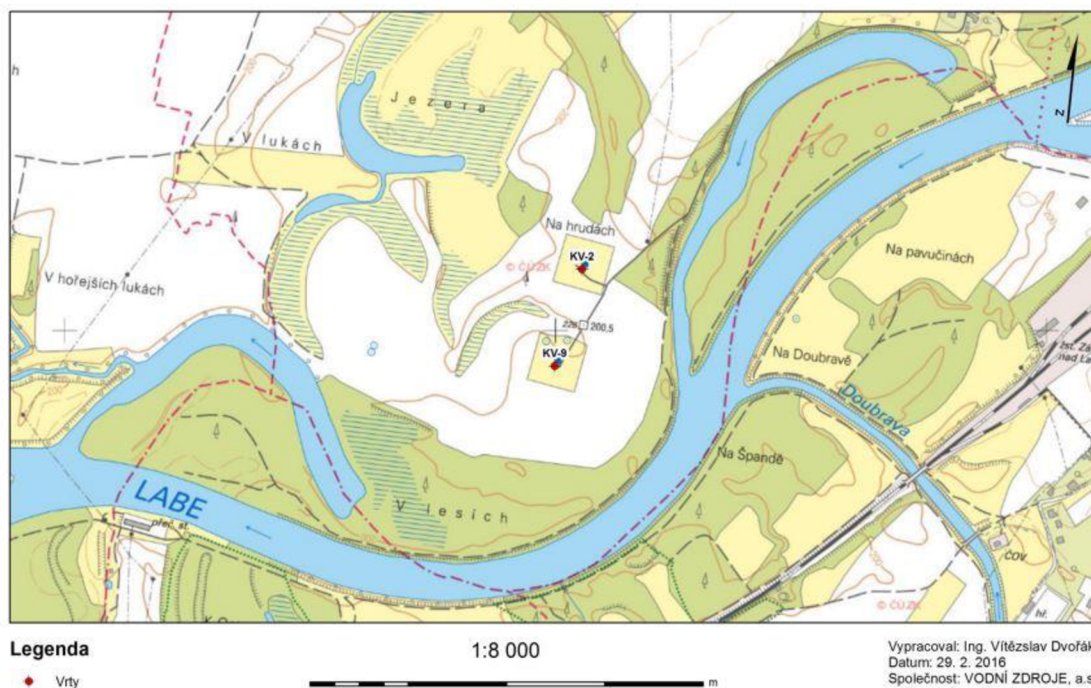
Klimaticky se oblast řadí do teplé klimatické oblasti T-2, jež je charakterizována jako teplá s dlouhým suchým létem. Přechodná období jsou krátká stejně jako zima. Zimní období se vyznačují jako mírně teplá a suchá až velmi suchá, s krátkým trváním sněhové pokrývky (40–50 dnů v roce). Průměrný úhrn srážek se pohybuje okolo 600 mm a průměrné roční teploty jsou v rozmezí 8–9 °C (Dvořák, 2016).

Zájmová lokalita z regionálně geologického hlediska náleží k Českému masivu. Podloží je tvořeno turonskými a písčitymi slínovci, které jsou z velké části zakryty kvarténními říčními a neolitickými sedimenty. Kvarténní sedimenty tvoří



převážně štěrkopísek, středně zrnité písky s příměsí jílovce, jež se vyskytují převážně na povrchu. Dle archivního geologického profilu se mocnost kvartetních sedimentů pohybuje v rozmezí 14-15 m.

Vrt KV-2 i KV-9 je umístěn uvnitř vlastní oplocenky o rozloze přibližně 100 m<sup>2</sup> (obr 13). Nad vrtem je vytvořen násep s manipulační šachtou a betonovou budkou. Je zde zaveden elektrický proud. Součástí oplocenky je i další vrt, který je využíván jako pozorovací vrt (Dvořák, 2016).



Obrázek 13: Umístění vrtů KV-2 a KV-9 (Ing. Dvořák, 2016)

Na základě archivních dat byly vytvořeny profily zkoumaných vrtů, jež jsou uvedeny jako příloha 1 a 2 této práce. Dále byly z těchto dat stanoveny maximální průtoky metodou typových křivek. Pro vrt KV-2 byl stanoven maximální průtok 11 l/s a pro vrt KV-9 13,2 l/s. V obou případech jde o maximální povolené využití jímacích objektů. Za současného stavu budou tyto maximální průtoky výrazně omezeny vlivem stárnutí objektů.

Jelikož jsou tyto vrtů uvažovány pro budoucí zásobování Kolínska pitnou vodou, vznesl provozovatel vodovodní sítě požadavek na kapacitu lokality 25 l/s, jakožto součet čerpaného množství z obou vrtů. Z informací, které byly uvedeny výše, víme, že tato kapacita nebyla dosažena ani těsně po zbudování obou vrtů.

Před hydrodynamickými zkouškami byly u obou vrtů provedeny kamerové prohlídky.

### **5.2.1 Kamerová prohlídka vrtu KV-2**

U vrtu KV-2 byl určen odměrný bod na 2 m nad terénem. Zkouška odhalila velké množství částic ve vodě, které snižovaly viditelnost. Dále byl zjištěn velmi silný nárůst rzi, bakterií a jejich metabolického odpadu. V hloubce okolo 8 m byla nalezena přítomnost bakterií typu Legionella. Od 11 m je díky velké koncentraci kalu obraz nečitelný. Kamerová zkouška také zjistila, že horní hranice usazenin nacházejících se nade dnem vrtu je v hloubce cca 15,5 m od odměrného bodu (cca 12,5 m pod terénem). V hloubce 16,3 m by se mělo nacházet dno kalníku. Po odečtení hodnot vyplývá, že se nade dnem vrtu KV-2 nachází 4 m silná vrstva usazenin (Dvořák, 2016).

### **5.2.2 Kamerová prohlídka vrtu KV-9**

Odměrný bod se nacházel 2 m na terénem. Při zkoušce vykazoval vrt velmi dobrou viditelnost. Byla patrná inkrustace zejména pak mezi 13-14 m od odměrného bodu. Preformace vrtu se nachází v hloubce 7 až 15 m a pravděpodobně pokračuje hlouběji. Dno kalníku by se mělo nacházet v 15,5 m pod terénem. Zkouška odhalila, že horní hrana usazenin nacházejících se nade dnem vrtu je v hloubce 12 m p.t. Po odečtení hodnot vyplývá, že nade dnem vrtu je vytvořena vrstva usazenin o tloušťce cca 3,5m (Dvořák, 2016).

