

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**



**Čištění vrtu a vyhodnocení jeho efektu z hydrodynamické
zkoušky**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Matěj Stočes

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

© 2024 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matěj Stočes

Vodní hospodářství

Název práce

Čištění vrtu a vyhodnocení jeho efektu z hydrodynamické zkoušky

Název anglicky

Well cleaning and evaluation of its effect from hydrodynamic test

Cíle práce

Popsat typy hydrodynamických zkoušek na vrtech a uvést metody čištění vrtů.

Na vybraném čištěném vrtu vyhodnotit účinek čištění pomocí metod založených na neustáleném proudění podzemní vody k reálnému vrtu.

Metodika

Zpracovat přehled hydrodynamických zkoušek.

Uvést přehled dodatečných odporů na vrtu a jeho blízkém okolí.

Popsat metody používané k čištění vrtů.

Na vybraném vrtu pomocí čerpací zkoušky provedené před a po čištění vrtu vyhodnotit koeficient dodatečných odporů metodami neustáleného proudění a výsledky porovnat.

Diskuse.

Závěr

Doporučený rozsah práce

30 – 40 str.

Klíčová slova

vrt, čerpací zkoušky, regenerace, skin faktor

Doporučené zdroje informací

PECH, Pavel; ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. FAKULTA AGROBIOLOGIE, POTRAVINOVÝCH A PŘÍRODNÍCH ZDROJŮ. *Speciální případy hydrauliky podzemních vod*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T.G. Masaryka, 2010. ISBN 978-80-87402-04-7.

VALENTOVÁ, Jana; ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA. *Hydraulika podzemní vody*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03625-9.

WALTON, William Clarence. *Aquifer test modeling*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. ISBN 1420042920.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 16. 3. 2024

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Pavla Pecha, CSc. a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

Svým podpisem prohlašuji, že tištěná verze je shodná s verzí odevzdanou elektronicky a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souladu s GDPR.

Ve Všetatech:

Poděkování

Chtěl bych tímto vyjádřit poděkování vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Pechovi, CSc. za odborné vedení práce, trpělivost a cenné rady, se kterými mi byl v průběhu psaní práce k dispozici.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá čištěním vrtu a vyhodnocením jeho efektu z hydrodynamické zkoušky. Práce je rozdělena na dvě hlavní kapitoly, teoretickou a praktickou. V teoretické části je objasněna problematika proudění podzemní vody, je uveden přehled dodatečných odporů a hydrodynamických zkoušek na vrtech spolu s metodami používanými k jejich regeneraci.

Hlavním cílem praktické části je vyhodnocení efektivity čištění vrtu a jeho okolí pomocí čerpacích zkoušek provedených před a po regeneraci. Metody založené na neustáleném proudění podzemní vody jsou aplikovány k vybranému vrtu, aby byl posouzen vliv čištění na koeficient dodatečných odporů. Literární rešerše je využita k posouzení různých typů hydrodynamických zkoušek a metod čištění vrtů, zatímco pomocí Jacobovy semilogaritmické metody jsou vyhodnoceny výsledky naměřených dat.

Závěrem práce je vyhodnocení úspěšnosti provedené regenerace na vybraných vrtech, což je přínosem v oblasti údržby a optimalizace provozu vrtů.

Klíčová slova: vrt, regenerace, čerpací zkoušky, skin faktor

Abstract

This bachelor thesis deals with the cleaning of a borehole and the evaluation of its effect from a hydrodynamic test. The thesis is divided into two main chapters, theoretical and practical. The theoretical part explains the groundwater flow and gives an overview of additional resistances and hydrodynamic tests on boreholes, together with the methods used for their recovery.

The main objective of the practical part is to evaluate the effectiveness of cleaning the borehole and its surroundings by means of pumping tests carried out before and after regeneration. Methods based on continuous groundwater flow are applied to a selected borehole to assess the effect of cleaning on the coefficient of additional resistances. A literature search is used to assess different types of hydrodynamic tests and well cleaning methods, while the results of the measured data are evaluated using Jacob's semilogarithmic method.

The paper concludes with an evaluation of the success of the performed regeneration on the selected wells, which provides benefits in the field of maintenance and optimization of well operations.

