

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIROMENTÁLNÍHO  
MODELOVÁNÍ**



**Vyhodnocení účinků regenerace vrtů  
z hydrodynamických zkoušek**

Diplomová práce

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

**Diplomant:** Bc. Jiří Dubský

© 2021 ČZU v Praze

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jiří Dubský

Krajinné inženýrství  
Voda v krajině

Název práce

Vyhodnocení účinků regenerace vrtů z hydrodynamických zkoušek

Název anglicky

Evaluation of the effects of well rehabilitation from aquifer 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**

cca 50 str.

**Klíčová slova**

well, skin effect, aquifer test

---

**Doporučené zdroje informací**

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

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**

2020/21 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

**Konzultant**

Ing. Pavel Černý

Elektronicky schváleno dne 2. 3. 2021

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

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2021

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 03. 03. 2021

---

## **Čestné prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci „Vyhodnocení účinků regenerace vrtů z hydrodynamických zkoušek“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Pavel Pecha, CSc. a zároveň prohlašuji, že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Mariánských Lázních, dne:

.....

## **Poděkování:**

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce profesoru Ing. Pavlu Pechovi, CSc., za cenné připomínky a odborné rady, kterými velmi přispěl k vypracování této práce. Také děkuji firmě Vodní zdroje, a.s. za poskytnutí technických materiálů k vytvoření této práce.

## **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá vyhodnocením účinků regenerace vrtů z hydrodynamických zkoušek. Je zde popsána metoda vyhodnocení skinového faktoru z hydrodynamické zkoušky se zaměřením na počáteční část zkoušky. Je provedeno vyhodnocení efektů regeneračních zásahu na třech vrtech.

Pro vyhodnocení dat byla použita Jacobova semilogaritmická metoda a metoda sklonu prvního přímkového úseku před dosažením Jacobovy přímky. Výsledky měření jsou zahrnuty v závěru. V diskusi je řešen efekt regenerace vrtu a její význam, včetně porovnání vyhodnocení skinového faktoru z čerpací a stoupací zkoušky.

Základní znalosti jsou získány v literární rešerši. V praktické části jsou uplatněny dovednosti získané prostudováním literární rešerše při vyhodnocení účinků regeneračního zásahu na vrtu z hydrodynamických zkoušek.

### **Klíčová slova:**

vrt, hydrodynamická zkouška, dodatečné odpory, regenerace

## **Abstract:**

The Diploma Thesis deals with the evaluation of the well regeneration by means of hydrodynamic tests. The thesis describes two methods of skin factor evaluation from the hydrodynamic tests (pumping and build-up) with a focus on the first part of the test and from the Jacob semilogarithmic straight line on the three wells.

Comparison of the two methods Jacob semi-logarithmic and procedure for evaluation skin factor from the slope of the first part of pumping test are included in the conclusion. The discussion deals with the effect of well regeneration.

The basic knowledge are obtained by studying the literature research in the first part of this Thesis. In the practical part of the thesis this knowledge were used for evaluation of the effect of well regeneration from hydrodynamic tests.

### **Keywords:**

well, hydrodynamic test, additional resistances, regeneration

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce.....	2
3. Metodika .....	3
4. Podzemní voda a její rozdělení .....	4
4.1 Vertikální rozdělení podpovrchových vod .....	4
4.2 Rozdělení podpovrchových vod podle vzniku.....	5
4.3 Rozdělení vodonosných vrstev.....	5
4.4 Vlastnosti zvodnělých vrstev .....	8
4.4.1 Storativita ( $S$ ) .....	8
4.4.2 Pórovitost ( $n$ ).....	9
4.4.3 Propustnost ( $k_p$ ).....	10
4.4.4 Hydraulická vodivost ( $K$ ).....	11
4.4.5 Transmisivita ( $T$ ) .....	11
5. Zákonitosti proudění podzemních vod.....	12
5.1 Rovnice kontinuity .....	12
5.2 Darcyho zákon .....	13
5.2.1 Meze platnosti Darcyho zákona.....	15
5.3 Proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou .....	17
5.4 Proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou.....	17
5.5 Dupuitovy postuláty.....	18
6. Proudění podzemních vod k ideálnímu vrtu.....	20
6.1 Nestacionární radiální proudění k ideálnímu úplnému vrtu .....	20
6.2 Theisova metoda typové křivky .....	22
6.3 Jacobova semilogaritmická metoda přímky .....	24
7. Proudění podzemních vod ke skutečnému vrtu .....	26
7.1 Bezrozměrné parametry .....	27
7.2 Dodatečné odpory .....	28
7.3 Storativita vrtu .....	30

8.	Hydrodynamické zkoušky .....	32
8.1	Čerpací zkoušky .....	33
8.2	Stoupací zkoušky .....	34
8.3	Odběrové zkoušky .....	35
8.4	Trubkové zkoušky .....	36
8.5	Expresní zkoušky .....	37
9.	Regenerace vrtu .....	37
10.	Vyhodnocení dodatečných odporů na reálném vrtu .....	39
10.1	Popis lokality vrtu KV-2 a KV-9 (Žehušice) .....	39
10.2	Popis hydrodynamické zkoušky na obou vrtech .....	41
10.3	Výsledky hydrodynamické zkoušky na vrtu KV-2 .....	42
10.4	Výsledky hydrodynamické zkoušky na vrtu KV-9 .....	43
10.5	Vyhodnocení dodatečných odporů na vrtech KV-2 a KV-9 .....	43
11.	Vyhodnocení regenerace vrtu z čerpací zkoušky .....	47
11.1	Popis lokality vrtu RD-2 (Radouň) .....	47
11.1.1	Geologie a litologie v oblasti vrtu RD-2 .....	48
11.2	Regenerace vrtu RD-2 .....	48
11.3	Vyhodnocení vrtu RD-2 před regenerací .....	50
11.4	Vyhodnocení vrtu RD-2 po regeneraci .....	51
12.	Vyhodnocení regenerace vrtu z čerpací a stoupací zkoušky .....	53
12.1	Popis lokality vrtu HV-5 (Všetaty) .....	53
12.2	Popis regenerační metody .....	54
12.3	Vyhodnocení výsledků před a po regeneraci .....	56
13.	Diskuse .....	61
14.	Závěr .....	63
	Přehled literatury a použitých zdrojů .....	64
	Seznam obrázků .....	67
	Seznam příloh .....	68



# 1. Úvod

V 21. století je voda nedílnou součástí života a rozumné nakládání s ní je hlavní tématem k řešení. Důsledkem vleklých such je nedostatečná zásoba pitné vody, ale i vody pro zemědělství a průmysl. Největší zásobárnou pitné vody je voda, nacházející se pod zemským povrchem, tedy hlavně voda podzemní (VALENTOVÁ, 2007). Již od nepaměti je vodní zdroj velmi cenný a každý živý tvor se snaží přirozeně sídlit v jeho blízkosti.

Dnes je pro nás voda běžnou součástí života. Nikdo si pořádně neuvědomujeme, že by v řádech desítek let mohlo dojít k úbytku zásob různých druhů vod, včetně vody podzemní. Nedostatek pitné vody je aktuálně velmi řešeným tématem. Za tuto skutečnost jsem velmi rád, protože z mého pohledu je voda, a nakládání s ní velmi podceňováno. V dobách dávno minulých bylo realizovatelné odebrání vody z řek do vodovodních sítí s nízkou úpravou, v této době už toto možné není a voda z řek se musí nákladně upravovat. Na tento popud se populace snaží vyzískat vodu z podzemních zdrojů svého pozemku. Tudíž se zvyšuje poptávka po realizaci jímacích objektů. Při realizaci těchto objektů je záhodno znát na základě hydrogeologického průzkumu, geologické a hydrogeologické vlastnosti daného prostředí, zákonitosti proudění podzemních vod, možnosti využití technologií a různé možnosti realizace jímacích objektů.

Francouzský technik a inženýr Henry Philibert Gaspard Darcy, roku 1856 na základě experimentů odvodil zákon laminárního režimu proudění podzemní vody v porézním prostředí, zákon nese jeho jméno, tzv. Darcyho zákon. Dalším průkopníkem byl Charles Vernon Theis, který se zabýval problematikou neustáleného radiálně-symetrického proudění podzemní vody k vrtům. Toto řešení neustáleného proudění publikoval v roce 1935 pro ideální vrty, tj. nejsou brány v úvahu dodatečné odpory a vlastní objem vrtu (poloměr vrtu je zanedbatelně malý). Dodatečné odpory představují souhrn jevů, jejichž vlivem dojde k odchylce u naměřených hodnot snížení vody na „skutečném“ vrtu na rozdíl od teoretického snížení získaného za předpokladu „ideálního“ proudění vody k úplnému vrtu. V roce 1953 van Everdingen definoval tzv. skin faktor, který vyjadřuje souhrnný vliv dodatečných odporů na celkové snížení ve vrtu. Pomocí „skin faktoru“ lze vyjádřit dodatečné snížení ve vrtu. Následně jsou publikovány první články (zahrnující vliv dodatečných odporů a objemu vrtu) do řešení proudění podzemní vody k reálnému vrtu, sloužící pro jejich následný výpočet.

Výběr tématu své diplomové práce jsem směřoval k tomu, abych se posunul dále v problematice regenerací vrtů, kterou jsem se zabýval už ve své bakalářské práci a dokázal co nejlépe vyhodnotit účinky různých metod regenerace vrtů z čerpacích i ze stoupacích zkoušek. Dále by měla diplomová práce objasnit čtenáři danou problematiku a být nápomocna při případném využití v praxi.

## 2. Cíle práce

Cílem této diplomové práce je seznámení se s problematikou proudění podzemních vod, ať už s chováním podzemních vod za různých podmínek, nebo v odlišných prostředích. Dále obeznámení se s hydrodynamickými zkouškami, podrobněji s čerpací a stoupací zkouškou, přiblížení možnosti regenerace vrtů, ať už metodou celkové regenerace, či postupně provedenými jednotlivými metodami regenerací.

Je popsána metoda vyhodnocení skinového faktoru z čerpací zkoušky, resp. stoupací zkoušky se zaměřením na počáteční část semilogaritmického grafu, kdy nebylo dosaženo přímkového úseku vyhodnotitelného Jacobovou semilogaritmickou aproximací. Tento postup aplikovat na vyhodnocení efektů regenerací alespoň tří vrtů. Dále porovnat s vyhodnocením Jacobovou semilogaritmickou aproximací. Vyzkoušet vyhodnocení skin faktoru z přímkové části stoupací zkoušky, kdy je snížení ovlivňováno skin faktorem a vlivem plnění vlastního objemu vrtu.

### 3. Metodika

V této diplomové práci jsem kladl důraz na objasnění základní problematiky proudění podzemní vody k vrtům. V diplomové práci jsou popsány jednotlivé rozdělení podzemních vod podle vzniku, rozdělení a vlastnosti zvodnělých vrstev. Dále jsem chtěl vysvětlit proudění podzemních vod v porézním prostředí, jako je rovnice kontinuity porézního prostředí, Darcyho zákon, proudění zvodnělou vrstvou s volnou nebo napjatou hladinou a Dupuitovy postuláty.

V další části popisují problematiku proudění podzemních vod k ideálnímu vrtu, která zahrnuje popis neustáleného rotačně symetrického proudění zvodnělou vrstvou, v této části jsou také uvedeny jednotlivé příklady řešení. Následuje popis Theisovy metody typové křivky a Jacobova semilogaritmická aproximace. Dále se věnuji popisu neustáleného proudění podzemní vody ke skutečnému vrtu. Uvádím v této části dodatečné odpory, jednotlivé bezrozměrné parametry a také je zde vysvětlena storativita (zásobnost) vrtu, navazuje také zmínka o definici a vysvětlení „skin faktoru“. V další kapitole jsou probrány jednotlivé hydrodynamické zkoušky s důrazem na zkoušky stoupací a čerpací.

V praktické části je vyhodnocení skutečného efektu regenerace z počátečního úseku stoupací zkoušky a pomocí Jacobovy semilogaritmické aproximace na jednotlivých vrtech. Zhodnocení a porovnání jednotlivých výsledků ze stoupacích a čerpacích zkoušek. Tato porovnání je následně probráno v diskusi. V závěru je provedeno vyhodnocení efektů jednotlivých regeneračních zásahů s porovnáním dosažených výsledků u všech lokalit.

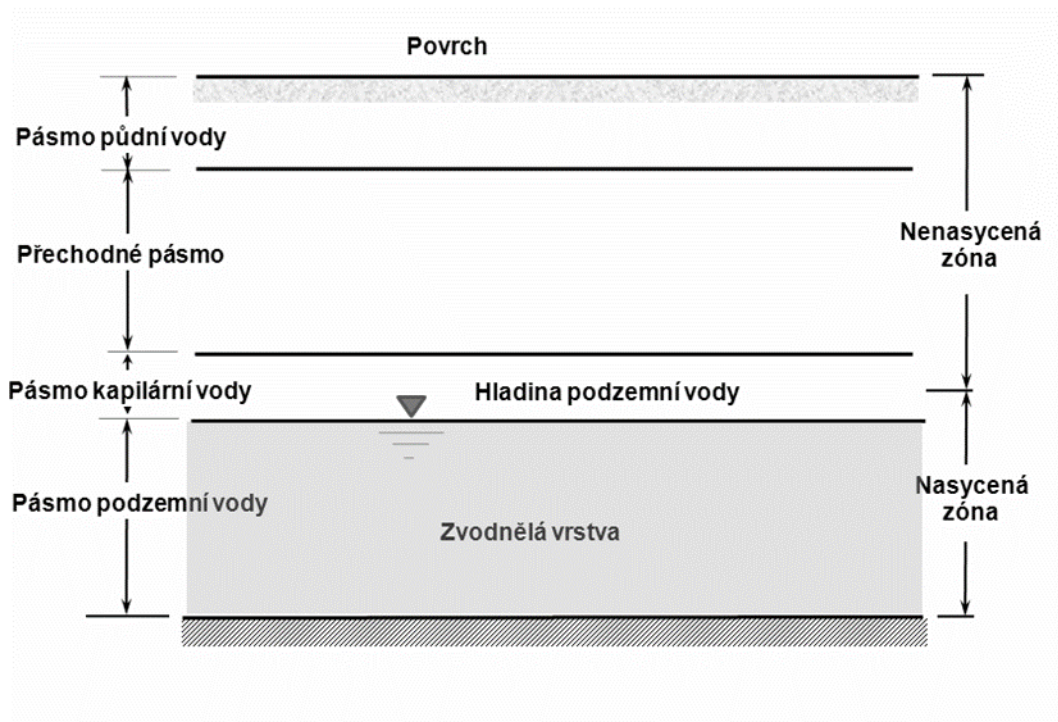
## 4. Podzemní voda a její rozdělení

Pojmem podzemní voda rozumíme vodu umístěnou pod zemským povrchem. Jedná se o klíčový zdroj celosvětových zásob sladkých vod (VALENTOVÁ, 1994). Poptávka o podzemní vody se neustále navyšuje, využívají se při zavlažování, v průmyslu, ale také v domácnostech. S rostoucí poptávkou se zvyšují také požadavky na její kvalitu. Světové zásoby pitné vody, které jsou dnes dostupné jsou tvořeny z 20 % podzemní vodou. V místech, kde bylo nadměrně čerpáno ze zásob podzemních vod je dnes nedostatek vody, a proto je nutné provádět přesné odhady dostupných zdrojů podzemních vod, s tím také souvisí plánování, které zajistí, aby byl zajištěn proces jejího doplňování (VALENTOVÁ, 1994).

Podzemní voda je významným elementem ve všech klimatických regionech jako složka hydrologického cyklu. Z důvodu velmi dobré kvality, snadné dostupnosti a dostupných metod k jejímu získávání stoupá poptávka po podzemní vodě (TODD a MAYS 2005, VALENTOVÁ, 2010). Při získávání podzemní vody, která se nachází zpravidla v pórech mezi jednotlivými částicemi zeminy, nebo na místech, kde je porušena kontinuita hornin je nutné znát vlastnosti a typy zvodnělého prostředí.

### 4.1 Vertikální rozdělení podpovrchových vod

Schéma rozdělení podzemních vod v homogenním prostředí je zobrazeno na *obr. 1*.



Obrázek 1 - Schéma rozdělení podzemních vod (PECH, 2010)

Ve vertikálním profilu se vody vyskytují ve čtyřech pásmech:

- a) Pásmo půdní vody – pásmo začínající na povrchu, které dosahuje do hloubky kořenové zóny rostlin.
- b) Přechodné pásmo – vyskytující se pod pásmem půdní vody, které dosahuje k pásmu kapilární vody. Tato část se může v závislosti na podmínkách měnit na nasycenou, nebo nenasyčenou zónu.
- c) Pásmo kapilární vody – zóna objevující se mezi hladinou podzemní vody (tzv. kapilárním lemem) a přechodným pásmem.
- d) Pásmo podzemní vody – zóna nacházející se pod pásmem kapilární vody, jedná se o prostředí, které je saturované vodou. Saturovaná zóna pokračující hlouběji až k hornině, která je izolátorem.

Ve vertikálním rozdělení podzemních vod můžeme rozdělit na dvě pásma. Pásmo nasycené, kde bývají většinou nasyceny všechny póry vodou. Pásmo nenasyčené, které se nachází nad pásmem nasyceným a vyznačuje se jen částečnou nasyceností všech pórů (PECH, 2010).

#### 4.2 Rozdělení podpovrchových vod podle vzniku

a) Juvenilní (hlubinná) voda – jedná se o vody, které vznikají ve velkých hloubkách pod povrchem kondenzací vodních par, tyto vodní páry jsou produktem procesu tuhnutí magmatu. Juvenilní vody jsou vyjmuty z oběhu vody (MÁČA, 2014).

b) Vadózní voda – zde se jedná o vodu, která je do horninového prostředí infiltrována z povrchu. Největším zdrojem těchto vod jsou atmosférické srážky. Mezi tyto vadózní vody řadíme zkondenzované vodní páry, které se vyskytují v puklinách hornin, či v pórech zemin (STARÝ, 2005).

c) Fosilní podzemní voda – jde o vodu, která vznikla před dlouhou dobou a nezasahuje do hydrologického cyklu, protože byla od té doby uzavřena nepropustnými vrstvami (MÁČA, 2014).

#### 4.3 Rozdělení vodonosných vrstev

Podpovrchové vody jsou tvořeny nasycenou a nenasyčenou zónou. Odborným pojmem zvodnělá vrstva rozumíme vodonosnou vrstvu (tzv. zvođeň, kolektor, angl. aquifer) používající se pro nasycené zvodnělé prostředí. Opačným případem je, pokud prostředí vodu není schopno propouštět, potom se jedná se o izolátor. Poslední variantou je propustné prostředí

s přetékáním tzv. poloizolátor, který v porovnání s více propustnou vrstvou je schopen propouštět pouze malé množství vody (FREEZE A CHERRY, 1979).

Horniny nebo zeminy, ať už se jedná o metamorfované, sedimentární či magmatického původu nikdy nejsou výhradně propustné nebo naopak nepropustné. Stále záleží na tom, v jakém rozsahu jsou schopné vodu propouštět (PECH, 2010).

#### a) S volnou hladinou

Tato zvodněná vrstva je shora ohraničena volnou hladinou, na níž působí atmosférický tlak, zespodu je ohraničená nepropustnou vrstvou (izolátorem). Jde o prostředí, které je vodou vyplněno do spodní části kolektoru. Ve vrchní části kolektoru nad hladinou podzemní vody se nachází pásmo aerace, kde jsou póry vyplněny vzduchem. Hladina podzemní vody je označována za hydrogeologickou hranici, která je proměnlivá (MARSCHALCO ET. AL., 2002).

Primární zdrojem přirozené subvence vody do zvodnělé vrstvy s volnou hladinou jsou atmosférické srážky. Dalším zdrojem mohou být přečištěné odpadní vody. Tyto vody bývají přímo čerpány do zvodně, nebo jsou rozlity po povrchu a nechají se vsakovat.

Zvodnělá vrstva s volnou hladinou je obvykle blíže k zemskému povrchu než zvodnělá vrstva s napjatou hladinou. Z tohoto důvodu je jejich hladina podzemní vody ovlivňována zevními vlivy. Výsledkem je následné kolísání hladiny vody. Jde o vratký stav, kdy je voda odváděna pryč ze systému, nebo naopak dotována do systému.

Dotace vody z přirozených zdrojů je přímo závislá na tom, v jakých klimatických podmínkách se daný region nachází. V letních měsících se velká většina atmosférických srážek odpařuje, tudíž je dotace vody do kolektoru nižší, v zimních měsících je to podobné z důvodu, že bývá půda často zamrzlá. Naopak je tomu v jarních a podzimních měsících, kdy se dotace vody do kolektoru zvyšuje z důvodu maximálních srážek a nízkého výparu. Také je výhodou, že půda není zmrzlá a voda může snadněji infiltrovat (VALENTOVÁ, 2010).

Do kolektoru s volnou hladinou podzemní vody rovněž řadíme segment, který se nazývá tzv. pásmo kapilární vody, toto pásmo evidujeme jako přechod mezi pásmem saturace (nasycení) a pásmem aerace (nenasycení) (MARSCHALCO ET. AL., 2002). Z důvodu svého umístění je zvodeň s volnou hladinou poměrně náchylná na lidskou činnost. Může se například jednat o lidskou činnost, při které vznikají polutanty a tím ohrozit zdroj podzemní vody následnou kontaminací. Kontaminace zvodně by závisela na hloubce hladiny podzemní vody a také na způsobilosti polutantu vniknout přes vadózní zónu.

Nárůst populace a urbanizace má velký dopad na podzemní vodu. S nárůstem populace je spojeno budování infrastruktury, zastavování území a tím pádem roste objem odebírané

podzemní vody. Zastavěné území a velké množství zpevněných ploch je důvodem nemožnosti doplnění vody do kolektoru hlavně kvůli nepropustnosti povrchu a značnému povrchovému odtoku (THOMPSON, 1999).

#### b) S napjatou hladinou

Zvodeň s napjatou hladinou je vrstva, která je shora i zdola ohraničena nepropustnou či polopropustnou zvodnělou vrstvou. Všechny póry v této zvodni jsou naplněny vodou, která má větší tlak, než je atmosférický tlak (WALTON, 2006). Nepropustná vrstva neboli izolátor zabraňuje či velmi omezuje pohyb vody mezi kolektorem a vodou, která je obsažena v okolím horninovém prostředí.

K dotaci vody do kolektoru může docházet pouze tam, kde se zvodeň s napjatou hladinou blíží k zemskému povrchu. Pokud budeme předpokládat kolektor obklopen výhradně poloizolátory, kolektor bude zásobován v nižším rozsahu vodou, která prosakuje skrz, jedná se o tzv. polopropustné prostředí s přetékáním. Tyto kolektory jsou pod velkým tlakem a je zde nepřítomnost hladiny podzemní vody, protože jsou všechny dostupné póry vyplněny vodou a jsou ohraničeny polopropustnými, nebo úplně nepropustnými vrstvami. Jednou z mála oblastí, kde evidujeme v kolektoru s napjatou hladinou, hladinu podzemní vody je oblast, kde je zvodeň dotována povrchovou vodou.