### **5.2.3 Popis hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2**

Vhodný průtok pro určení parametrů byl při strojní zkoušce stanoven na 2,2 l/s. Tento průtok byl konstantně udržován v průběhu celé čerpací zkoušky. Doba trvání čerpací zkoušky byla 64,6 min. Následující stoupací zkouška trvala 25,15 min. Obě zkoušky byly měřeny do ustáleného stavu. Ke konci čerpací zkoušky bylo dosaženo snížení 4,99 m. Maximální snížení čerpací zkoušky bylo 5,4 m a bylo jej dosaženo přibližně ve 14 min. V této části čerpací zkoušky došlo pravděpodobně k protržení kolmatační zóny, které bylo zapříčiněno vlivem vysokých vtokových rychlostí. Vlivem protržení došlo k uvolnění drobných částic z okolí vrtu. To zavinilo zvýšení hladiny ve vrtu. Kvůli změnám v okolí vrtu během čerpací zkoušky nebylo možné vyhodnotit hodnotu transmisivity a nasycené hydraulické vodivosti. Tyto hodnoty byly

vyhodnoceny na základě stoupací zkoušky. Hodnota transmisivity byla  $2,46 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  a hodnota hydraulické vodivosti byla  $2,23 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  (Dvořák, 2016).

Tabulka 1: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2

Q [m <sup>3</sup> /s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m <sup>2</sup> /s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,0022	0,17	0,076	0,001007	5,3569	700

### 5.2.3.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

$$W = \frac{2 * 3,14 * 0,001007 * 5,3569}{0,0022} - 0,5 \ln \frac{2,246 * 0,001007 * 700}{0,17^2 * 0,076} = 12,10$$

$$s_w = \frac{0,0022 * 12,10}{2 * 3,14 * 0,001007} = 4,2 \text{ m}$$

Snížení způsobené dodatečnými odpory má hodnotu 4,2 m.

### 5.2.3.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 2: Parametry metody I-SPPU pro vrt KV-2

s [-]
4,57

$$C = 0,0022 * \left( \frac{3}{0,0721} \right) = 0,092 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{0,092}{2 * 3,14 * 0,17^2 * 0,076} = 6,67$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \left( \frac{2 * 3,14 * 0,0246 * 4,57}{0,0022} - 1,027 \log 6,67 - 1,0237 \right) = 13,1$$

$$s_w = \frac{0,0022 * 13,1}{2 * 3,14 * 0,001007} = 4,56 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 4,56 m.

## 5.2.4 Popis hydrodynamické zkoušky vrtu KV-9

Vhodný průtok pro určení parametrů byl při strojní zkoušce stanoven na 4,16 l/s. Tento průtok byl konstantně udržován v průběhu celé čerpací zkoušky. Doba trvání čerpací zkoušky byla 31,23 min. Následující stoupací zkouška trvala 13,35 min. Obě zkoušky byly měřeny do ustáleného stavu. Maximální snížení čerpací zkoušky bylo 5,3 m, což se rovná maximálnímu snížení. Za pomoci Jacobovy aproximace byla vypočtena hodnota transmisivity  $2,29 \cdot 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$  a hodnota hydraulické vodivosti  $2,08 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ . Pro stoupací zkoušku byly hodnoty vypočteny stejnou metodou. Hodnota transmisivity u stoupací zkoušky je  $2,08 \cdot 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ . Hydraulická nasycenost má hodnotu  $1,89 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$  (Dvořák, 2016).

Tabulka 3: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu KV-9

Q [m <sup>3</sup> /s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m <sup>2</sup> /s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,0042	0,1125	0,076	0,005925	5,258	800

### 5.2.4.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

$$W = \frac{2 * 3,14 * 0,005925 * 5,258}{0,0042} - 0,5 \ln \frac{2,246 * 0,005925 * 800}{0,1125^2 * 0,076} = 41,92$$

$$s_w = \frac{0,0042 * 41,92}{2 * 3,14 * 0,005925} = 4,73 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 4,73 m.

## 5.2.4.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 4: Parametry metody I-SPPU metody pro vrt KV-9

s [-]
3,16

$$C = 0,0042 * \left(\frac{3}{0,5705}\right) = 0,022 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{0,022}{2 * 3,14 * 0,1125^2 * 0,076} = 3,642$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \left(\frac{2 * 3,14 * 0,005925 * 3,16}{0,0042} - 1,027 \log 3,642 - 1,0237\right) = 30,69$$

$$s_w = \frac{0,0042 * 30,69}{2 * 3,14 * 0,005925} = 3,46 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 3,46 m.

## 5.2.5 Shrnutí výsledků vrtu KV-2 a KV-9

Tabulka 5: Výsledky Cooper-Jacobovi výpočetní metody hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2 a KV-9

KV-2		KV-9	
W	s <sub>w</sub> [m]	W	s <sub>w</sub> [m]
12,10	4,2	41,92	4,73

Tabulka 6: Výsledky I-SPPU metody hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2 a KV-9

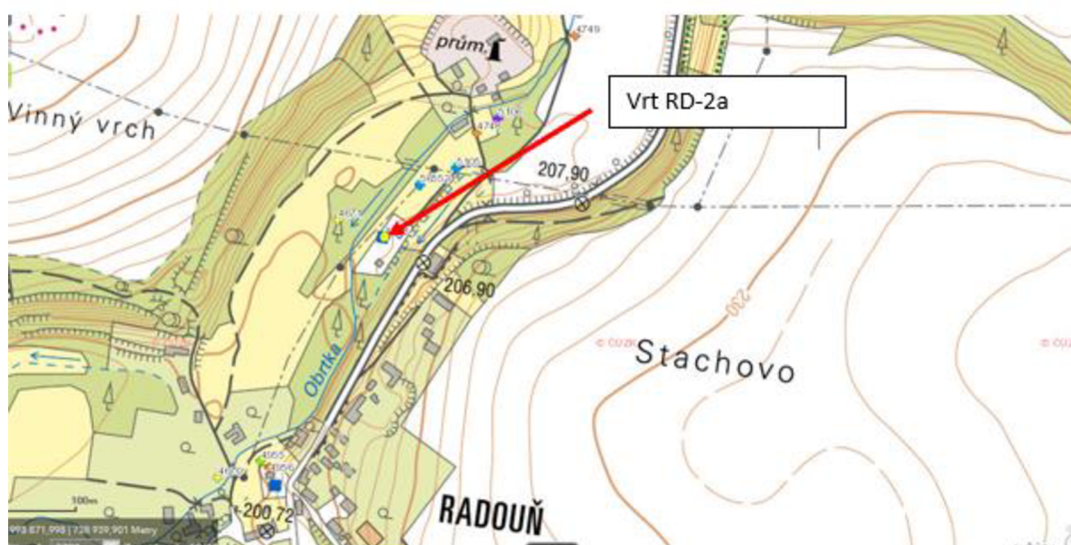
KV-2		KV-9	
W	s <sub>w</sub> [m]	W	s <sub>w</sub> [m]
13,1	4,56	30,69	3,46

Výsledek čerpací zkoušky odhalil snížení funkčnosti vrtu KV-2 i KV-9. I kdyby byla provedena regenerace vrtu, není možné dosáhnout požadované odběrné kapacity 25 l/s pro součet obou vrtů. Tento fakt je podpořen i skutečností, že vrty nebyly schopny dosáhnout požadované hodnoty ani bezprostředně po jejich realizaci. Z těchto důvodů bylo místo regenerace vrtu navrženo zbudování dalších 3 vrtů v zájmové oblasti, které by zajistily dosažení požadavků správce vodovodní sítě.

