

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIROMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**



Vyhodnocení regeneračního zásahu na reálném vrtu

Bakalářská práce

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

Bakalant: Jiří Dubský

© 2019 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Dubský

Vodní hospodářství

Název práce

Vyhodnocení regeneračního zásahu na reálném vrtu.

Název anglicky

Evaluation of regeneration intervention on a real well.

Cíle práce

Popsat metodu vyhodnocení dodatečných odporů (skin faktoru) z čerpací na reálném vrtu.
Vyhodnotit efekt regeneračního zásahu na vrtu RD2 z čerpacích zkoušek před a po regeneraci.
Pro vyhodnocení použít Jacobovu semilogaritmickou aproximaci a metodu vyhodnocení koeficientu dodatečných odporů z počátečního úseku čerpací zkoušky.

Metodika

Zpracovat literární rešerši k vyhodnocování dodatečných odporů na reálných vrtech.

Popis zkoumané lokality a regenerace provedené na vrtu RD... 2 na Obrtce.

Vyhodnocení čerpacích zkoušek před a po regeneraci.

Vyhodnotit účinnost regeneračního zásahu na vrtu RD2.

Diskuse.

Závěr.

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

vrt, hydrodynamická zkouška, dodatečné odpory, regenerace

Doporučené zdroje informací

FREEZE, R. ALLAN, CHERY, JOHN, A. 1979. Groundwater. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall Inc.
JELMERT, T. A. Introductory Well Testing. 2013. ISBN 978-87-403-0445-9
PECH, P. 2010. Speciální případy hydrauliky podzemních vod. ČZU-VÚV TGM.
VALENTOVÁ, J. 2002. Hydraulika podzemních vod. Skripta ČVUT.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Konzultant

Ing. Kahuda

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 03. 04. 2019

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci „Vyhodnocení regeneračního zásahu na reálném vrtu“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Pavel Pecha, CSc. a zároveň prohlašuji, že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Praze, dne:.....

.....

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce profesoru Ing. Pavlu Pechovi, CSc., za cenné připomínky a odborné rady, kterými velmi přispěl k vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi Ing. Danielu Kahudovi.

Abstrakt:

Bakalářská práce se zabývá vyhodnocením regeneračního zásahu na reálném vrtu. Je zde popsána metoda vyhodnocení dodatečných odporů (skin faktoru) z čerpací zkoušky a vyhodnocení efektu zásahu na vrtu RD-2 před a po jeho regeneraci.

Pro vyhodnocení dat byla použita Jacobova semilogaritmická metoda a Theisova typová křivka. Výsledky měření jsou zahrnuty v závěru. V diskuzi je řešena kvalita regenerace vrtu a její význam.

Základní znalosti student získá prostudováním literární rešerše. V praktické části uplatní dovednosti, které získal při vyhodnocení regeneračního zásahu na reálném vrtu.

Klíčová slova:

vrt, hydrodynamická zkouška, dodatečné odpory, regenerace

Abstract:

The Bachelor Thesis deals with the evaluation of regeneration intervention on a real well. The Thesis describes the method of evaluation of additional resistance (skin factor) from the pumping test and the evaluation of the effect of intervention on the well RD-2 before and after its regeneration.

The Jacob semi-logarithmic method and Theis type curve were used to evaluate the storativity, transmissivity. The measurement results are included in the conclusion. The discussion deals with the quality of well regeneration and its importance.

The student will acquire basic knowledge by studying the literature research in the first part of this Thesis. In the practical part, he will apply the skills he gained from the literary research. He will use this knowledge to evaluate the regeneration intervention on a real well.

Klíčová slova:

well, hydrodynamic test, additional resistances, regeneration

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce	2
3. Metodika.....	3
4. Historie	4
5. Podzemní voda.....	4
6. Vertikální rozdělení podzemních vod	5
7. Typy zvodnělých vrstev	6
7.1 Zvodnělá vrstva s volnou hladinou.....	6
7.2 Zvodnělá vrstva s napjatou hladinou.....	6
7.3 Polopropustná vrstva s přetékáním.....	6
8. Hydrogeologické a hydraulické vlastnosti zvodnělých vrstev	7
8.1 Storativita	7
8.1.1 Efektivní storativita	7
8.1.2 Opožděná storativita.....	7
8.1.3 Pružná storativita.....	7
8.1.4 Volná storativita	8
8.1.5 Storativita volné hladiny.....	8
8.2 Pórovitost	8
8.2.1 Aktivní pórovitost	8
8.2.2 Efektivní pórovitost	8
8.3 Propustnost	8
8.4 Hydraulická vodivost.....	9
8.5 Transmisivita	9
9. Základní rovnice	10
9.1 Rovnice kontinuity	10
9.2 Darcyho rovnice.....	10

9.2.1	Meze platnosti Darcyho rovnice	10
10.	Ideální vrt	13
10.1	Řešení neustáleného proudění k ideálnímu vrtu	13
10.2	Theisova metoda typových křivek	15
10.3	Jacobova metoda semilogaritmické přímky	16
11.	Skutečný vrt	17
11.1	Dodatečné odpory	18
12.	Hydrodynamické zkoušky	21
12.1	Čerpací zkouška	22
12.2	Odběrové zkoušky	23
12.3	Stoupací zkouška	23
12.4	Trubková zkouška	24
12.5	Expresní zkouška	25
13.	Vyhodnocení regeneračního zásahu	26
13.1	Popis zájmové lokality	26
13.2	Geologie a litologie v zájmové lokalitě	27
13.3	Regenerace vrtu	27
14.	Vyhodnocení RD-2 před regenerací	29
15.	Vyhodnocení RD-2 po regeneraci	31
16.	Diskuze	33
17.	Závěr	34

1. Úvod

V současné době je velkým problémem nedostatečná zásoba pitné vody. Několik let dlouhotrvající sucho přináší potřebu nás všech, co nejlépe využívat podzemní vody. I přes nedostatek spodní vody nepolevuje zájem o vrtání nových studní. Zatím co v minulosti se hloubily studny jen několik metrů, teď se musí jít s vrtem daleko hlouběji.

Nejdůležitější osobou v tomto oboru byl Henry Darcy, který je zakladatelem moderní podzemní hydrauliky. Henry Darcy roku 1856 na základě svých pokusů podal základ filtrace podzemních vod horninovým prostředím. Formuloval lineární závislost rychlosti proudění podzemní vody na hydraulickém spádu. Tohoto Darcyho zákona – rovnice využívají postupem času další vědci a po jejich experimentech dochází k drobným úpravám řešení rovnic. Ve 20. století se na hydrodynamické zkoušky zaměřil hydrolog C.V. Theis a vzniká nová pomocná rovnice, kterou následně zjednodušuje semilogaritmická Jacobova metoda.

Výběr tématu své bakalářské práce jsem směřoval k tomu, abych získal nové zkušenosti a dokázal co nejlépe vyhodnotit čerpací zkoušky před a po regeneraci reálného vrtu.

2. Cíle práce

Zpracování literární rešerše, která má popsat metodu vyhodnocení dodatečných odporů z čerpání na reálném vrtu a vyhodnocení efektu regeneračního zásahu na vrtu RD-2.

Pro vyhodnocení čerpacích zkoušek z dat měření před a po její regeneraci jsem použil Jacobovu semilogaritmickou aproximaci a Theisovu metodu typové křivky.

3. Metodika

Zprv  bylo nutné vyobrazit základní problematiku týkající se podpovrchových vod, jako nap říklad základní rozdělení zvodnělých vrstev. Dále se seznámit s hydrogeologickými a hydraulickými vlastnostmi zvodnělých vrstev. Je nutné si vysvětlit pojmy storativita, transmisivita, kter  pak vyu žív me k vyhodnocení dodatečných odporů, dodatečného snížení a specifick  vydatnosti.

Další část je věnována vysv tlen  základních rovnic, jako jsou rovnice kontinuity a Darcyho rovnice, u které jsou zde uvedeny i její meze platnosti. N sledn  se práce zam rjuje na problematiku ideálního a skutečného vrt. U této problematiky následují informace o Theisov  metodě typových křivek a Jacobová metodě semilogaritmick  p mky. U skutečných vrtů jsou zde vysvětleny dodatečné odpory a jejich výpočet.

Následuje pops n  hydrodynamických zkoušek a jejich jednotliv  popis. Vzorce nacházející se v předchozích částech práce využijeme k vyhodnocení regeneračního zásahu na vrtu RD-2. Následuje popis zkouman  lokality a regenerace proveden  na tomto vrtu RD-2 na Obrtce. Z v re n  vyhodnocení čerpacích zkoušek před a po regeneraci a vyhodnocení u innosti regeneračního zásahu.

V závěru uvádíme nam řen  hodnoty a v diskuzi porovnáme hodnoty výsledků zkoušek před a po regeneraci.

4. Historie

Studnařství je hlavním oborem, který se mezi lidmi vyskytuje už od pravěku. Blízkost vodních toků, pramenů či jezer byla hlavním faktorem pro první stálé osady založené člověkem. Lidé se také velmi brzy naučili hledat a využívat vodu v měkkých půdách pod povrchem země. Na území České republiky se voda nachází v nebývalé míře, i když to nemusí být na všech místech nutně pravda. Většina studen staršího data budovaná před používáním těžké strojní techniky se přiřazuje do kategorie kopané studny. V praxi byly tyto studny široké tak, aby v tomto prostoru se byl kopáč schopen ohánět krumpáčem. Při větším rozšiřování šířky a v méně kompaktní zemině hrozilo riziko závalu. Jednou z výjimek je slavná čtyřmetrová studna v Mělníku. Účel tohoto díla není přesně znám. Stěny této staré studny byly vykládány kamením, aby zamezily zřícení stěn. V minulosti se k čerpání používal rumpál se závěsným vědrem. Už ve starověku jsme se mohli setkat s prvními čerpadly, která byla poháněna lidskou, anebo zvířecí silou, v ojedinělých případech byla poháněna větrnou energií.