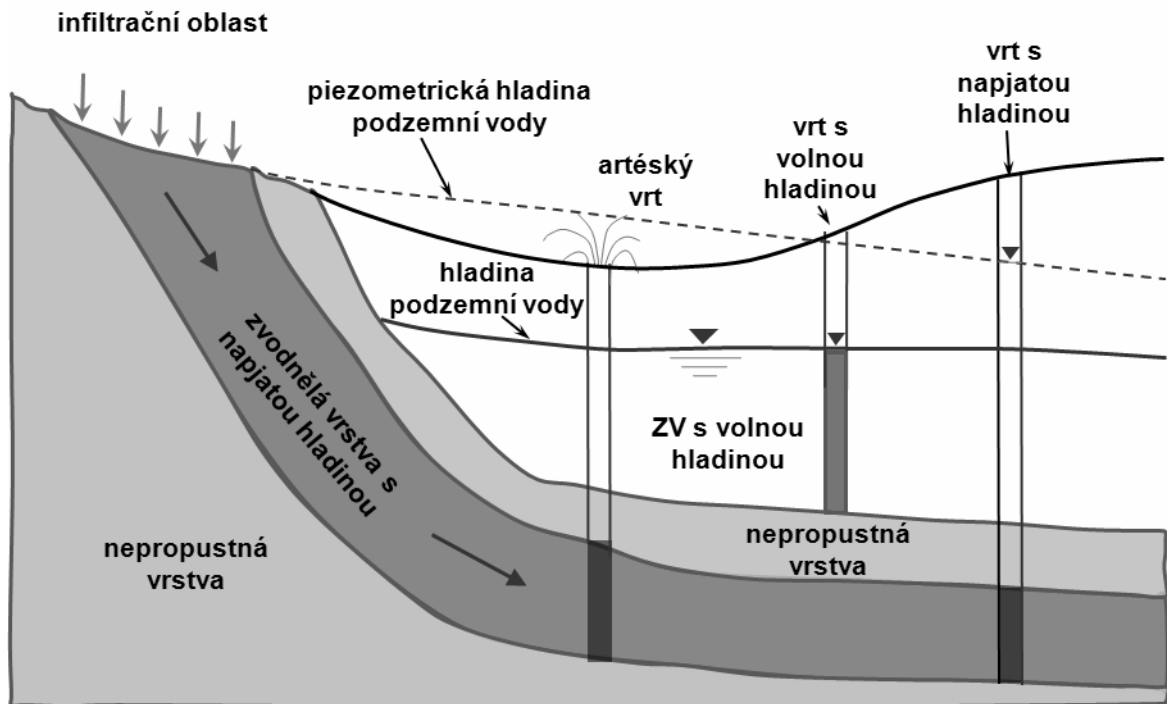
Piezometrická hladina podzemní vody udává v těchto zvodních tlakové podmínky. Jedná se o úroveň, na kterou vystoupí hladina podzemní vody, když narazíme na napjatou zvodeň. Piezometrická hladina bývá také nazývána jako výtlačná výška. Hodnotu této výtlačné výšky je možné získat pomocí piezometru. Piezometrem rozumíme trubici, která je na obou koncích otevřená. Piezometr zasadíme do zvodně s napjatou hladinou, voda začne vstupovat spodním koncem do piezometru a následně vystoupá směrem vzhůru na úroveň, kterou označujeme jako piezometrickou hladinu podzemní vody (THOMPSON, 1999; VALENTOVÁ, 2010).

Dále je možné se v praxi setkat se situací, kdy se piezometrická hladina vyskytuje nad zemským povrchem, jestliže je vrt zapuštěn ve zvodnělé vrstvě s piezometrickou hladinou mluvíme o artéském vrtu (artéské studně). Z tohoto důvodu je tato zvodnělá vrstva často nazývána jako artéská zvodnělá vrstva (PECH, 2010).

#### c) Polopropustná vrstva s přetékáním

Zde se jedná o zvodnělou vrstvu, která může být s volnou, tak i napjatou hladinou. Tato vrstva buď získává, nebo ztrácí vodní zásobu přes sousední polopropustné vrstvy (THOMPSON, 1999).

Polopropustné vrstvy nejsou tak obvyklé, zpravidla vyskytující se v místech vyschlých jezer, na pláních, nebo v aluviálních údolích. Na těchto místech jsou propustné vrstvy překryty polopropustnou vrstvou chovající se jako izolant. Pokud se rozhodneme čerpat vodu z těchto vrstev, voda bude doplňována přes podložní nebo nadložní polopropustné izolátory (TODD a MAYS, 2005).



Obrázek 2 - Schématické rozdělení zvodněných vrstev (PECH, 2010)

#### 4.4 Vlastnosti zvodněných vrstev

##### 4.4.1 Storativita (S)

Jedná se o vlastnost, která reprezentuje schopnost nasyceného zvodnělého prostředí pojmout anebo uvolnit určitý objem vody, obvykle bývá označována velkým S.

$$S = S_s \cdot b \quad (1)$$

$S_s$  – specifická storativita ( $m^{-1}$ )

Pod pojmem specifická storativitu rozumíme objem vody, který se uvolní z jednotkového objemu zvodnělé vrstvy při jednotkovém poklesu piezometrické výšky.

$$S_s = \rho \cdot g (\alpha + n \beta_v) \quad (2)$$



kde  $\rho$  je měrná hmotnost vody [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  $g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  $\alpha$  je koeficient stlačitelnosti zvodně [ $\text{Pa}^{-1}$ ],  $n$  je pórovitost nasyceného kolektoru a  $\beta_v$  je koeficient stlačitelnosti kapaliny [ $\text{Pa}^{-1}$ ]

Rozlišujeme více typů storativity (zásobnosti) například:

a) Efektivní storativita

Jedná se o hodnotu storativity, která je v určitém momentě neustáleného proudění efektivně uplatňována.

b) Opožděná storativita

Objem vody (resp. jeho poměr), který se uvolní z pórů do přesného časového okamžiku od snížení volné hladiny.

c) Pružná storativita

Zde u pružné storativity se jedná o možnost hornin uvolnit z pružných zásob vody, která se nachází v pórech nebo pojmout do pružné zásoby v pórech v důsledku pružnosti zvodnělé vrstvy specifický objem vody při změně napětí (piezometrického).

d) Volná storativita

Jedná se o zásobnost, která je objemem pórů, z nichž voda vytéká nebo do kterých voda vtéká při změně volné hladiny bez zahrnutí vody z blízké kapilární zóny vlivem gravitační síly.

e) Storativita volné hladiny

Tato zásobnost je objemem pórů, z nichž voda vyteče nebo do kterých vteče při změně volné hladiny. Je zde zahrnuta voda, která při snížení volné hladiny odtéká také vlivem gravitačních sil ze zóny kapilární (BEAR, 1972).

#### 4.4.2 Pórovitost ( $n$ )

Pórovitost zvodnělého prostředí je podílem celkového objemu pórů ( $V_p$ ) a celkového objemu vzorku zvodnělé vrstvy ( $V_t$ ). Výsledkem je bezrozměrná pórovitost, která se ale v praxi obvykle přepočítává na procentuální hodnoty – přenásobením 100 (SCHÖN, 2015). Např. písek 20–30 %, štěrk 25–50 %, hlína 35–50 %, jíl 40–70 %).

$$n = \frac{V_p}{V_t} \quad (3)$$

Ke správné charakterizaci kolektoru je nutné rozlišit jednotlivé druhy pórovitosti (SCHÖN, 2015; PECH, 2010).

a) Aktivní pórovitost

$$n_a = \frac{V_{pa}}{V_t} \quad (4)$$

$V_{pa}$  – objem pórů, ze kterých voda odteče pouze v důsledku gravitace

b) Efektivní pórovitost

$$n_e = \frac{V_{pe}}{V_t} \quad (5)$$

$V_{pe}$  – součet objemu pórů, kde se při proudění voda opravdu pohybuje

Efektivní pórovitost je zásadním faktorem používající se při řešení okruhu problémů proudění podzemních vod i šíření kontaminace v podzemních vodách.

Pórovitost je možné určit přímo v laboratoři ze vzorku vrtných jader, nebo nepřímo ze záznamu karotážních měření. V tomto případě se využívá akustických a jaderných metod (SCHÖN, 2015).

#### 4.4.3 Propustnost ( $k_p$ )

Propustnost (permeabilita) je hlavní charakteristikou porézního prostředí. Charakterizuje schopnost horniny nebo zeminy propouštět vodu, a přitom nezávisí na fyzikálních vlastnostech kapalin. Permeabilita je určena jen z vlastností pevné části zvodnělé vrstvy. Z toho plyne, že vlastnosti kapaliny zde nejsou zahrnuty (SCHÖN, 2015; PECH, 2010). Propustnost můžeme určit buď přímo, například rozbořem získaných vzorků, nebo testováním prostřednictvím studňových čerpacích zkoušek. Dále je možné propustnost určit nepřímo, a to pomocí parametrů pórovitosti a zrnitosti nebo karotážním měřením. Nepřímá metoda pomocí parametrů pórovitosti a zrnitosti je používána výhradně v nezpevněných sedimentech.

Propustnost neboli permeabilitu je možné vyjádřit empirickým vztahem (BEYER a SCHWEIGER, 1969).

$$k_p = C d_{10}^2 \quad (6)$$

$C$  – konstanta, která zahrnuje vliv možných činitelů na proudění vody (tortuozity)

$d_{10}$  – průměr zrn [m], který je určený z křivky zrnitosti

#### 4.4.4 Hydraulická vodivost ( $K$ )

Hydraulická vodivost je charakteristika zvodně, kterou můžeme najít v Darcyho rovnici (viz kapitola [5.2 Darcyho zákon](#)). Hydraulická vodivost charakterizuje, jak je schopna kapalina proudit v porézním prostředí. Přesnou hodnotu hydraulické vodivosti je validní stanovit pomocí dat získaných z čerpací zkoušky nebo laboratorně (THOMPSON, 1999). Lze ji vypočítat vztahem (BEAR, 1979):

$$K = \frac{k_p \rho g}{\mu} \quad (7)$$

$k_p$  – permeabilita [ $m^2$ ]

$\rho$  – měrná hmotnost vody [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$\mu$  – dynamická viskozita [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]

$g$  – tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

#### 4.4.5 Transmisivita ( $T$ )

Transmisivita, česky průtočnost je schopnost zvodnělé vrstvy propustit kapalinu. V prostředí homogenním je stanovena jako součin koeficientu hydraulické vodivosti  $K$  a výšky (mocnosti) zvodnělé vrstvy  $b$ .

$$T = b \cdot K \quad (8)$$

$T$  – transmisivita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],  $b$  – výška (mocnost) zvodnělé vrstvy [ $m$ ],  $K$  – koef. hydraulické vodivosti [ $m \cdot s^{-1}$ ]

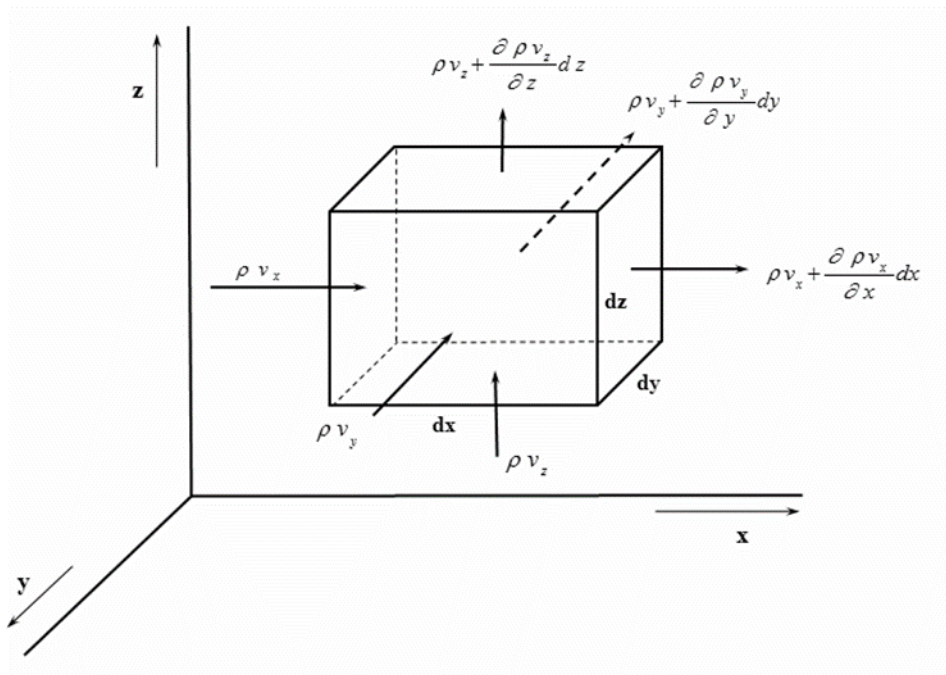
## 5. Zákonitosti proudění podzemních vod

Uvnitř hydrologického cyklu, kde voda koluje z míst umělé nebo přirozené dotace do míst umělého nebo přirozeného odběru. Nízká rychlost proudění je jedním ze znaků podzemních vod. V druhé polovině 19. století se řada vědců zabývala problematikou pohybu podzemních vod. Vycházeli z předpokladu, že podzemní voda proudí z výše položených míst do níže položených míst. V odborné terminologii, že podzemní vody proudí z míst, která mají vyšší mechanickou energii do míst, která mají nižší mechanickou energii (VALENTOVÁ, 2010). Pojem mechanická energie vody uvádí potenciál proudění (jde o práci, kterou voda překonává k pohybu do zvoleného místa). Praxe využívá místo potenciálu proudění vody hydraulickou výšku  $H$  [L]. Tato hydraulická výška je součtem geodetické výšky  $z$  a tlakové výšky  $h$ .

$$H = h + z \quad (9)$$

### 5.1 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity patří mezi základní fyzikální zákony, jde o interpretaci fyzikálního zákona zachování hmoty, v porézním prostředí se většinou nachází ve zvodnělé vrstvě plně nasycené (HÁLEK a ŠVEC, 1973). Vymežíme-li si elementární rovnoběžnostěn v proudu podzemní vody s rozměry stran  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ . Strany rovnoběžnostěnu jsou s jednotlivými souřadnými osami rovnoběžné. Odvození rovnice kontinuity v proudu podzemní vody je platné za předpokladu, že se v námi uvažovaném rovnoběžnostěnu nenachází ani propad, ani zdroj. Objem hmoty vody, který vstupuje se musí rovnat výstupnímu objemu hmoty vody.



Obrázek 3 - Elementární rovnoběžnostěn (PECH, 2010)

Pokud budeme uvažovat konstantní měrnou hmotnost vody  $\rho = konst.$  je možné zapsat rovnici kontinuity pro ustálené proudění ve tvaru:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

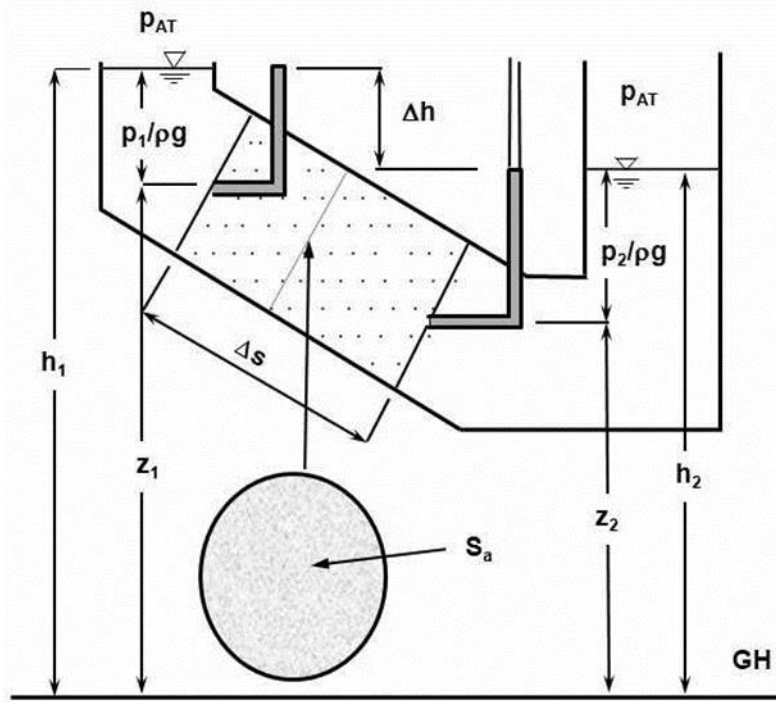
$v_x, v_y, v_z$  – rychlosti proudění ve směru jednotlivých os souřadnicového systému

nebo

$$\text{div } v = 0 \quad (11)$$

## 5.2 Darcyho zákon

Henry Darcy, celým jménem Henry Philibert Gaspard Darcy, žijící v letech 1803–1858 ve francouzském městě Dijon, publikoval roku 1856 na základě experimentu sledování průsaku vody přes písčitou náplň ve svislé trubici zákon odporu při proudění vody v porézním prostředí. Tímto experimentem bylo zjištěno, že průtok při rovnoměrném filtračním proudění vody v kruhové trubici s příčným průřezem  $S_a$  je přímo úměrný piezometrickému (hydraulickému) spádu (obr. 4). Tento experiment probíhal ve válci naplněném pískem s konstantním průřezem  $S_a$  a Henry Darcy stanovil, že při rovnoměrném filtračním proudění je průtok vody závislý na hydraulické vodivosti, hydraulickém spádu a také závislý průtočným průřezem, konkrétně na jeho ploše (DARCY, 1856).



Obrázek 4 - Schéma Darcyho experimentu proudění vody porézním prostředím (PECH, 2010)

Rovnice Darcyho zákona:

$$Q = K S_a \frac{h_1 - h_2}{\Delta s} \quad (12)$$

kde  $Q$  – průtočné množství vody [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $K$  – hydraulická vodivost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], která charakterizuje odporové vlastnosti porézního prostředí a vlastnosti kapaliny při proudění,  $S_a$  – představuje plochu průtočného průřezu [ $\text{m}^2$ ],  $h_1 - h_2$  představuje rozdíl piezometrických výšek [ $\text{m}$ ],  $\Delta s$  – vzdálenost profilů [ $\text{m}$ ]

Z rovnice (12) je možné vyjádřit rychlost s využitím rovnice kontinuity pro ustálené proudění (KURÁŽ, 2014):

$$v = -K \frac{\partial h}{\partial x} = -K i \quad (13)$$

zde jde o matematické vyjádření Darcyho zákona, podle kterého je vztah mezi hydraulickým gradientem a filtrační rychlostí v uvažovaném bodě lineární. Zlomek  $\frac{\partial h}{\partial x}$  představuje hydraulický gradient,  $v$  – darcyovská rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ], Tato rovnice je platná pouze pro jednorozměrné proudění v homogenním prostředí. Pro obecný případ trojrozměrné filtrace je možné vztah (13) přepsat do složek ve směru souřadných os  $x$ ,  $y$  a  $z$ .

$$v_x = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad (14)$$

$$v_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$$

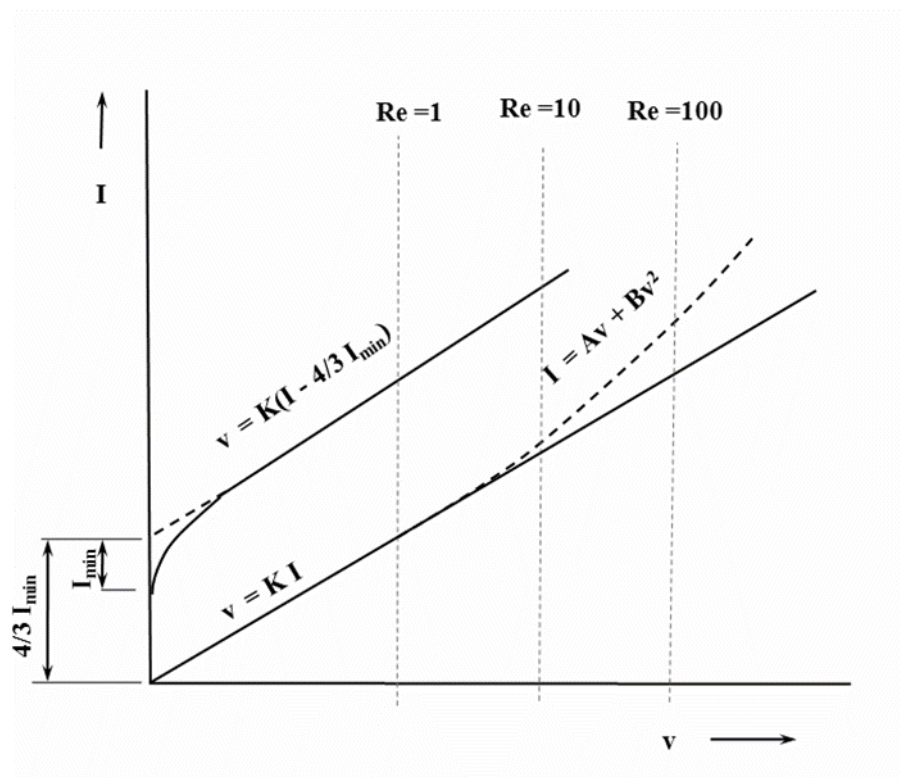
kde vektor  $v$  obsahuje složky rychlosti  $v_x, v_y, v_z$ , tyto složky jsou ve směru os  $x, y$  a  $z$ .

nebo

$$v = K \cdot \text{grad } H \quad (15)$$

### 5.2.1 Meze platnosti Darcyho zákona

Ze vztahu, který odvodil Henry Darcy vyplývá, že vztah mezi hydraulickým gradientem a rychlostí vody, která proudí porézním prostředím je lineární. Tato lineární závislost platí pouze v určitých mezích.



Obrázek 5 - Platnost Darcyho zákona v jednotlivých mezích (PECH, 2010)

V mechanice tekutin se k určení přechodu režimu proudění využívá Reynoldsova čísla ( $Re$ ), respektive jako kritická hodnota. Reynoldsovo číslo Reynolds definuje jako bezrozměrné číslo, které vyjadřuje poměr viskózních a inerciálních sil, které působí na proudící kapalinu (VALENTOVÁ, 2007). Pokud tuto formulaci zjednodušíme, jedná se o poměr mezi třecími a setrvačnými silami.

Pro určení přechodu proudění je využíváno kritické hodnoty Reynoldsova čísla  $Re_{krit}$  (BEAR, 1979). Kritická hodnota Reynoldsova čísla pro proudění podzemních vod je  $Re = 1$ .

- $Re$  0–10 proudění laminární
- $Re$  10-100 přechodná nelineární oblast
- $Re$  >100 proudění turbulentní

Pokud je překročena určitá kritická rychlost filtrace je Darcyho vztah neplatný. Také v jemnozrnných materiálech lze považovat Darcyho vztah za platný až po překročení kritické hodnoty hydraulického gradientu a rychlost můžeme vyjádřit vztahem (MUCHA, 1987):

$$v = K \cdot \left( I - \frac{4}{3} I_{min} \right) \quad (16)$$

Z rovnice je patrné, že se hned nedá do pohybu všechna voda v pórech.  $I$  značí hydraulický spád,  $K$  je hydraulická vodivost. Hodnota  $I_{min}$  je určena podle zrnitostního složení. Pro prachovité až hlinité zeminy se pohybuje okolo 0,3 až 0,5 a pro zeminy jílovité 0,5 až 1,0 výjimečně někdy i více.

Reynoldsovo filtrační číslo můžeme definovat dle (HÁLEK a ŠVEC, 1979) jako:

$$Re_f = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (17)$$

kde  $d_e$  je efektivní průměr zrna [m] (např. dle WARDA, 1964  $d_e = k_p^{1/2}$ )  $\mu$  je dynamická viskozita [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

Stanovení  $d$  v Reynoldsově čísle je velmi náročné, a z toho důvodu se nejčastěji využívá průměr zrna  $d_{10}$ . Průměr  $d_{10}$  je takový průměr zrna, kdy je ve vzorku 10 % z celkového množství zrn s průměrem menším, než je  $d_{10}$ .

Pokud se  $Re$  nachází v rozmezí mezi 0 až 10 můžeme předpokládat Darcyho vztah za platný, pokud překročí hodnota  $Re > 10$  dojde následně k postupnému zvětšujícímu odchýlení od lineárního průběhu, a tedy nejlépe vyhovuje tento odporový zákon ve všeobecném tvaru.

$$I = A v + B v^m \quad (18)$$

kde  $m$  je v rozmezí 1,6 až 2.

Pro Reynoldsovo číslo  $> 100$  dostáváme již zcela turbulentní proudění a jde o kvadratický vztah mezi rychlostí a hydraulickým spádem  $I$ , tudíž ze stávající rovnice zůstane na pravé straně pouze druhý člen s exponentem  $m$  rovným 2.

$$I = B \cdot v^2 \quad (19)$$



### 5.3 Proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou

Při proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou jsou hydrodynamické podmínky jednoznačně jednodušší než u vrtu s volnou hladinou. Při proudění podzemní vody zvodnělou vrstvou s volnou hladinou dojde v čase  $t$  ke změně úrovně hladiny vody a také se mění transmisivita  $T$  nasycené vrstvy a mocnost zvodně porézního prostředí (PECH, 2010). Rovnice neustáleného radiálně-symetrického proudění podzemní vody s napjatou hladinou vychází z rovnice kontinuity (10) a rovnice Darcyho zákona (12), kterou můžeme po úpravě přepsat do tvaru:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (20)$$

Vztah pro snížení  $s$  je možné vyjádřit:  $s = H - h$ , kde  $h$  představuje piezometrickou výšku v daném bodě [m] a  $H$  představuje hodnotu piezometrické výšky v čase  $t = 0$  nebo v dosahu depresního kuželu,  $R$  [m].  $S$  představuje koeficient zásobnosti (storativity) odvozený ze storativity specifické ( $S_s$ ).  $T$  představuje transmisivitu, která je součin mocnosti zvodnělé vrstvy  $b$  [m] a hydraulické vodivosti  $K$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]. Zlomek na pravé straně rovnice  $\frac{\partial s}{\partial t}$  reprezentuje derivaci snížení  $s$  podle času  $t$ .

### 5.4 Proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou

Proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou je z hlediska hydrodynamických podmínek mnohem složitější než proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou. Při počátku čerpání není transmisivita zvodně v dosahu depresního kužele konstantní, ale je uvnitř depresní oblasti funkcí vzdálenosti od vrtu a při proudění v nestacionárním režimu je funkcí času (PECH, 2010).