Keywords: bore hole, regeneration, pumping tests, skin factor

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Cíle práce	2
3.	Metodika	3
4.	Podzemní voda	4
5.	Zvodnělé vrstvy.....	4
5.1	Vrstva s volnou hladinou.....	5
5.2	Vrstva s napjatou hladinou	5
5.3	Vrstva polopropustná s přetékáním	5
6.	Charakteristiky zvodnělých vrstev	6
6.1	Hydraulická vodivost, propustnost.....	6
6.2	Pórovitost	6
6.3	Transmisivita.....	7
6.4	Storativita.....	7
7.	Proudění podzemní vody.....	8
7.1	Darcyho zákon	8
7.2	Rovnice kontinuity	11
8.	Dodatečné odpory	12
8.1	Kolmatační odpory.....	14
8.2	Odpory vznikající neúplným otevřením mocnosti zvodně	14
8.3	Odpory vznikající uvnitř vrtů.....	14
8.4	Skin faktor	15
9.	Regenerace vrtů.....	16

9.1	Mechanická regenerace.....	16
9.2	Chemická regenerace	18
10.	Hydrodynamické zkoušky.....	18
10.1	Čerpací zkouška	19
10.2	Odběrová zkouška.....	21
10.3	Stoupací zkouška.....	21
11.	Vyhodnocení efektu provedené regenerace.....	22
11.1	Popis lokality.....	23
11.2	Geologická situace řešené lokality	23
11.3	Popis jednotlivých vrtů	24
11.4	Provedený regenerační zásah	25
11.5	Vyhodnocení efektu regeneračního zásahu	26
12.	Diskuze.....	32
13.	Závěr	33

1. Úvod

V dnešní době, kdy nedostatek pitné vody představuje jeden z problémů pro budoucí generace, je třeba efektivně využívat podzemní zdroje pitné vody. Srážkově podprůměrná období v letech minulých přetrvávající do současnosti nás spolu s narůstající spotřebou vody nutí k maximálnímu využívání podzemních zdrojů. Tato situace vyžaduje systematický přístup jak k vrtání nových vrtů, tak k optimalizaci vrtů existujících. Technologický pokrok nám umožňuje jímat vodu z větších hloubek než v minulosti, kdy studny dosahovaly hloubky pouze několika metrů.

Henry Darcy, jenž byl jedním z klíčových průkopníků v oblasti hydrauliky podzemních vod, se zabýval poznáním proudění podzemních vod skrz porézní prostředí a jeho práce se stala prvotním nástrojem pro jeho pochopení. Objevy, pod kterými je Darcy podepsaný, zejména Darcyho zákon, popisující vztah mezi rychlostí proudění a hydraulickým spádem, následně posloužily jako základní kameny pro další výzkum v oblasti hydrogeologie. V pozdějších letech pokračoval v Darcyho stopách hydrolog C. V. Theis, který se ovšem hlouběji zaměřil na problematiku hydrodynamických zkoušek. Jeho práce vedla k vývoji metodologie využívající typové křivky a později byla tato Theisova metoda dále zdokonalena pomocí Jacobovy semilogaritmické metody.

Téma bakalářské práce bylo zvoleno s úmyslem hlouběji porozumět problematice hydrodynamických zkoušek a samostatně ověřit efektivitu vlastních regeneračních zásahů na vrtech.

2. Cíle práce

Teoretická část práce je cílena na zpracování literární rešerše zdrojů týkající se oblasti regenerace vrtů. Budou vysvětleny základní pojmy z oboru hydrauliky podzemních vod, které se týkají zejména proudění podzemní vody porézním prostředím. Budou zde přehledně popsány typy hydrodynamických zkoušek a uveden přehled dodatečných odporů na vrtu a jeho blízkém okolí.

V části praktické je cílem vyhodnotit účinek čištění na dvou vybraných vrtech vrtu pomocí čerpacích zkoušek s využitím metod, založených na neustáleném proudění podzemní vody k reálnému vrtu a výsledky porovnat.