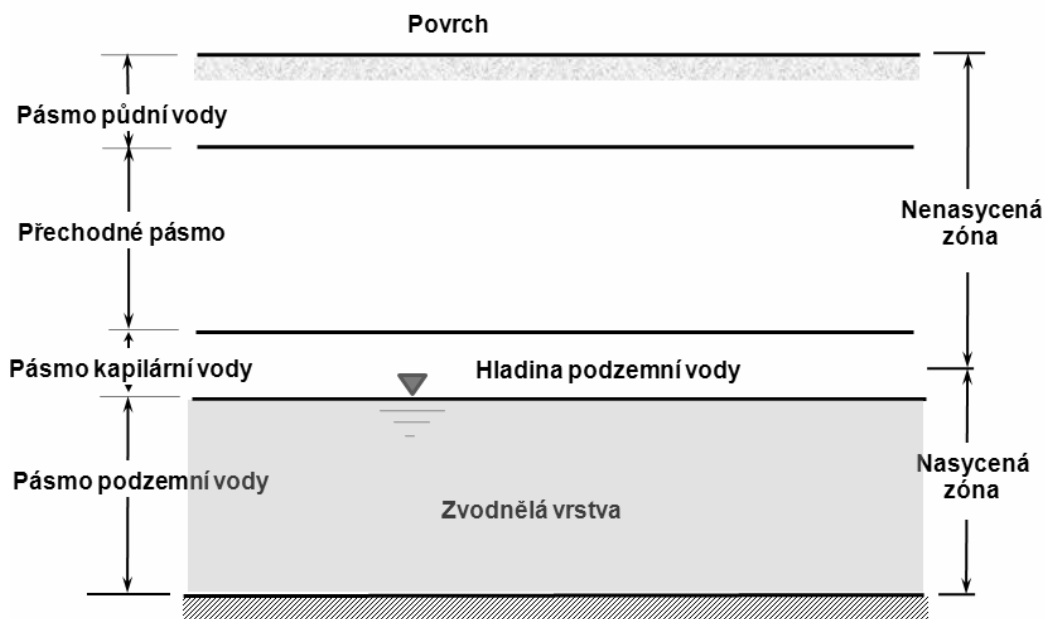
5. Podzemní voda

Podpovrchovou vodu můžeme specifikovat jako vodu, která se nachází pod povrchem země. Podzemní voda se vyskytuje zejména v pórech mezi částicemi zeminy, nebo v místech, kde je narušena kontinuita hornin (plné nasycení pórů a pohybuje se působením gravitační síly). Podzemní voda je nedílnou součástí světových zásob sladké vody (VALENTOVÁ, 1994).

Dostupné světové zásoby veškeré sladké vody jsou z 20 % tvořeny vodou podzemní. Podzemní voda je velmi spolehlivým zdrojem vody, bohužel proces jejího doplňování je velmi zdlouhavý (VALENTOVÁ, 1994).

6. Vertikální rozdělení podzemních vod

Rozdělení podzemních vod můžeme názorně vidět na následujícím schématu:



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

Výskyt vody ve vertikálním profilu můžeme rozdělit do čtyř pásem:

1. Pásmo půdní vody – nachází se na úplném povrchu do hloubky kořenů rostlin.
2. Přechodné pásmo – nachází se pod pásmem půdní vody až do začátku pásma kapilární vody.
3. Pásmo kapilární vody – zóna mezi přechodným pásmem a hladinou podzemní vody.
4. Pásmo podzemní vody – nachází se pod pásmem kapilární vody.

Dále také můžeme vertikální profil podzemních vod rozdělit na pásmo nasycené a pásmo nenasycené. Nasycené pásmo, zóna saturace je částí půdy, kde bývají většinou všechny póry vyplněny vodou. Nenasycené pásmo, zóna aerace je část půdy, která se nachází nad nasyceným pásmem, přes které srážková a povrchová voda prochází do části nasycené (PECH, 2010).

7. Typy zvodnělých vrstev

System podpovrchové vody sestává z nasycené a nenasycené zóny. Odborný výraz zvodnělá vrstva můžeme chápat jako tzv. vodonosnou vrstvu (zvodeň) používající se pro nasycené zvodnělé prostředí. Hydraulika podzemních vod definuje zvodnělou vrstvu jako jednoduchou geologickou formaci nebo skupinu geologických formací, které vodu propouštějí a zajišťují velké množství vody. Pokud daná geologická formace nepropouští významné množství vody označujeme ji jako nepropustnou zvodnělou vrstvu neboli izolátor. Dále se můžeme setkat s termínem polopropustná zvodnělá vrstva (zvodnělá vrstva s přetékáním vody nebo poloizolátor), v tomto případě se jedná o geologickou formaci, která v porovnání s propustnou zvodnělou vrstvou může propouštět malé množství vody (PECH, 2010).

Posouzení, zdali se jedná o vrstvu propustnou, polopropustnou nebo nepropustnou je velmi relativní, protože ani jedna zemina není absolutně nepropustná nebo absolutně propustná (PECH, 2010).

7.1 Zvodnělá vrstva s volnou hladinou

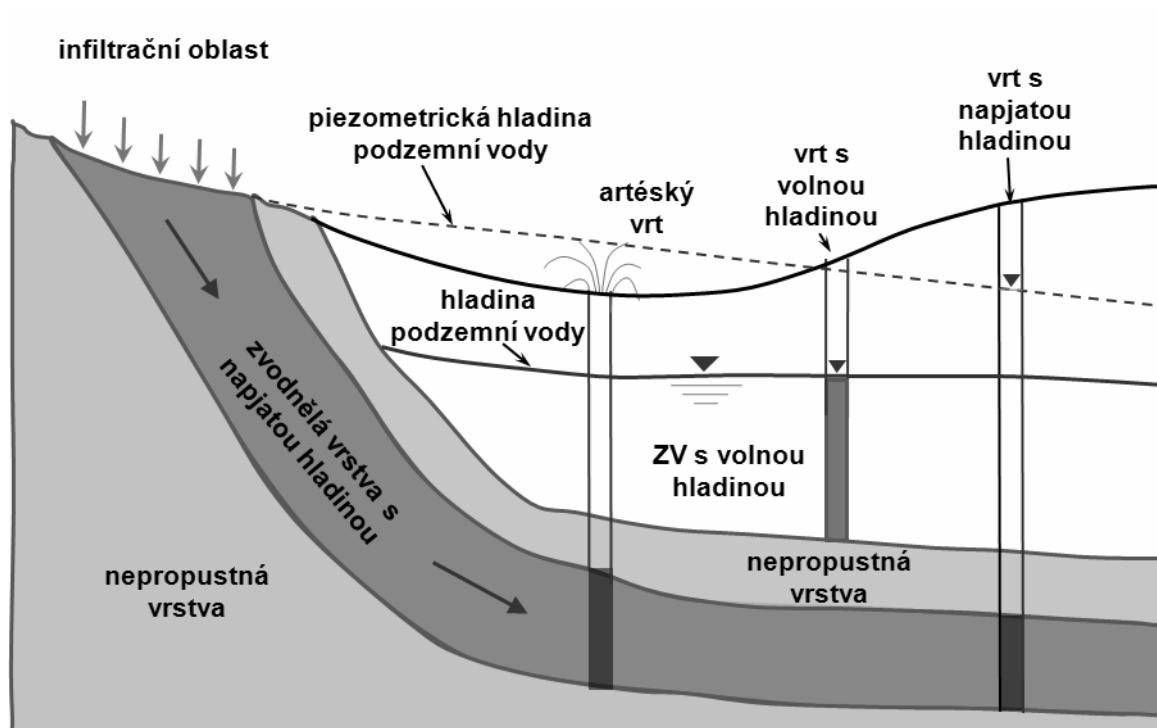
Tato vrstva je shora ohraničená volnou hladinou, na kterou působí atmosférický tlak. V realitě se nad hladinou podzemní vody nachází ještě kapilární zóna, která se z částí ještě připojuje mezi podzemní vody (PECH, 2010).

7.2 Zvodnělá vrstva s napjatou hladinou

Jedná se o vrstvu, která je zdola i shora ohraničena polopropustnou nebo nepropustnou zvodnělou vrstvou. Dále se můžeme v praxi setkat s případem, kdy se piezometrická hladina nachází nad zemským povrchem, pokud je tento vrt zapuštěn ve zvodnělé vrstvě s touto piezometrickou hladinou, v tom případě se jedná o tzv. artéský vrt. Proto se tato vrstva velmi často nazývá výrazem artéská zvodnělá vrstva (PECH, 2010).

7.3 Polopropustná vrstva s přetékáním

Polopropustná vrstva s přetékáním je zvodnělá vrstva získávající nebo ztrácející vodu přes sousední polopropustné vrstvy. Zvodnělá vrstva buď s napjatou nebo volnou hladinou. Na následujícím obrázku můžeme vidět znázorněné druhy zvodnělých vrstev (PECH, 2010).



Obrázek 2 - Typy zvodnělých vrstev (PECH, 2010)

8. Hydrogeologické a hydraulické vlastnosti zvodnělých vrstev

8.1 Storativita

Jde o vlastnost nasyceného zvodnělého prostředí nabývat nebo uvolňovat určité množství vody. Specifickou storativitu chápeme jako objem vody, který je uvolněn z jednotkového objemu zvodnělé vrstvy při jednotkovém poklesu piezometrické výšky (PECH, 2010). Můžeme rozlišovat několik typů storativity (zásobnosti):

8.1.1 Efektivní storativita

Hodnota storativity, která se efektivně uplatňuje v daném momentě procesu neustáleného proudění.

8.1.2 Opožděná storativita

Poměr objemu vody uvolněné z pórů do určitého časového okamžiku od snížení volné hladiny.

8.1.3 Pružná storativita

Schopnost horniny uvolnit z pružné zásoby podzemní vody v pórech nebo pojmout do pružné zásoby v pórech v důsledku pružnosti zvodněnce (objemové stlačitelnosti vody a horninového skeletu) určitý objem vody při změně

piezometrického napětí. Pružná storativita podmiňuje velikost pružných zásob podzemní vody.

8.1.4 Volná storativita

Storativita daná objemem pórů, ze kterých voda vyteče nebo do kterých přiteče při změně volné hladiny podzemní vody bez zahrnutí vody z přilehlé kapilární zóny.

8.1.5 Storativita volné hladiny

Storativita daná objemem pórů, ze kterých voda vyteče nebo do kterých přiteče při změně volné hladiny se zahrnutím vody, která při snížení volné hladiny odtéká i z kapilární zóny (BEAR, J., 1979).

8.2 Pórovitost

Pórovitost zvodnělých vrstev je podílem celkového objemu pórů (V_p) ku vymezenému objemu zvodnělé vrstvy (V_t).

$$n = \frac{V_p}{V_t} \quad (1)$$

Poté pokud daný výsledek vynásobíme stem dostaneme podíl póru v celkovém objemu v procentech. Např. písek 20 – 30 %, štěrk 25 – 50 %, hlína 35 – 50 %, jíl 40 – 70 %). Dále můžeme také určit aktivní nebo efektivní pórovitost.

8.2.1 Aktivní pórovitost

$$n_a = \frac{V_{pa}}{V_t} \quad (2)$$

V_{pa} – objem pórů, ze kterých se oddělí voda pouze v důsledku gravitace

8.2.2 Efektivní pórovitost

$$n_e = \frac{V_{pe}}{V_t} \quad (3)$$

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 (PECH, 2010).