### 5.3 Vrt RD-2 Radouň

Zájmová oblast se nachází v dolní části české křídové pánve. Hladina podzemní vody je velmi silně omezena. Proud podzemní vody je vázán na pukliny v podloží, které tvoří typické prostředí s dvojitou porézností.

Vrt RD-2 z roku 1975 se nalézá v lokalitě čerpací stanice Radouň ve střední části severních Čech (obr 14). Tato lokalita se 3 čerpacími vrty představuje jeden z hlavních vodních zdrojů v regionálním zásobování pitnou vodou. Zejména pak pro oblast mezi Mělníkem a Ústí nad Labem. Typický provozní čerpaný objem je až 55 m<sup>3</sup>/h (Kahuda, 2021).



Obrázek 14: Umístění vrtu RD-2 (mapy.geology.cz, 2015)

### 5.3.1 Kamerová prohlídka vrtu RD-2

Hladina vody v době měření (27.5.2015) dosahovala 4,08m.

Ocelové pažnice nesly náznaky inkrustace. Počet nárůstů se přibývajícím hloubkou zvyšuje. V hloubce 15,6 m dosahují velkých rozměrů. Na přechodu do užších pažnic v hloubce 16,65 m se našla napadávká a různé cizorodé předměty. Přes snahu se nepodařilo s kamerovým aparátem dostat hlouběji. Kvůli objevení výše uvedených znečištění bylo navrženo vyčištění vrtu (Kahuda, 2021).

### 5.3.2 Hydrodynamická zkouška vrtu RD-2 před regenerací

Tabulka 7: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2 před regenerací

Q [m <sup>3</sup> /s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m <sup>2</sup> /s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,0148	0,15	0,0012	0,02257	4,0156	1200

### 5.3.2.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

$$W = \frac{2 * 3,14 * 0,02257 * 4,0156}{0,0148} - 0,5 \ln \frac{2,246 * 0,02257 * 1200}{0,15^2 * 0,0012} = 31,14$$

$$s_w = \frac{0,0148 * 31,14}{2 * 3,14 * 0,02257} = 3,25 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 3,25 m.

### 5.3.2.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 8: Parametry metody I-SPPU pro vrt RD-2 před regenerací

s [-]
3,83

$$C = 0,0148 * \left( \frac{3}{0,0150} \right) = 2,96 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{2,96}{2 * 3,14 * 0,15^2 * 0,0012} = 17456,94$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \frac{2 * 3,14 * 0,02257 * 3,83}{0,0148} - 1,027 \log 17456,94 - 1,0237 = 29,80$$

$$s_w = \frac{0,0148 * 29,80}{2 * 3,14 * 0,02257} = 3,11 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 3,11 m.



### 5.3.3 Hydrodynamická zkouška vrtu RD-2 po regeneraci

Tabulka 9: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2 po regeneraci

Q [m <sup>3</sup> /s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m <sup>2</sup> /s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,0148	0,15	0,0012	0,02257	3,065	800

#### 5.3.3.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

$$W = \frac{2 * 3,14 * 0,02257 * 3,065}{0,0148} - 0,5 \ln \frac{2,246 * 0,02257 * 800}{0,15^2 * 0,0012} = 22,24$$

$$s_w = \frac{0,0148 * 22,24}{2 * 3,14 * 0,0123} = 2,32 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 2,32 m.

#### 5.3.3.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 10: Parametry metody I-SPPU metody pro vrt RD-2 po regeneraci

s [-]
2,39

$$C = 0,0148 * \left( \frac{4}{0,0204} \right) = 2,9 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{2,9}{2 * 3,14 * 0,15^2 * 0,0012} = 17114,65$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \frac{2 * 3,14 * 0,02257 * 2,39}{0,0148} - 1,027 \log 17114,65 - 1,0237 = 13,89$$

$$s_w = \frac{0,0148 * 13,89}{2 * 3,14 * 0,02257} = 1,45 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 1,45 m.

### 5.3.4 Shrnutí výsledků vrtu RD-2

Tabulka 11: Výsledky Cooper-Jacobovi výpočetní metody hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2

RD-2 před regenerací		RD-2 po regenerací	
W	sw [m]	W	sw [m]
31,14	3,25	22,24	2,32

Tabulka 12: Výsledky metody I-SPPU výpočetní metody hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2

RD-2 před regenerací		RD-2 po regenerací	
W	sw [m]	W	sw [m]
29,80	3,11	13,89	1,45

Ze souhrnu tabulek 11 a 12 vyplývá, že regenerace vrtu RD-2 proběhla úspěšně. U obou výpočetních metod došlo ke snížení hodnoty skin faktoru. U Cooper-Jacobovy metody je úspěšnost činí 28,6 %. Došlo ke zmenšení snížení vlivem dodatečný odporů o 0,93 m. Výraznější progres proběhl podle metody I-SPPU, která

pracuje s prvním přímkovým úsekem. Podle jejich výpočtů byla úspěšnost regenerace 53,4 % a snížení se zmenšilo o 1,66 m.

## 5.4 Vrt B-1 a B-3 Srbsko

Zájmová oblast, ve které se nacházejí vrty B-1 a B-3 se nachází v Srbsku. Konkrétně v obci Sráža (Стража) ležící přibližně 16 km severně od města Vršac (Вршац). Na obrázku 15 je zobrazeno umístění vrtů na okraji obce.

Situace jímacích vrtů v lokalitě Straža vytipované k regeneraci



Obrázek 15: Umístění vrtu B1 a B3 (Ing. Dvořák, 2015)

### 5.4.1 Kamerová prohlídka vrtu B-3

Kamerová prohlídka odhalila, že vnitřek vrtu je zatížen nízkou mírou kolmatace. Důvodem jejich nízkých hodnot je regenerace vrtu, která proběhla v roce 2010 (Dvořák, 2016).

## 5.4.2 Kamerová prohlídka vrtu B-1

Kamerové záběry odhalily vysokou kolmataci vrtu. Perforované části výstroje a jejich nejbližší okolí byly zasaženy silnými nárůsty bakteriálních kolonií (Dvořák, 2016).

## 5.4.3 Regenerace vrtu B-3

S ohledem na typ výstroje vrtu (viz příloha 3) byla pro regeneraci vrtu B-3 zvolena kombinace chemického čištění a čištění za pomoci tlakových nárazů (Dvořák, 2016).

## 5.4.4 Regenerace vrtu B-1

U vrtu B-1 bylo s ohledem na typ výstroje vrtu (viz příloha 4) využita k regeneraci metoda chemického čištění, metoda tlakových rázů a čištění za pomoci plastových kartáčů (Dvořák, 2016).

## 5.4.5 Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 před regenerací

Během zkoušky bylo čerpáno vydatností 14 l/s. Hladina během zkoušky dosáhla snížení 10,07 m (Dvořák, 2016).

Tabulka 13: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 před regenerací

Q [m <sup>3</sup> /s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m <sup>2</sup> /s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,014	0,1615	0,044	0,0036	9,77	1000

### 5.4.5.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

$$W = \frac{2 * 3,14 * 0,0036 * 9,77}{0,014} - 0,5 \ln \frac{2,246 * 0,0036 * 1000}{0,1615^2 * 0,044} = 11,36$$

$$s_w = \frac{0,014 * 11,36}{2 * 3,14 * 0,0036} = 7,03 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 7,03 m.