Při odvozování rovnic pro proudění podzemních vod zvodnělou vrstvou s volnou hladinou se využívá rovnic pro proudění podzemní vody zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou za předpokladu, že průměrná transmisivita  $T'$ , která se využívá v oblasti ovlivněné čerpáním a je rovna v prvním přiblížení aritmetickému průměru z transmisivity  $T_o$  ( $R$ ) neovlivněné čerpáním a z maximálně snížené transmisivity  $T_v$  ( $r_v$ ) na plášti vrtu:

$$T' = \frac{T_o(R) + T_v(r_v)}{2} \quad (21)$$

Máme mnoho různých technik, které se využívají k výpočtu, většinou se volí podle charakteru vstupních dat. K účelům této práce bude využívat při výpočtech proudění podzemní vody s volnou hladinou hodnoty snížení hladiny ve vrtu upravené opravným snížením  $s_v$ .

$$s_c = s_v \frac{H'}{H} = s_v - \frac{s_v^2}{2H} \quad (22)$$

kde  $s_v$  představuje snížení hladiny vody ve vrtu [m],  $s_c$  představuje opravné snížení pro proudění s volnou hladinou [m],  $H'$  představuje mocnost redukované zvodnělé porézní vrstvy [m],  $H$  představuje v dosahu depresního kužele mocnost zvodnělé vrstvy [m]

## 5.5 Dupuitovy postuláty

Dupuitovy postuláty neboli Dupuitovy předpoklady se používají pro řešení proudění podzemní vody s volnou hladinou. Pokud se jedná o proudění rovnoměrné je volná hladina proudnicí, každý bod této hladiny je vektorem hustoty toku ve směru tečny k hladině (MLS, 1988). Velikost hustoty toku je možné vyjádřit rovnicí vycházející z diferenciální formy Darcyho zákona:

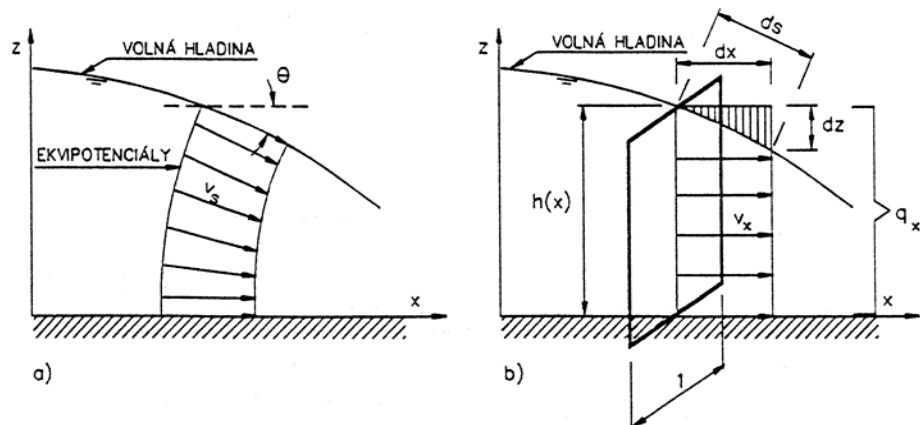
$$v_s = -K \frac{\partial H}{\partial s} = -K \frac{\partial z}{\partial s} = -K \sin \theta \quad (23)$$

kde  $v_s$  je vektor hustoty toku ve směru osy  $x$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] a  $\theta$  představuje úhel, který svírá tečna k hladině s vodorovným směrem [-]

Roku 1863 publikoval Dupuit řešení proudění vody ve zvodni s volnou hladinou, které je založené na zjednodušených postulátech (DUPUIT, 1863). Tím je myšleno, že sklon hladiny podzemní vody je většinou velmi malý:  $\frac{1}{1000}$  až  $\frac{10}{1000}$ , a tudíž můžeme považovat tento směr proudění za horizontální. Je možné Dupuitovy postuláty vyjádřit rovnicí:

$$\frac{\partial H}{\partial x}(x, y, z) = \frac{\partial h}{\partial x}(x, y) \quad (24)$$

kde hydraulická výška  $H(x, y, z)$  a hladina podzemní vody  $h(x, y)$  má shodné hodnoty, proudnice reprezentují vodorovné přímky a křivky vertikální reprezentují ekvipotenciály, které jsou kolmé na proudnice (MLS, 1984). Jak můžeme vidět na obr. 6.



Obrázek 6 - Dupuitovy postuláty (VALENTOVÁ, 2007)

V rovnici (22) je úhel  $\theta$  velmi malý, hodnota sklonu se pohybuje do cca  $10^\circ$ , tudíž můžeme  $\sin \theta = \partial h / \partial s$  nahradit sklonem hladiny  $\tan \theta = \partial h / \partial x$ . V tomto případě není hydraulická výška funkcí vertikální souřadnice  $z$ , ale  $H = h(x)$ .

$$v_z(x, z) = -\frac{z q_x^2}{K h^3(x)} \quad (25)$$

Rovnice (25) představuje velikost rychlosti, které je rychlostí proti směru osy  $z$ , což můžeme vidět na obr. 6. Vertikální složka rychlosti dosahuje záporných hodnot nad nepropustným podložím.

## 6. Proudění podzemních vod k ideálnímu vrtu

Zde je nutné si nejprve vysvětlit pojem ideální vrt. Ideálním vrtem, je takový vrt, u kterého neuvažujeme dodatečné odpory uvnitř i v blízkém okolí do cca 5 m od osy vrtu (PECH a kol., 2015). Při řešení se také nebere na počátku čerpací zkoušky v potaz vliv objemu vody ve vrtu. Začátek depresní křivky je na hladině vody v čerpaném vrtu. V této kapitole bude osvětleno řešení základní parciální diferenciální rovnice filtračního proudění s napjatou hladinou k úplnému vrtu. Bude využito metod, které se používají k vyhodnocování přítokových zkoušek, a to Theisova metoda typových křivek, a pro pozdější časy bude využita Jacobova semilogaritmická aproximace.

### 6.1 Nestacionární radiální proudění k ideálnímu úplnému vrtu

V tomto případě předpokládáme horizontální proudění vody zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou, která je omezena dvěma nepropustnými vrstvami, které jsou vzdáleny o konstantní mocnost. Vycházíme z rovnice (20) v kapitole 5.3, ze které můžeme vyloučit vertikální složku, jelikož se jedná o horizontální proudění.

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{s}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (26)$$

Pokud řešíme axiálně symetrický průsak k dokonalému vrtu, upravíme diferenciální rovnici (26), zderivováním a převedením do cylindrických souřadnic, a to za využití proměnné  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  (PECH, 2010)

Poté platí pro první derivaci snížení ve směru x

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial s}{\partial r} \frac{x}{\sqrt{(x^2+y^2)}} = \frac{\partial s}{\partial r} \frac{x}{r} \quad (27)$$

Následně provedeme druhou derivaci ve směru x

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} \frac{x^2}{r^2} + \frac{\partial s}{\partial r} \frac{y^2}{r^3} \quad (28)$$

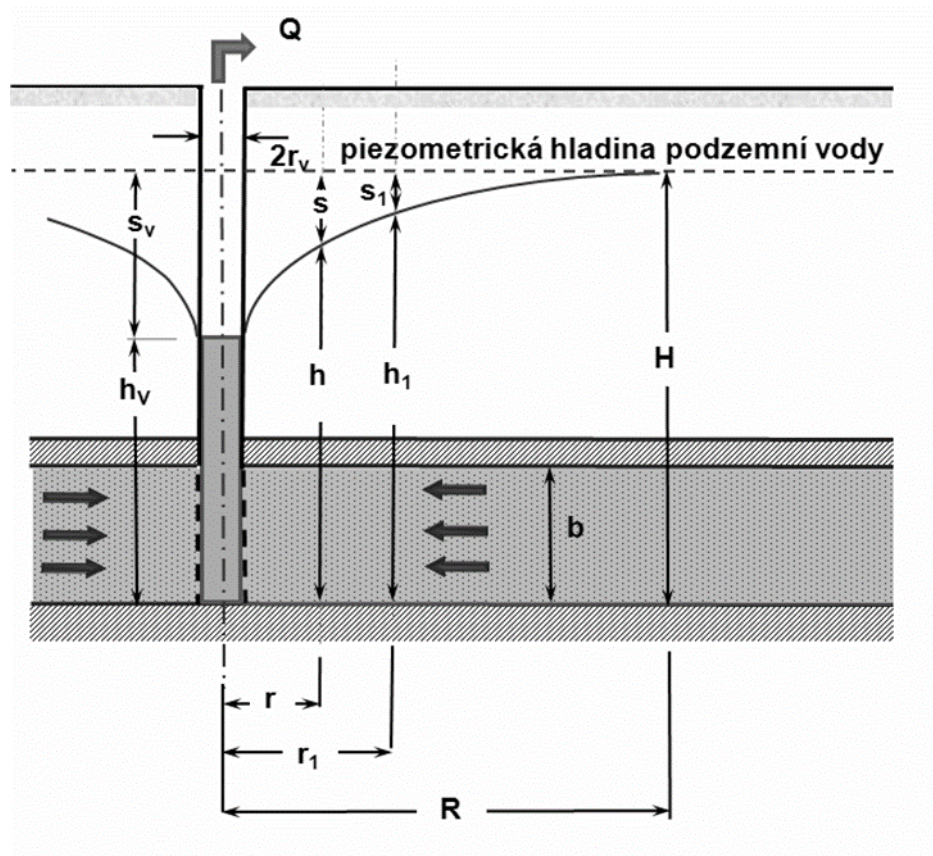
Totožným postupem provedeme druhou derivaci ve směru y

$$\frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} \frac{y^2}{r^2} + \frac{\partial s}{\partial r} \frac{x^2}{r^3} \quad (29)$$

Jestliže tento tvar rovnice (29) a rovnici (28) dosadíme do první základní rovnice (26) dostáváme po úpravě diferenciální rovnici, která popisuje průsak podzemní vody nasyceným porézním prostředím s napjatou hladinou v požadovaných cylindrických souřadnicích, který probíhá až do hydraulicky dokonalého vrtu ve tvaru

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (30)$$

kde  $s$  je snížení [m],  $r$  je radiální vzdálenost [m],  $S$  je storativita zvodně [-],  $t$  je čas [s],  $T$  je transmisivita zvodně [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]



Obrázek 7 - Schéma úplného ideálního vrtu ve zvodni s napjatou hladinou

Toto řešení jako první publikoval Charles Vernon Theis (1935), který byl autorem vyhodnocení hydraulických parametrů v porézním prostředí, které byly zjištěny ze záznamu snížení hladiny podzemní vody ve vrtu. Když Theis řešil rovnici (30) vycházel z následujících předpokladů (THEIS, 1935):

- Zvodnělá vrstva je homogenní a izotropní.
- Jde o nestlačitelnou kapalinu.
- Výška zvodně  $b$  se nemění v celé řešené oblasti.

- Koeficient storativity a transmisivity jsou konstantní v čase a prostoru.
- V čase je čerpáno konstantní množství vody z vrtu.
- Vrt je v neomezené zvodnělé vrstvě (dosah depresního kuželu se během čerpání nedostane k napájecí ani nepropustné hranici).
- V celé době čerpací zkoušky platí pro filtrační rychlost Darcyho vztah.
- Piezometrická výška hladiny podzemní vody je ve všech místech zvodně konstantní a je rovna  $H$ , a rovněž ve vrtu je výška vody  $H$ .
- Objem čerpaného vrtu je bezvýznamně malý (při řešení není uvažován).
- Na vrtu a v jeho blízkosti nemají vliv dodatečné odpory (jedná se o ideální vrt).

Theis dal do spojitosti proudění vody a přenos tepla. Za pomoci profesora C. I. Lubina určil Theis následující tvar pro snížení (THEIS, 1935).

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (31)$$

kde  $W(u)$  je Theisova studňová funkce, která je ve tvaru exponenciálního integrálu a pro účely hydrogeologické se využívá její aproximace nekonečné řady (THEIS, 1935).

$$W(u) = -\gamma - \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^n}{n!n} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (32)$$

kde  $\gamma$  je Eulerova konstanta, která se rovná  $\gamma = 0,577216$  a  $u$  představuje argument Theisovy studňové funkce, který je bezrozměrný

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (33)$$

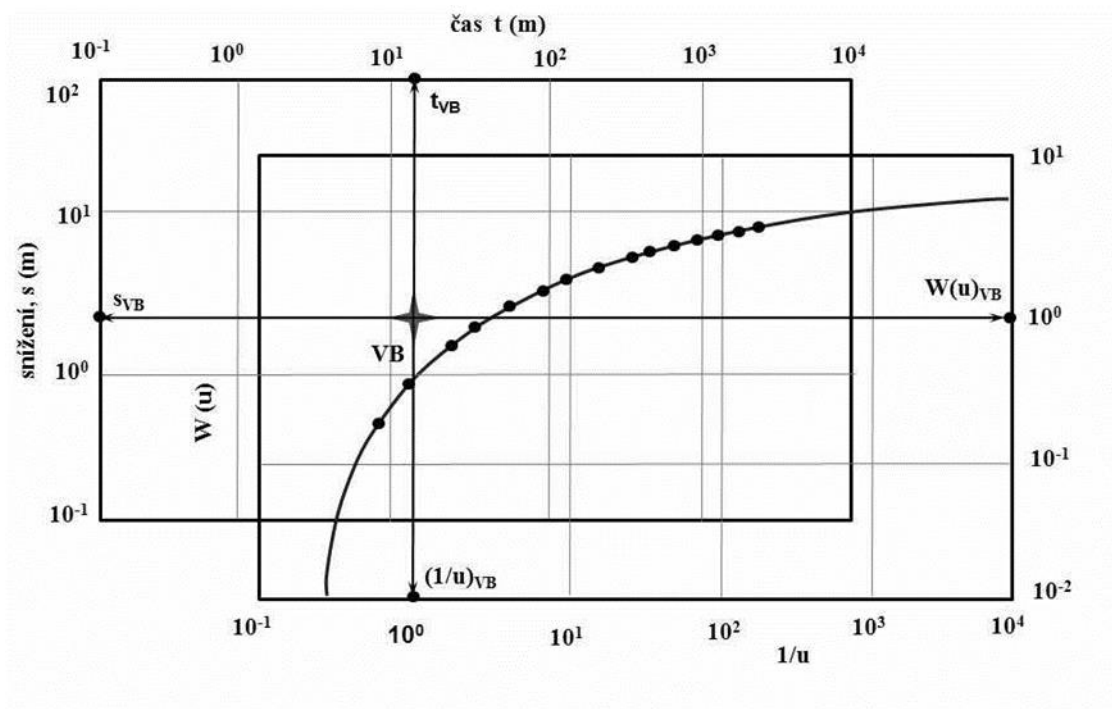
kde  $S$  představuje storativitu zvodnělé vrstvy [-],  $T$  představuje koeficient transmisivity [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $t$  představuje čas [s] a  $r$  představuje radiální vzdálenost [m],

## 6.2 Theisova metoda typové křivky

Rovnice (31) je využívána pro vyhodnocení přítokových zkoušek při nestacionárním režimu proudění, tato metoda je v literatuře nazývána „Theisovou metodou typové křivky“. Tato metoda může být využita k vyhodnocení storativity  $S$  a transmisivity  $T$  z hodnot získaných při čerpací zkoušce, kde je  $Q = \text{konst.}$  Metoda Theisovy typové křivky je použitelná na odčerpávaném vrtu, kde jsou dodrženy tyto podmínky: na vrtu a v blízkém okolí jsou zanedbatelné dodatečné odpory a objem vrtu je blízko hodnotě nula (THEIS, 1935).

Při čerpací zkoušce získáme v závislosti na čase hodnoty snížení vody v odčerpávaném vrtu, které vyneseme v odděleném grafu, ale ve stejném log-log měřítku separátně. Avšak je

zde klíčové, aby oba zmíněné grafy měly totožné logaritmické měřítko. Jak můžeme vidět na následujícím obrázku (8).



Obrázek 8 - Theisova typová křivka (THEIS, 1935)

Pokud posuneme křivku získanou z čerpací zkoušky po typové křivce dle Theise a získáme shodu, zvolíme si kterýkoliv vztážený bod VB. Poté na obou grafech odečítáme hodnoty  $s_{VB}$ ,  $t_{VB}$ ,  $(1/u)_{VB}$  a  $W(u)_{VB}$ . Následným dosazením  $W(u)_{VB}$  a  $s_{VB}$  do rovnice (34) získáme koeficient transmissivity.

$$T = \frac{Q}{4\pi s_{VB}} W(u)_{VB} \quad (34)$$

Dosazením dalších odečtených hodnot  $(1/u)_{VB}$  a  $t_{VB}$  do vztahu pro argument Theisovy funkce (33) stanovíme koeficient storativity.

$$S = \frac{4 T u_{VB} t_{VB}}{r^2} \quad (35)$$

kde  $T$  představuje hodnotu transmissivity [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],  $u_{VB}$  představuje argument Theisovy studňové funkce [-],  $t_{VB}$  představuje čas [s] a  $r$  představuje radiální souřadnici [m]

Zde je nutno uvést, že metodu Theisovy typové křivky lze užít na vrtu, který je odčerpáván pouze za podmínky, že na vrtu a v jeho blízkém okolí jsou dodatečné odpory zanedbatelné a také vlastní objem vrtu je blízko zanedbatelné hodnotě.

### 6.3 Jacobova semilogaritmická metoda přímky

Charles Edward Jacob (1914 - 1970) modifikoval roku 1946 Theisovu metodu typové křivky. Modifikoval rovnici studňové funkce dle Theise  $W(u)$  za určitých podmínek a to, že hodnota  $l/u > 100$  s chybou, která je menší než 0,25 % lze poté tuto rovnici zjednodušit zanedbáním třetího, čtvrtého a dalších členů, které se nacházejí na pravé straně rovnice (JACOB, 1946). Jacobova semilogaritmická aproximace studňové funkce (JACOB, 1946) má tvar.

$$W(u) \cong -0,577216 - \ln u \quad (36)$$

Pokud dosadíme za argument Theisovy studňové funkce  $u$  z rovnice (33) můžeme po modifikaci Theisovu studňovou funkci nahradit tímto výrazem.

$$W(u) \cong \ln \frac{2,246T t}{r^2 S} \quad (37)$$

Následným dosazením rovnice (37) do rovnice (31) dostaneme vztah, který představuje snížení  $s$ .

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,246T t}{r^2 S} \quad (38)$$

Při nahrazení přirozeného logaritmu  $\ln$  za logaritmus dekadický  $\log$  dostáváme upravený vztah pro snížení v libovolné vzdálenosti od osy odčerpávaného vrtu,  $r$  v čase  $t$ .

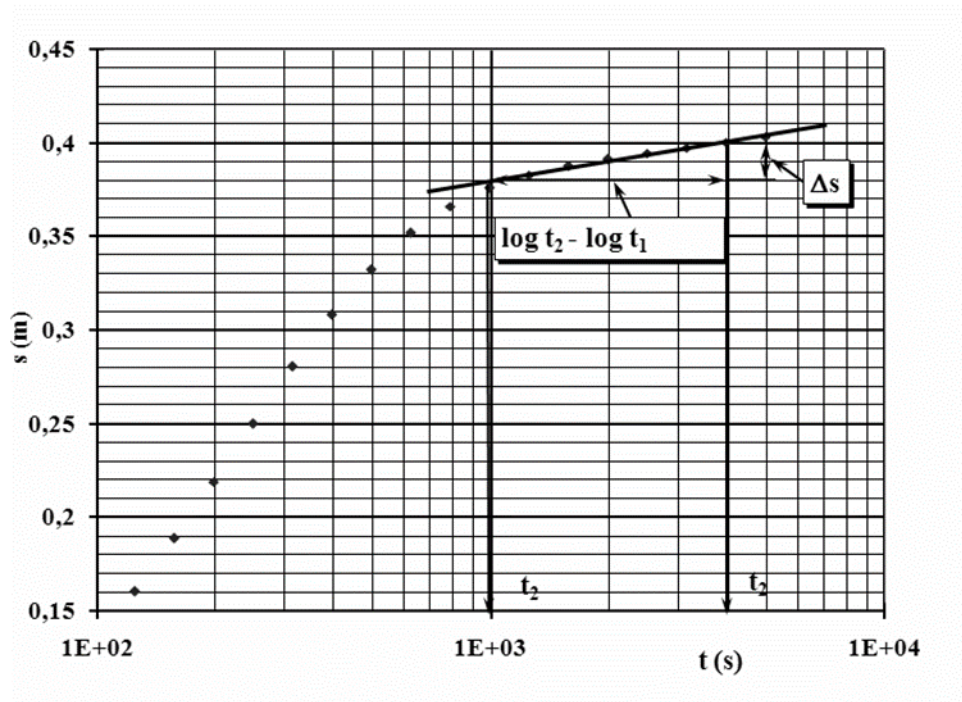
$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,246T t}{r^2 S} \quad (39)$$

Pokud vynášíme křivku z čerpací zkoušky ve tvaru snížení,  $s$  vs.  $\log t$  jak můžeme vidět na obrázku č. 9, tedy pro delší časové úseky se křivka transformuje do přímky se sklonem (40).

$$i = (s_2 - s_1) / (\log t_2 - \log t_1) \quad (40)$$

kde  $i$  představuje výsledný sklon přímky [-],  $s_1, s_2$  představuje v časech  $t_1$  a  $t_2$  snížení na vrtu [m],  $\log t_1$  a  $\log t_2$  představuje logaritmus času [s]





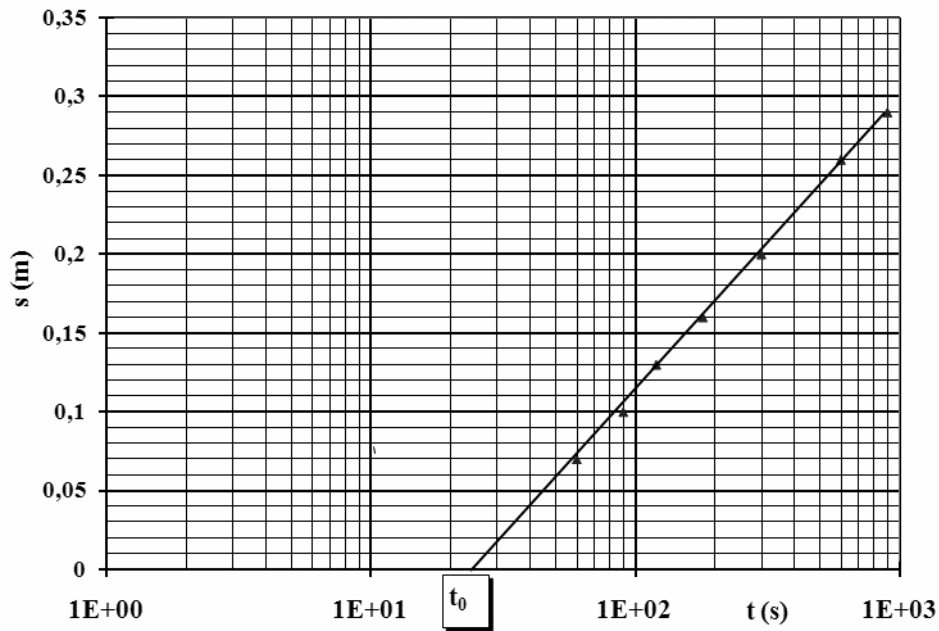
Obrázek 9 - Graf čerpací zkoušky  $s$  vs.  $\log t$  (PECH, 2010)

Následně dosadíme sklon přímky  $i$  (40) do vztahu pro výpočet koeficientu transmisivity v tomto tvaru (41) (PECH, 1988).

$$T = 0,183 \frac{Q}{i} \quad (41)$$

kde  $Q$  představuje množství, které je čerpáno z vrtu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $T$  představuje koeficient transmisivity [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $i$  je sklon přímky [-]

Máme-li k dispozici údaje z jednoho nebo více pozorovacích vrtů je možné stanovit koeficient storativity  $S$  pomocí Jacobovy metody ze základu hodnot snížení hladiny v čase  $t$ . V semilogaritmicke grafu (obr. 10) vidíme vynesené hodnoty ležící na přímce. Souřadnicová osa  $x$  reprezentuje logaritmus času [s] a osa  $y$  reprezentuje snížení [m]. Bod  $t_0$  je počáteční časový bod, který určuje na pozorovacím vrtu počátek snížení piezometrické hladiny, ale u kterého je ještě nulová hodnota snížení.