8.3 Propustnost

Propustnost je rysem porézního prostředí. Ukazuje způsobnost materiálu propouštět vodu. Nesouvisí s vlastnostmi kapaliny. Propustnost můžeme vyjádřit tímto empirickým vztahem (BAZER, SCHWEIGER, 1969)

$$k_p = C d_{10}^2 \quad (4)$$

8.4 Hydraulická vodivost

Můžeme ji najít v Darcyho rovnici, kde se nachází jako koeficient. Její velikost je odrazem vlastností zvodnělého prostředí a vlastnostech kapaliny proudící v porézním prostředí. Lze ji vypočítat vztahem:

$$K = \frac{k_p \rho g}{\mu} \quad (5)$$

ρ – měrná hmotnost kapaliny [ML^{-3}]; m – 1000 kg/m^3

8.5 Transmisivita

Transmisivita neboli průtočnost je schopnost propouštět kapalinu zvodnělou vrstvou. V homogenním prostředí je určena jako součin výšky zvodnělé vrstvy a koeficientu hydraulické vodivosti.

$$T = b K \quad (6)$$

b – výška zvodnělé vrstvy, T – transmisivita [L^2T^{-1}]

9. Základní rovnice

9.1 Rovnice kontinuity

Jedná se o interpretaci fyzikálního zákona zachování hmoty. V mnoha případech si rovnici kontinuity zjednodušíme na tvar pro ideální kapalinu, která ustáleně proudí v uzavřené trubici proměnlivého průřezu S .

$$Q = S v = konst. \quad (7)$$

Z rovnice kontinuity vyplývá:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (8)$$

9.2 Darcyho rovnice

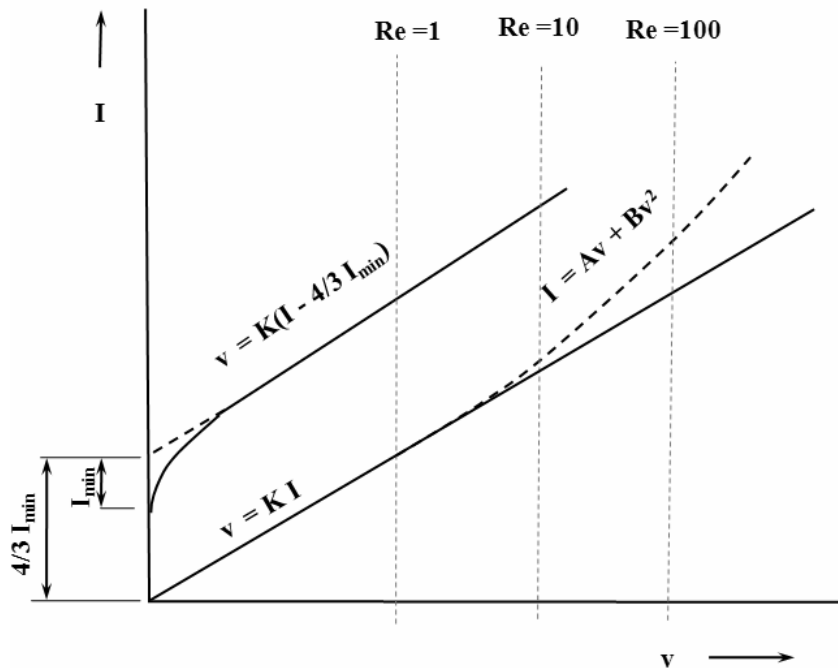
Jde o matematický vztah, který odvodil francouzský inženýr Henry Darcy (1803 – 1858) definuje rychlost průtoku kapaliny nasycenou zónou pevného porézního prostředí. Lineární závislost mezi filtrační rychlostí kapaliny v_f a piezometrickým gradientem I .

$$v_f = k I \quad (9)$$

kde I = piezometrický gradient $(h_1 - h_2)/L$, t. j. výškový rozdíl mezi úrovní hladiny h_1 nad vstupem do filtru a úrovní hladiny h_2 přiléhající k spodní výtokové ploše dělený délkou (výškou) filtru L

9.2.1 Meze platnosti Darcyho rovnice

Pro proudění v nasycené zóně platí Darcyho zákon, pro proudění v nenasyčené Darcy-Buckinghamův zákon. Z Darcyho zákona je zřejmé, že je souvislost mezi rychlostí vody, která proudí porézním prostředím a hydraulickým gradientem je lineární, ale tato lineárnost platí pouze v daných mezích.



Obrázek 3 - Meze platnosti Darcyho rovnice (PECH, 2010)

Reynoldsovo číslo (Re), přesněji řečeno jeho kritická hodnota se využívá pro určení přechodu mezi turbulentním a laminárním prouděním. Reynoldsovo číslo je bezrozměrné číslo znázorňující poměr třecích a setrvačných sil. Reynoldsovo číslo a jeho kritická hodnota je tehdy, dokud je zajištěn laminární režim proudění.

Darcyho vztah je neplatný, pokud je překročena daná kritická filtrační rychlost. V jemnozrnných materiálech je voda vázána velkými molekulárními silami, takže Darcyho vztah je v tomto případě platný až po překročení dané hodnoty hydraulického gradientu. Upravený Darcyho vztah: (MUCHA, 1987)

$$v = K \left(I - \frac{4}{3} I_{\min} \right) \quad (10)$$

Z tohoto vztahu je viditelné, že všechna voda v pórech se hned nedá do pohybu. Pro prachovité až hlinité zeminy se hodnoty I_{\min} nacházejí v rozmezí 0,3 - 0,5. Naopak u jílových zemin v rozmezí 0,5 – 1. V některých případech u jílových i více.

Využijeme-li definici Reynoldsova čísla (dle HÁLEK, ŠVEC, 1979)

$$Re_f = \frac{\rho v d_e}{\mu} \quad (11)$$

kde μ – dynamická viskozita [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$], d_e – efektivní průměr zrna [L]

Určení průměru zrna je v Reynoldsově čísle velmi náročné. V současnosti se setkáváme s využitím zrna o průměru d_{10} . Jedná se o takový průměr zrna, kde je v daném vzorku 10 procent z celku s menším průměrem než d_{10} .

Darcyho vztah platí do hodnoty Reynoldsova čísla = 1, dále do hodnoty Reynoldsova čísla zhruba 10 je odchylka velmi nízká a Darcyho vztah považujeme za platný. Pokud ale hodnota Reynoldsova čísla překročí hodnotu 10 a naruší laminární proudění tak nejlépe vyhovuje všeobecný tvar odporového zákona:

$$I = A v + B v^2 \quad (12)$$

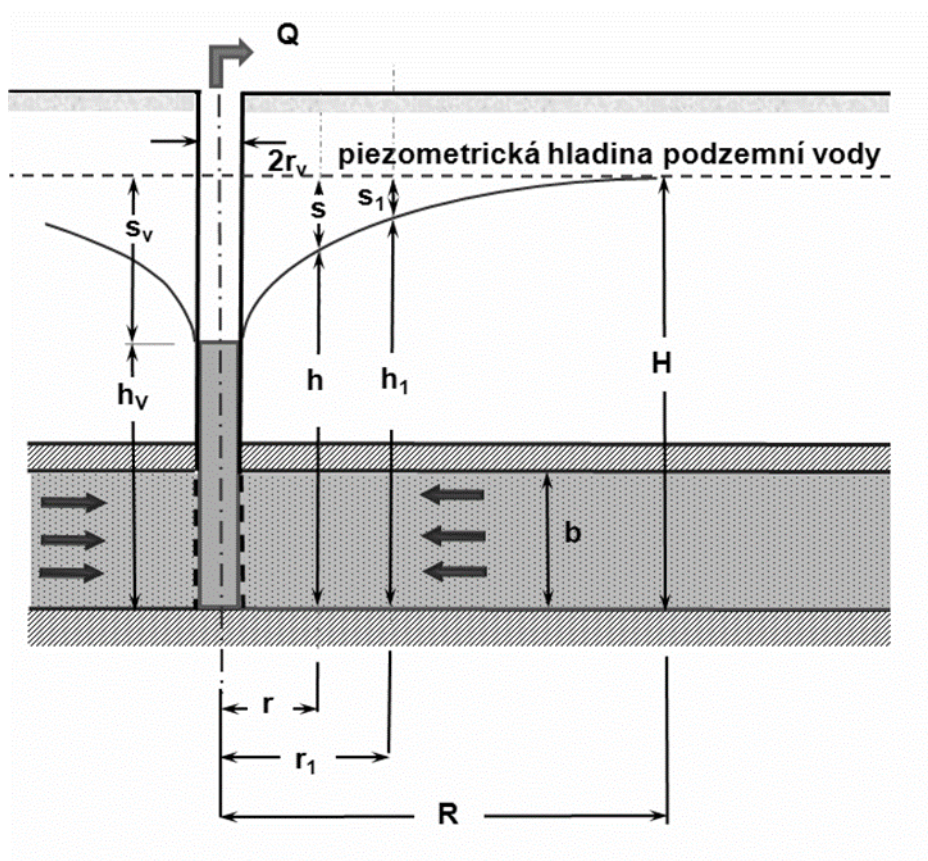
Při Reynoldsově čísle vyšším než 100 již dostáváme turbulentní proudění. Vztah mezi rychlostí a hydraulickým spádem I je kvadratický a v rovnici na pravé straně bude pouze s druhým členem.

$$I = B v^2 \quad (13)$$

V oblasti lineárního filtračního zákona se odehrává většina proudění podzemních vod. Turbulentní proudění v podzemních vodách nastává jen velmi zřídka. Jedním z příkladů jsou např. velké pukliny nebo krasové horniny.

10. Ideální vrt

Pojmem ideální vrt chápeme vrt, u kterého neuvažujeme dodatečné odpory. Tyto odpory neuvažujeme, jak ve vlastním vrtu, tak ani v jeho blízkém okolí. Blízkým okolím se rozumí okolí do cca 5 m od osy vrtu. Vliv objemu vody ve vrtu na počátku čerpací zkoušky se neuvažuje. Na hladině vody čerpaného vrtu začíná depresní křivka.



Obrázek 4 - Schéma úplného ideálního vrtu s napjatou hladinou (PECH, 2010)

10.1 Řešení neustáleného proudění k ideálnímu vrtu

Základní rovnice popisující neustálené radiálně symetrické proudění podzemní vody k vrtu v cylindrických souřadnicích má tvar (THEIS, 1935).