#### 5.4.5.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 14: Parametry metody I-SPPU metody pro vrt B-3 před regeneraci

s [-]
5,63

$$C = 0,014 * \left( \frac{3}{0,0557} \right) = 0,075 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{0,075}{2 * 3,14 * 0,1615^2 * 0,044} = 10,46$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \left( \frac{2 * 3,14 * 0,0036 * 5,63}{0,014} - 1,027 \log 10,46 - 1,0237 \right) = 6,59$$

$$s_w = \frac{0,014 * 6,59}{2 * 3,14 * 0,0036} = 4,08 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 4,08 m.

#### 5.4.6 Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 po regeneraci

Čerpací zkouška vrtu B-3 byla provedena v délce 70 min. Při zkoušce bylo čerpáno vydatností 18 l/s. Maximální snížení, kterého bylo dosaženo během zkoušky je 9,77 m (Dvořák, 2016).

Tabulka 15: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 po regeneraci

Q [m³/s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m²/s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,018	0,1615	0.044	0,0036	9,706	3000

#### 5.4.6.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

$$W = \frac{2 * 3,14 * 0,0036 * 9,706}{0,018} - 0,5 \ln \frac{2,246 * 0,0036 * 3000}{0,1615^2 * 0,044} = 7,21$$

$$s_w = \frac{0,018 * 7,21}{2 * 3,14 * 0,0036} = 5,74 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 5,74 m.

#### 5.4.6.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 16: Parametry metody I-SPPU pro vrt B-3 po regeneraci

s [-]
5,56

$$C = 0,018 * \left( \frac{3}{0,2565} \right) = 0,21 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{0,21}{2 * 3,14 * 0,1615^2 * 0,044} = 29,21$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \left( \frac{2 * 3,14 * 0,0036 * 5,56}{0,018} - 1,027 \log 29,21 - 1,0237 \right) = 2,9$$

$$s_w = \frac{0,018 * 2,9}{2 * 3,14 * 0,0036} = 2,31 \text{ m}$$

Snížení způsobené dodatečnými odpory má hodnotu 2,31 m.

### 5.4.7 Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 před regenerací

Během zkoušky bylo čerpáno vydatností 14 l/s. Hladina během zkoušky dosáhla snížení 10,94 m.

Tabulka 17: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 před regenerací

Q [m³/s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m²/s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,014	0,16	0,013	0,00378	-	-

#### 5.4.7.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

Z důvodu nedostatečných dat ze zkoušky nebylo možné vypočítat skin faktor z 2. přímkového úseku za pomoci Cooper-Jacobovy semilogaritmické aproximace.

#### 5.4.7.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 18: Parametry metody I-SPPU pro vrt B-1 před regenerací

s [-]
8,1

$$C = 0,014 * \left( \frac{3}{0,9665} \right) = 0,04 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{0,04}{2 * 3,14 * 0,16^2 * 0,013} = 20,79$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \frac{2 * 3,14 * 0,00378 * 8,1}{0,014} - 1,027 \log 20,79 - 1,0237 = 11,17$$

$$s_w = \frac{0,014 * 11,17}{2 * 3,14 * 0,00378} = 6,59 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 6,59 m.

## 5.4.8 Popis hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 po regeneraci

Při čerpací zkoušce vrtu B-1 bylo čerpáno vydatností 10,2 l/s. Maximální snížení, kterého bylo dosaženo během zkoušky, je 7,04 m.

Tabulka 19: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 po regeneraci

Q [m³/s]	r <sub>v</sub> [m]	S [-]	T [m²/s]	s <sub>v</sub> [m]	t [s]
0,0102	0,16	0,013	0,00378	7,0307	1800

### 5.4.8.1 Cooper-Jacobova semilogaritmická aproximace

$$W = \frac{2 * 3,14 * 0,00378 * 7,0307}{0,0102} - 0,5 \ln \frac{2,246 * 0,00378 * 1800}{0,16^2 * 0,013} = 10,99$$

$$s_w = \frac{0,0102 * 10,99}{2 * 3,14 * 0,00378} = 4,72 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 4,72 m.



### 5.4.8.2 Metoda I-SPPU

Tabulka 20: Parametry metody I-SPPU pro vrt B-1 po regeneraci

s [-]
6,05

$$C = 0,0102 * \left( \frac{3}{0,1041} \right) = 0,29 \text{ m}^2$$

$$C_D = \frac{0,29}{2 * 3,14 * 0,16^2 * 0,013} = 140,64$$

$$W = \frac{1}{0,86} * \left( \frac{2 * 3,14 * 0,00378 * 6,05}{0,0102} - 1,027 \log 140,64 - 1,0237 \right) = 9,27$$

$$s_w = \frac{0,0102 * 9,27}{2 * 3,14 * 0,00378} = 3,98 \text{ m}$$

Snížení způsobení dodatečnými odpory má hodnotu 3,98 m.

### 5.4.9 Shrnutí výsledků vrtu B-3 a B-1

Tabulka 21: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 vypočteny Cooper-Jacobovou metodou

B-3 před regenerací		B-3 po regeneraci	
W	s <sub>w</sub> [m]	W	s <sub>w</sub> [m]
11,36	7,03	7,21	5,74

Tabulka 22: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 vypočteny metodou I-SPPU

B-3 před regenerací		B-3 po regeneraci	
W	$s_w$ [m]	W	$s_w$ [m]
6,59	4,08	2,9	2,31

Tabulka 23: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 vypočteny Cooper-Jacobovou metodou

B-1 před regenerací		B-1 po regeneraci	
W	$s_w$ [m]	W	$s_w$ [m]
-	-	10,99	4,72

Tabulka 24: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 vypočteny metodou I-SPPU

B-1 před regenerací		B-1 po regeneraci	
W	$s_w$ [m]	W	$s_w$ [m]
11,17	6,59	9,27	3,98

U vrtu B-3 došlo vlivem regenerace ke snížení skin faktoru u obou metod. Podle metody Cooper-Jacoba byla úspěšnost regenerace 36,5 %. Snížení dodatečnými odpory se zmenšilo o 1,29 m. Metoda I-SPPU zaznamenala úspěšnost 56 % a zmenšení snížení o 1,77 m.

U vrtu B-1 došlo obdobně jako u vrtu B-3 k úspěšné regeneraci vrtu. Metoda Cooper-Jacoba nemohla být vyhodnocena. Podle I-SPPU byla úspěšnost regenerace 17 %. Snížení dodatečnými odpory se zmenšilo o 2,61 m.

## 6 Závěr

Pokud se zaměříme na porovnání výpočetních metod skin faktoru, vykazuje metoda I-SPPU zaměřující se na první přímkový úsek ve většině případů menší úspěšnost než metoda Cooper-Jacobova.