Obrázek 10 - Semilogaritmický graf čerpací zkoušky na pozorovacím vrtu (PECH, 2010)

Následný výpočet koeficientu storativity (42) vypadá takto.

$$S = 2,246 \frac{T t_0}{r^2} \quad (41)$$

kde  $S$  je koeficient storativity [-],  $T$  je koeficient transmisivity [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $r$  představuje vzdálenost od osy odčerpávaného vrtu k pozorovacímu vrtu [m],  $t_0$  je čas průsečíku extrapolované přímky s vodorovnou osou [s]

## 7. Proudění podzemních vod ke skutečnému vrtu

V následující kapitole bude uvedeno řešení základní parciální diferenciální rovnice neustáleného radiálně-symetrického průsaku podzemních vod k vrtu úplnému ve zvodnělé vrstvě s napjatou hladinou v bezrozměrných parametrech. Toto řešení bude uvedeno pro tzv. reálný neboli skutečný vrt. Pojmeme skutečný vrt rozumíme případ, kdy na odčerpávaném vrtu a v jeho blízkém okolí se uvažuje působení dodatečných odporů a do výpočtu tedy zavádíme také vliv vlastní objemu odčerpávaného vrtu na počáteční úsek hydrodynamické zkoušky (PECH, 2010).

## 7.1 Bezrozměrné parametry

- Bezrozměrné snížení výšky piezometrické ve vzdálenosti  $r$  od vrtu

$$s(r_D, t_D) = \frac{2\pi T}{Q}(H - h(r, t)) \quad (42)$$

kde  $T = K b$  je transmisivita [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $K$  je hydraulická vodivost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $b$  je mocnost zvodně, tj. vzdálenost mezi nepropustnými vrstvami [m],  $Q$  představuje odebírané množství vody z vrtu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $H$  představuje piezometrickou výšku v čase  $t = 0$  (tj. před zahájením hydrodynamické zkoušky) [m],  $h(r, t)$  představuje v čase  $t$  ve vzdálenosti  $r$  od odčerpávaného vrtu piezometrickou výšku [m],  $t$  představuje čas, který je měřen od začátku hydrodynamické zkoušky [s],  $t_D$  představuje bezrozměrný čas [-] a  $r_D$  je bezrozměrný poloměr [-]

- Bezrozměrné snížení hladiny vody ve vrtu odběrovém

$$s_{VD}(t_D) = \frac{2\pi T}{Q}(H - h_v(t)) \quad (43)$$

kde  $Q$  je čerpané množství vody z odběrového vrtu [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $H$  je původní piezometrická výška v čase  $t = 0$  [m],  $h_v$  je výška hladiny vody v odběrovém vrtu v čase  $t$  [m]

- Bezrozměrný čas

$$t_D = \frac{Tt}{r_v^2 S} \quad (44)$$

kde  $T$  je koeficient transmisivity zvodně [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $t$  je čas [s],  $r_v$  je poloměr odčerpávaného vrtu [m],  $S$  je koeficient storativity [-]

- Bezrozměrný poloměr

$$r_D = \frac{r}{r_v} \quad (45)$$

kde  $r$  představuje vzdálenost od odčerpávaného vrtu, konkrétně od jeho osy [-]

- Bezrozměrná storativita vrtu

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_v^2 S} \quad (46)$$

kde  $S$  je koeficient storativity [-],  $C$  je jednotkový faktor storativity vrtu [-]

- Bezrozměrný koeficient dodatečných odporů

$$W = \frac{2\pi T s_W}{Q} \quad (47)$$

kde  $s_w$  představuje snížení ve vrtu (určitou jeho část), které připadá na vliv dodatečných odporů [m]

## 7.2 Dodatečné odpory

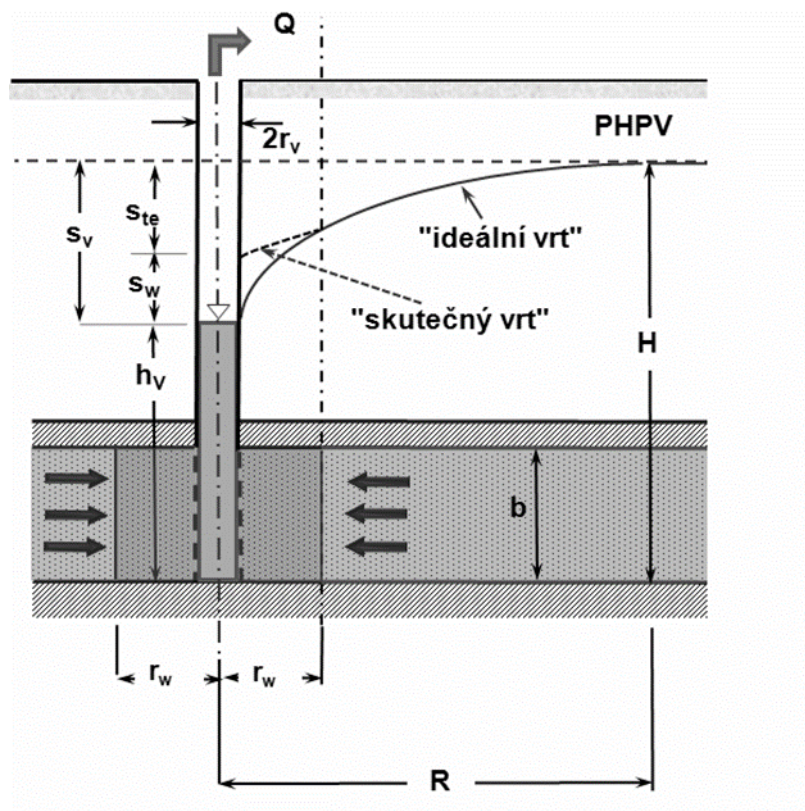
Pojem dodatečné odpory chápeme jako souhrn jevů, které mají vliv na odchýlení naměřené hodnoty snížení vody na „skutečném“ vrtu, oproti teoretickému snížení, které získáme při předpokladu „ideálního“ modelu proudění vody k vrtu úplnému (případ, kde se neuvažují dodatečné odpory a vlastní objem vrtu nemá vliv na počátek přítokové zkoušky, což znamená, že není tímto objemem ovlivněno snížení. Snížení (popř. zvýšení) hladiny vody, které naměříme na odběrovém (resp. nálevovém) vrtu bude následně větší než vypočtené snížení (popř. zvýšení) hladiny vody ve vrtu, které by poté vyvolalo hydraulický zásah pomocí hydrodynamicky dokonalého vrtu bez dodatečných odporů. Snížení hladiny vody na vrtu „skutečném“ (uvažujeme existenci dodatečných odporů) záleží na odporu porézního prostředí, které je nasyceno vodou, viskozitě a na dodatečných ztrátách, které vznikají v blízkosti vrtu a na jeho stěnách.

Příčiny vzniku dodatečných odporů jsou například technické, které vznikají při zhotovení vrtu, hydromechanické, biologické, chemické a další jevy vyskytující se na vrtu a jeho okolí při využívání vrtu (HURST, 1953). Klíčové je znát velikost vzniklých dodatečných odporů a jimi způsobené dodatečné snížení, které je nezbytné pro stanovení storativity z údajů snížení hladiny, které byly naměřeny na odběrovém vrtu za nestacionárního režimu proudění a poté při stanovení filtračního koeficientu při stacionárním režimu proudění (PECH, 2003).

Určitá část snížení spadající na působení dodatečných odporů je možno rozdělit na snížení, které je způsobeno (KARANJAC, 1972):

- *kolmatací vrtu* ( $s_K$ ), jedná se o ucpávání pórů jemným materiálem, což má za následek snížení průtočnosti porézního prostředí anebo při porušení vnitřní struktury porézního prostředí vlivem výplachu, který vznikne do zvodně při rotačním vrtání, při kterém vzniká tzv. kalová kůra, nebo případ kdy při nárazovém vrtání dochází ke zhutnění porézního prostředí a tím tedy dojde ke snížení propustnosti,
- *zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu* pro přítok vody ( $s_F$ ), tam kde tvoří stěnu vrtu perforovaná pažnice, filtr apod.,
- *neúplným průnikem* ( $s_p$ ), dodatečné odpory vznikající neúplným otevřením mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem (ČÍŽEK, 2011),

- *ucpáváním* ( $s_I$ ), které je způsobeno zachycováním částic hornin nebo obsypu do otvoru filtru vlivem působení mikroorganismů a chemické inkrustace,
- *třením* ( $s_T$ ) vody o stěny vrtu a také její vnitřní tření (zde také uvažujeme i dodatečné odpory, které vznikli uvnitř vrtu turbulencí),
- *turbulentním režimem proudění* ( $s_{TP}$ ) ve zvodnělé vrstvě, především v blízkém okolí odběrového vrtu,
- *ostatními typy dodatečných odporů* ( $s_O$ ).



Obrázek 11 - Snížení s dodatečnými odpory v odběrovém vrtu (PECH, 2010)

Snížení připadající na působení dodatečných odporů je možné následně vyjádřit.

$$s_w = s_K + s_F + s_P + s_I + s_T + s_{TP} + s_O \quad (48)$$

kde  $s_w$  je část snížení, které připadá na vliv dodatečných odporů [L],  $s_K$ ,  $s_F$ ,  $s_P$ ,  $s_I$ ,  $s_T$ ,  $s_{TP}$ ,  $s_O$  je dílčí snížení, které je způsobeno jednotlivými typy dodatečných odporů

Rozdělit jednotlivě složky dodatečných odporů je velmi problematické, proto v mnoha publikacích zabývající se touto problematikou používají sumarizaci dodatečných odporů formou bezrozměrného koeficientu  $W$ , který nazývají skin faktor.

Pojem skin faktor (ang. „skin effect“) rozumíme jako překážku na toku způsobenou nekonečně tenkým poškozením v blízkosti vrtu. Následný pokles tlaku při tomto efektu

a průtoku kapaliny ve vrtu je úměrný, tudíž se chová jako ustálené proudění (WATTENBARGER, 1967). Tento pojem zavedli poprvé roku 1953 Hurst a van Everdingen.

Celkové snížení hladiny vody ( $s_v$ ) naměřené v odběrovém vrtu při přítokové zkoušce vyjádříme vztahem (obr. 11).

$$s_v = s_{te} + s_w \quad (49)$$

kde  $s_w$  je část snížení ve vrtu připadající na vliv dodatečných odporů [m],  $s_v$  představuje v odběrovém vrtu celkové snížení hladiny [m],  $s_{te}$  je snížení hladiny vody bez dodatečných odporů [m] ve vrtu

Při zanedbání části snížení, které je způsobeno nelineárními odpory  $s_T$  a  $s_{TP}$ , je tedy dodatečné snížení (jeho velikost) ve vrtu odběrovém, závislá na odebírané vydatnosti  $Q$  dle lineárního vztahu (VAN EVERDINGEN, 1953).

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (50)$$

kde  $W$  je koeficient dodatečných odporů [-]

Pokud se vrátíme ke kapitole (6.3), která přibližuje metodu vyhodnocení Jacobovou semilogaritmickou aproximací. Zde dodatečné odpory nemají vliv na sklon přímkového úseku a změny nepozorujeme ani na pozorovacím vrtu při následných výpočtech transmisivity  $T$  a koeficientu hydraulické vodivosti  $K$ . V tomto případě je ovlivněn pouze tvar a délka počátečního úseku (PECH, 2010a).

### 7.3 Storativita vrtu

Storativita vrtu neboli česky zásobnost vrtu je dodatečné plnění nebo prázdnění vrtu. Má velmi zásadním způsobem vliv na počáteční část přítokové zkoušky. Když nebudeme brát v úvahu vliv zásobnosti vrtu při vyhodnocování přítokové zkoušky (úsek při čerpací zkoušce, který předchází úseku, který je vyhodnotitelný Jacobovou semilogaritmickou aproximací) dostaneme nepřesné výsledky.

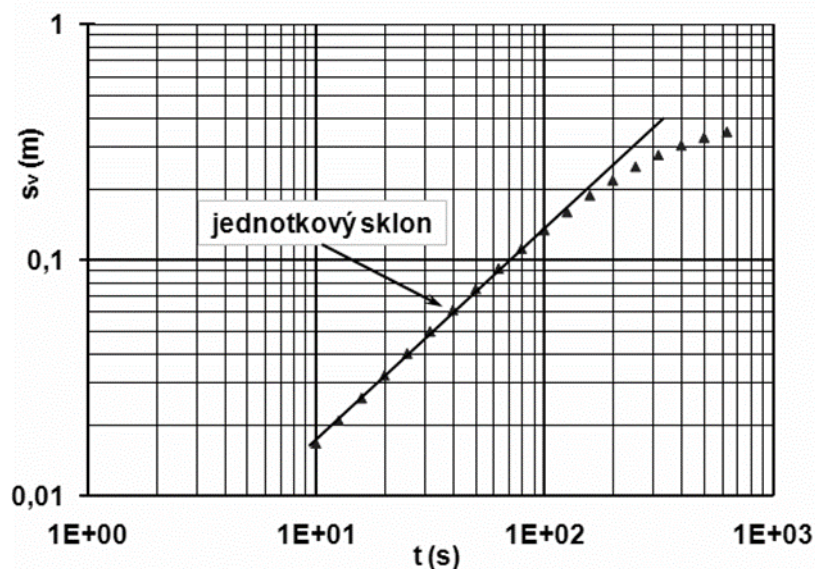
Pokud začneme čerpat z vrtu konstantní množství vody je zpočátku čerpána voda, která tvoří vlastní objem vrtu a přítok vody do vrtu ze zvodně je nulový ( $Q_p = 0$ ). S narůstajícím časem odběru se množství odčerpávané vody bude měnit do hodnoty  $Q$  a množství vody, která je odčerpávána z vlastního objemu vrtu se bude zmenšovat, až dosáhne hodnot zanedbatelných oproti přítoku vody ze zvodně  $Q_p$ .

Henry J. Ramey, Jr. (1970) zkoumal problematiku vlivu objemu vrtu u naftových vrtů na průběh čerpací, resp. stoupací zkoušky v počátku časového úseku. Určil tak zvaný jednotkový faktor storativity vrtu  $C$  ve zjednodušeném tvaru.

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad (51)$$

kde  $C$  představuje jednotkový faktor storativity vrtu [ $\text{m}^2$ ],  $\Delta V$  představuje objemovou změnu vrtu [ $\text{m}^3$ ],  $\Delta h$  představuje ve vrtu změnu výšky vody [ $\text{m}$ ]

Ramey objevil, že v počáteční části přítokových čerpacích, resp. stoupacích zkoušek je ve vyhodnoceném grafu přímková část s jednotkovým sklonem ( $\text{tg } \alpha = 1$ ) tj.  $45^\circ$ , z které určíme jednotkový faktor storativity vrtu  $C$ , s jehož pomocí určíme hodnotu bezrozměrné storativity vrtu  $C_D$ .



Obrázek 12 - Znáznorněná závislost mezi  $\log s_v$  a  $\log t$  (PECH, 2010)

Obrázek (12) znázorňuje jednotkový sklon přímkové části při startu čerpací zkoušky v  $\log$ - $\log$  grafu. Na ose  $x$  je vynesena čas  $t$  [s] a na ose  $y$  je vyneseno snížení vody v odběrovém vrtu  $s_v$  [m]. Přímková část s jednotkovým sklonem v grafické závislosti  $\log s_v$  vs.  $\log t$  „trvá“, dokud je všechna voda čerpána výhradně jen z vlastního objemu vrtu, tedy do doby  $Q_p/Q = 0$ .

Závěrem uvádím vztah, ze kterého lze vypočítat bezrozměrný jednotkový faktor storativity vrtu  $C$  dle (RAMEY, 1970).

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} \quad (52)$$

kde  $t_j$  a  $s_j$  představuje dvojici hodnot na přímém úseku jednotkového sklonu v grafu  $\log s_v$  vs.  $\log t$  (obr. 12)

## 8. Hydrodynamické zkoušky

Hydrodynamické zkoušky charakterizujeme jako metody, které se využívají pro určení hydraulických charakteristik na hydrogeologickém objektu získané pozorováním hydrodynamického zásahu do geohydrodynamického systému (JETEL, 1991).

Základní rozdělení hydrodynamických zkoušek dle (JETEL, 1982) na:

- Čerpací zkoušky (při čerpací zkoušce dojde na zkušební objektu ke stálému odběru určitého množství vody, současně se pozoruje pokles hladiny a tlaku zvodně)
- Stoupací zkoušky (u těchto zkoušek pozorujeme vzestup hladiny a následný vývoj poměrů tlaku po přerušení odběru)
- Odběrové zkoušky (při nichž dojde na objektu k proměnlivému nebo konstantnímu odběru kapaliny)
- Přítokové zkoušky (při této zkoušce dochází ke vtoku podzemích vod do objektu)
- Diferenční zkoušky (tyto zkoušky monitorují změnu tlaku a hladiny při konstantním odběru po změně odebíraného množství kapaliny)
- Nálevové zkoušky (monitorují závislost hladin v pozorovacích objektech a množství vody přitékající do objektu)
- Trubkové zkoušky (při těchto zkouškách využíváme tzv. testeru (testovací zařízení, které je zapuštěno do pozorovaného objektu), přerušíme hloubení vrtu, izolujeme nezapažený úsek, který se odlehčí od tlaku výplachu sloupce a následuje přítok ze zkoušeného kolektoru)
- Vtlačovací zkoušky (na objektu při této zkoušce monitorujeme závislost tlaku na základě vtlačované kapaliny pomocí přetlaku)



Dále bych se chtěl v mé diplomové práci věnovat podrobněji zkouškám čerpacím (8.1) a zkouškách stoupacím (8.2).

## 8.1 Čerpací zkoušky

Čerpací zkoušky rozdělujeme na základě režimu proudění k pozorovanému objektu na ustálený režim čerpací zkoušky a neustálený režim čerpací zkoušky.

**Ustálený režim čerpací zkoušky** – patří mezi nejjednodušší způsoby vyhodnocení. Výhodou je její snadná interpretace, nevýhodou je naopak do ustáleného stavu delší doba čerpání. Tato metoda spočívá v konstantním odběru vody do té doby až v okolí vrtu nastane ustálený režim proudění (RIVERA a RAGHAVAN, 1979). Předpokládáme platnost Dupuitových postulátů pro volnou hladinu, dle kterých zanedbáváme vertikální složku proudění  $i = \partial h / \partial r$  (HÁLEK a ŠVEC, 1979). Hodnotu transmisivity lze stanovit z rovnice, která vychází z proudění podzemní vody k vrtu s napjatou hladinou (THIEM, 1906).

$$T = \frac{Q}{2\pi s_v} \ln \frac{r_d}{r_v} \quad (53)$$

kde  $Q$  je čerpané množství [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $s_v$  je snížení na vrtu [m],  $r_d$  je dosah deprese ve zvodni [m],  $r_v$  je poloměr hydrologicky dokonalého vrtu [m]

Pokud by se jednalo o vrt s volnou hladinou platí následující rovnice.

$$Q = \frac{\pi K (H^2 - h_v^2)}{\ln \left( \frac{R}{r_v} \right)} \quad (54)$$

kde  $K$  je hydraulická vodivost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $H$  je mocnost zvodnělé vrstvy v čase 0 [m],  $R$  je poloměr dosahu depresního kužele [m],  $r_v$  je aktivní poloměr studny (vrtu) [m],  $h_v$  je výška vody ve vrtu [m]

Pokud se jedná o vrt, který se nachází v kolektoru napjatém a dochází k proudění horizontálnímu přes celou mocnost kolektoru  $b$ . Řešením je Thiemova rovnice (ŠRÁČEK a KUCHOVSKÝ, 2003).

$$Q = 2\pi K b \frac{(h_2 - h_1)}{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (55)$$

kde  $K$  je hydraulická vodivost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $b$  je mocnost kolektoru [m],  $r_2 / r_1$  představuje vzdálenost čerpaného vrtu od vrtů pozorovacích [m],  $h_2 - h_1$  jsou hydraulické výšky v pozorovacích vrtech [m]

**Neustálený režim čerpací zkoušky** – i zde je stejně jako u režimu ustáleného čerpání množství podzemní vody konstantně. Monitorujeme pokles hladiny na zkoumaném objektu, který v určitých časových intervalech zapisujeme. Pokud potřebujeme i určit storativitu je nutné zaznamenávat na pozorovacím vrtu i snížení. Tato metoda byla v tehdejší Československu zavedena až v roce 1960 (ŠRÁČEK a KUCHOVSKÝ, 2003). To řešení neustáleného režimu proudění k úplným vrtům je podrobněji popsáno v kapitole (6. 1).

## 8.2 Stoupací zkoušky

Během těchto zkoušek dochází k přerušení konstantního čerpání ve vrtu a hladina začíná stoupat. Ve stanoveném časovém intervalu z vrtu odčerpáváme specifické množství vody a posléze následným přerušením čerpání bude i nadále hladina ve vrtu stoupat vzhůru stejně, jako kdyby pokračovalo čerpání vody. Současně bude do vrtu přitékat ze zvodně stejná vydatnost jako je čerpaného množství (DUBSKÝ, 2019).

Hydrolog C. V. Theis se zabýval vyhodnocením průběhu stoupací zkoušky, přesněji stoupaním hladiny při této zkoušce. Roku 1935 definoval metodu superpozice. Metodou superpozice je možné stanovit zbytkové snížení během stoupací zkoušky (DUBSKÝ, 2019). Jde o součet snížení pokračovaného čerpání a snížení záporného na imaginárním vsakovacím vrtu (CHARBENEAU, 2006), nebo využít Theisovu rovnici pro zbytkové snížení stoupací zkoušky (KRESIC, 2006).

$$s^* = s + s_{st} \quad (56)$$

kde  $s^*$  je výsledné naměřené snížení na vrtu během stoupací zkoušky [m],  $s$  je snížení z „pokračující čerpací zkoušky“ [m],  $s_{st}$  je vzestup hladiny v průběhu stoupací zkoušky [m]

Pro výsledné snížení hladiny ve vrtu platí (KRESIC, 2006).

$$s^* = \frac{+Q}{4\pi T} W(u) + \frac{-Q}{4\pi T} W(u_{st}) \quad (57)$$

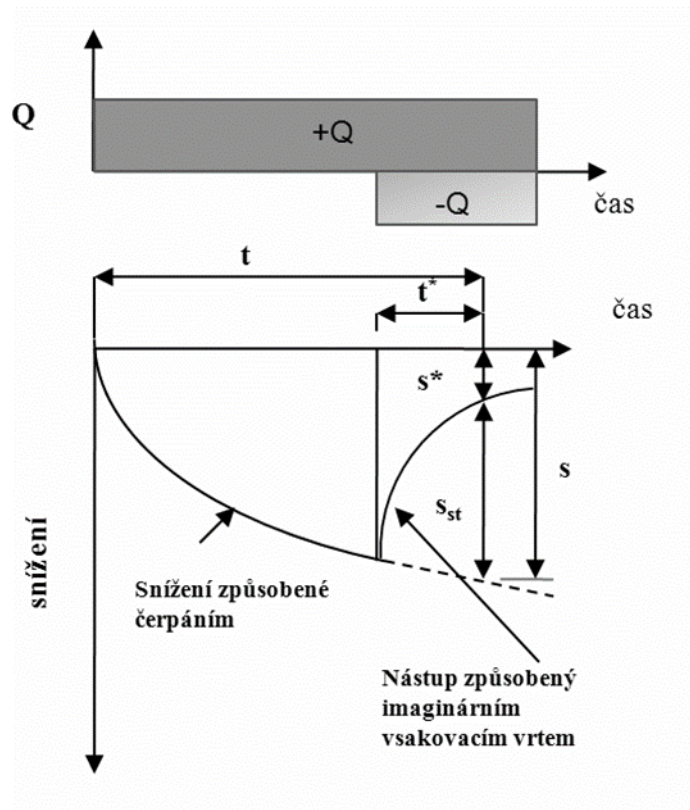
kde  $u$  představuje argument studňové funkce dle Theise pro čerpací zkoušku (58),  $u_{st}$  představuje argument Theisovy studňové funkce pro imaginární vsakovací vrt (59)

$$u = \frac{r^2 S}{4T t} \quad (58)$$

kde  $r$  je radiální vzdálenost od osy odčerpávaného vrtu [m],  $S$  je koeficient storativity [-],  $T$  je koeficient průtočnosti (transmissivity) [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ],  $t$  je čas, který je měřen od začátku čerpání [s]

$$u_{st} = \frac{r^2 S'}{4T t^*} \quad (59)$$

kde  $u_{st}$  je parametr Theisovy studňové funkce pro stoupací zkoušku [-],  $S'$  je koeficient storativity stanovený ze stoupací zkoušky [-],  $t$  je čas, který je měřen od okamžiku zastavení čerpání [s]



Obrázek 13 - Stoupací zkouška (PECH, 2010)

### 8.3 Odběrové zkoušky

Při odběrových zkouškách dochází ke konstantnímu snížení hladiny, zanedbáváme časový průběh odebíraného průtoku (JETEL, 1982). Závislost mezi časem a snížením je vyjádřena Jacob–Lohmanovou rovnicí.

$$Q = 2\pi T s_v G(\lambda) \quad (60)$$

kde  $T$  představuje koeficient průtočnosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $s_v$  představuje konstantní snížení hladiny ve vrtu [m],  $G(\lambda)$  je Jacob–Lohmanova studňová funkce

## 8.4 Trubkové zkoušky

U trubkových zkoušek (dril stem test) používáme testery. Princip trubkové zkoušky je jednoduchý. Na úplném počátku je nutné přerušit hloubení vrtu, poté izolovat nezapažený úsek, když máme úsek izolován, odlehčíme ho od tlaku výplachu sloupce. V posledním kroku dojde k přítoku ze zkoušeného kolektoru (DUBSKÝ, 2019).