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S \partial s}{T \partial t} \quad (14)$$

Kde s - snížení (L); r - radiální vzdálenost (L); S - storativita zvodnělé vrstvy (-);

T - transmisivita zvodnělé vrstvy ($L^2 \cdot T^{-1}$); t - čas (T);

Řešení rovnice bylo publikováno C.V. Theisem (1935). C.V. Theis rovnici řešil za následujících předpokladů:

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

Řešení dle Theise (1935):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (15)$$

kde $W(u)$ je Theisova studňová funkce, která odpovídá tvaru nekonečné řady

$$W(u) = -\gamma - \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^n}{n!n} \quad (16)$$

$n = 1, 2, 3 \dots$

kde γ je Eulerova konstanta, která je rovna $\gamma = 0,577216$, u je argumentem Theisovy studňové funkce:

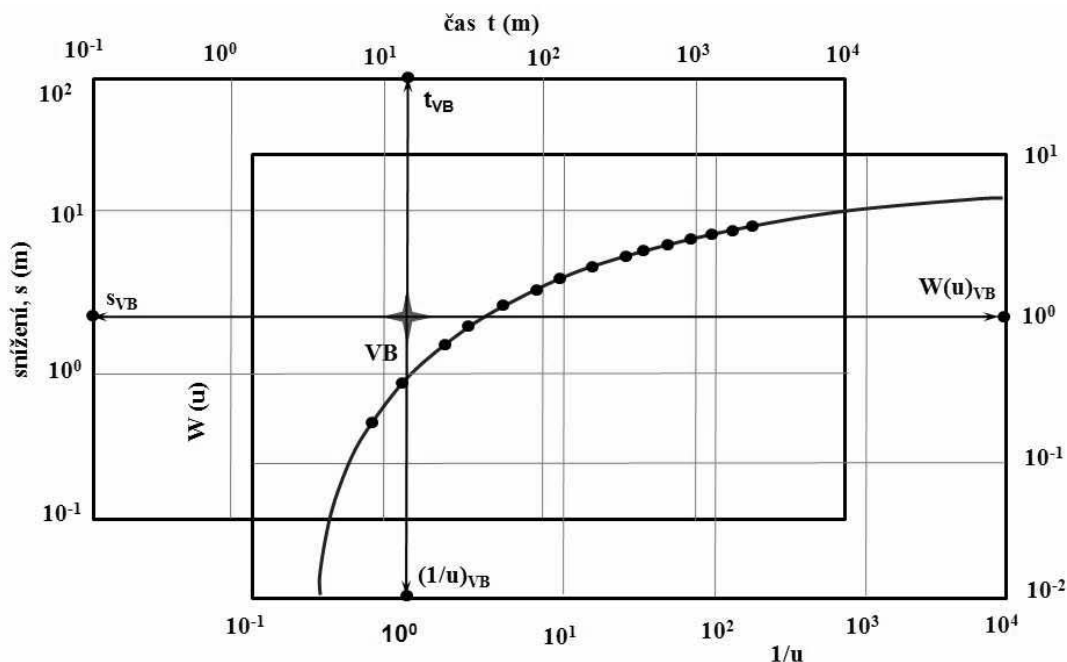
$$u = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (17)$$

K vyhodnocení čerpací zkoušky ideálního vrtu se využívá Theisova metoda typových křivek (THEIS, 1935). Pozdější časy čerpání (výskyt 2. přímkového úseku) vyhodnocujeme pomocí Jacobovy semilogaritmické aproximace (JACOB, C.E., 1946).

10.2 Theisova metoda typových křivek

Rovnice řešení dle Theise je využívána při vyhodnocování přítokových zkoušek za nestacionárního režimu proudění. V literatuře se setkáváme s touto metodou označovanou jako „Theisova metoda typové křivky“. Tuto rovnici můžeme využít k vyhodnocení storativity a transmisivity z hodnot naměřených čerpací zkouškou za neustáleného proudění, kdy průtok musí být konstantní a známe všechny ostatní parametry (THEIS, 1935).

Hodnotu snížení vody v závislosti na čase v odčerpávaném vrtu z čerpací zkoušky vyneseme v oddělených grafech ve stejném log-log měřítku odděleně. Je nutné, aby v obou grafech bylo totožné logaritmické měřítko, viz obrázek.



Obrázek 5 - Theisova metoda typových křivek (PECH, 2010)

Až posunem křivky, kterou jsme získali z reálné čerpací zkoušky po Theisově typové křivce docílíme shody. Určíme vztažný bod VB. U obou grafů odečteme pro tento bod hodnoty s_{VB} , t_{VB} , $(1/u)_{VB}$ a $W(u)_{VB}$.

Pokud do rovnice dosadíme $W(u)_{VB}$ a s_{VB} můžeme určit koeficient transmisivity:

$$T = \frac{Q}{4\pi s_{VB}} W(u)_{VB} \quad (18)$$

Dále dosazením hodnot $(l/u)_{VB}$ a t_{VB} do vztahu (číslo) pro argument Theisovy funkce určíme hodnotu koeficientu storativity:

$$S = \frac{4 T u_{VB} t_{VB}}{r^2} \quad (19)$$

Musíme, ale brát v potaz, že tuto Theisovu metodu typové křivky je možné použít na odčerpávaném vrtu pouze tehdy, kdy na vrtu a v jeho nedalekém okolí zanedbáváme dodatečné odpory a vlastní objem vrtu se také blíží zanedbatelné hodnotě (HANTUSH, M.S., 1966).

10.3 Jacobova metoda semilogaritmické přímky

U hodnot l/u větších než 100 a chybou menší než 0,25 % je možné Theisovu studňovou funkci (číslo) zjednodušit ignorováním třetího, čtvrtého a dalších členů na pravé straně. Dostaneme Jacobovu semilogaritmickou aproximaci studňové funkce (JACOB, C.E., 1946).

$$W(u) \cong -\gamma - \ln u \quad (20)$$

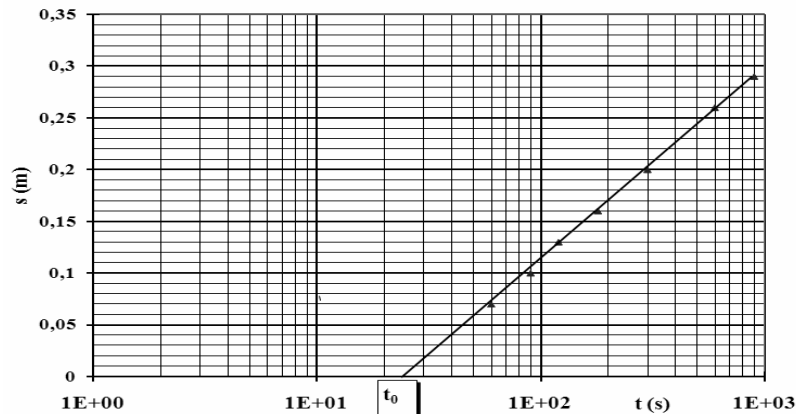
Pokud dosadíme za argument Theisovy studňové funkce u z rovnice (17) je možno po úpravě nahradit Theisovu studňovou funkci následujícím výrazem:

$$W(u) \cong \ln \frac{2,246Tt}{r^2 S} \quad (21)$$

Dosazením vztahu (21) do rovnice (15) dostaneme vztah pro snížení:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,2246Tt}{r^2 S} \quad (22)$$

Pokud můžeme využít naměřené údaje alespoň z jednoho pozorovacího vrtu je možné zjistit koeficient storativity S . Na následujícím obrázku jsou v grafu vyobrazeny hodnoty snížení s proti $\log t$ na pozorovacím vrtu.



Obrázek 6 - Čerpací zkouška na pozorovacím vrtu (PECH, 2010)

Koeficient transmisivity následně lze určit ze základní rovnice:

$$T = 0,183 \frac{Q}{i} \quad (23)$$

kde, Q je čerpané množství, a i je sklon, který získáme z následující rovnice:

$$i = \frac{(s_2 - s_1)}{(\log t_2 - \log t_1)} \quad (24)$$

Dále musíme vyjádřit koeficient storativity z následující rovnice:

$$S = 2,246 \frac{T t_0}{r^2} \quad (25)$$

kde, t_0 je „čas průsečíku“ přímky s horizontální časovou osou

11. Skutečný vrt

Pojmem skutečný vrt se rozumí vrt, kdy na odčerpávaném vrtu a v nejbližším okolí toho vrtu uvažujeme dodatečné odpory a jejich působení (CHU, W. C., et al., 1980). Do výpočtu také uvádíme účinek vlastního objemu odčerpávaného vrtu na počáteční úsek hydrodynamické zkoušky (AGARWAL, R.G., 1970).

S vyhodnocováním skutečných vrtů se velmi často setkáváme v naftové oblasti. V této oblasti byly navrženy postupy, které se týkaly určování velikosti dodatečných odporů. Nejčastější byla například metoda typových křivek (EARLOUGHER, R. C. Jr., 1977) či vztahy odvozené z velkého počtu praktických čerpacích zkoušek (RAGHAVAN, R., 1980). Určení koeficientu dodatečných odporů na vrtu se v hydraulice podzemních vody užívá jen velmi zřídka. Využívá se Jacobova semilogaritmická aproximace nebo stupňovitá čerpací zkouška (KRESIC, N., 2006).

11.1 Dodatečné odpory

Snížení hladiny vody ve „skutečném“ vrtu záleží na odporu porézního prostředí nasyceného vodou, viskozitě a na tzv. dodatečných ztrátách vznikajících ve vrtu, na jeho stěnách a blízkém okolí vrtu. Pojmem dodatečné odpory chápeme soubor jevů, které mají vliv na odchýlení naměřených hodnot snížení vody na „skutečném“ vrtu na rozdíl od teoretického snížení dosaženém za předpokladu „ideálního“ modelu proudění vody k úplnému vrtu (vrt u kterého se neuvažuje existence dodatečných odporů a vlastní objem vrtu se neprojeví do průběhu přítokové zkoušky, tzn. nedojde tímto objemem k ovlivnění snížení).

Zvýšení hladiny vody (resp. snížení) naměřené na odběrném vrtu je poté větší než výpočtové zvýšení (resp. snížení) hladiny vody ve vrtu, které by přivodilo existující hydraulický zásah pomocí hydrodynamicky dokonalého vrtu bez těchto dodatečných odporů. Někaké typy dodatečných odporů vznikají už při zhotovování vrtu, které vznikají nedokonalostí techniky a nedostatky při technologií hloubení. Například při nárazovém vrtání dochází ke zhutnění porézního prostředí v blízkém okolí vrtu a tím se sníží jeho propustnost (PECH, 2010).

Dodatečné odpory mohou být zapříčiněny také chemickými, hydromechanickými a dalšími jevy, které se vyskytují na vrtu a jeho okolí v průběhu používání vrtu (HURST, W., 1953). Určení dodatečných odporů (jejich velikosti) je nezbytné při určování storativity, kterou stanovujeme z údajů o snížení hladiny, které jsme naměřili na odběrovém vrtu při nestacionárním režimu proudění a při určení filtračního koeficientu za stacionárního režimu (VAN EVERDINGEN, A. F. and HURST, W., 1949).

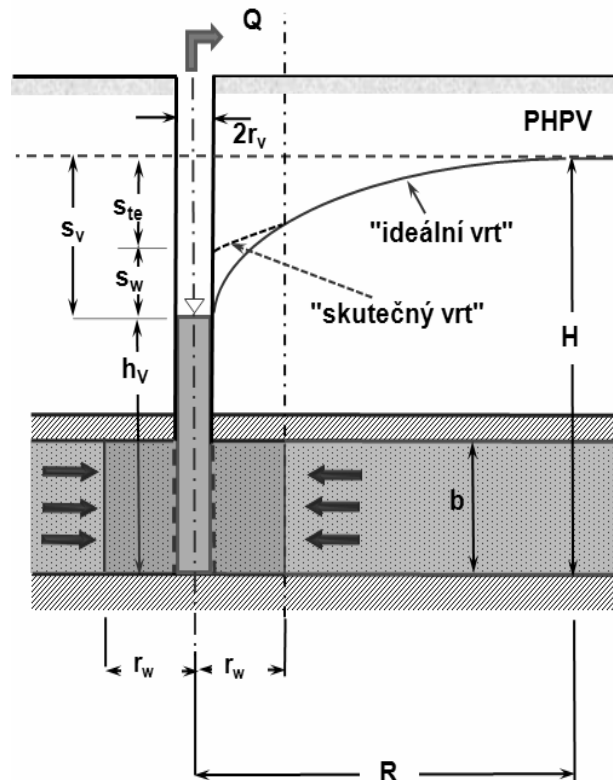
Část snížení, která připadá na působení dodatečných odporů lze rozčlenit na snížení, které je způsobené (KARANJAC, J., 1972):

– *kolmataci vrtu* (s_k), tzn. ucpání pórů jemným materiálem, díky kterému dochází ke snížení průtočnosti porézního prostředí, nebo při porušení původní vnitřní struktury porézního prostředí v blízkém okolí odběrového vrtu při jeho hloubení – jde o snížení propustnosti vlivem vniknutí výplachu do zvodnělé vrstvy

– *zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu* pro přítok vody (s_F) tam, kde je stěna vrtu tvořena filtrem nebo perforovanou pažnicí

– *neúplným průnikem* (s_P) – neúplným otevřením mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem (tzv. neúplné vrty)

- *ucpáváním* (s_i) – zachytáváním částiců horniny nebo obsypu v otvorech filtru (sem přiřazujeme ucpávání otvorů filtru působením mikroorganismů, bakterií a také chemickou inkrustací)
- *třením* (s_T) vody o stěny vrtu a její vnitřní tření (v této skupině uvažujeme i dodatečné odpory, které vznikají uvnitř vrtu turbulencí)
- *turbulentním režimem proudění* (s_{TP}) ve zvodnělé vrstvě, především v blízkém okolí odběrového vrtu
- *dalšími druhy dodatečných odporů* (s_o).