U vrtů RD-2, B-1 i B-3 bylo regenerací dosaženo snížení skin faktoru. Největší úspěšnost regenerace podle metody Cooper-Jacoba vykázal vrt B-3 (36,5 %). U vrtu B-1 nemohlo být vyhodnocení této metody provedeno, neboť ze zkoušek nebyla získána vhodná data.

Podle metody I-SPPU vykázala největší úspěšnost regenerace vrt B-3 (56 %). Nejmenší úspěšnost regenerace zaznamenal vrt B-1 (17 %).

U vrtu KV-2 a KV-9 bylo čerpací zkouškou ověřeno, že vrty jsou zasaženy degradací. I kdyby byla provedena regenerace vrtů, nebylo by možné dosáhnout kapacity požadované správcem vodovodní sítě. Z tohoto důvodu se nepokračovalo regenerací vrtů, ale bylo navrženo vybudování 3 nových vrtů v zájmové oblasti. Z tohoto důvodu nebyly vrty KV-2 a KV-9 zahrnuty do vyhodnocení úspěšnosti regenerace vrtů.

Regenerace vrtů je důležitou součástí pro zajištění ekonomicky udržitelného zisku pitné vody z podzemních úložišť. Zajišťuje provozuschopnost a udržitelnost vrtů po dlouhé časové období.

Podle příkladu vrtů KV-2 a KV-9 je patrné, že regenerace není vždy řešením daných otázek a problematik, co se například týká požadované kapacity vody odebrané do vodovodní sítě k zajištění pitné vody. Je ale důležité uvědomit si, že i přesto je jeho součástí. Vybudování nových vrtů zajistí dodatek kapacity, její udržitelnost ovšem závisí právě na regeneraci. Proto je potřeba rozvíjet regenerační metody, jako je například ultrazvukové čištění nebo vytvářet nové technologie, jež přinesou nové inovativnější metody.

## Přehled literatury a použitých zdrojů

Čerpací, stoupací a vsakovací zkoušky [online], 2011. .: AQUA ENVIRO s.r.o., [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://www.aquaenviro.cz/cerpaci-stoupaci-a-vsakovaci-zkousky.php>

ČESKÁ REPUBLIKA, 2001. Vodní zákon. In: *25/2001*. 2001. Praha: -, ročník 2001, číslo 254. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/20F9C15060CAD3AEC1256AE30038D05C/%24file/Z%20254\\_2001.pdf](https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/20F9C15060CAD3AEC1256AE30038D05C/%24file/Z%20254_2001.pdf)

DARCY, Henry, 1856. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. 1. Paris: Distribution D'EAU. ISBN .

DVOŘÁK, Vítězslav, 2016. *Veletov*. 1. Praha: -. ISBN . ISSN .

DVOŘÁK, Vítězslav, 2016. *52485\_Regenerace-Srbsko*. 1. .: . ISBN . ISSN .

FREEZ, R. Allen a John A. CHERRY, 1979. *Groundwater*. 1. .: . ISBN 0-13-365312-9.

GRMELA, , 2004. *Základy hydrogeologie. Základy hydrogeologie* [online]. online: - [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz>

HÁLEK, V. a ŠVEC, J. 1979. *Groundwater hydraulics*. Elsevier Scientific Publishing Company. ISBN 0444556478.

HURST, W. 1953. Establishment of skin effect and its impediment to fluid flow into a well bore. *Pet. Eng.*, 25, B6–B16

JANDORA, Jan, Vlastimil STARA a Miloš STARÝ, 2011. *Hydraulika a hydrologie*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-7204-739-0.

JEDLIČKA, M. a J. KOŽIŠEK, 1981. *Provozně geologická příručka*. . .: nakl. technické literatury. ISBN .

JETEL, Ján, 1982. *Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech*. . Praha: Academia. Knihovna Ústředního ústavu geologického. ISBN .

KAHUDA, Daniel, 2021. *52485\_RD-2-description*. 2021. Praha: -. ISBN . ISSN .

*Klempa: Technika a technologie hlubinného vrtání* [online], 2011. Praha: - [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/TECHHLDOB/>

KODEŠOVÁ, Radka, 2005. *Modelování v pedologii*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Katedra pedologie a geologie FAPPZ. ISBN 80-213-1347-1.

KOVÁCS, György, 1981. *Seepage Hydraulics*. 1. Budapest: Akadémiai Kiadó. ISBN 9630520206.

MAYS, Larry. W., 2001. *Water Resources Engineering*. 1. Tempe, Arizona: John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-29783-6.

PECH, Pavel, 2010. *SPECIÁLNÍ PŘÍPADY HYDRAULIKY PODZEMNÍCH VOD*. . Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-87402-04-7.

PECH, Pavel, Michal KURÁŽ a František PASTUZEK, 2015. *Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech*. 1.

PONGMANDA, S a A SUPRAPTI, 2020. Performing application of cooper-jacob method for identification of storativity. *IOP Conference Series: Earth* [online]. 719. 719(1), 1-1 [cit. 2022-01-18]. DOI: 10.1088/1755-1315/419/1/012128. ISSN 17551307.

Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/339129371\\_Performing\\_application\\_of\\_cooper-jacob\\_method\\_for\\_identification\\_of\\_storativity](https://www.researchgate.net/publication/339129371_Performing_application_of_cooper-jacob_method_for_identification_of_storativity)

PRAŽSKÝ, Jeroným, 1964. *Průzkumný vrt*. . Praha: Státní nakladatelství technické literatury. ISBN .

RIVERA, J.G. a R. RAGHAVAN, 1979. *Analysis of Short-Time Pressure Data Dominated by Wellbore Storage and Skin*. . .: JPT. ISBN .

SIMMONS, Craig T., 2008. Henry Darcy (1803–1858): Immortalised by his scientific legacy. *Hydrogeology Journal*. vol. 16. 16(6), . DOI: 10.1007/s10040-008-0304-3. ISSN 1431-2174. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-008-0304-3>

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

ŠRÁČEK, Ondřej a Tomáš KUCHOVSKÝ, 2003. *Základy hydrogeologie*. . Brno: Masarykova univerzita. ISBN 80-210-3146-8.

THEIS, Charles, 1952. *THE RELATION BEIVIEEN THE LOWERING OF THE PIEZOMETRIC SURFACE AND THE RATE AND DURATION OF DISCHARGE OF A WEII US ING GROUND WATER STORAG*. 1. Washington: US. ISBN .

TODD, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*. 2. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0471059374.

TORRES, Dominic, ed., 2011. *Water Engineering: Water Resource Planning, Development and Management*. 1. New York: Nova Science Publishers, Inc. ISBN 9781612099149.

TREIDEL, Holger, Jose Luis MARTIN-BORDES a Jason J. GURDAK, ed., 2011. *Climate Change Effects on Groundwater Resources*. 1. Wallingford, UK: Taylor & Francis Group. ISBN 9780415689366.

VALENTOVÁ, Jana, 2018. *Hydraulika podzemní vody*. 4. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-06483-2.

VUKOVIĆ, Milan a Andjelko SORO, 1992. *Hydraulics of Water Wells*. 1st Ed. Colorado: Water Resources Publications. ISBN 09-183-3476-4.