Existuje mnoho druhů testerů. Testery se většinou sestávají z následujících částí:

- gumového pakru zapuštěného do izolovaného vrtu
- vyrovnávací záklopy, kterou regulujeme tlak
- přítokové záklopy, pomocí které je možné regulovat přítok

Gumový pakr zapustíme do stěn pažnic a otevřeme vyrovnávací záklopkou, tím dosáhneme vyrovnání tlaku uvnitř pakru s tlakem atmosférickým. V tomto případě uvažujeme odlišné hodnoty mezi tlakem atmosférickým a tlakem v kolektoru. Toto má za následek přítok kapaliny přes tester do vrtných trubek. Tj. **1. fáze počátečního přítoku**, zpravidla trvající až 10 minut (JETEL, 1982).

Poté následuje **2. fáze počátečního vzestupu tlaku**. V této fázi dojde k uzavření přítokové záklopy a je po stanovenou dobu měřen vývoj tlaku. Zpravidla se jedná o dobu 30 až 60 minut (JETEL, 1982). Hodnota, která vychází na konci této fáze je úroveň tlaku v kolektoru. Jedná se o počáteční tlak v uzavřeném vrtu.

**3. fází je hlavní přítok**. Hlavní přítok začíná při překročení hodnoty počátečního tlaku v uzavřeném vrtu. Tudiž se otevře přítoková záklopka (je nutné zaznamenat tlak, který evidujeme při počátečním přítoku). Pomocí této záklopy je umožněn opětovný přítok kolektorové kapaliny do vrtu. Tato fáze zpravidla trvá 60 až 120 minut (JETEL, 1982).

Finální fází je **4. fáze závěrečného vzestupu tlaku**. Při této fázi je ukončen přítok kapaliny (nutno zaznamenat koncový tlak při přítoku), protože je uzavřena přítoková záklopka. Následně sledujeme vývoj tlaku minimálně 30 minut. Je nezbytné zaznamenat si koncový tlak ve vrtu.

Po dokončení všech těchto fází můžeme otevřít vyrovnávací klapky. Následně opatrně vytáhneme tester i s obsahem kolektorové kapaliny v něm na povrch.

## 8.5 Expresní zkoušky

Expresní zkoušky jsou postaveny na metodě jednorázového nálevu. Důsledkem aproximace Theisovy křivky stoupací zkoušky navrhli Ferris a Knowles využít metodu jednorázového nálevu. Při tomto pokusu Ferris a Knowles vpustili určitý objem vody  $V$  do soustavy vrtu a měřili o kolik poklesne hladina za čas  $t$ .

$$V = \pi r_0^2 s_0 \quad (61)$$

kde  $V$  je nálev objemu do soustavy vrtu [ $\text{m}^3$ ],  $s_0$  je zvýšení hladiny dodáním určitého objemu kapaliny [ $\text{m}^2$ ],  $r_0^2$  je vnitřní poloměr vrtu [ $\text{m}$ ],

## 9. Regenerace vrtu

Z důvodu zvyšujících se cen realizací nových studní je dnes značná poptávka po regeneracích jímacích objektů.

Aby byl jímací objekt schopen sloužit k odběru vody v požadovaném množství, je logické, že je nutné provádět jeho údržbu. Pokud jímací objekt neudržíme v co nejlepší kondici klesá jeho produktivita až do chvíle, kdy je jediným možným řešením jeho obnova. Jedním z důvodů nižší produktivity může být stáří vrtu. V průběhu času, jak proudí voda do vrtu, jsou jednotlivé části systému vrtu (studně) postupně zanášeny, korodovány nebo přestanou úplně fungovat. Další případem, který vede ke snížení životnosti vrtu může být také nesprávné navržení (SOULSBY, 2010).

Jímací vrtu je nutné pravidelně udržovat, aby nedošlo k tomu, že nebude možné obnovit vrt do plné kapacity ani těmi nejtěžšími zásahy. Pokud specifická vydatnost vrtu klesne na více než 15 - 20 % své původní hodnoty nastává téměř havarijní situace (BUTTS, 2017).

Proces regenerace vrtu můžeme obecně rozdělit na několik fází. Zprv je nutné zjistit o jaký typ studně se jedná, z důvodu použití odpovídajícího postupu. Navazujícím krokem je inspekce vrtu pomocí kamerového systému. Poté se ve studni naruší veškeré povlaky na stěnách a usazeniny pomocí vzduchu, který vynese vodu s rozbitým materiálem na povrch. Následně se provádí sterilizace (dezinfikování) celého vrtu pomocí dezinfekčních chemických prostředků, které jsou přidány do vody ve vrtu. Posledním procesem regenerace je čerpací zkouška, pomocí které zjistíme úspěšnost provedené regenerace a také poslouží jako další materiál k možným v budoucnu následujícím zkouškám efektivity studně.

Když mluvíme o odstraňování usazenin a povlaků ve vrtu je nutné zvolit vhodnou techniku. Můžeme postupovat řešením mechanického rázu nebo zvolit chemickou cestou (SOULSBY, 2010). Aktuálně se hodně mluví o novém řešení, a to regenerování vrtů pomocí ultrazvuku.

Pokud se ve vrtu nachází čerpadlo, které brání volnému přístupu ke spodní části vrtu volíme spíše chemické metody regenerace. Typicky se využívá chlor, kyseliny nebo povrchově aktivní činidla. Účinnost těchto látek je závislá na jejich kombinaci, a především na jejich koncentraci, distribuci i na správné volbě a namíchání směsi. Pokud shledáme postup chemickou cestou jako vhodný, je možné studnu obnovit až na 80 - 90 % své původní kapacity.

Mechanické metody jsou velmi účinné a jsou využívány, pokud je odstraněno čerpací zařízení regenerovaného objektu. Pokud využíváme mechanickou metodu regenerace na stabilní vrtu, který má stěny vrtu stabilní, používáme drátěné kartáče různých typů, které postupně obrušují stěny vrtu (BUTTS, 2017). Tuto metodu je nevhodné použít, pokud nejsou stěny vrtu stabilní a bylo by možné je tímto postupem nenávratně poškodit.

Další možnosti regenerace vrtů může být čištění pomocí vodního tlaku nebo tlakovými rázy (dávky stlačeného vzduchu). Tyto metody je možné volně kombinovat podle situace v jaké se zkoumaný vrt nachází (SOULSBY, 2010).

Pokud se jedná o studnu, která je nenávratně poškozena, nelze využít žádnou ze stávajících metod. Jedinou možností je provést částečnou nebo úplnou obnovu objektu. Při obnově objektu se poškozené části studně nahradí novými, které mají zpravidla menší průměr a jsou vyrobeny z novějších a kvalitnějších materiálů.

Poměrně novým principem v regeneraci vrtů je princip regenerace vrtů pomocí ultrazvukové sondy. Tato sonda byla vyvíjena v německé společnosti SONIC Technologies, GmbH v roce 2018. Hlavními výhodami této metody jsou šetrnost k materiálům a životnímu prostředí (bez použití chemikálií), jedná se o levnou metodu, která je účinná až do hloubky 250 m (někdy i více) a je účinná v celém obsypu.

Princip čištění vrtu ultrazvukem je následující:

- rozklad velkých molekul (molekuly se rozštěpují na menší části, tento efekt také způsobuje i likvidaci bakterií ve studni).
- kavitace (vznik dutin v kapalině při lokálním poklesu tlaku, následovaný jejich implozí, tento efekt odstraňuje materiál, který je přichycený na povrchu štěrku).

- kmitání molekul v krystalické mřížce (pohyb v molekulové struktuře, který vede k třetí mezi částicemi šterku a tím k obrušování nánosu).
- napětí mezi různými materiály (nerovnoměrné změny objemu šterku a povlaku mají za následek rozlámání povlaku).

Postup regeneraci vrtu ultrazvukem:

1. Čištění jednoho segmentu vrtu trvajícím přibližně 10 minut (délka úseku je rovna délce sondy).
2. Následuje vypláchnutí daného úseku pomocí ponorného čerpadla po dobu, dokud nevychází ven pouze čistá voda.
3. Postupné spuštění systému níže do dalšího úseku vrtu.

Z hlediska podmínek použití je u této regenerační sestavy nutný:

- Minimální průměr regenerovaného objektu 160 mm a více.
- Hloubkový dosah 200 m.
- Jeřáb s nosností minimálně 2500 kg, výškou zdvihu 6 m a možností pohybu minimálně dvou osob.
- Agregát střídavého elektrického proudu, který bude mít min. výkon 15 kW a 25 A.
- Sestava ocelového potrubí s celkovou délkou min. 200 m.
- Strojní naviják pro silový kabel ultrazvukových emitorů
- Platforma o minimální nosnosti 2500 kg.
- Možnost připojení taženého kompresoru.

## 10. Vyhodnocení dodatečných odporů na reálném vrtu

V následující kapitole diplomové práce bude popsáno vyhodnocení dodatečných odporů na dvou reálných vrtech. Konkrétně se jedná o vrty KV-2 a KV-9.

### 10.1 Popis lokality vrtu KV-2 a KV-9 (Žehušice)

Žehušická kotlina tvoří severozápadní část Čáslavské kotliny, konkrétně níže položené území tektonické sníženiny při údolí Doubravě, Klejnárce a přilehlém úseku Labe. Tato kotlina se vyznačuje rovinným až ploše pahorkatinným reliéfem středopleistocenních a mladopleistocenních teras, širokých údolních niv, pokryvů závějí a drobných navátých písků.

Území zájmové lokality je odvodňováno J, V, mírně i Z směrem (území se nachází v konvexe řeky) do řeky Labe. Číslo hydrologického pořadí je 1-04-01-0010-0-00.

Z klimatického hlediska (QUITT, 1971) patří zájmová lokalita do mírně teplé klimatické oblasti T - 2, která je charakterizována jako teplá s dlouhým a suchým létem. Přejídné období je velmi krátké s teplým až mírně teplým jarem a podzimem. Zima je krátká, mírně teplá a suchá až velmi suchá, s velmi krátkou dobou sněhové pokrývky. Průměrná roční teplota se pohybuje v rozmezí 8 - 9 °C. Průměrný roční srážkový úhrn se pohybuje kolem 600 mm. Sněhová pokrývka se udrží 40 - 50 dní v roce.

Z regionálního geologického hlediska patří zájmová lokalita k Českému masivu. Podloží zkoumané lokality tvoří turonské a písčité slínovce převážně pokryté kvarténními říčními a eolitickými sedimenty.

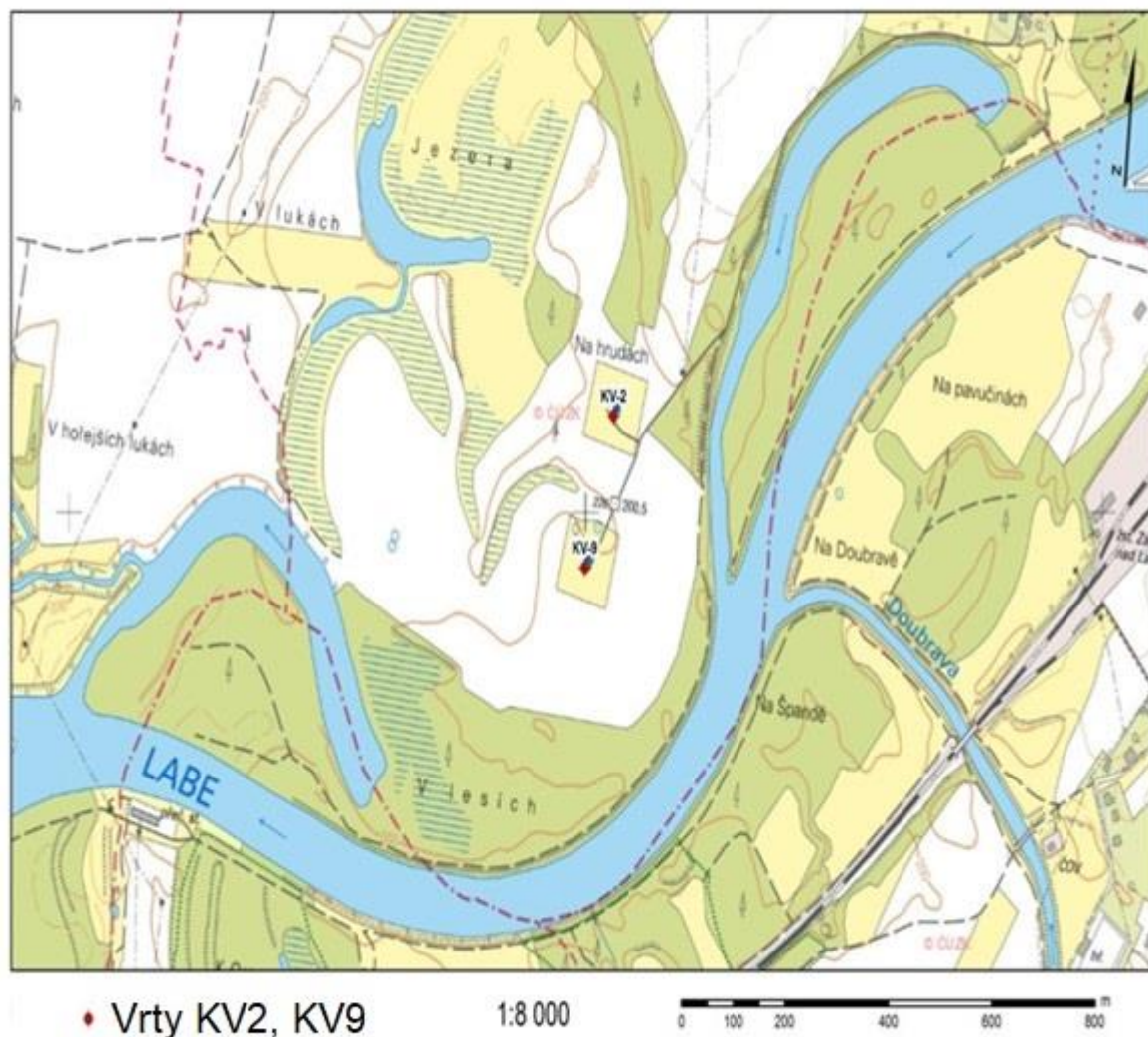
Kvarténní sedimenty v zájmové lokalitě jsou zastoupeny zejména štěrkopísky, dále středně zrnitými písky s příměsí jílovitých částic, které se vyskytují hlavně při povrchu. Podle archivních geologických profilů se mocnost kvarténních sedimentů v lokalitě pohybuje v rozmezí od 14 do 15 m.

Vrty KV-2 a KV-9 se nacházejí v konvexním ohybu řeky Labe (viz obr . 14). Každý z vrtů je umístěn uvnitř vlastní oplocenky o rozloze přibližně 100 m<sup>2</sup> a nad ním je vytvořen násep s manipulační šachtou a betonovou budkou se zavedeným elektrickým proudem. V každé oplocence se ještě nachází jeden další vrt, který byl použit při čerpací zkoušce jako pozorovací objekt (byly v něm měřeny hladiny podzemních vod). Pozorovací objekt k vrtu KV-2 je vzdálený 7 m, pozorovací objekt k vrtu KV-9 je vzdálený 46,7 m.

Oba vrty jsou vrtány o průměru 1620 mm (až do hloubky 5 m), dále navazuje průměr vrtání 1350 mm, který pokračuje až ke dnu vrtu. Obsyp obou vrtů je dvojitý - vnější obsyp má frakci 2-4 mm, vnitřní obsyp má frakci 8-16 mm. Vrty jsou v oblasti plné výstroje vystrojeny ocelí s vnějším průměrem 426 mm. Oblast perforované výstroje je vystrojena starší verzí filtrů UGI s vnějším průměrem 360 mm. Vrt KV-9 byl v minulosti převystrojen na nižší průměr. Z terénního průzkumu bylo zřejmé, že studna KV-9 byla převystrojena na ocelovou výstroj s vnějším průměrem 225 mm.



## Lokalita vrtů KV2 a KV9



Obrázek 14 - Bližší zaměření lokality vrtu KV-2 a KV-9 (AUTOR, 2021)

### 10.2 Popis hydrodynamické zkoušky na obou vrtech

Hydrodynamické zkoušky na obou vrtech byly provedeny výtlačným čerpadlem CVBU 0704. Toto čerpadlo bylo zapouštěno do vrtu na výtlačném potrubí opatřeném přírubami, nad které bylo umístěno potrubní koleno s vodoměrem, škrtkovým ventilem a hadicí odvádějící odčerpanou vodu do vzdálenosti cca 100 m od čerpaného vrtu (aby se zamezilo návratu odčerpané vody do vrtu při hydrodynamické zkoušce). Čerpadlo bylo voleno tak, aby bylo schopno vytvořit takový průtok, který odpovídal průtokům při historicky provedených

hydrodynamických zkouškách na sledovaných vrtech (11 a 13,3 l/s). Zároveň však byla nutná možnost jeho průtok regulovat za pomoci ventilu. Pro měření změny hladin ve vrtech byla zvolena kombinace automatické hladinoměrné sondy s nastaveným vteřinovým intervalem a manuálního měření hladin za pomoci akustického hladinoměru. Vlivem vysoké měkkosti vody však akustický hladinoměr v některých úsecích vynechával. Před každou hydrodynamickou zkouškou byla provedena strojní zkouška, při níž bylo nastaveno vhodné čerpané množství vody.

### 10.3 Výsledky hydrodynamické zkoušky na vrtu KV-2

Při strojní zkoušce byl určen průtok, který bude vhodný pro určení parametrů vrtu na 2,2 l/s. Tento průtok byl konstantně udržován a kontrolován při průběhu vlastní čerpací zkoušky (dále ČZ). ČZ trvala 64,6 min. Následující stoupací zkouška (dále SZ) měla trvání 25,15 min. Obě hydrodynamické zkoušky jak ČZ, tak SZ byly měřeny do ustáleného stavu. V závěru ČZ bylo dosaženo hodnoty konečného snížení 4,99 m. Tato hodnota se nerovnal hodnotě maximálního snížení v průběhu ČZ. Maximální snížení bylo při ČZ dosaženo cca ve 14. minutě a bylo 5,4 m. V této fázi ČZ došlo velmi pravděpodobně k protržení kolmatační zóny vrtu důsledkem vysokých vtokových rychlostí, čímž došlo k uvolnění drobných částic z okolí vrtu. Tím bylo poté způsobeno zvýšení hladiny ve vrtu v průběhu ČZ. Díky změnám podmínek v okolí vrtu během ČZ nebylo v tomto úseku hydrodynamické zkoušky možné vyhodnotit hodnotu nasycené hydraulické vodivosti a transmisivity kolmatací neovlivněného horninového prostředí za pomoci Jacobovy aproximace. Tyto dvě hodnoty byly následně vyhodnoceny ze SZ, přičemž hodnota transmisivity byla  $2,46 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s a hodnota nasycené hydraulické vodivosti byla  $2,23 \cdot 10^{-3}$  m/s. Tyto hodnoty se velmi dobře shodují s hodnotami, které byly zjištěny z archivních dat (KOKOŠKOVÁ a kol., 1984), kdy byla hodnota transmisivity vypočtena na  $1,6 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s a hodnota nasycené hydraulické byla vypočtena na  $1,2 \cdot 10^{-3}$  m/s. Hodnotu neovlivněné storativity nebylo možné stanovit z pozorovacího vrtu (okraj depresního kuželu vytvořený ČZ nedosáhl až k pozorovacímu vrtu) a tak byla přejata hodnota  $7,6 \cdot 10^{-2}$  z výše zmíněného původního hydrogeologického průzkumu lokality.

Hlavním cílem těchto hydrodynamických zkoušek bylo ověření stavu kolmatace vrtu, proto byl při vyhodnocování těchto zkoušek dáván důraz právě na úseky, které charakterizují kolmataci – *prázdění vrtu a přímkový úsek reálného vrtu* (Agarwalovský úsek – počáteční fáze ČZ). K následnému vlastnímu vyhodnocení kolmatace vrtu byla využita Agarwalova metoda, jejímž výsledkem je stanovení výšky snížení ve vrtu při ČZ, způsobené dodatečnými odpory na plášti vrtu, v obsypu vrtu a v reaktorové zóně (zóna do vzdálenosti cca 6 průměrů vrtu). Hodnota této výšky byla u vrtu KV-2 vypočtena na 5,9 m. Tato hodnota je vyšší nežli

dosažené snížení ve vrtu na konci ČZ, které bylo 4,99 m. Takto vysoké snížení vyvolané dodatečnými hydraulickými odpory charakterizuje téměř úplnou kolmataci vrtu.

Celkový průběh hydrodynamické zkoušky na vrtu KV-2 v závislosti na čase je v grafu znázorněn v příloze č. 1. Grafy vyhodnocení jednotlivých úseků ČZ na vrtu KV-2 jsou znázorněny v příloze č. 2. Graf vyhodnocení SZ je na vrtu KV-2 je znázorněn v příloze č. 3.

#### 10.4 Výsledky hydrodynamické zkoušky na vrtu KV-9

Při strojní zkoušce byl určen průtok, který bude vhodný pro určení parametrů vrtu na 4,16 l/s. Tento průtok byl udržován konstantní a kontrolován v průběhu vlastní ČZ. ČZ trvala 31,23 min. Následující SZ měla trvání 13,35 min. Obě hydrodynamické zkoušky jak ČZ, tak SZ byly měřeny do ustáleného stavu. Při čerpací zkoušce bylo dosaženo pro konečného snížení hodnoty 5,3 m, což byla i hodnota snížení maximálního. Z ČZ byly pomocí Jacobovy aproximace vypočteny hodnoty transmisivity  $2,29 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  a nasycené hydraulické vodivosti  $2,08 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Obdobnou metodou byly také učeny tyto hodnoty i z SZ – hodnota transmisivity  $2,08 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  a hodnota nasycené hydraulické vodivosti  $1,89 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Tyto hodnoty se tak jako u vrtu KV-2 velmi dobře shodují s hodnotami, které byly zjištěny z archivních dat (KOKOŠKOVÁ a kol., 1984), kdy byla hodnota transmisivity vypočtena na  $2,9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  a hodnota nasycené hydraulické vodivosti na  $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Hodnotu neovlivněné storativity nebylo stejně jako u vrtu KV-2 možno určit z pozorovacího vrtu a proto byla její hodnota  $7,6 \cdot 10^{-2}$  přejata z výše zmíněného původního hydrogeologického průzkumu této lokality.

Přesná hodnota snížení, které bylo způsobené vlivem dodatečných odporů, byla dle Agarwalovy metody vypočtena na 3,69 m, což jsou přibližně 2/3 z celkového snížení ve vrtu, které bylo 5,3 m. Toto snížení, které je vyvolané dodatečnými hydraulickými odpory charakterizuje opět velmi značnou kolmataci vrtu. Celkový průběh hydrodynamické zkoušky na vrtu KV-9 v závislosti na čase je v grafu znázorněn v příloze č. 4. Grafy vyhodnocení jednotlivých úseků ČZ jsou znázorněny v příloze č. 5. Graf vyhodnocení SZ je znázorněn v příloze č. 6.

#### 10.5 Vyhodnocení dodatečných odporů na vrtech KV-2 a KV-9

Při vyhodnocení vrtu KV2 využijeme data (tab. 1), které jsme měli naměřené k dispozici.

Tabulka 1 - Hodnoty pro vrt KV2

$r_w$	0.17 (m)
$Q$	0.0022 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$S$	0.076 (-)
$\Delta s$	0.4 (-)
$I_{1P}$	5.0 (-)

V tabulce (1) může vidět hodnotu  $r_w$ , která představuje poloměr vrtu,  $Q$  je čerpané množství,  $S$  je storativita,  $\Delta s$  je rozdíl hodnot snížení a  $I_{1P}$  je hodnota sklonu prvního přímkového úseku v semilogaritmickém grafu  $s$  vs.  $\log t$ .

Za prvé je nutné si vypočítat koeficient jednotkové storativity vrtu.

$$C = Q \frac{t^j}{s^j} = 0,0022 \frac{3}{0,07} = 0,094 \text{ m}^2$$

Následně stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu  $C_D$ .