Obrázek 7 - Snížení na odběrovém vrtu (dodatečné odpory) (PECH, 2010)

Hromadné snížení, které připadá na působení dodatečných odporů můžeme vyjádřit:

$$s_w = s_K + s_F + s_P + s_I + s_T + s_{TP} + s_o \quad (26)$$

kde s_w je snížení způsobené dodatečnými odpory ve vrtu, s_K , s_F , s_P , s_I , s_T , s_{TP} , s_o jsou jednotlivá snížení způsobená různými druhy dodatečných odporů.

Oddělení jednotlivých složek dodatečných odporů je nadmíru problematické, a proto v této práci (jako v mnoho dalších publikacích, které se touto problematikou zabývají) bude k charakteristice dodatečných odporů využito sumárního bezrozměrného koeficientu dodatečných odporů W (v britské literatuře nazývané jako skin faktor).

Hromadné snížení hladiny vody naměřené v odběrovém vrtu během přítokové zkoušky můžeme vyjádřit vztahem:

$$s_v = s_{te} + s_w \quad (27)$$

kde s_{te} je teoretické snížení hladiny vody na tzv. „ideálním“ vrtu [L^2]
 s_w je dodatečné snížení hladiny vody ve vrtu vlivem dodatečných odporů [L]

Pokud zanedbáme část snížení, která působí nelineární odpory s_T a s_{TP} , je velikost dodatečného snížení v odběrovém vrtu závislá na odebírané vydatnosti Q podle lineárního vztahu (VAN EVERDINGEN, 1949).

$$s_v = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (28)$$

kde W je koeficient dodatečných odporů (bezrozměrný)

Pokud zahrneme vliv dodatečných odporů do celkového snížení na „skutečném“ vrtu při proudění s napjatou hladinou následovně:

- při stacionárním režimu proudění

$$s_v = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{R}{r_v} + W \right) \quad (29)$$

- při nestacionárním režimu proudění

a) při dosazení do Theisovy rovnice (15)

$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} (W(u) + 2W) \quad (30)$$

b) pro bezrozměrný čas $t_D > 25$ (více v kapitole 10.3)

$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2,246Tt}{r_v^2 S} + 2W \right) \quad (31)$$

Koeficient dodatečných odporů lze určit z rovnice (31)

$$W = \frac{2\pi T s_v}{Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{2,246Tt}{r_v^2 S} \quad (32)$$

což můžeme rozepsat

$$W = \frac{2\pi T s_v}{Q} - \frac{1}{2} \left(\ln t + \ln \frac{T}{r_v^2 S} + 0,8091 \right) \quad (33)$$

Pokud vyhodnocujeme semilogaritmický úsek přítokové zkoušky Jacobovou aproximací v tom případě se ani na pozorovacím vrtu, ani na odběrovém vrtu hladinový skok neprojevuje při výpočtech koeficientu transmisivity T a koeficientu hydraulické vodivosti K . Způsobeno je to tím, že dodatečné odpory neovlivňují směrnici přímkové části grafu. Ovlivní pouze délku a tvar počátečního úseku.

Specifickou vydatnost můžeme vypočítat z rovnice:

$$q = \frac{Q}{s_v} \quad (34)$$

kde, Q je čerpané množství, s_v je celkové snížení.

12. Hydrodynamické zkoušky

Hydrodynamickými zkouškami stanovujeme hydraulické charakteristiky vrtu a zvodně, jako kdyby pokračovalo čerpání a zároveň stejné množství vody bylo čerpáno do studny. Určují se pozorováním hydrodynamického zásahu do soustavy těchto kolektorů (JETEL, 1982).

Hydrodynamické zkoušky můžeme rozdělit do těchto základních skupin:

1. Čerpací zkouška

Na zkušebním objektu dojde ke stálému odebírání určitého množství vody, současně pozorujeme pokles hladiny a tlaku zvodnělé vrstvy. V dalších případech také sledujeme proměnlivost přítoku do objektu nebo konstantní snížení.

2. Odběrové zkoušky

Na objektu dochází k odběru kapaliny proměnlivě nebo konstantně.

3. Stoupací zkoušky

U těchto typů zkoušek můžeme pozorovat vzestup hladiny a vývoj tlakových poměrů po zastavení odběru.

4. Přítokové zkoušky

Při této zkoušce dojde k přítoku podzemní vody do objektu.

5. Diferenční zkoušky

Tato zkouška monitoruje změny hladiny a tlaku při konstantním odběru po změnách odebíraného množství kapaliny.

6. Nálevové zkoušky

U této zkoušky pozorujeme závislost hladin v pozorovacích objektech a množství vody, které přitéká do objektu.

7. Trubkové zkoušky

Jde o testovací zařízení, které zapustíme do pozorovaného vrtu na vrtných trubkách.

8. Vtlačovací zkoušky

Na objektu lze pozorovat závislosti tlaku na základě vtlačované kapaliny přetlakem.

Dále se budeme zabývat nejběžnějšími zkouškami, které se používají v praxi.

12.1 Čerpací zkouška

Jednoduchá definice čerpací zkoušky je zahrnuta v předchozí dvanácté kapitole. Čerpací zkoušku můžeme rozdělit na základě režimu proudění k pozorovanému objektu na:

Ustálený režim čerpací zkoušky – patří mezi nejjednodušší způsoby vyhodnocení a vychází z Dupuitových postulátů. Při zkoušce dochází ke konstantnímu odběru vody a v okolí vrtu nastane ustálený režim proudění (RIVERA, J.G. and RAGHAVAN, R., 1979). Přesnou hodnotu transmisivity lze vyjádřit z rovnice pro proudění podzemní vody k vrtu s napjatou hladinou:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_v} \ln \frac{r_d}{r_v} \quad (35)$$

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

Pokud se jedná o vrt s volnou hladinou použijeme následující rovnici:

$$H^2 - h_v^2 = \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{R}{r_v} \quad (36)$$

kde, Q je čerpané množství [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$], K je hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], R je poloměr dosahu depresního kužele [m], r_v je aktivní poloměr studny [m], H je mocnost zvodnělé vrstvy [m], h_v je výška vody ve studni [m]

Neustálený režim čerpací zkoušky – obdobně jako u ustáleného režimu čerpací zkoušky se čerpá konstantní množství podzemní vody. Pozorujeme pokles hladiny na daném objektu, který v určitých časových úsecích zaznamenáváme. Pokud vyžadujeme i určení storativity, musíme zaznamenat i snížení na pozorovacím vrtu.

Řešení neustáleného proudění k úplným vrtům je uvedeno v kapitole (10.1).

12.2 Odběrové zkoušky

Při odběrové zkoušce dochází ke konstantnímu snížení hladiny, zaznamenáváme časový průběh odebíraného průtoku (JETEL, 1982). Závislost času a snížení je vyjádřena Jacob – Lohmanovou rovnicí:

$$Q = 2\pi T s_v G(\lambda) \quad (37)$$

kde, T je koeficient průtočnosti [m^2/s], s_v je konstantní snížení hladiny ve vrtu [m], $G(\lambda)$ je Jacobova-Lohmanova studňová funkce.

12.3 Stoupací zkouška

V průběhu této zkoušky dojde k přerušení konstantního čerpání ve vrtu a hladina začíná stoupat. V určitém časovém intervalu z vrtu odčerpáme určité množství vody a posléze následným přerušením čerpání bude hladina ve vrtu stoupat stejně, jako kdyby pokračovalo čerpání vody. Zároveň do vrtu z povrchu přitéká stejná vydatnost čerpaného množství.

Vyhodnocením průběhu stoupacích zkoušek, konkrétněji stoupáním hladiny se zajímal hydrolog C. V. Theis. Který roku 1935 definoval metodu superpozice. Metodou superpozice lze také určit zbytkové snížení během stoupací zkoušky. Jedná se o součet snížení pokračovaného čerpání a záporného snížení na imaginárním vsakovacím vrtu (CHARBENEAU, 2006), nebo můžeme také použít Theisovy rovnice pro zbytkové snížení stoupací zkoušky.

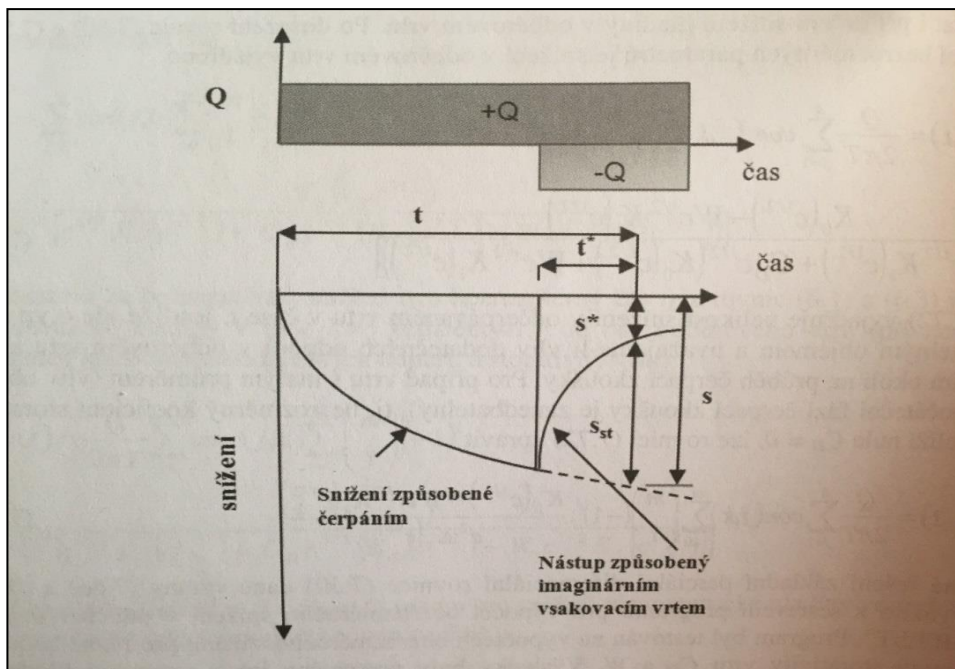
$$s^* = s + s_{st} \quad (38)$$

kde, s^* je výsledné snížení na vrtu [m], s je snížení z probíhající čerpací zkoušky [m], s_{st} je vzestup hladiny během stoupací zkoušky [m]

U imaginárního vsakovacího vrtu, neboli stoupací zkoušku lze využít platící rovnici vycházející z Theisovy studňové funkce (BATU, J., 1999).

$$u_{st} = \frac{r^2 S'}{4Tt^*} \quad (39)$$

kde, r je radiální vzdálenost od osy odčerpávaného vrtu [m], S' je storativita stanovená ze stoupací zkoušky [-], T je koeficient transmisivity [$m^2 \cdot s^{-1}$], t^* je měřený čas od zastavení čerpání [t]



Obrázek 8 - Průběh stoupací zkoušky (PECH, 2010)

12.4 Trubková zkouška

U této trubkové zkoušky (drill stem test) musíme využívat tzv. testery. Princip trubkové zkoušky: na začátku přerušíme hloubení vrtu, izolujeme nezapažený úsek, tento úsek odlehčíme od tlaku výplachu sloupce a následně dojde k přítoku ze zkoušeného kolektoru.