3. Metodika

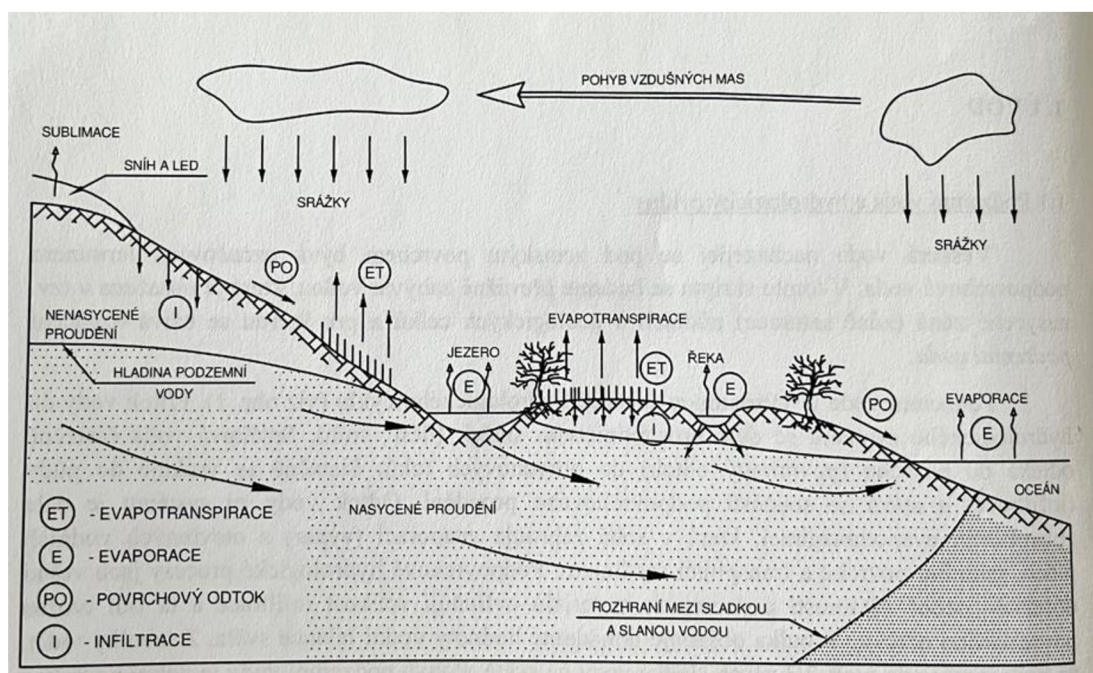
Jako první bylo vhodné nastínit obecnou charakteristiku podzemní vody z hlediska jejího významu pro člověka a následně uvést základní problematiku vztahující se k rozdělení zvodnělých vrstev. Následně bylo nutné vysvětlit hydraulické vlastnosti zvodnělých vrstev jako je hydraulická vodivost, transmisivita nebo storativita. Další kapitola je zaměřená na proudění podzemní vody, které je analyzováno pomocí rovnice kontinuity a Darcyho zákona. Během této analýzy byly stanoveny hranice platnosti Darcyho zákona, které jsou ovlivněny Reynoldsovým číslem. Dále byly detailně vysvětleny dodatečné odpory a vytvořen přehled těchto odporů spolu s rovnicemi pro výpočet skin faktoru.

V následující části bakalářské práce je vysvětlena regenerace vrtů, proč je důležité její použití a jsou popsány její druhy jak mechanické, tak chemické. Po regeneraci následuje popsání hydrodynamických zkoušek. Je vysvětlen jejich základní význam, uveden jejich přehled a detailní popis vybraných druhů hydrodynamických zkoušek, zvýšená pozornost je věnována především zkouškám čerpacím.

V praktické části se práce soustředí na vyhodnocení účinků provedené regenerace na dvou zvolených reálných vrtech. Kapitola obsahuje detailní popis lokality ze dvou hledisek - geografického a geologického, jejichž charakteristikami jsou podrobně popsány oba vybrané vrty. Poté je proveden vlastní výpočet pro vyhodnocení úspěšnosti regeneračního zásahu. Jsou použity především rovnice pro výpočet transmisivity, velikosti dodatečných odporů a snížení, způsobené dodatečnými odpory.