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 S} = \frac{0,094}{6,28 * 0,17^2 * 0,076} = 7,48 [-]$$

Dále vypočítáme transmisivitu  $T$ .

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} = 0,183 \frac{0,0022}{0,4} = 0,001007 [m^2 \cdot s^{-1}]$$

Dalším krokem je určení dodatečných odporů ze sklonu  $I_{1P}$ .

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$

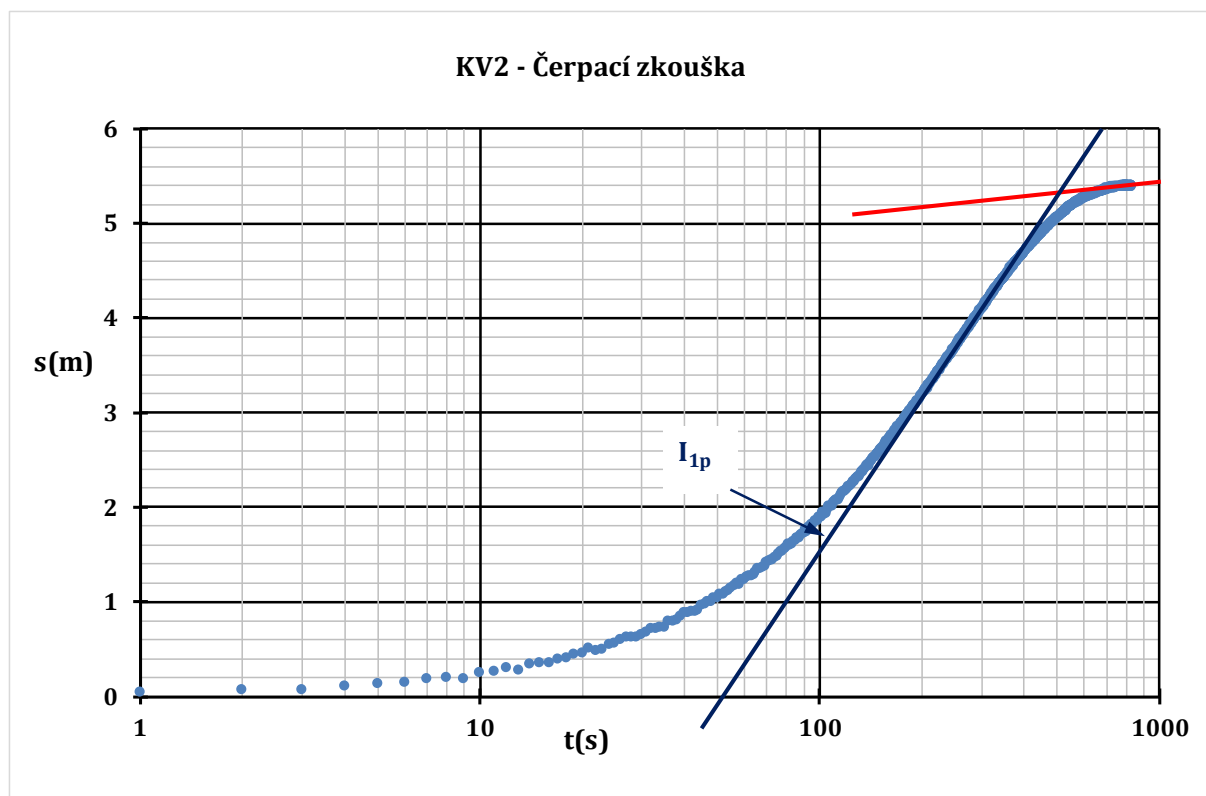
$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{6,28 * 0,001007 * 5,0}{0,0022} - 1,027 \log 7,48 - 1,0237 \right) = 14,48 [-]$$

Vyhodnocení dodatečných odporů z Jacobovy semilogaritmické metody.

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{2,246 T t}{r_w^2 S}$$

pro  $t = 800$  s je  $s_w = 5,2$  m

$$W = \frac{6,28 * 0,001007 * 5,2}{0,0022} - \frac{1}{2} \ln \frac{2,246 * 0,001007 * 800}{0,17^2 * 0,076} = 12 [-]$$



Obrázek 15 - Graf čerpací zkoušky na vrtu KV-2 (AUTOR, 2021)

Při vyhodnocení vrtu KV9 obdobně jako u KV2 využijeme data (tab. 2), které jsme měli naměřené k dispozici nebo je určili z grafu hydrodynamické zkoušky.

Tabulka 2 - Hodnoty pro vrt KV9

$r_w$	0.1125 (m)
$Q$	0.0042 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )
$S$	0.076 (-)
$\Delta s$	0.2 (-)
$I_{1P}$	3.3 (-)

V tabulce (2) může vidět hodnotu  $r_w$ , která představuje poloměr vrtu,  $Q$  je čerpané množství,  $S$  je storativita,  $\Delta s$  je hodnota snížení (rozdíl snížení ve dvou časech  $t_1$  a  $t_2$ ) a  $I_{1P}$  je hodnota sklonu prvního přímkového úseku, který předchází Jacobovu úseku čerpací zkoušky.

Za prvé je nutné si vypočítat koeficient jednotkové storativity vrtu.

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} = 0,0042 \frac{2}{0,45} = 0,018 m^2$$

Následně stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu  $C_D$ .

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 S} = \frac{0,018}{6,28 * 0,1125^2 * 0,076} = 3,06 [-]$$

Dále vypočítáme transmisivitu  $T$ .

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} = 0,183 \frac{0,0042}{0,2} = 0,0011 [m^2 \cdot s^{-1}]$$

Dalším krokem je určení dodatečných odporů ze sklonu  $I_{1P}$ .

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$

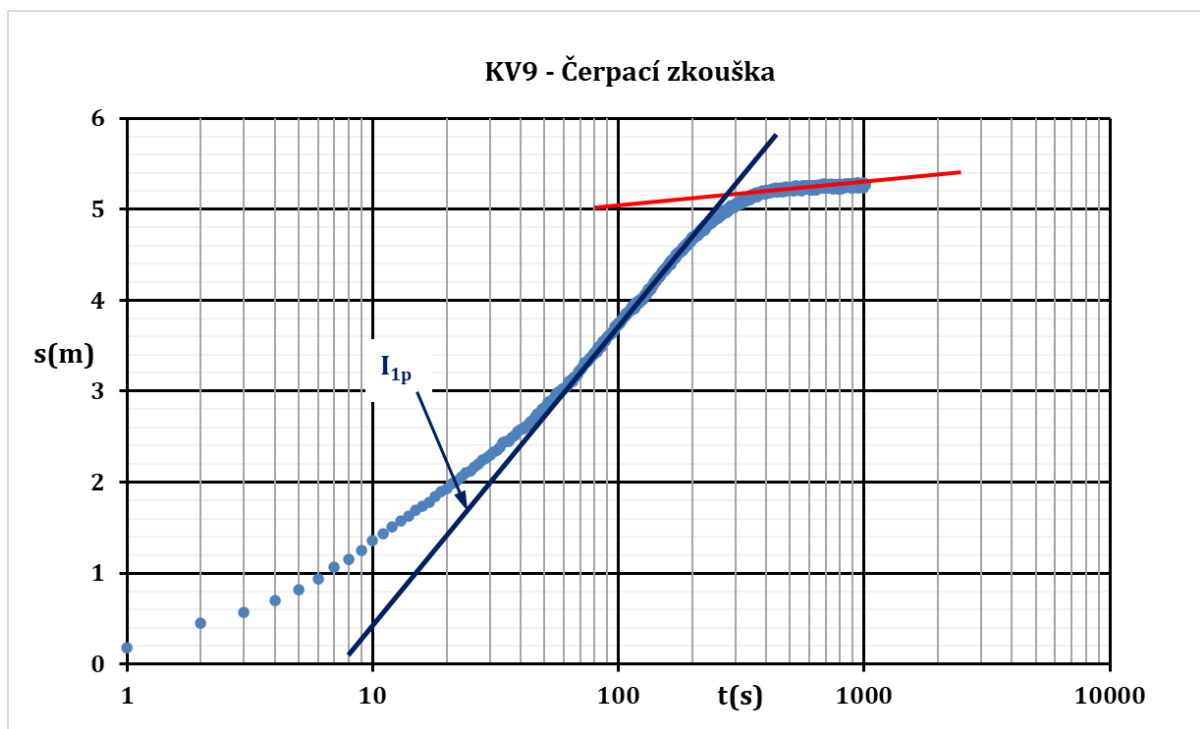
$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{6,28 * 0,0011 * 5,0}{0,0042} - 1,027 \log 3,06 - 1,0237 \right) = 20,27 [-]$$

Vyhodnocení dodatečných odporů z Jacobovy metody.

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{2,246 T t}{r_w^2 S}$$

pro  $t = 800$  s je  $s_w = 5,2$  m

$$W = \frac{6,28 * 0,0011 * 5,2}{0,0042} - \frac{1}{2} \ln \frac{2,246 * 0,0011 * 800}{0,1125^2 * 0,076} = 25,44 [-]$$



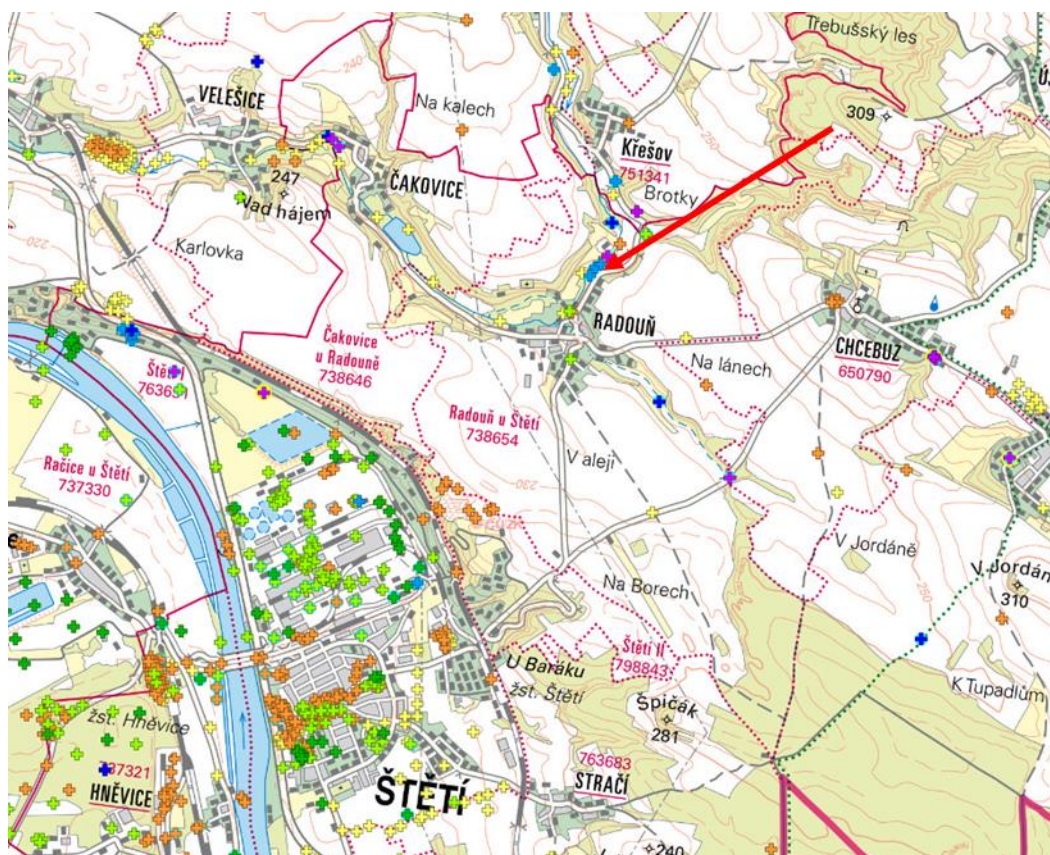
Obrázek 16 - Graf čerpací zkoušky na vrtu KV-9 (AUTOR, 2021)

## 11. Vyhodnocení regenerace vrtu z čerpací zkoušky

V následující kapitole bude popsáno vyhodnocení reálného vrtu RD-2 před a po regeneraci z čerpací zkoušky.

### 11.1 Popis lokality vrtu RD-2 (Radouň)

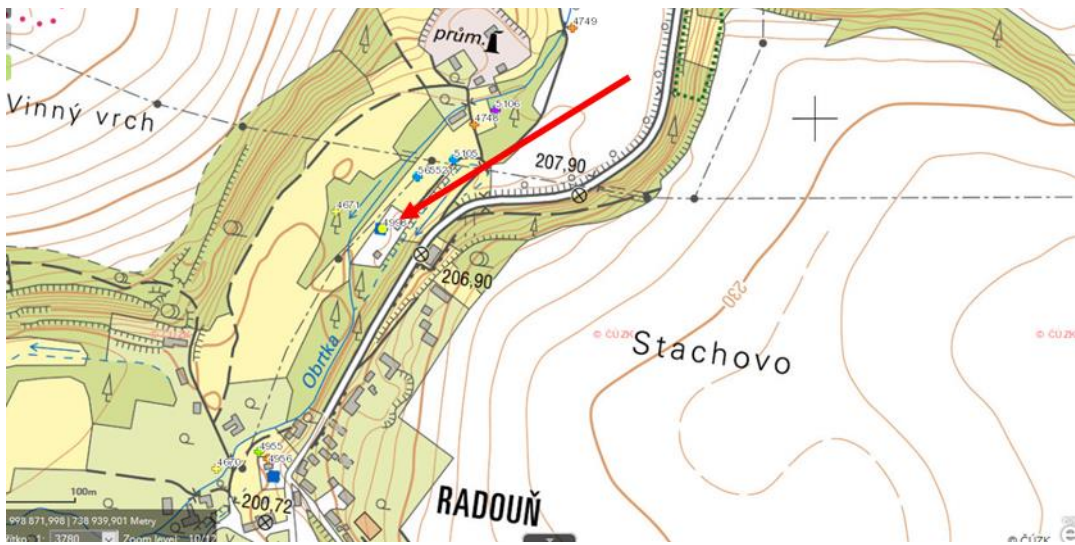
Jedná se o vrt RD-2 (Radouň). Vrt RD-2 se nachází ve střední části severních Čech (Česká republika) v lokalitě čerpací stanice Radouň, která je provozována významnou vodárenskou společností. Na této lokalitě se nachází tři čerpací vrtů, které představují jeden z mnoha zásadních vodních zdrojů v regionálním zásobování pitnou vodou a rovněž zajišťují hlavní vodovodní městský a průmyslový areál mezi Mělníkem a Ústím nad Labem. Provozní čerpaná množství dosahují v této lokalitě velmi vysokých hodnot – až 55 m<sup>3</sup>/h. Jedná se o vrt s překližkovou pažnicí, který je 50 metrů hluboký.



Obrázek 17 - Lokalita vrtu RD-2 (Radouň) (AUTOR, 2021)

### 11.1.1 Geologie a litologie v oblasti vrtu RD-2

V dolní části české křídlové pánve v poměrně mělkých pískovcových skalách letomanského stáří se nachází toto čerpací místo. Hladina podzemní vody je silně omezena (i při výskytu artézských studní) s překryvným nepropustným útvarem. Tento útvar je složen z marlitu a turonských slínů. Jedná se o typické filtrační prostředí s dvojitou porézností, kde je proud podzemní vody vázán na pukliny, které se v podloží nacházejí.



Obrázek 18 - Bližší zaměření lokality vrtu RD-2 (AUTOR, 2021)

### 11.2 Regenerace vrtu RD-2

V důsledku nejasných informací o plášti překližky, byly použitelné regenerační techniky velmi omezeny. Bylo rozhodnuto o použití mechanického čerpání sedimentů a následné čištění nylonovými kartáči. Chemická regenerační technologie nebyla využita z důvodu nízké trvanlivosti specifické pryskyřice vůči kyselinám.



Atributy	Odkazy
ID GDO	4998
Původní název	RD-2a
Druh objektu	vrt svislý
Hloubka	50
Souřadnice X	999125
Souřadnice Y	738487,5
Nadmořská výška	199
Zaměření vrtu	zaměřený
Zastižený kvartér	5
První hornina pod kvartérem	pískovec
Stratigrafie	Křída
Účel objektu	hydrogeologický
Rok	1975
Geologie	ano
Hmotná dokumentace	ne
Inklinometrie	ne
Hydrogeologie	ano
Karotáž	ne
list ZM 50	02-44
list ZM 25	02-441
list ZM 10	02-44-12

Obrázek 19 - Popisné atributy tykající se vrtu RD-2  
([https://mapy.geology.cz/vrtna\\_prozkoumanost/](https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/), 2021)

Na obrázku (19) jsou hlavní atributy, které náležejí vrtu RD-2 (Radouň). Z těchto atributů můžeme zjistit, že jde o svislý vrt, který měl původní název RD-2a. Vrt RD-2 byl vyhotoven

roku 1975 a sahá do hloubky 50 metrů. Čerpané množství u vrtů v této lokalitě dosahuje hodnot až 55 m<sup>3</sup>/h.

### 11.3 Vyhodnocení vrtu RD-2 před regenerací

Při všech následujících vyhodnoceních se využívá vztahů, které jsou dopodrobna popsány a vysvětleny v předcházejících kapitolách.

#### - Vyhodnocení dle Jacoba

Q[l/s]	14,8	čerpaná vydatnost
hw[m p.t.]	50,00	hloubka vrtu
h0[m p.t.]	0,63	počáteční úroveň HPV
h1[m p.t.]	4,80	úroveň HPV na konci ČZ
M[m]	49,38	mocnost zvodně
s[m]	4,18	pokles úrovně HPV při ČZ
q[l/s/m]	3,54	specifická vydatnost
Y	6,55	index transmisivity
Z	4,86	index konduktivity
I	0,2204	hydraulický gradient
T[m <sup>2</sup> /s]	1,23E-02	transmisivita zvodně
K[m/s]	2,49E-04	nasyčená hydraulická vodivost zvodně
R[m]	197,78	dosah deprese dle Siechardta

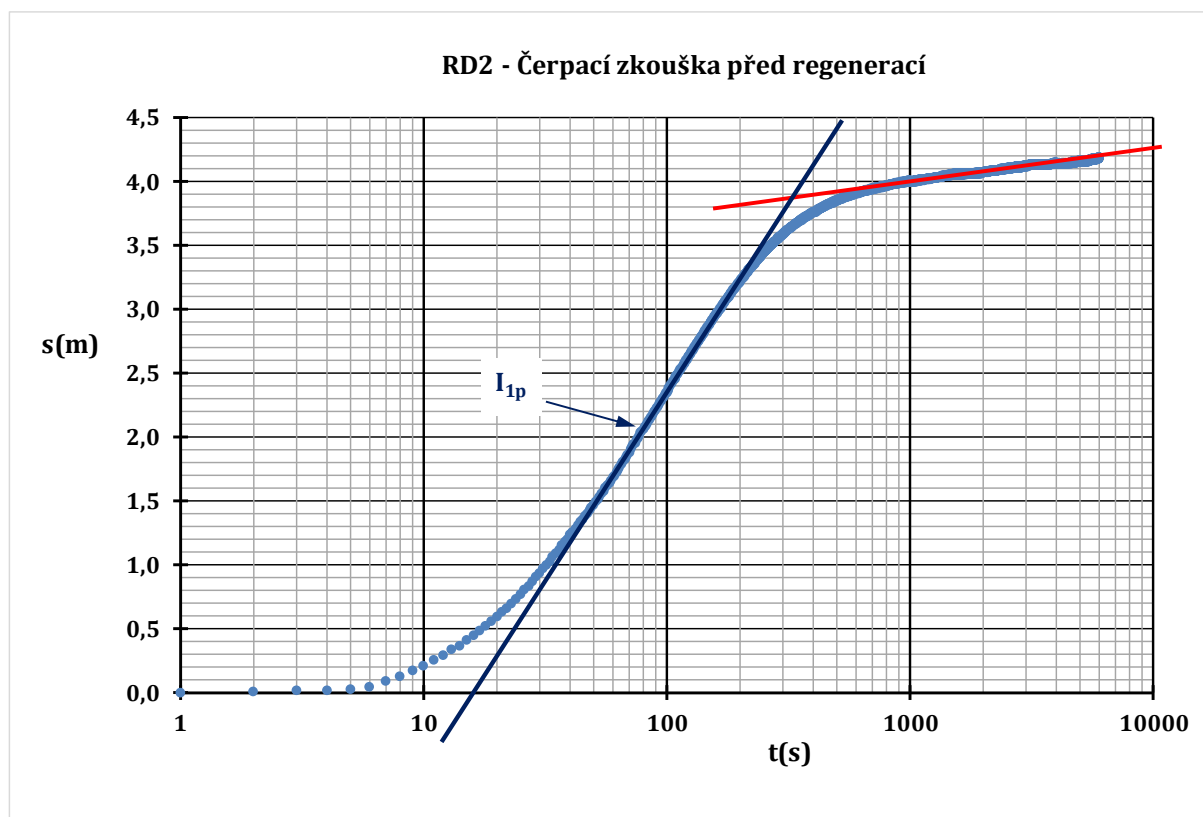
#### - Výpočet skin efektu dle Agarwala

r <sub>v</sub> [m]=	0,15	poloměr výstroje vrtu
Q[m <sup>3</sup> /s]=	0,0148	čerpaná vydatnost
1/lp=	50,76	převrácená hodnota sklonu při prázdnění vrtu
C[m <sup>2</sup> ]=	0,7512	koeficient jednotkové storativity vrtu
C <sub>D</sub> [-]=	4376,29	bezrozměrná storativita vrtu
I	2,99	hydraulický gradient
W[-]=	12,66	koeficient dodatečných odporů
s <sub>w</sub> [m]=	2,43	snížení způsobené dodatečnými odpory

#### - Efektivita čerpání

Q[l/s]=	14,8	čerpaná vydatnost
s <sub>60min</sub> [m]=	4,13	h <sub>pv</sub> 60 min. po zapnutí čerpadla
r[m]=	0,15	poloměr výstroje
K[m/s] =	2,49E-04	hydraulická vodivost
T[m <sup>2</sup> /s] =	1,23E-02	transmisivita
S <sub>y</sub> [s-1] =	1,21E-03	storativita (spec. vydatnost)

Q/s60(real.)=	0,0035818
Q/s60(teor.)=	0,01023248
Efektivita =	35,04 %



Obrázek 20 - Grafické vyhodnocení vrtu RD-2 před regenerací (AUTOR, 2021)

#### 11.4 Vyhodnocení vrtu RD-2 po regeneraci

##### - Vyhodnocení dle Jacoba

Q[l/s]	14,2	čerpaná vydatnost
hw[m p.t.]	50,00	hloubka vrtu
h0[m p.t.]	1,26	počáteční úroveň HPV
h1[m p.t.]	4,50	úroveň HPV na konci ČZ
M[m]	48,74	mocnost zvodně
s[m]	3,24	pokles úrovně HPV při ČZ
q[l/s/m]	4,39	specifická vydatnost
Y	6,64	index transmisivity
Z	4,95	index konduktivity
I	0,2451	hydraulický gradient
T[m <sup>2</sup> /s]	1,06E-02	transmisivita zvodně

$K[m/s]$	2,18E-04	nasyčená hydraulická vodivost zvodně
$R[m]$	143,31	dosah deprese dle Siechardta