Máme různé druhy testerů, které se skládají z těchto následujících částí:

- gumový pakr, který je zapažený do izolovaného úseku vrtu,
- přítoková záklopka, která reguluje přítok,
- vyrovnávací záklopka, ta slouží k regulaci tlaku.

Do stěn pažnic se zapustí gumový pakr a otevřením vyrovnávací záklopky dojde k vyrovnání tlaku uvnitř pakru s atmosférickým tlakem. U tohoto případu uvažujeme odlišné hodnoty mezi tlakem v kolektoru a atmosférickým tlakem. Toto vyvolá přítok kapaliny do vrtných trubek přes tester. Tj. **1. fáze počátečního přítoku**, která trvá přibližně až 10 minut (JETEL, 1982).

Poté následuje **2. fáze počátečního vzestupu tlaku**, při níž dochází k uzavření přítokové záklopky a měříme tlakový vývoj po určitou dobu. Většinou se jedná o dobu 30 až 60 minut (JETEL, 1982). Výsledná hodnota na konci této fáze je rovna úrovni tlaku v kolektoru. Jde o počáteční tlak v uzavřeném vrtu.

Do **3. fáze patří hlavní přítok**. Hlavní přítok nastává, když se překročí hodnota počátečního tlaku v uzavřeném vrtu. V tomto důsledku se otevře přítoková záklopka

(musíme zaznamenat tlak při počátečním přítoku). Tato záklopka umožní opětovný přítok kolektorové kapaliny do vrtu. Třetí fáze většinou trvá 60 až 120 minut (JETEL, 1982).

Poslední fází je fáze závěrečného vzestupu tlaku, při níž se přeruší přítok kapaliny (musíme zaznamenat koncový tlak při přítoku), jelikož se uzavře přítoková záklopka. Dále pozorujeme tlakový vývoj po dobu minimálně 30 minut. Je nutné zaznamenat koncový tlak ve vrtu.

Po skončení všech čtyř fází otevřeme vyrovnávací klapky. Tester obezřetně vytáhneme na povrch i s obsahem kolektorové kapaliny v něm.

12.5 Expresní zkouška

Jedná se o metodu jednorázového nálevu. V důsledku aproximace Theisovy křivky stoupací zkoušky dali Ferris a Knowles podnět k využití metody jednorázového nálevu. Tuto metodu znázorňuje rovnice (36). Při pokusu Ferris a Knowles vpustili daný objem vody V do soustavy vrtu a posléze měřili pokles hladiny za čas.

$$V = \pi r_0^2 s_0 \quad (40)$$

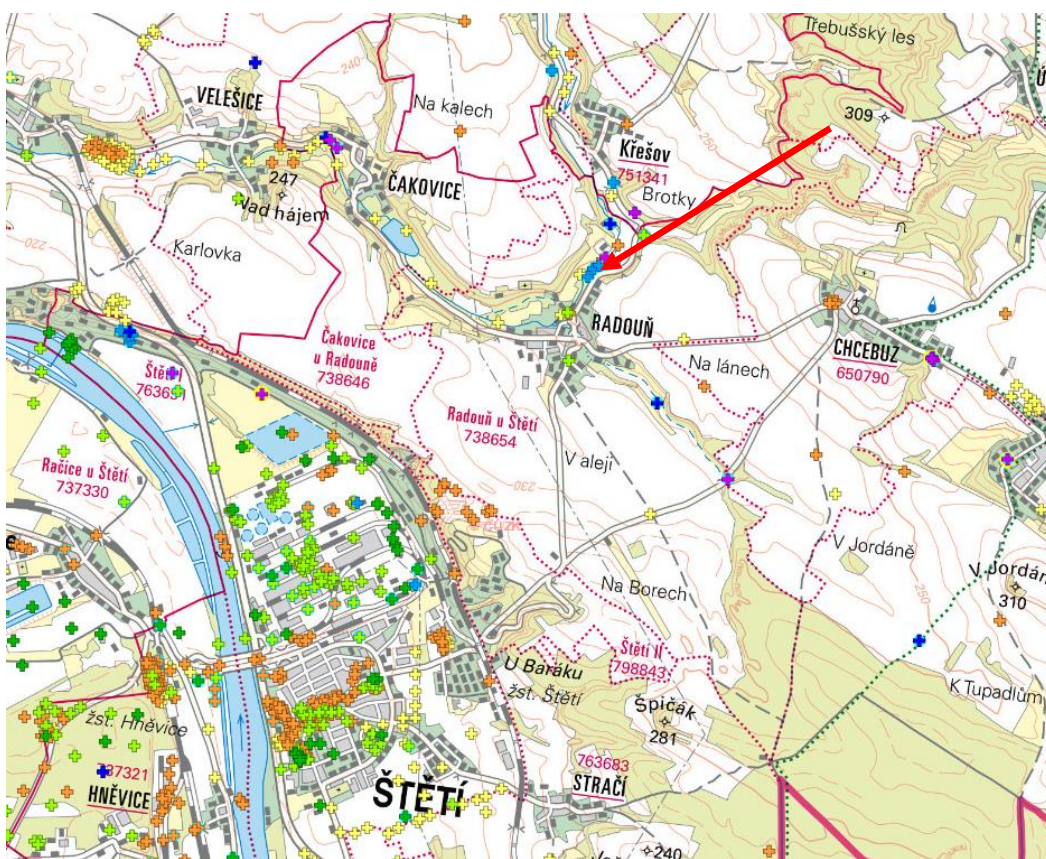
kde, V je nálev objemu do soustavy vrtu [m^3], r_0^2 je vnitřní poloměr vrtu [m], s_0 je zvýšení hladiny dodáním určitého objemu kapaliny [m^2]

13. Vyhodnocení regeneračního zásahu

V následující kapitole se budeme zabývat vyhodnocením regeneračního zásahu na reálném vrtu.

13.1 Popis zájmové lokality

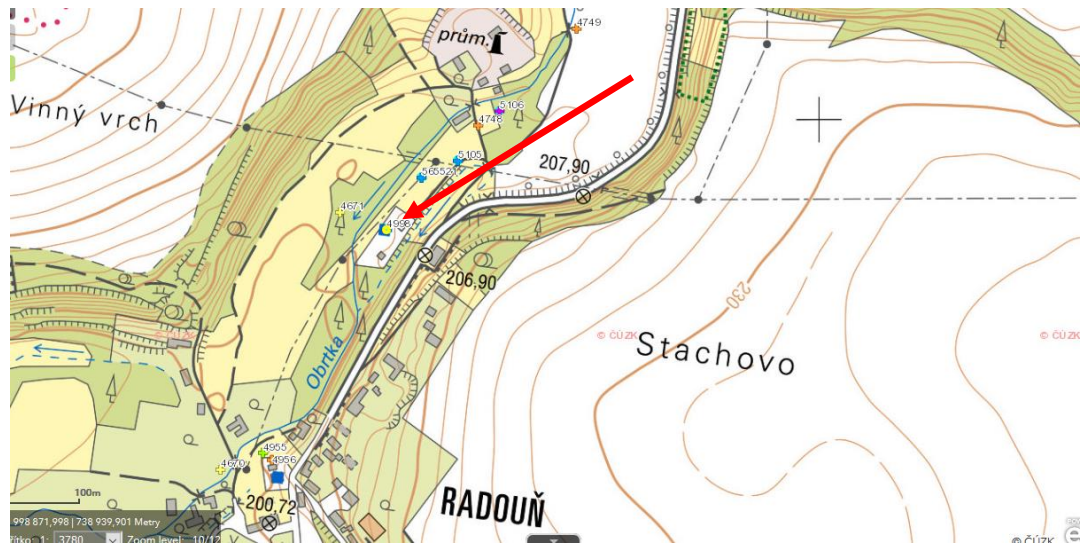
Jedná se o studnu RD-2 (Radouň). Studna RD-2 se umístěním nachází ve střední části severních Čech (Česká republika) v lokalitě čerpací stanice Radouň, provozované významnou vodárenskou společností. Tato lokalita se třemi čerpacími vrtů představuje jeden z několika páteřních vodní zdrojů v regionálním zásobování pitnou vodou, které zajišťují hlavní vodovodní městský a průmyslový areál mezi Mělníkem a Ústím nad Labem. Typická provozní čerpaná množství jsou velmi vysoká – až 55 m³/h. Vrt RD-2 je 50 metrů hluboký s překližkovou pažnicí.



Obrázek 9 - Lokalita vrtu RD-2 Radouň (zdroj: mapy.geology.cz, 2019)

13.2 Geologie a litologie v zájmové lokalitě

Čerpací místo se nachází v dolní části české křídlové pánve v poměrně mělkých pískovcových skalách letomanského stáří. Hladina podzemní vody je silně omezena (i při výskytu artézských studní) s překryvným nepropustným útvarem, který se skládá z turonských slínů a marlitů. Proud podzemní vody je silně vázán na pukliny v podloží, které tvoří typické filtrační prostředí s dvojitou porézností.



Obrázek 10 - Bližší zaměření lokality vrtu RD-2 (zdroj: mapy.geology.cz, 2019)

13.3 Regenerace vrtu

Vzhledem k pochybnostem o odolnosti pláště překližky (respektive trvanlivosti specifické pryskyřice vůči kyselinám) byly rehabilitační techniky značně omezeny na mechanické čerpání sedimentů s omezeným čištěním pomocí nylonových kartáčů.

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 11 - Atributy týkající se vrtu RD-2 (zdroj: mapy.geology.cz, 2019)

Zde můžeme vidět hlavní atributy týkající se vrtu RD-2 (Radouň). Je zde možné vyčíst, že se jedná o svislý vrt s původním názvem RD-2a. Vrt RD-2 je 50 metrů hluboký a byl zhotoven roku 1975. U vrtů v této lokalitě jsou typická velmi vysoká provozní čerpaná množství. Dosahující hodnot až 55 m³/h.