WARD, J.C., 1964. *Turbulent Flow in Porous Media*. 1. .: JHD. ISBN .

Where is Earth's Water?, 2018. *USGS science for a changing world* [online]. online: U.S. Department of the Interior [cit. 2022-01-16]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water>

Pech, P., Kahuda, D. , 2018 – Průběžná zpráva projektu Projektu TAČR TH02030421 ULTRA Zařízení pro regeneraci vodárenských jímacích vrtů na principu ultrazvuku.

Ficaj V, Pech P, Kahuda D., 2021. Software for Evaluating Pumping Tests on Real Wells. *Applied Sciences*. 11(7),3182. <https://doi.org/10.3390/app11073182>

Cooper, H.H.; Jacob, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Trans. Am. Geophys. Union* 1946, 27, 526–534.

Van Everdingen, A.F. The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. *J. Pet. Technol.* 1953, 5, 171–176.

Theis, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans. Am. Geophys. Union* 1935, 16, 519–524.

Agarwal, R.G.; Al-Hussainy, R.; Ramey, H.J. An investigation of well storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. *Soc. Pet. Eng. J.* 1970, 10, 279–291

Ramey, H.H., Jr. Short-time well test data interpretation in the presence of skin effect and wellbore storage. *J. Pet. Technol.* 1970, 22, 97–104.

Mucha I., Šestakov V. M. (1987): *Hydraulika podzemných vód*. ALFA/SNTL Praha

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Konstrukce vrtu pro jímání podzemní vody (Univerzita Masarykova, 2011) .....	5
Obrázek 2: Ideální vrt (Pech,2015) .....	6
Obrázek 3: Vertikální rozdělení podpovrchových vod (Pech, 2010) .....	7
Obrázek 4: Typy zvodnělých vrstev (Pech, 2010) .....	8
Obrázek 5: Elementární rovnoběžnostěn (Pech, 2010).....	11
Obrázek 6: Schéma Darcyho experimentu (Pech,2010) .....	12
Obrázek 7: Meze platnosti Darcyho zákona (Pech, 2010).....	13
Obrázek 8: Theisova metoda typové křivky (Pech,2010) .....	18
Obrázek 9: Graf čerpací zkoušky s vs. log t (Pech,2010).....	21
Obrázek 10: Graf čerpací zkoušky na pozorovacím vrtu (Pech, 2010).....	22
Obrázek 11: Snížení na odběrovém vrtu s dodatečnými odpory (Pech,2010) .....	26
Obrázek 12: Rozložení přímkových úseků čerpací zkoušky (Bc. Olmrová, 2022) ...	29
Obrázek 13: Umístění vrtu KV-2 a KV-9 (Ing. Dvořák, 2016) .....	32
Obrázek 14: Umístění vrtu RD-2 (mapy.geology.cz, 2015) .....	38
Obrázek 15: Umístění vrtu B1 a B3 (Ing. Dvořák,2015) .....	42



## Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2.....	34
Tabulka 2: Parametry metody I-SPPU pro vrt KV-2 .....	34
Tabulka 3: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu KV-9.....	35
Tabulka 4: Parametry metody I-SPPU metody pro vrt KV-9.....	36
Tabulka 5: Výsledky Cooper-Jacobovi výpočetní metody hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2 a KV-9.....	36
Tabulka 6: Výsledky I-SPPU metody hydrodynamické zkoušky vrtu KV-2 a KV-9...37	
Tabulka 7: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2 před regenerací .....	38
Tabulka 8: Parametry metody I-SPPU pro vrt RD-2 před regenerací .....	39
Tabulka 9: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2 po regeneraci.40	
Tabulka 10: Parametry metody I-SPPU metody pro vrt RD-2 po regeneraci.....	40
Tabulka 11: Výsledky Cooper-Jacobovi výpočetní metody hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2 .....	41
Tabulka 12: Výsledky metody I-SPPU výpočetní metody hydrodynamické zkoušky vrtu RD-2.....	41
Tabulka 13: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 před regenerací43	
Tabulka 14: Parametry metody I-SPPU metody pro vrt B-3 před regenerací.....	44
Tabulka 15: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 po regeneraci..45	
Tabulka 16: Parametry metody I-SPPU pro vrt B-3 po regeneraci .....	45
Tabulka 17: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 před regenerací .....	46
Tabulka 18: Parametry metody I-SPPU pro vrt B-1 před regenerací .....	46
Tabulka 19: Seznam parametrů hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 po regeneraci..47	
Tabulka 20: Parametry metody I-SPPU pro vrt B-1 po regeneraci .....	48
Tabulka 21: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 vypočteny Cooper-Jacobovou metodu .....	48

Tabulka 22: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-3 vypočteny metodou I-SPPU .....	49
Tabulka 23: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 vypočteny Cooper-Jacobovou metodou .....	49
Tabulka 24: Výsledné hodnoty hydrodynamické zkoušky vrtu B-1 vypočteny metodou I-SPPU .....	49

## Seznam příloh

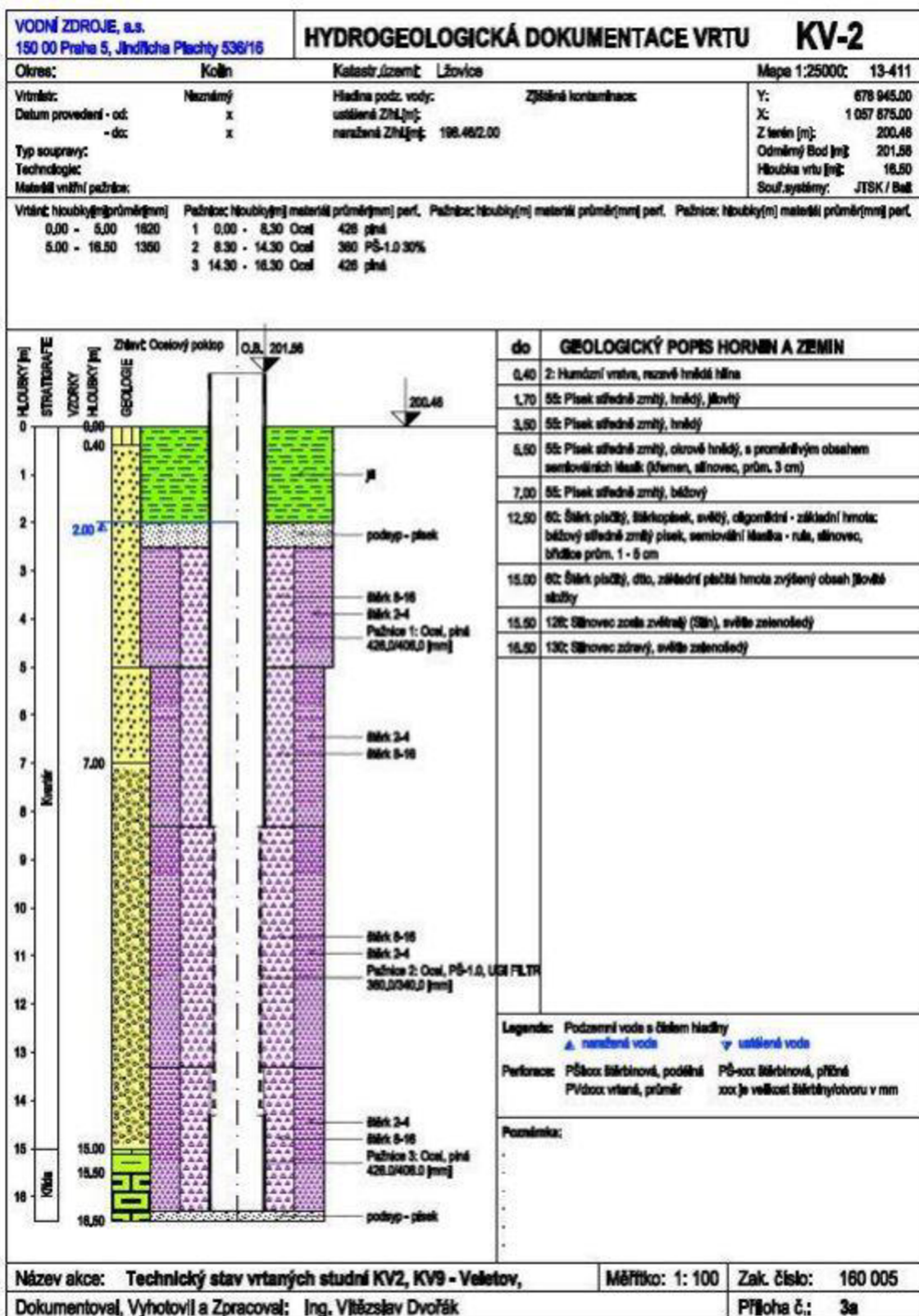
Příloha 1 – Profil vrtu KV-2 (Ing. Dvořák,2015)