4. Podzemní voda

Podzemní voda, tvořící součást celkového oběhu vody na Zemi, je oproti vodě povrchové tekoucí ve vodních tocích nebo v nádržích ukrytá pod zemským povrchem. Podzemní voda se vyskytuje ve formě prosté, případně v určitých částech území ve formě minerální, to záleží na geologických vlastnostech daného území. Na povrch zemský vyvěrá v podobě pramenů, ale už historicky byla jímána pomocí kopaných studní, které na některých místech slouží pro regionální zásobování vodou do dnešní doby. S tím souvisí i to, že první osídlení vznikala v oblastech vyvěrajících pramenů a kolem řek. Podle zdrojů můžeme podzemní vodu rozdělit na přírodní, indukovanou a umělou. Základními hydrogeologickými tělesy jsou kolektory, izolátory, případně poloizolátory. (KRÁSNÝ et al., 2012) Pohyb podzemní vody je proti vodě povrchové, která má dobu zdržení v řece zhruba dva týdny, velmi pomalý. Doba jejího zdržení se pohybuje v řádech desítek až desetitisíců let. (VALENTOVÁ, 2018)



Obrázek 1- Hydrologický cyklus (VALENTOVÁ, 2018)

5. Zvodnělé vrstvy

Zvodeň neboli kolektor, je nasycené zvodnělé prostředí. To propouští vodu a poskytuje významné množství vody. Voda v této vrstvě proudí snáze než ve vrstvě, která nedisponuje schopností významné množství vody propouštět. Tato vrstva je pak nazývána jako izolátor. (PECH, 2010)

5.1 Vrstva s volnou hladinou

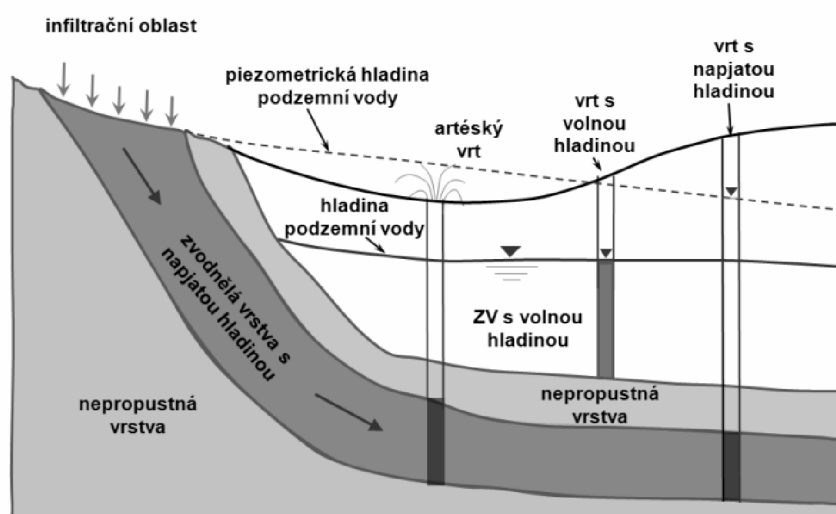
Jako zvodnělá vrstva s volnou hladinou se označuje především vrstva, jež je na své horní straně ohraničená volnou hladinou takovou, na níž působí atmosférický tlak. Je známo, že ve skutečnosti se nad hladinou podzemní vody v této vrstvě vyskytuje tzv. kapilární zóna, která se připojuje k vrstvě podzemních vod z třetiny své výšky. (PECH, 2010)

5.2 Vrstva s napjatou hladinou

Vrstva, kterou odděluje nepropustná nebo polopropustná zvodnělá vrstva jak shora, tak i zdola je popisována jako vrstva s napjatou hladinou. Voda v této vrstvě vyplňuje veškeré její póry. Voda nacházející se v pórech má větší tlak, než je tlak atmosférický. (WALTON, 2006) Piezometrická hladina, pro jejíž měření se využívá přístroj piezometr, je ve zvodnělé vrstvě hladina vody, která vystoupá až nad úroveň horní nepropustné nebo polopropustné vrstvy. Ve výjimečných případech může nastat stav, že se piezometrická hladina podzemní vody vyskytuje nad zemským povrchem, potom je možné hovořit o artézské studni, zvodni, případně kolektoru. Často bývá podle artézské studně pojmenovaná celá vrstva, tedy artézská zvodnělá vrstva. (PECH, 2010)