14. Vyhodnocení RD-2 před regenerací

Při vyhodnocování před regenerací využíváme vztahy, které jsou dopodrobna popsány v předchozích kapitolách. Hlavně využíváme výpočet sklonu, transmisivity, storativity, dodatečných odporů W , dodatečné snížení S_w a specifickou vydatnost.

Zaprvé jsme použili rovnici pro výpočet sklonu:

$$i = \frac{(s_2 - s_1)}{(\log t_2 - \log t_1)}$$

$$i = \frac{(3,98 - 3,84)}{(\log 900 - \log 500)}$$

$$i = 0,5484335267$$

S vypočteným sklonem můžeme dosadit do rovnice pro výpočet transmisivity:

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

$$T = 0,183 \frac{0,0148}{0,5484335267}$$

$$T = 0,004938429 \text{ m}^2/\text{s}$$

S vypočtenou transmisivitou dosadíme do následující rovnice a vypočteme storativitu:

$$S = 2,246 \frac{T t_o}{r^2}$$

$$S = 2,246 \frac{0,004938429 * 70}{40^2}$$

$$S = 0,000485262$$

Po vypočtení storativity jsme přešli k výpočtu dodatečných odporů:

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

$$W_1 = \frac{2\pi * 0,004938429 * 4}{0,0148} - \frac{1}{2} \left(\ln 500 + \ln \frac{0,004938429}{0,15^2} + 0,8091 \right)$$

$$W_1 = 5,632613631$$

$$W_2 = \frac{2\pi * 0,004938429 * 4}{0,0148} - \frac{1}{2} \left(\ln 600 + \ln \frac{0,004938429}{0,15^2} + 0,8091 \right)$$

$$W_2 = 5,541452852$$

$$W_3 = \frac{2\pi * 0,004938429 * 4}{0,0148} - \frac{1}{2} \left(\ln 700 + \ln \frac{0,004938429}{0,15^2} + 0,8091 \right)$$

$$W_3 = 5,466377513$$

Výsledná hodnota dodatečných odporů W je průměrem z hodnot W_1 , W_2 , W_3 :

$$W = 5,546147999$$

S průměrnou hodnotou dodatečných odporů počítáme dále v rovnici pro výpočet dodatečného snížení s_w :

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

$$s_w = \frac{0,0148}{2\pi * 0,004938429} 5,546147999$$

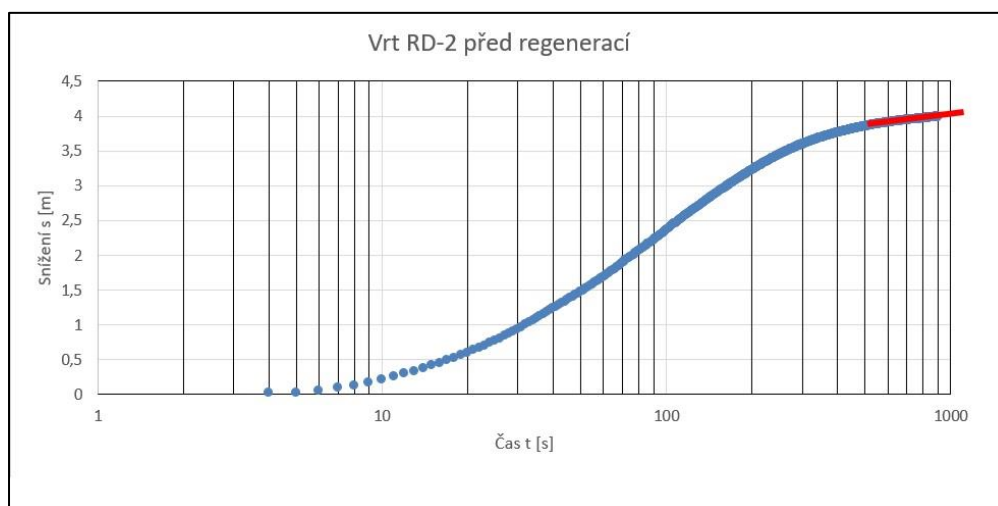
$$s_w = 2,64535823 \text{ m}$$

V závěru našich výpočtů zjistíme hodnotu specifické vydatnosti:

$$q = \frac{Q}{s_v}$$

$$q = \frac{0,0148}{4}$$

$$q = 3,7 * 10^{-3} = 0,0037 \text{ m}^2/\text{s}$$



Obrázek 12 - Vrt RD-2 před regenerací (AUTOR, 2019)

15. Vyhodnocení RD-2 po regeneraci

Při vyhodnocování po regeneraci využíváme stejných vztahů jako u vyhodnocení před regenerací. Hodnoty sklonu, storativity i transmisivity zůstávají stejné jako před regenerací.

$$i = 0,5484335267$$

$$T = 0,004938429 \text{ m}^2/s$$

$$S = 0,000485262$$

$$W = \frac{2\pi T s_v}{Q} - \frac{1}{2} \left(\ln t + \ln \frac{T}{r_w^2 S} + 0,8091 \right)$$

$$W_1 = \frac{2\pi * 0,004938429 * 3}{0,0142} - \frac{1}{2} \left(\ln 500 + \ln \frac{0,004938429}{0,15^2} + 0,8091 \right)$$

$$W_1 = 3,801816142$$

$$W_2 = \frac{2\pi * 0,004938429 * 3}{0,0142} - \frac{1}{2} \left(\ln 600 + \ln \frac{0,004938429}{0,15^2} + 0,8091 \right)$$

$$W_2 = 3,710655364$$

$$W_3 = \frac{2\pi * 0,004938429 * 3}{0,0142} - \frac{1}{2} \left(\ln 700 + \ln \frac{0,004938429}{0,15^2} + 0,8091 \right)$$

$$W_3 = 3,633580024$$

$$W = 3,71535051$$

Výsledná hodnota W je znovu průměrem z hodnot W_1 , W_2 , W_3 . Následně jsme pokračovali výpočtem dodatečného snížení:

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

$$s_w = \frac{0,0142}{2\pi * 0,004938429} * 3,71535051$$

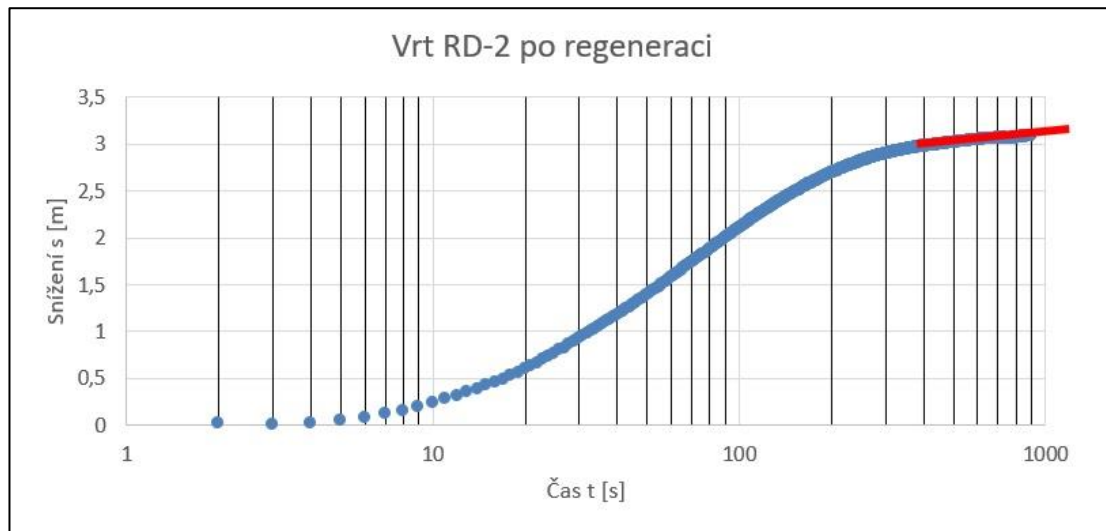
$$s_w = 1,700276131 \text{ m}$$

V závěru našich výpočtů zjistíme hodnotu specifické vydatnosti:

$$q = \frac{Q}{s_v}$$

$$q = \frac{0,0142}{3}$$

$$q = 4,733333333 \cdot 10^{-3} = 0,004733333333 \text{ m}^2/\text{s}$$



Obrázek 13 - Vrt RD-2 po regeneraci (AUTOR, 2019)

16. Diskuze

Pokud si prohlédneme výsledné hodnoty v následující tabulce, je zde viditelné zlepšení ve všech aspektech tohoto regenerovaného vrtu. Zmenšení dodatečných odporů na vrtu je příčinou velmi pozitivního výsledku této regenerace. Zmenšením hodnoty dodatečných odporů dochází ke zvýšení hodnoty specifické vydatnosti vrtu. Tato vydatnost vyjadřuje průměrnou schopnost dávky vody za stanovený čas při jednotkovém poklesu hladiny.

Před regenerací		Po regeneraci	
$i =$	0,5484335267	$i =$	0,5484335267
$T =$	0,004938429	$T =$	0,004938429
$S =$	0,000485262	$S =$	0,000485262
$W_1 =$	5,632613631	$W_1 =$	3,801813412
$W_2 =$	5,541452852	$W_2 =$	3,710655364
$W_3 =$	5,464377513	$W_3 =$	3,633580024
$\bar{W} =$	5,546147999	$\bar{W} =$	3,71535051
$s_w =$	2,64535823	$s_w =$	1,700276131
$q =$	0,0037	$q =$	0,004733333333

Dalším důležitým faktorem je poloha, kde se daný regenerovaný vrt nachází. S tímto faktorem souvisí jeho geologické a litologické poměry. Důvodem zlepšení hodnot po následné regeneraci může být také správně vybraná regenerační technika mechanického čerpání sedimentů a čištění pomocí nylonových kartáčů.

V širším významu této problematiky je důležité jakékoliv regenerace na vrtech provádět v kratším časovém horizontu a s určitou pravidelností. Při aktuálních problémech s nedostatkem vody by měla být regenerace vrtů a podzemní voda hlavním bodem diskuze.

17. Závěr

Na samotném začátku regenerace vrtu vzhledem k pochybnostem o odolnosti pláště překližky (respektive trvanlivosti specifické pryskyřice vůči kyselinám), bylo rozhodnuto o využití regenerační techniky mechanického čerpání sedimentů s omezeným čištěním pomocí nylonových kartáčů.

Pro vyhodnocení regeneračního zásahu byla provedena čerpací zkouška před i po regeneraci. Pomocí Jacobovy semilogaritmické aproximace byly určeny hodnoty storativity $S = 4,9384299 \cdot 10^{-3}$ a transmisivity $T = 4,85262 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Výpočtem bylo zjištěno, že velikost dodatečných odporů se snížila z hodnoty 5,55 před regenerací na 3,72 po následné regeneraci. Následující výsledek odpovídá zlepšení o cca 50 %. Snížení při vlivu dodatečných odporů na RD-2 před regenerací bylo 2,64 m a po následné regeneraci 1,70 m. Výsledek prokazuje zlepšení o cca 55 %. Specifická vydatnost vrtu byla před regenerací 0,0037 m²/s a po následné regeneraci 0,0047 m²/s, což prokazuje zlepšení o 27 %.