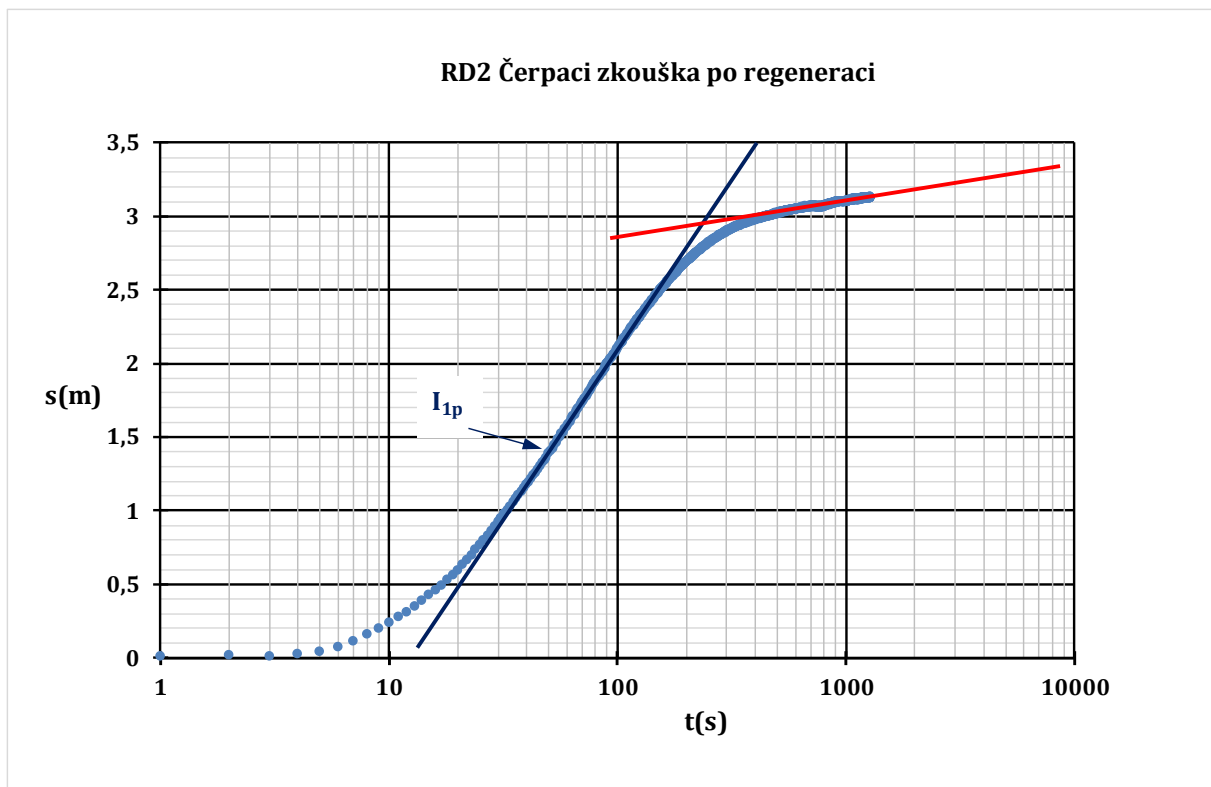
- **Výpočet skin efektu dle Agarwala**

$r_v[m]$	0,15	poloměr výstroje vrtu
$Q[m^3/s]$	0,0142	čerpaná vydatnost
$1/lp$	117,65	převrácená hodnota sklonu při prázdnění vrtu
$C[m^2]$	1,6706	koeficient jednotkové storativity vrtu
$C_D[-]$	65600,63	bezrozměrná storativita vrtu
$I$	2,27	hydraulický gradient
$W[-]$	5,52	koeficient dodatečných odporů
$s_w[m]$	1,18	snížení způsobené dodatečnými odpory

- **Efektivita čerpání**

$Q[l/s]$	14,2	čerpaná vydatnost
$s_{60min}[m]$	3,21	h <sub>pv</sub> 60 min. po zapnutí čerpadla
$r[m]$	0,15	poloměr výstroje
$K[m/s]$	2,18E-04	hydraulická vodivost zvodně
$T[m^2/s]$	1,06E-02	transmisivita
$S_y[s^{-1}]$	1,80E-04	storativita (spec. vydatnost)

$Q/s_{60}(real.)$	0,00442933
$Q/s_{60}(teor.)$	0,0079069
Efektivita =	56,02 %



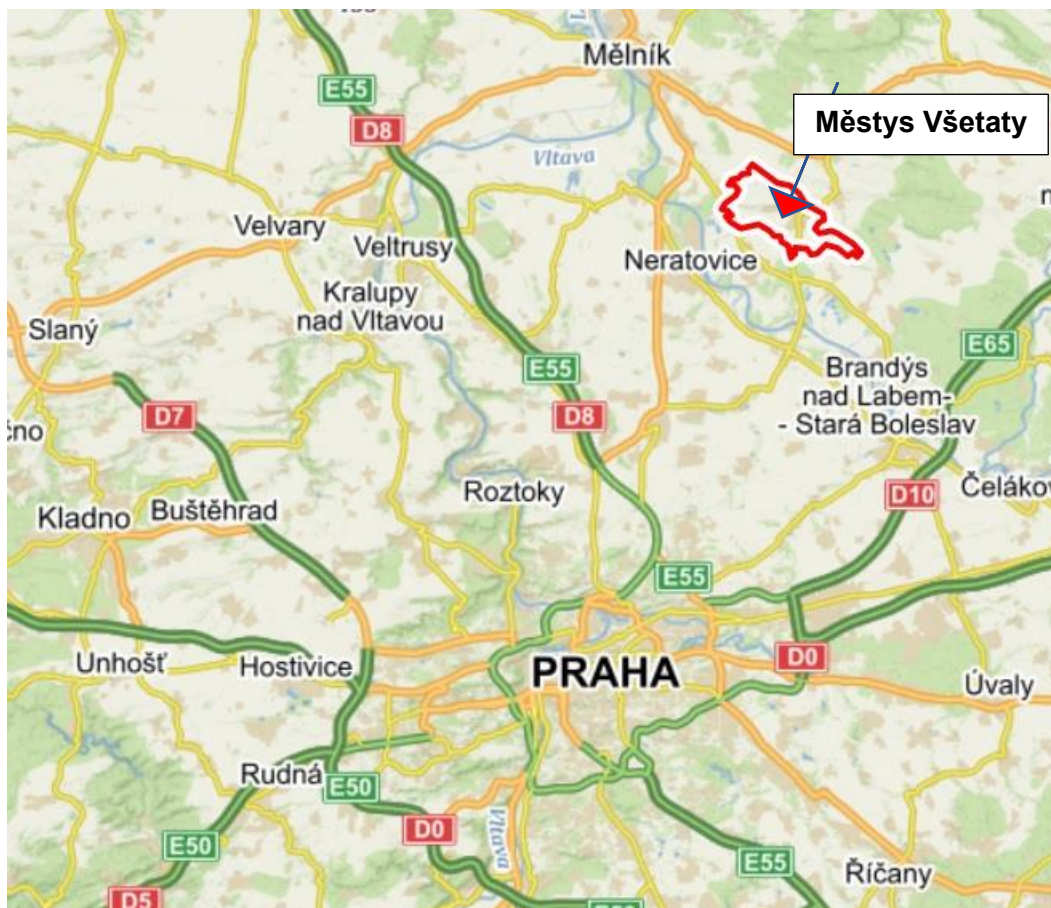
Obrázek 21 - Grafické vyhodnocení vrtu RD-2 po regeneraci (AUTOR, 2021)

## 12. Vyhodnocení regenerace vrtu z čerpací a stoupací zkoušky

V této kapitole bude uvedeno vyhodnocení regeneračního zásahu na reálném vrtu před a po regeneraci z čerpací i stoupací zkoušky.

### 12.1 Popis lokality vrtu HV-5 (Všetaty)

Lokalita vrtu HV-5 se nachází v katastrálním území Všetaty (okres Mělník, Středočeský kraj). V roce 2021 zahájí provozovatel práce, které povedou k opětovnému použití vrtu pro zásobování vodou.



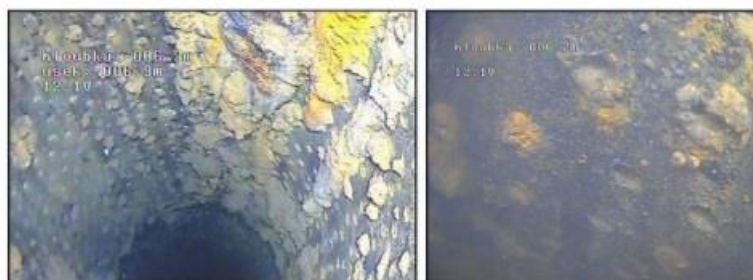
Obrázek 22 - Městys Všetaty – lokalita vrtu HV-5 ([www.mapy.cz](http://www.mapy.cz), 2021)

## 12.2 Popis regenerační metody

Na vybrané lokalitě vrtu HV-5 byla provedena regenerace pomocí nové ultrazvukové regenerační sestavy. K prvnímu (ostrému) využití zcela nové regenerační sestavy došlo na konci roku 2020, konkrétně v prosinci na objektu HV-5 ve Všetatech. Tento testovaný objekt HV-5 pochází z roku 1977 a v současné době je subjektem Středočeské vodárny, a.s. držen jako záložní vodárenský jímací zdroj v rámci jímacího území Všetaty. V letech 1980 až 2000 byl vrt intenzivně využíván provozní vydatností menší než 10 l/s. Jedná se o jímací vrtanou studnu vrtného průměru  $d = 450$  mm s ocelovou výstrojí DN 377 mm s úsekem vrtané perforace 4,2 - 11,0 m p.t. Vrt jímá vodu z mělkého kolektoru stáří kvartéru a úroveň hladiny podzemní vody (HPV) se zde pohybuje kolem 1 m p.t. V rámci předchozího provozu vrt nebyl nikdy regenerován, hydrodynamické zkoušky byly provedeny pouze v době zprovoznění vrtu v roce 1977 (kdy byl vrt testován na  $Q = 20,61$  l/s). Vrt má hloubku 14,7 m.

Regenerační práce byly zahájeny pomocí standardní techniky mechanického čištění – tj. očištěním stěn vrtu ocelovým kartáčem a odčerpáním sedimentu hydropneumatickým

(mamutovým) čerpadlem za účelem zprůchodnění vnitřního prostoru výstroje vrtu a odtěžení napadávky v kalníku vč. odstranění cizích předmětů ze dna. Poté byla aplikována technologie ultrazvuku s cílem otevření maximálního množství perforačních otvorů, které jsou v současnosti vlivem pokročilé kolmatace vrtu zaneseny, a rovněž zprůchodnění obsypu vrtu v prostoru za pláštěm výstroje. Vrt byl vystaven působení ultrazvukové vlny o výkonu 7,5 kW po průměrnou dobu 10 min/1 m perforovaného úseku výstroje při simultánním odčerpávání uvolněného sedimentu.



Obrázek 23 - Vizuální srovnání povrchu výstroje vrtu před a po regeneraci ultrazvukem



Obrázek 24 - Souprava na regeneraci vrtů ultrazvukovou technologií (Foto: DANIEL KAHUDA, 2020)

### 12.3 Vyhodnocení výsledků před a po regeneraci

Před startem i po dokončení prací byla provedena kontrola technické stavu výstroje vrtu a také byla provedena hydrodynamická zkouška délky 30 min. Úroveň hladiny podzemní vody byla měřena pomocí automatické tlakové sondy v časových intervalech po 1 sekundě a s referenčním měřením ručním hladinoměrem. Výsledky byly hodnoceny pomocí metod hydrauliky podzemních vod.

- Byla stanovena hodnota specifické vydatnosti  $q$  [l/s/m] z aktuální čerpané vydatnosti a „pseudo“ ustálené hladiny podzemní vody
- Poté byl dle (AGARWALA, 1970) určen koeficient dodatečných tlakových odporů  $W$  včetně souvisejících charakteristiky nutných k jeho určení.

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$

a

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

kde  $i$  je sklon prvního přímkového úseku,  $S$  je storativita [-],  $C$  je jednotkový faktor storativity vrtu [m<sup>2</sup>],  $r_w$  je poloměr výstroje vrtu [m],  $C_D$  je bezrozměrná storativita vrtu [-] a  $W$  je koeficient dodatečných odporů [-].

#### Stoupací zkouška před regenerací

Za prvé bylo nutné vypočítat koeficient jednotkové storativity vrtu.

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} = 0,019 \text{ m}^2$$

Následně stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu  $C_D$ .

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 S} = \frac{0,019}{6,28 * 0,1885^2 * 0,001} = 856,238 [-]$$

Dalším krokem je určení dodatečných odporů ze sklonu  $I_{1P}$ .

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{6,28 * 0,004 * 0,19}{0,00648} - 1,027 \log 856,238 - 1,0237 \right) = 3,8 [-]$$



### Stoupací zkouška po regeneraci

Za prvé vypočet koeficientu jednotkové storativity vrtu.

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} = 0,019 \text{ m}^2$$

Následně stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu  $C_D$ .

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 S} = \frac{0,019}{6,28 * 0,1885^2 * 0,001} = 856,238 [-]$$

Dalším krokem je určení dodatečných odporů ze sklonu  $I_{1P}$ .

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$
$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{6,28 * 0,004 * 0,19}{0,00842} - 1,027 \log 856,238 - 1,0237 \right) = 2,8 [-]$$

### Čerpací zkouška před regenerací

Za prvé bylo nutné vypočítat koeficient jednotkové storativity vrtu.

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} = 0,019 \text{ m}^2$$

Následně stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu  $C_D$ .

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 S} = \frac{0,019}{6,28 * 0,1885^2 * 0,001} = 856,238 [-]$$

Dalším krokem je určení dodatečných odporů ze sklonu  $I_{1P}$ .

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$
$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{6,28 * 0,004 * 0,18}{0,00648} - 1,027 \log 856,238 - 1,0237 \right) = 4,1 [-]$$

### Čerpací zkouška po regeneraci

Za prvé vypočet koeficientu jednotkové storativity vrtu.

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} = 0,2988 \text{ m}^2$$

Následně stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu  $C_D$ .

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_w^2 S} = \frac{0,2988}{6,28 * 0,1885^2 * 0,001} = 1338,3 [-]$$

Dalším krokem je určení dodatečných odporů ze sklonu  $I_{1P}$ .

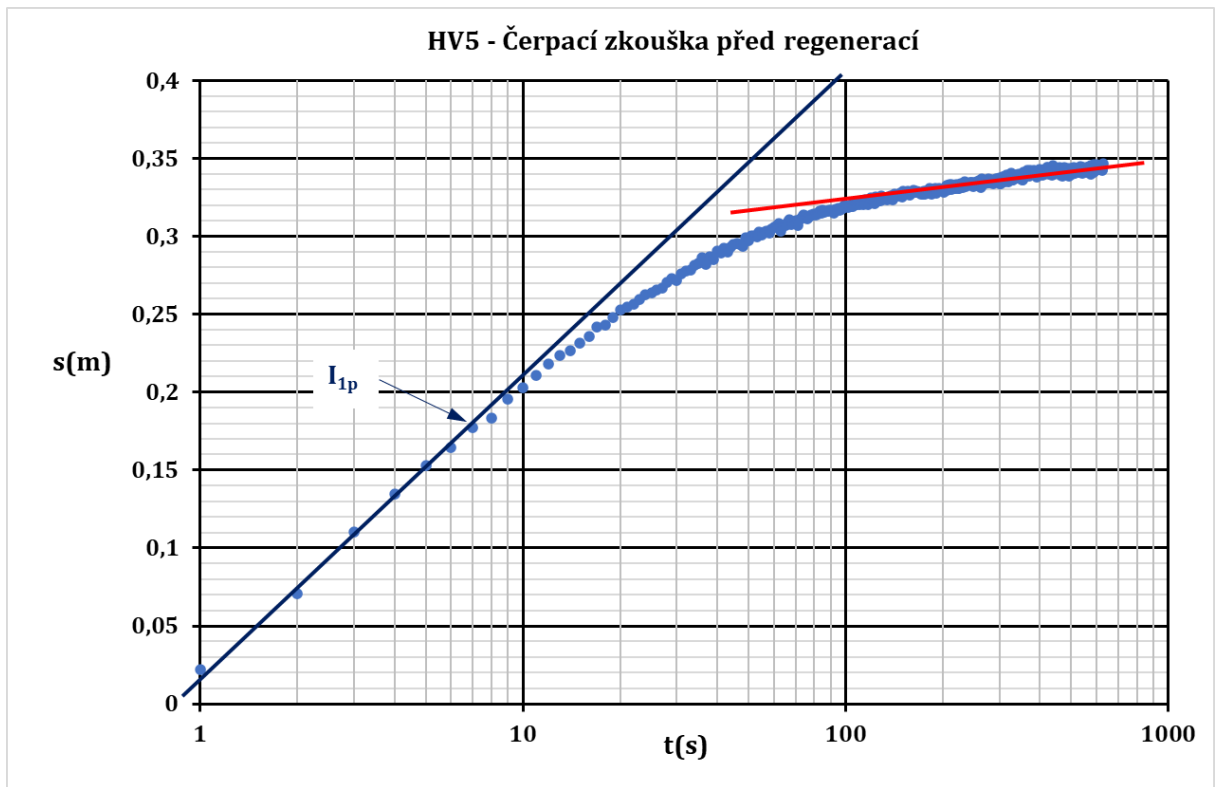
$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{2\pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$

$$W = \frac{1}{0,86} \left( \frac{6,28 * 0,052177 * 0,18}{0,00842} - 1,027 \log 1338,3 - 1,0237 \right) = 3,4 [-]$$

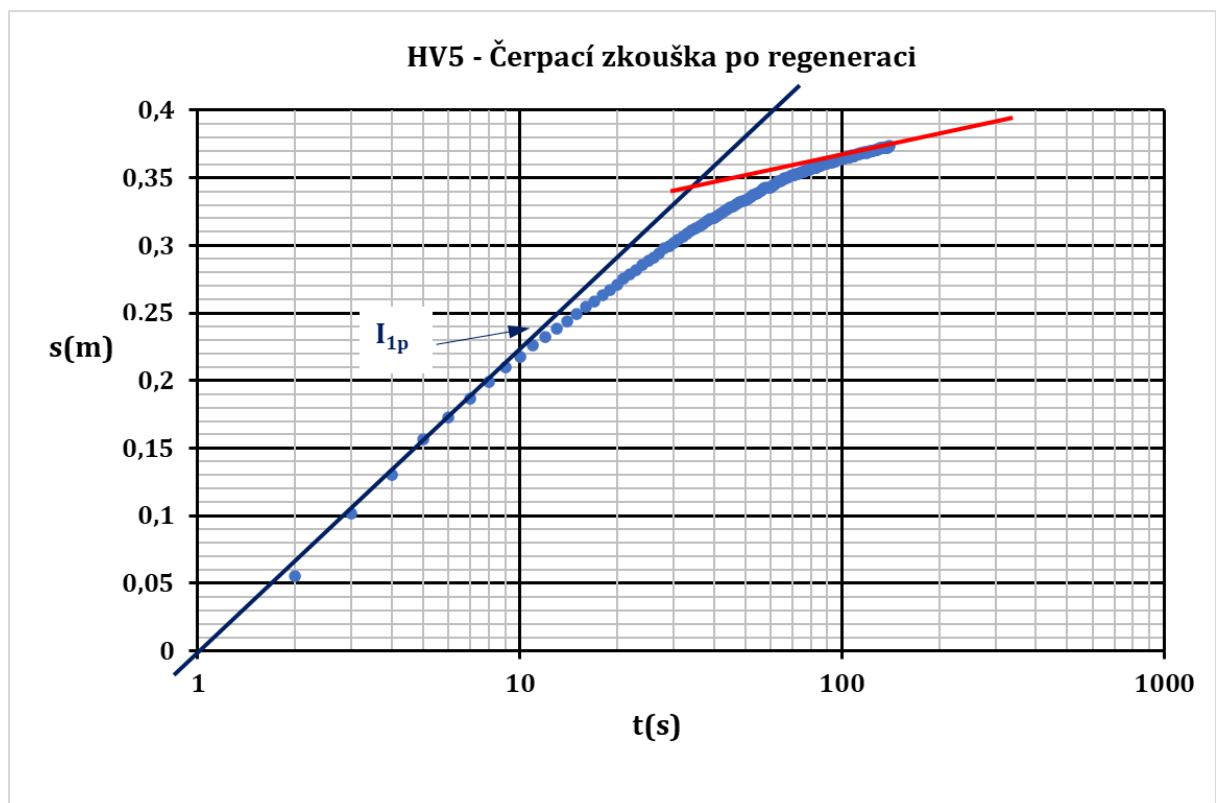
Tabulka 3 - Výsledky čerpací a stoupací zkoušky před a po regeneraci

	ČERPACÍ ZKOUŠKA		STOUPACÍ ZKOUŠKA	
	Před regenerací	Po regeneraci	Před regenerací	Po regeneraci
<b>Dodatečné odpory</b>	W = 4,1 [-]	W = 3,4 [-]	W = 3,8 [-]	W = 2,8 [-]
<b>%</b>	100 %	83 %	100 %	74 %

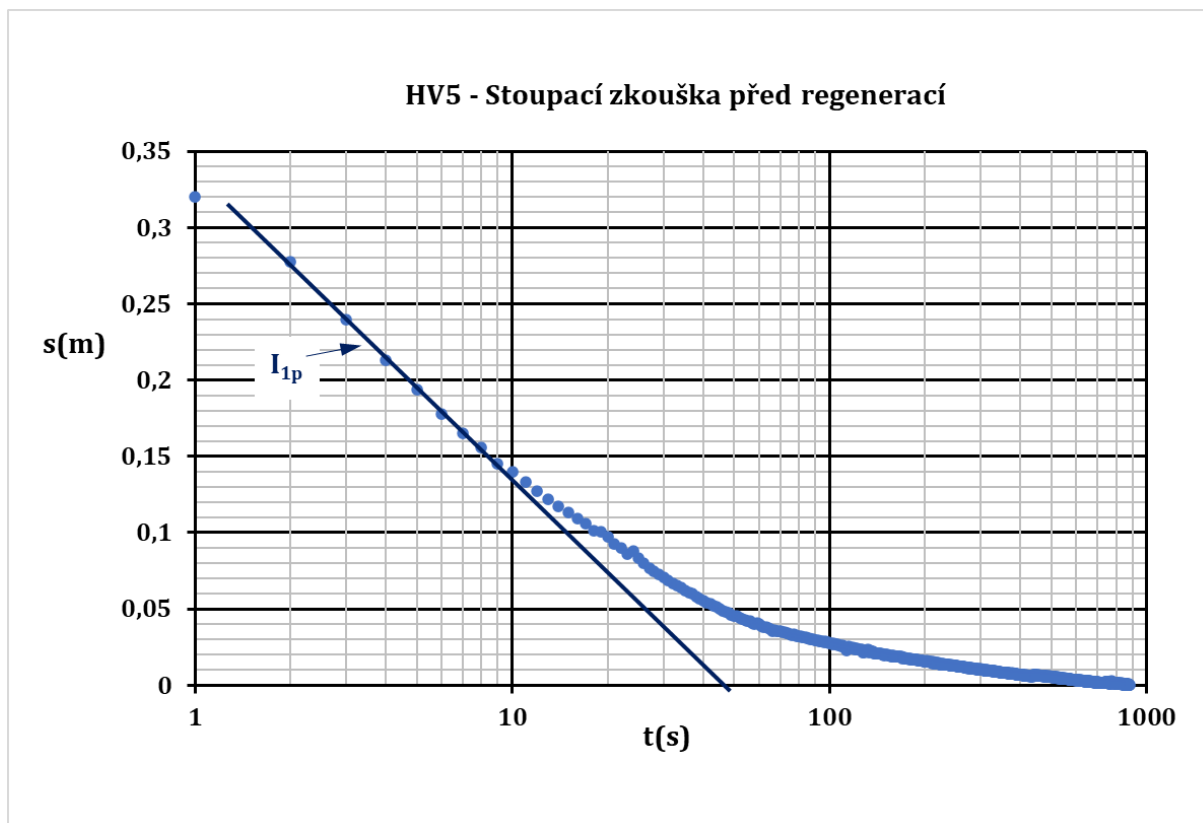
Následuje grafické zobrazení čerpací i stoupací zkoušky před a po regeneraci.