Příloha 2 – Profil vrtu KV-9 (Ing. Dvořák,2015)

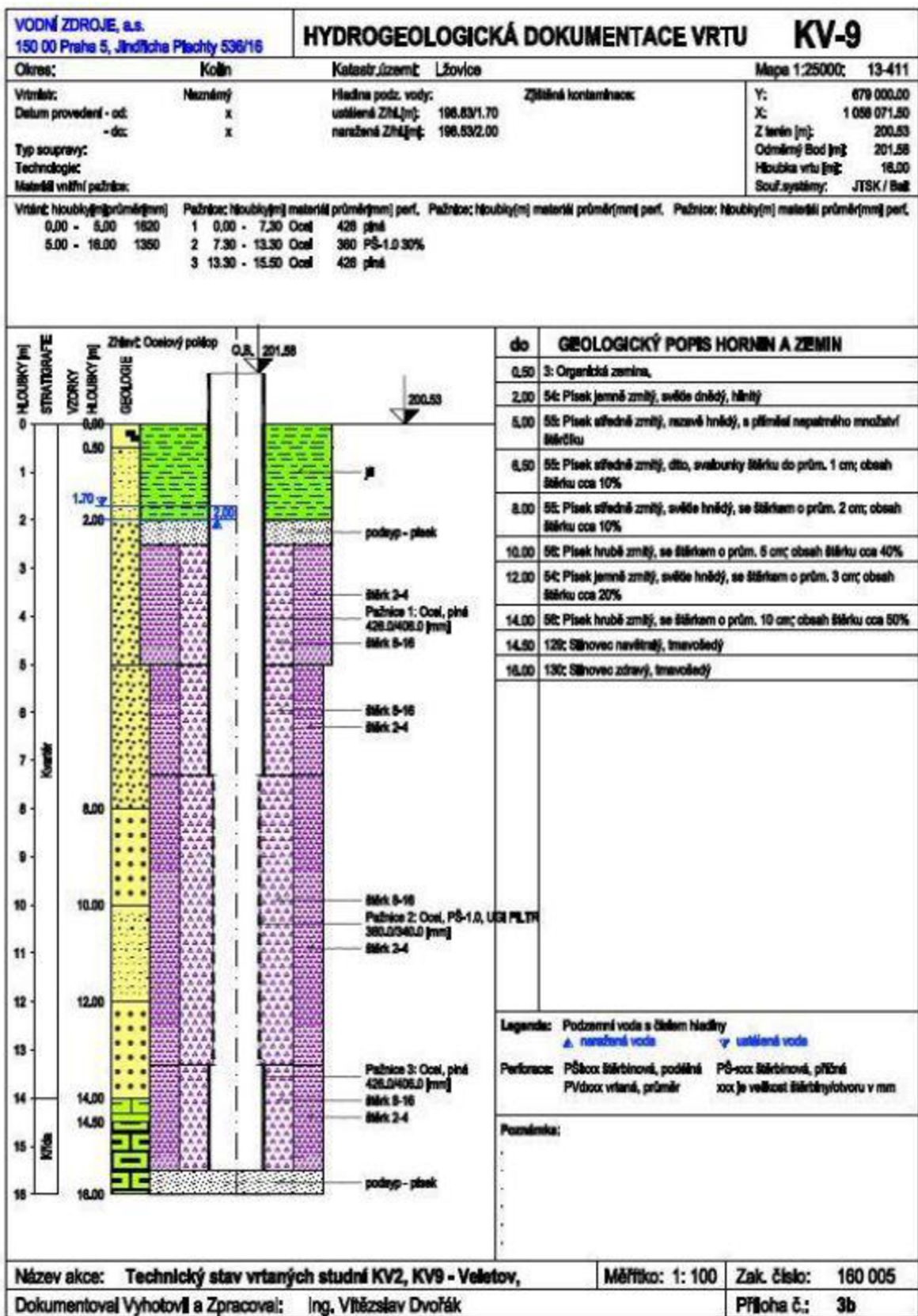
Příloha 3 – Profil vrtu B-3 (Ing. Dvořák,2015)

Příloha 4 – Profil vrtu B-4 (Ing. Dvořák,2015)