Výsledky u všech sledovaných faktorů po regeneraci prokazují procentuální zlepšení. Proto je možné tento regenerační zásah na reálném vrtu považovat za prospěšný.

Přehled literatury a použitých zdrojů

AGARWAL, R. G., Al-Hussainy, R., and Ramey, H. J. Jr. (1970) An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. Trans. Soc. Petroleum Eng. AIME, 249, p. 279–290. Trans AIME.

BATU, J. (1999) Aquifer hydraulics: A comprehensive Guide to hydrogeologic data analysis. John Wiley, New York, 727 p.

BEAR, J. (1979) Hydraulics of ground water. New York.

COOPER, H. H., Jr. and JACOB C. E. (1946) A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transaction, American Geophysical Union, 27, p. 526-534.

DARCY, H. (1856) Les Fontaines Publiques de la Ville Dijon. Dalmont, Paris, France.

EARLOUGHER, R. C. Jr. and Kersch, K. M. (1974) Analysis of Short-Time Transient Test Data by Type-Curve Matching. JPT.

EARLOUGHER, R. C. Jr. (1977) Advances in well test analysis. Monograph series. SPE of AIME. Dallas.

FREEZE R. A., CHERRY J. A. (1979) Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs. New Jersey.

HÁLEK, V. a ŠVEC, J. (1973) Hydraulika podzemní vody. Academia, Praha.

HANTUSH, M. S. (1966) Hydraulics of wells. Advances in Hydroscience, edited by Ven Te Chow, Academic Press, New York, p. 281–442.

HORNE, R. N. (1990) Modern well test analysis – A computer aided approach. Petroway, Inc.

HURST, W. (1953) Establishments of the skin effect and its impediment to fluid flow to a wellbore. Petr. Eng. Inst. 25, Dallas.

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

CHU, W. C., GARCIA-RIVERA, J. and RAGHAVAN, R. (1980) Analysis of interference test data influenced by wellbore storage and skin at the flowing well. JPT. Trans AIME, 249 p.

- JETEL, J. (1982) Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha.
- KARANJAC, J. (1972) Well Losses Due to Reduced Formation Permeability. Ground Water, Vol. 8, No 4.
- KRESIC, N. (2006) Hydrogeology and groundwater modeling. CrC Press, 807 p.
- LEE, J. (1982) Well Testing. SPE Textbook. Vol 1.
- MLS, J., (1988) Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha, 26s.
- MUCHA, I. (1987) Hydraulika podzemních vod. SNTL Praha.
- PECH, P. (1988) Nestacionární proudění kapaliny k úplnému „reálnému“ vrtu s napjatou hladinou. Vodohospodářský časopis, 36, č. 1, p. 71–85.
- PECH, P. (2003) Determination of the skin factor in the early portion of an aquifer test. J. Environ. Hydrology, vol. 11, p. 1–9.
- PECH, P., (2010) Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Vydavatelství ČZU, Praha, ISBN 978-80-87402-04-7.
- RAGHAVAN, R. and TONGPENYAI, I. (1981) The Effect of Wellbore Storage and Skin on Interference Test Data. JPT.
- 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.
- RIVERA, J. G. and RAGHAVAN, R. (1979) Analysis of Short-Time Pressure Data Dominated by Wellbore Storage and Skin. JPT
- THEIS, C. V., (1935) The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Trans. AGU, 16
- VALENTOVÁ J., (1994) Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha, 19s.
- WALTON W. C., 2006: Aquifer Test Modeling. CRC Press. Hardcover: 240 pages, ISBN-10: 1420042920
- VAN EVERDINGEN, A. F. and HURST, W. (1949) The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. J. of Petroleum Technology, Vol. 1, No. 12, Petrol Trans AIME, Vol. 186.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Vertikální rozdělení podzemních vod (PECH, 2010).....	5
Obrázek 2 - Typy zvodnělých vrstev (PECH, 2010)	7
Obrázek 3 - Meze platnosti Darcyho rovnice (PECH, 2010).....	11
Obrázek 4 - Schéma úplného ideálního vrtu s napjatou hladinou (PECH, 2010).....	13
Obrázek 5 - Theisova metoda typových křivek (PECH, 2010).....	15
Obrázek 6 - Čerpací zkouška na pozorovacím vrtu (PECH, 2010).....	17
Obrázek 7 - Snížení na odběrovém vrtu (dodatečné odpory) (PECH, 2010).....	19
Obrázek 8 - Průběh stoupací zkoušky (PECH, 2010)	24
Obrázek 9 - Lokalita vrtu RD-2 Radouň (zdroj: mapy.geology.cz, 2019).....	26
Obrázek 10 - Bližší zaměření lokality vrtu RD-2 (zdroj: mapy.geology.cz, 2019).....	27
Obrázek 11 - Atributy týkající se vrtu RD-2 (zdroj: mapy.geology.cz, 2019).....	28
Obrázek 12 - Vrt RD-2 před regenerací (AUTOR, 2019).....	30
Obrázek 13 - Vrt RD-2 po regeneraci (AUTOR, 2019)	32

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Zkrácený výběr dat před regenerací

Příloha č. 2 – Zkrácený výběr dat po regeneraci

Příloha č. 1 – Zkrácený výběr dat před regenerací

t (sec)	s (m)	t (sec)	s (m)	t (sec)	s (m)	t (sec)	s (m)
10	0,2107	52	1,5107	94	2,2693	136	2,7573
11	0,2523	53	1,5335	95	2,2797	137	2,7674
12	0,2927	54	1,5551	96	2,2981	138	2,7738
13	0,3338	55	1,576	97	2,3107	139	2,7894
14	0,3678	56	1,5981	98	2,325	140	2,7932
15	0,4103	57	1,6192	99	2,3415	141	2,8037
16	0,4472	58	1,6396	100	2,3495	142	2,8138
17	0,484	59	1,6594	101	2,3678	143	2,8212
18	0,5222	60	1,6814	102	2,3807	144	2,8336
19	0,5568	61	1,6967	103	2,3933	145	2,8382
20	0,5909	62	1,7227	104	2,4064	146	2,8494
21	0,6326	63	1,7413	105	2,4203	147	2,8585
22	0,661	64	1,761	106	2,4341	148	2,8697
23	0,6979	65	1,7822	107	2,4485	149	2,8776
24	0,7339	66	1,7998	108	2,4555	150	2,8815
25	0,764	67	1,8214	109	2,4721	151	2,8921
26	0,8039	68	1,8427	110	2,4857	152	2,8989
27	0,8364	69	1,8594	111	2,4967	153	2,9065
28	0,8645	70	1,8804	112	2,5091	154	2,9165
29	0,9019	71	1,9007	113	2,5156	155	2,9193
30	0,9328	72	1,9198	114	2,5301	156	2,9329
31	0,9655	73	1,9382	115	2,5425	157	2,9379
32	1,0001	74	1,9534	116	2,5509	158	2,9475
33	1,0271	75	1,9744	117	2,5665	159	2,9539
34	1,0618	76	1,9905	118	2,5733	160	2,9576
35	1,0916	77	2,0056	119	2,5876	161	2,9687
36	1,1154	78	2,0299	120	2,5979	162	2,9736
37	1,1503	79	2,0413	121	2,6053	163	2,9837
38	1,1772	80	2,0575	122	2,6175	164	2,9908
39	1,2016	81	2,076	123	2,6265	165	2,9991
40	1,2313	82	2,0919	124	2,6398	166	3,004
41	1,2554	83	2,1075	125	2,6501	167	3,0069
42	1,2848	84	2,1223	126	2,6587	168	3,0191
43	1,3111	85	2,1351	127	2,6749	169	3,026
44	1,3327	86	2,1549	128	2,677	170	3,035
45	1,3559	87	2,1657	129	2,6917	171	3,0398
46	1,3799	88	2,181	130	2,7015	172	3,0439
47	1,4037	89	2,1967	131	2,7102	173	3,0539
48	1,4258	90	2,2079	132	2,721	174	3,0591
49	1,4496	91	2,2292	133	2,7277	175	3,0689
50	1,4672	92	2,2394	134	2,7426	176	3,0747
51	1,4932	93	2,2544	135	2,7462	177	3,0796

Příloha č. 2 – Zkrácený výběr dat po regeneraci

t (sec)	s (m)	t (sec)	s (m)	t (sec)	s (m)	t (sec)	s (m)
10	0,2352	52	1,4213	94	2,0339	136	2,3902
11	0,2747	53	1,4406	95	2,0439	137	2,3947
12	0,3097	54	1,4606	96	2,0574	138	2,4019
13	0,3452	55	1,4772	97	2,0666	139	2,4067
14	0,3849	56	1,4954	98	2,0745	140	2,4095
15	0,4214	57	1,5184	99	2,0873	141	2,4197
16	0,4555	58	1,5317	100	2,0964	142	2,425
17	0,4872	59	1,5505	101	2,1065	143	2,4298
18	0,5243	60	1,5694	102	2,1162	144	2,4384
19	0,5594	61	1,5828	103	2,1281	145	2,4445
20	0,591	62	1,6007	104	2,1386	146	2,4465
21	0,6269	63	1,6196	105	2,145	147	2,455
22	0,6618	64	1,6363	106	2,1561	148	2,4621
23	0,6964	65	1,6485	107	2,165	149	2,4664
24	0,7288	66	1,6685	108	2,1725	150	2,4744
25	0,762	67	1,682	109	2,1827	151	2,4776
26	0,7961	68	1,697	110	2,1944	152	2,4829
27	0,8232	69	1,7135	111	2,1974	153	2,4874
28	0,8581	70	1,7291	112	2,2087	154	2,4948
29	0,8904	71	1,741	113	2,2183	155	2,4969
30	0,9192	72	1,7578	114	2,2276	156	2,5034
31	0,9445	73	1,7741	115	2,2353	157	2,5106
32	0,9727	74	1,7875	116	2,2437	158	2,5106
33	1,0006	75	1,8001	117	2,2523	159	2,5195
34	1,0268	76	1,8139	118	2,2564	160	2,525
35	1,0525	77	1,8249	119	2,2658	161	2,5262
36	1,077	78	1,8401	120	2,2746	162	2,5343
37	1,1008	79	1,8561	121	2,2803	163	2,5405
38	1,1244	80	1,8677	122	2,2904	164	2,5408
39	1,1508	81	1,8792	123	2,2977	165	2,5491
40	1,1711	82	1,8913	124	2,3038	166	2,5507
41	1,19	83	1,907	125	2,3122	167	2,5568
42	1,2134	84	1,9198	126	2,3211	168	2,5618
43	1,2362	85	1,9299	127	2,3299	169	2,5692
44	1,256	86	1,9409	128	2,3357	170	2,5701
45	1,2791	87	1,9537	129	2,3418	171	2,5741
46	1,3007	88	1,9638	130	2,3456	172	2,5805
47	1,3226	89	1,9782	131	2,3543	173	2,5835
48	1,3377	90	1,9916	132	2,3639	174	2,588
49	1,3584	91	2,0018	133	2,3703	175	2,5935
50	1,3825	92	2,0112	134	2,3732	176	2,5959
51	1,4012	93	2,0257	135	2,3823	177	2,6002