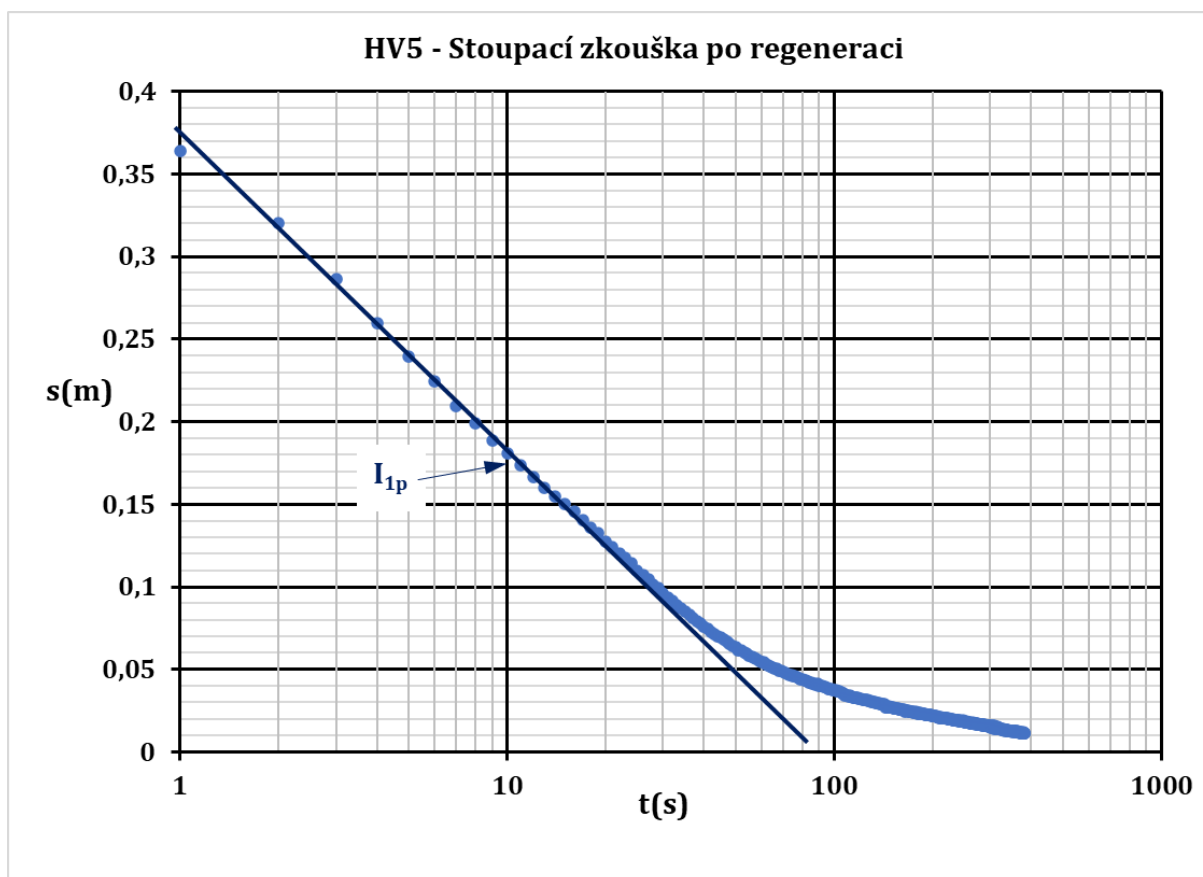
Obrázek 25 - Čerpací zkouška před regenerací (AUTOR, 2021)



Obrázek 26 - Čerpací zkouška po regeneraci (AUTOR, 2021)



Obrázek 27 - Stoupací zkouška před regenerací (AUTOR, 2021)



Obrázek 28 - Stoupací zkouška po regeneraci (AUTOR, 2021)

## 13. Diskuse

Kamerová prohlídka a hydrodynamické zkoušky na vrtech KV-2 a KV-9 potvrdily následující skutečnosti. Vnitřní část výstroje obou vrtů je velmi silně pokryta nárůsty inkrustů. Perforovaná část výstroje obou vrtů je zanesena kolmatačními produkty, u vrtu KV-2 bylo z kamerové zkoušky zjištěno, že nejsme schopni rozeznat perforovanou část výstroje vrtu. Oproti původní světlé hloubce obou vrtů bylo zjištěno, že nad jejich dnem se nachází značná mocná vrstva usazenin (u vrtu KV-2 se jedná o 4 m mocné vrstvy usazenin, u vrtu KV-9 o 3,5 m mocné vrstvy usazenin). Z hydrodynamických zkoušek jsme zjistili vysoké hodnoty hydraulických odporů na plášti a v blízkém okolí vrtu, které jsou vysvětlením vysokého stupně kolmatace. Zejména vrt KV-2 se blíží z tohoto důvodu svému kolmatačnímu kolapsu. Vysoký stupeň kolmatace obou vrtů je tak problematický, že nejsme schopni ani při razantním použití mechanické a chemické regenerace zaručit úplné obnovení původních funkcí obou vrtů.

U vrtu RD-2 byly kvůli nejasnostem o odolnosti pláště překližky (respektive trvanlivosti specifické pryskyřice vůči kyselinám) použity značně omezené regenerační techniky. Bylo použito pouze mechanické čerpání sedimentů a omezené čištění nylonovými kartáči. I tak bylo dosaženo poměrně uspokojujících výsledků.

Tabulka 4 - Výsledky čerpací zkoušky vrtu RD-2 před a po regeneraci

<b>ČERPACÍ ZKOUŠKA RD-2</b>	
Před regenerací	Po regeneraci
Koeficient dodatečných odporů $W = 12,66 [-]$	Koeficient dodatečných odporů $W = 5,52 [-]$
Efektivita = 35,04 %	Efektivita = 56,02 %

Snížení koeficientu dodatečných odporů je důvodem nadmíru pozitivního výsledku této regenerace. Důvodem zlepšení hodnot dodatečných odporů je patrně správně zvolená regenerační technika a také dalším faktorem je poloha, kde se daný vrt nachází a jeho geologické a litologické poměry. Před regenerací se pohybovala efektivita vrtu RD-2 kolem 35 %, po následné regeneraci se dostáváme na hodnotu efektivy 56 %. Jedná se tedy o zvýšení efektivy vrtu o 21 %.

U vrtu HV-5 se jednalo o jedno z prvních nasazení ultrazvukové regenerační soustavy. Tato experimentální regenerace vrtu HV-5 byla první v plánované řadě dalších provozních nasazení v rámci kterých bude testován specifický účinek u vrtů z různými technickými

vlastnostmi. Nová ultrazvuková metoda čištění vrtů by se měla stát velmi vhodným doplňkem spektra metod využívajících se pro regeneraci vrtů, ať už jímacích nebo vsakovacích. Regenerace vrtů ultrazvukem má mnoho výhod oproti ostatním metodám regenerace. Jejím benefitem je zejména odstranění kolmatujících nárůstů organického či anorganického původu. Metoda nevyužívá žádných chemických látek a tím je šetrná k životnímu prostředí. Dalším pro mě velmi významným benefitem této metody je fakt, že lze metodu aplikovat bez nutnosti souhlasu vodoprávního úřadu či dalších orgánů státní správy, a tudíž se zkracuje doba regeneračních prací na minimum. Je prokázáno, že ultrazvuk nemá žádný negativní dopad na výstroj vrtu nezávisle na tom, z jakého je materiálu, ať už se jedná o PVC, PE, keramiku, dřevo, ocel či měď). Ultrazvuková metoda umožní prodloužit životnost jímacích objektů, protože nezatěžuje výstroj vrtu, obsypu a jeho okolí.

*Tabulka 5 - Výsledky čerpací a stoupací zkoušky před a po regeneraci*

	ČERPACÍ ZKOUŠKA		STOUPACÍ ZKOUŠKA	
	Před regenerací	Po regeneraci	Před regenerací	Po regeneraci
<b>Dodatečné odpory</b>	W = 4,1 [-]	W = 3,4 [-]	W = 3,8 [-]	W = 2,8 [-]
<b>%</b>	100 %	83 %	100 %	74 %

U vrtu HV-5 byla provedena jak čerpací, tak i stoupací zkouška. Z čerpací zkoušky bylo zjištěno, že velikost dodatečných odporů se snížila z hodnoty 4,1 před regeneraci na hodnotu 3,4 po regeneraci. Tento výsledek odpovídá zlepšení o 17 %. Ze stoupací zkoušky bylo zjištěno, že velikost dodatečných odporů se snížila z hodnoty 3,8 před regeneraci na hodnotu 2,8 po regeneraci. Tento výsledek odpovídá zlepšení o 26 %.

## 14. Závěr

Ze skutečností uvedených v diskusi vyplývá, že u vrtů KV-2 a KV-9 nelze zajistit požadované množství jímané vody aplikací regeneračního zásahu. S ohledem na tuto skutečnost by bylo nejvhodnější vybudovat minimálně tři nové vrty. Protože i na nových vrtech budou probíhat kolmatační procesy a s ohledem na hydraulické charakteristiky zvodně doporučujeme vybudovat vrty s následujícími parametry. Průměr vrtání vrtů minimálně 600 - 700 mm. Vystrojení vrtu PE výstrojí o světlém průměru minimálně 300 mm se štěrbinovou perforací (šířka štěrbin max. 1 mm). Obsypat výstroj vrtu s ohledem na její hydraulické charakteristiky zvodně dvojitým filtračním obsypem (vnější obsyp zrnitosti: 1,3 až 4 mm, vnitřní obsyp zrnitosti: 2 až 6 mm). Cementace vrtu v horních 2 m p. t. Pod perforovanou částí výstroje vybudovat minimálně 2 m kalník, který bude umístěn v podložních slínovcích.

Na vrtu RD-2 můžeme dle našich výsledků evidovat značné zlepšení. Čerpací zkouška po regeneraci vrtu ukázala zlepšení efektivity vrtu o více než 20 %. Také u výpočtu dodatečných odporů evidujeme zlepšení po následné regeneraci o více než 50 %. Tudíž je možné tento výsledek považovat za dobré řešení a vhodně zvolenou metodu regenerace vrtu.

Regenerační práce na vrtu HV-5 byly zahájeny standartní technikou mechanického čištění. Pomocí ocelového kartáče byly vyčištěny stěny vrtu a byl hydropneumatickým čerpadlem odčerpán sediment ve výstroji vrtu. Následně došlo k aplikaci ultrazvukové technologie s cílem otevření maximálního množství perforačních otvorů, které jsou v současné době vlivem pokročilé kolmatace vrtu zaneseny. Nasazení této ultrazvukové regenerační soupravy proběhlo úspěšně. U výpočtu dodatečných odporů evidujeme mírné zlepšení a také se po regeneraci zvýšila specifická vydatnost vrtu. Nicméně se jednalo pouze o první v řadě plánovaných nasazení této regenerační soustavy, v rámci, kterých bude testován specifický účinek u vrtů s různými technickými i hydrogeologickými vlastnostmi. Účinky této regenerace jsou okamžité a velmi efektivní, čímž se zkrátí doba regeneračních prací a dojde se ke zdárnému výsledku.

Při zpracovávání této problematiky bylo mým cílem vysvětlit základní problematiku proudění podzemních vod k vrtům, popsat vlastnosti a typy různých zvodnělých prostředí. Hlavním smyslem bylo předložit informace, které slouží pro praktické řešení problematiky dodatečných odporů a jejich vlivu na účinnost jímacích objektů. Ze zkoumaných výsledků je patrný rozdíl mezi vypočítanými hodnotami za původního stavu před regenerací a vypočítanými hodnotami po provedení regeneračního zásahu na vrtu.

## Přehled literatury a použitých zdrojů

1. AGARWAL, R.G.; Al - Hussainy, R.; Ramey, H.J. Jr. (1970): An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow : I. Analytical treatment. Trans. Society of Petroleum Engineers Journal. AIME, 249, Vol. 10, Issue 3 279-290
2. BEAR J., (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier, INC., New York.
3. BEAR J., 1979: Hydraulics of Groundwater. McFraw-Hill Publishing Company, New York.
4. BEYER, W., and K.H. SCHWEIGER., (1969). Zur Bestimmung des entwasserbaren Porenanteils der Grundwasserleiter. Wasserwirtschaft Wassertechnik 19, no. 2: 57–60.
5. BUTTS E., (2017): Well and Pump Rehabilitation, Part 4: Rehabilitation techniques and improving efficiency in wells. Water Well Journal, svazek 2017, vydání 8 (August), 50-53
6. ČÍŽEK P., (2011): Nová závazná ČSN 75 5115 – Jímání podzemní vody [online]. Praha cit [2019-02-28]. Dostupné z: <[http://www.studny.info/Nova\\_%20CSN\\_755.htm](http://www.studny.info/Nova_%20CSN_755.htm)>
7. DARCY, H. (1856) Les Fontaines Publiques de la Ville Dijon. Dalmont, Paris, France.
8. DUBSKÝ, J (2019) Vyhodnocení regeneračního zásahu na reálném vrtu. Praha, 2019. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování. Vedoucí práce prof. Ing. Pavel Pech, CSc.
9. DUPUIT J., (1863): Ethudes theoretiques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et a travers les terrains permeables. Dunod, Paris. France
10. FREEZE A., CHERRY J., (1979): Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs. New Jersey.
11. HÁLEK V., ŠVEC J., (1973): Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství Academia, Praha.
12. HÁLEK V., ŠVEC J., (1979): Hydraulika podzemní vody. Academia Praha, Praha.
13. HURST, W. (1953) Establishments of the skin effect and its impediment to fluid flow to a wellbore. Petr. Eng. Inst. 25, Dallas.
14. CHARBENEAU, R. J., (2006) Groundwater hydraulics and pollutant transport. Waveland Press, Long Grove. Illinois, 593p.
15. JACOB C. E., (1946): Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., Vol. 72, No. 5.
16. JETEL J., (1982): Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha.



17. JETEL J., (1991): Hydrogeologie, inženýrská geologie. Český geologický ústav, Praha. ISBN 80-7075-026X, s 1-192.
18. KARANJAC, J. (1972) Well Losses Due to Reduced Formation Permeability. Ground Water, Vol. 8, No 4.
19. KOKOŠKOVÁ, Kupková, Zelinka, (1984): KOLIN V ELETOV. VYSLEDKY II. A III. ETAPY HYDROGEOLOGICKEHO PRUZKUMU ETAPOVA ZPRAVA , Vodní zdroje, Praha.
20. KRESIC, N. (2006) Hydrogeology and groundwater modeling. CrC Press, 807 p.
21. KURÁŽ M., (2014): HYDRODYNAMIKA PORÉZNÍHO PROSTŘEDÍ. Vydavatelství ČZU, Praha.
22. MÁCA P., (2014): Úvod do hydrologie. Česká zemědělská univerzita Praha, Praha.
23. MARSCHALKO, Marian., (2002): Influence of basic geotechnical parameters on slope stability. In: XIII International Scientific and Technical Conference New Methods and Technologies in Petroleum Geology, Drilling, Reservoir and Gas Engineering. Krakow: University of Mining and Metalurgy. s. 5-10. ISBN 80-248-00-72-1.
24. MLS J., (1984): Hydraulika podzemní vody. Skriptum ČVUT Praha, fakulta stavební, Praha, ČR.
25. MLS J., (1988): Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha.
26. MUCHA I., (1987): Hydraulika podzemních vod. STNL Praha.
27. PECH P., (1988): Nestacionární proudění kapaliny k úplnému „reálnému“ vrtu s napjatou hladinou. Vodohospodářský časopis, svazek 36, vydání 1, 71–85.
28. PECH P., (2003): Determination of the skin factor in the early portion of an aquifer test. J. Environ. Hydrology, vol. 11, p. 1–9.
29. PECH P., 2010: Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Česká zemědělská univerzita Praha, Praha.
30. PECH P., (2010a): Využití stoupacích zkoušek k vyhodnocení účinku regenerace vrtů. Vodohospodářské technicko- ekonomické informace, roč. 52, č. I, s. 23 - 25. ISSN: 0322-8916.
31. PECH P. a kol., (2015): Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech. Vydavatelství ČZU, Praha.
32. QUITT, Evžen., (1971): Klimatické oblasti Československa = Climatic regions of Czechoslovakia. Brno: Geografický ústav ČSAV. Studia Geographica.
33. RAMEY, H. J. Jr. (1970) Short-time well test data interpretation in the presence of skin effect and wellbore storage. J. Pet. Tech., Jan., 97.
34. RIVERA, J. G. and RAGHAVAN, R. (1979) Analysis of Short-Time Pressure Data Dominated by Wellbore Storage and Skin. JPT.

35. SCHÖN J., (2015): Basic Well Logging and Formation evaluation. Prof. Dr. Jürgen Schön&bookboon.com.
36. SOULSBY D., (2010): Technical Review Borehole Drilling and Rehabilitation Under Field Conditions. International Committee of the Red Cross, Geneva, Switzerland.
37. STARÝ M., (2005): Hydrologie. Vysoké učení technické v Brně, Brno.
38. ŠRÁČEK O., a KUCHOVSKÝ T., (2003): Základy hydrogeologie. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita. 177 s. ISBN 80-210-3146-8.
39. 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.
40. THIEM, Günther (1906). "Hydrologische methoden" (in German). Leipzig: J. M. Gebhardt: 56p.
41. THOMPSON A. S., (1999): Hydrology for Water Management. A. A. Balkema, Rotterdam.
42. TODD D. K., MAYS L. W., (2005): Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons, Hoboken, USA.
43. VALENTOVÁ, J., (1994): Hydraulika podzemní vody. Praha: České vysoké učení technické.
44. VALENTOVÁ J., (2007): Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha. 174 s., ISBN 978-80-01-03625-9.
45. VALENTOVÁ J., (2010): Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha.
46. VAN EVERDINGEN A. F., (1953): The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. Trans AIME, Vol. 198, p. 171–176.
47. WALTON, C. W., (2006): Aquifer Test Modeling. CRC Press, Taylor & Francis, NY
48. WARD J. C., (1964): Turbulent Flow in Porous Media. JHD, HY-5.
49. WATTENBARGER R. A., (1967): Effects of Turbulence, Wellbore Damage, Wellbore Storage, and Vertical Fractures on Gas Well Testing, Ph D thesis, Stanford U., Stanford, Calif.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schéma rozdělení podzemních vod (PECH, 2010) .....	4
Obrázek 2 - Schématické rozdělení zvodnělých vrstev (PECH, 2010).....	8
Obrázek 3 - Elementární rovnoběžnostěn (PECH, 2010) .....	13
Obrázek 4 - Schéma Darcyho experimentu proudění vody porézním prostředím (PECH, 2010).....	14
Obrázek 5 - Platnost Darcyho zákona v jednotlivých mezích (PECH, 2010).....	15
Obrázek 6 - Dupuitovy postuláty (VALENTOVÁ, 2007) .....	19
Obrázek 7 - Schéma úplného ideálního vrtu ve zvodni s napjatou hladinou .....	21
Obrázek 8 - Theisova typová křivka (THEIS, 1935) .....	23
Obrázek 9 - Graf čerpací zkoušky s vs. log t (PECH, 2010) .....	25
Obrázek 10 - Semilogaritmický graf čerpací zkoušky na pozorovacím vrtu (PECH, 2010)...	26
Obrázek 11 - Snížení s dodatečnými odpory v odběrovém vrtu (PECH, 2010).....	29
Obrázek 12 - Znázorněná závislost mezi log $s_v$ a log t (PECH, 2010).....	31
Obrázek 13 - Stoupací zkouška (PECH, 2010).....	35
Obrázek 14 - Bližší zaměření lokality vrtu KV-2 a KV-9 (AUTOR, 2021).....	41
Obrázek 15 - Graf čerpací zkoušky na vrtu KV-2 (AUTOR, 2021) .....	45
Obrázek 16 - Graf čerpací zkoušky na vrtu KV-9 (AUTOR, 2021) .....	46
Obrázek 17 - Lokalita vrtu RD-2 (Radouň) (AUTOR, 2021) .....	47
Obrázek 18 - Bližší zaměření lokality vrtu RD-2 (AUTOR, 2021) .....	48
Obrázek 19 - Popisné atributy tykající se vrtu RD-2 ( <a href="https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/">https://mapy.geology.cz/vrtna_prozkoumanost/</a> , 2021).....	49
Obrázek 20 - Grafické vyhodnocení vrtu RD-2 před regenerací (AUTOR, 2021).....	51
Obrázek 21 - Grafické vyhodnocení vrtu RD-2 po regeneraci (AUTOR, 2021) .....	53
Obrázek 22 - Městys Všetaty – lokalita vrtu HV-5 (www.mapy.cz, 2021).....	54
Obrázek 23 - Vizuální srovnání povrchu výstroje vrtu před a po regeneraci ultrazvukem ....	55
Obrázek 24 - Souprava na regeneraci vrtů ultrazvukovou technologií (Foto: DANIEL KAHUDA, 2020) .....	55
Obrázek 25 - Čerpací zkouška před regenerací (AUTOR, 2021).....	59
Obrázek 26 - Čerpací zkouška po regeneraci (AUTOR, 2021) .....	59
Obrázek 27 - Stoupací zkouška před regenerací (AUTOR, 2021) .....	60
Obrázek 28 - Stoupací zkouška po regeneraci (AUTOR, 2021).....	60

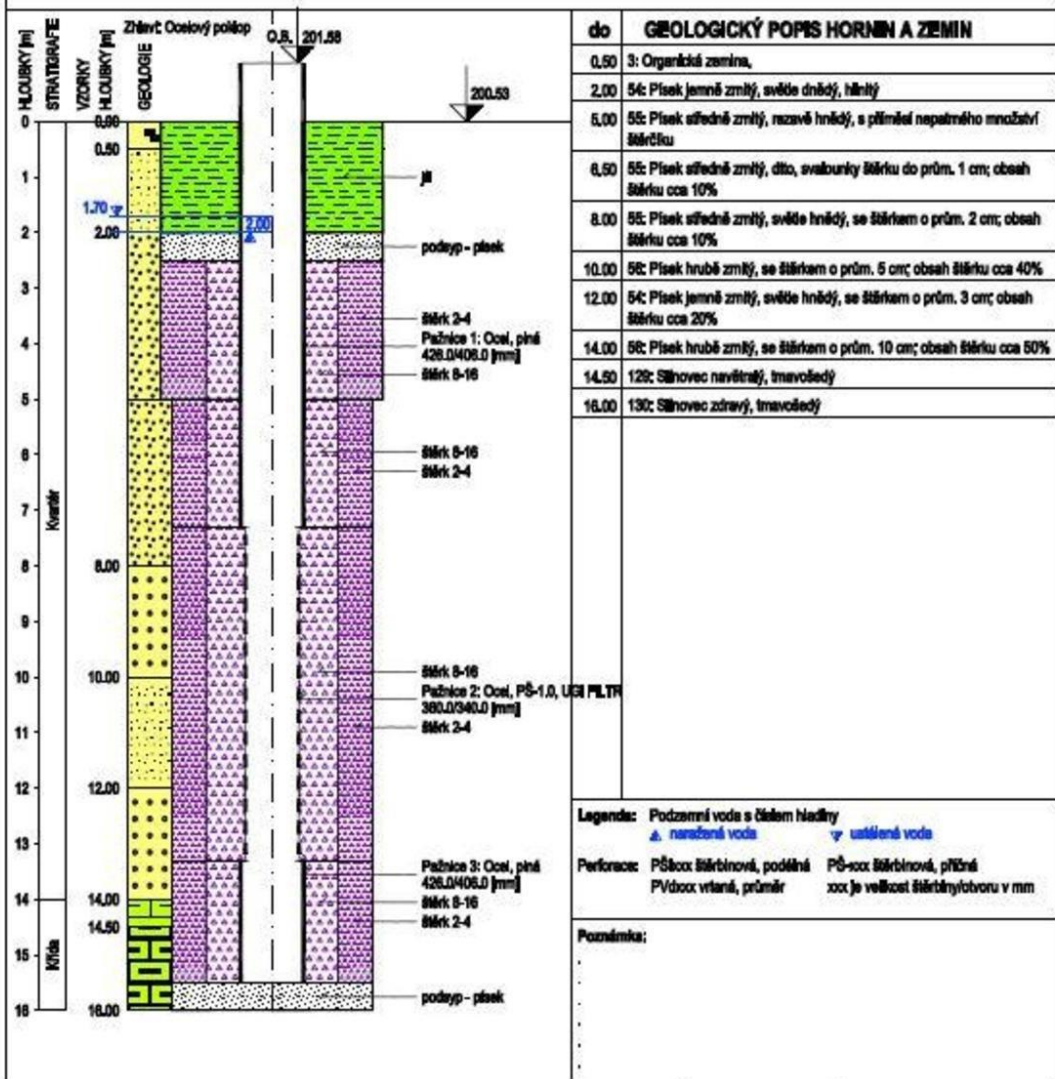
## **Seznam příloh**

**Příloha č. 1** – Hydrogeologická dokumentace vrtu KV-2 (VODNÍ ZDROJE, a.s., 2016)

**Příloha č. 2** – Hydrogeologická dokumentace vrtu KV-9 (VODNÍ ZDROJE, a.s., 2016)



VODNÍ ZDROJE, a.s. 150 00 Praha 5, Jindřicha Plachty 536/16		HYDROGEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VRTU <b>KV-9</b>	
Okres:	Koňín	Katastr. území:	Lžovice
Mapa 1:25000:	13-411		
Vrtník:	Naznamý	Hladina podz. vody:	Zjištěná kontaminace:
Datum provedení - od:	x	ustálená ZHL[m]:	196.83/1.70
- dc:	x	narušená ZHL[m]:	196.83/2.00
Y:	679 000.00		
X:	1 058 071.50		
Z terén [m]:	200.53		
Odměrný Bod [m]:	201.58		
Hloubka vrtu [m]:	16.00		
Souř. systémy:	JTSK / Bař		
Typ soupravy:			
Technologie:			
Materiál vnitřní pažnice:			
Vrtník: hloubky[m] průměr[mm]	Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.	Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.	Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.
0,00 - 5,00 1620	1 0,00 - 7,30 Ocel 426 píná		
5,00 - 16,00 1350	2 7,30 - 13,30 Ocel 360 PŠ-1.0 30%		
	3 13,30 - 15,50 Ocel 426 píná		



Název akce: Technický stav vrtaných studní KV2, KV9 - Veletov,	Měřítko: 1: 100	Zak. číslo: 160 005
Dokumentoval Vyhotořil a Zpracoval: Ing. Vítězslav Dvořák	Příloha č.: 2	

Vytvořeno systémem GeProDo, www.geprodo.wz.cz