Příloha 1 – Profil vrtu KV-2



Příloha 2 – Profil vrtu KV-9



**Název akce:** Technický stav vrtaných studní KV2, KV9 - Veletov,

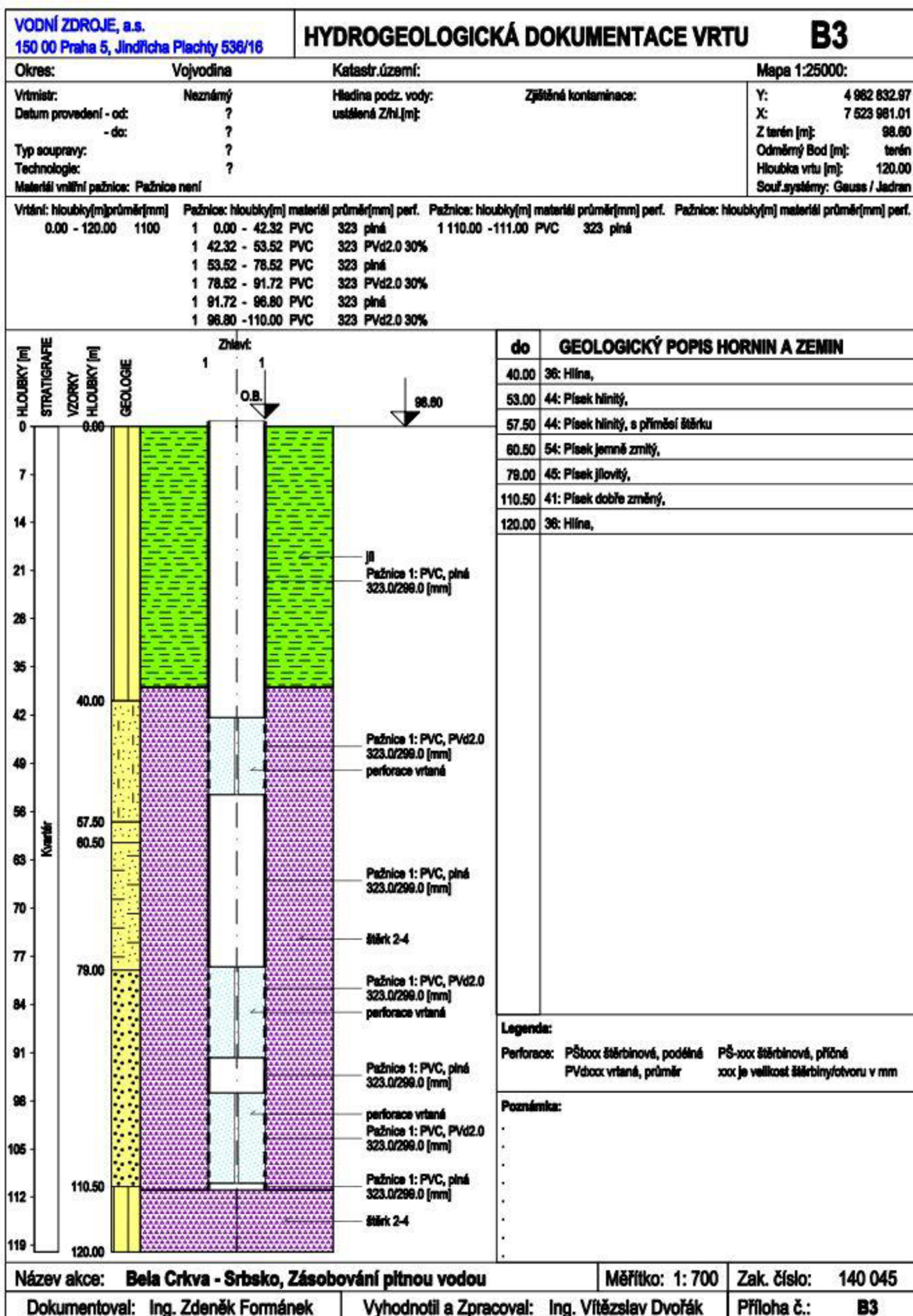
**Dokumentoval Vyhotoval a Zpracoval:** Ing. Vítězslav Dvořák

**Měřítko:** 1: 100

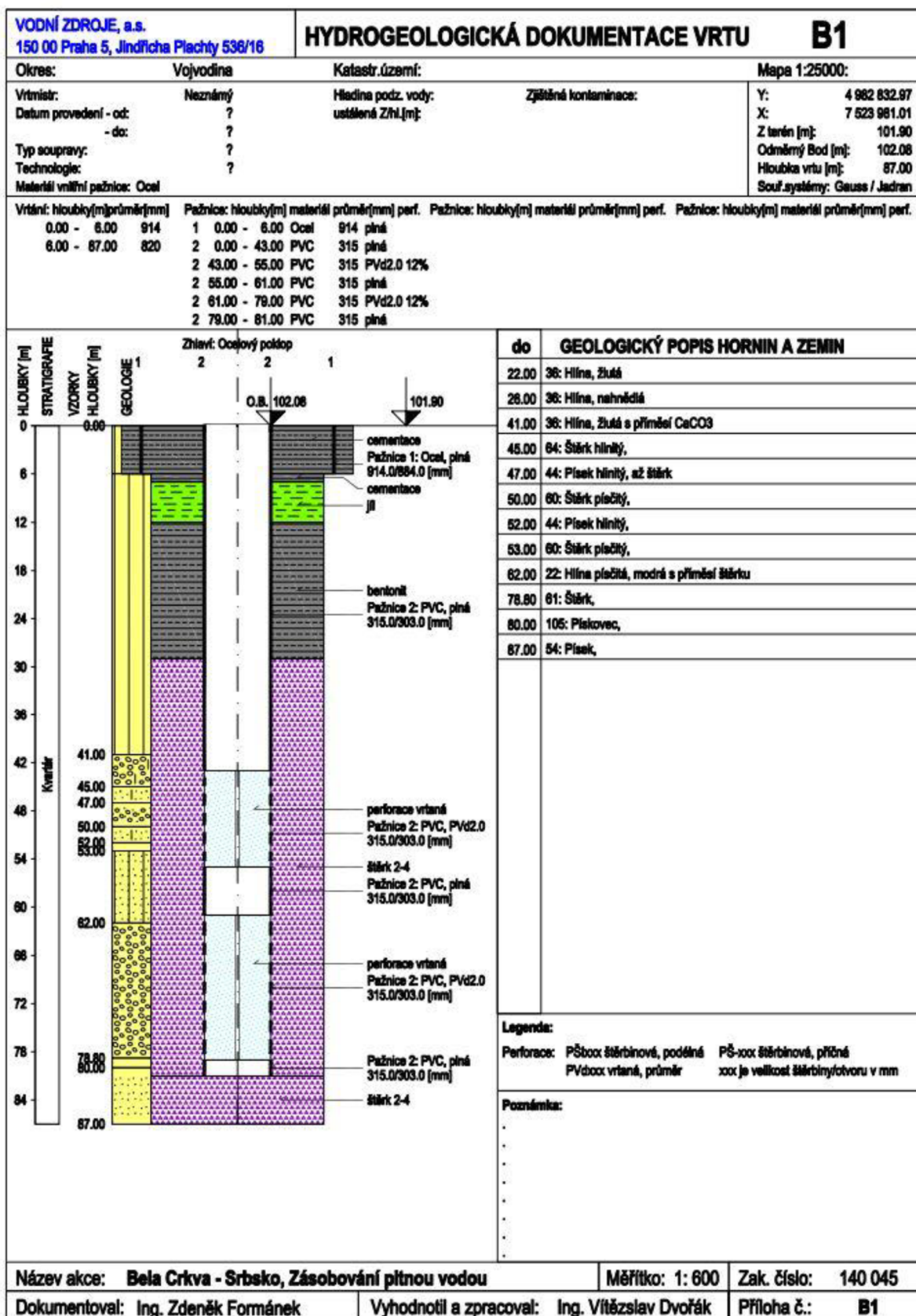
**Zak. číslo:** 160 005

**Příloha č.:** 3b

Příloha 3 – Profil vrtu B-3



Příloha 4 – Profil vrtu B-1



Vytvořeno systémem GeProDo, www.geprodo.wz.cz