5.3 Vrstva polopropustná s přetékáním

Tato vrstva se může vyskytovat buď s volnou nebo napjatou hladinou. Jako polopropustná vrstva s přetékáním se označuje vrstva, která může být dotovaná vodou nebo odvádí vodu přes polopropustné vrstvy, jimiž je obklopená. (PECH, 2010)



Obrázek 2- Druhy zvodnělých vrstev (PECH, 2010)

6. Charakteristiky zvodnělých vrstev

6.1 Hydraulická vodivost, propustnost

Filtrační koeficient K (koeficient hydraulické vodivosti), označující hydraulickou vodivost jako jeden ze členů Darcyho rovnice, může být například definován jako hustota toku. Podmínkou, která v tomto případě musí být splněná je však dosažení jednotkového hydraulického gradientu. Velikost filtračního koeficientu je přímo závislá na vlastnostech proudící kapaliny a porézního prostředí. Zejména se tímto myslí veličiny jako jsou hustota kapaliny a její viskozita, dále například zrnitostní složení a tvar zrn. Pro definici hydraulické vodivosti používáme jednotky $[L.T^{-1}]$. (VALENTOVÁ, 2018)

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

Kde platí, že:

k – propustnost $[L^2]$

ρ – hustota kapaliny $[M.L^{-3}]$

μ – dynamická viskozita kapaliny $[M.L^{-1}.T]$

Propustnost skrz porézní prostředí k , závisí, jak je dáno dle názvu, pouze na vlastnostech daného porézního prostředí. Jeho hodnotu můžeme stanovit dvěma způsoby. Lze použít výpočet pomocí vztahů, které jsou historicky založené na empirickém výzkumu nebo mohou být fyzikálního původu. (VALENTOVÁ, 2018) Příklad empirického vzorce pro výpočet je:

$$k = cd^2$$

Kde platí, že:

c – koeficient (např. hodnota pro čistý písek 140)

d – efektivní průměr zrna $[L]$

6.2 Pórovitost

Pórovitost horninového nebo půdního materiálu představuje procentuální podíl celkového objemu materiálu, který je vyplněn póry. Jedná-li se o nasycené prostředí, jsou póry vyplněny vodou, pokud je prostředí nenasyčené, jsou póry obvykle vyplněny vzduchem. Určení pórovitosti se provádí na nestlačeném ani jinak poškozeném vzorku

materiálu. (BOUWER, 1978) Pórovitost se uvádí v procentech a vypočítá se dle vzorce:

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} * 100$$

Kde platí, že:

n – pórovitost [%]

V_t – celkový objem vzorku [L³]

V_s – objem pevné části [L³]

6.3 Transmisivita

Transmisivita T neboli koeficient průtočnosti je další z parametrů, kterými lze popsat propustnost vody prostředím. Pokud uvažujeme kolektor s napjatou hladinou o výšce B a šířce W , pak definujeme transmisivitu jako průtok kolektorem stanovené výšky a šířky při splnění podmínky dosažení jednotkového hydraulického spádu. Jednotky transmisivity jsou [L².T⁻¹]. (VALENTOVÁ, 2018)

$$T = BK$$

Kde platí, že:

B – výška kolektoru [L]

K – koeficient hydraulické vodivosti [L.T⁻¹]

6.4 Storativita

Za schopnost nasyceného prostředí absorbovat či propustit konkrétní objem vody považujeme veličinu, označenou jako storativita. Pružná storativita S_p , jejíž koeficient je příznačný pro nasycenou zvodnělou vrstvu s napjatou hladinou, je definována jako objem vody uvolněný z jednotkové plochy této nasycené vrstvy při jednotkovém poklesu hydrostatického tlaku. Jedná se o bezrozměrný parametr, který lze vypočítat podle následujícího vzorce:

$$S = (\text{objem vody}) / [(\text{jednotková plocha}) \cdot (\text{jednotková změna})]$$

Specifická storativita je chápána jako určitý objem vody, který se obvykle uvolní při dosažení jednotkového poklesu piezometrické výšky z jednotkového objemu zvodnělé vrstvy. Pokud nastane stav, během kterého dochází k poklesu hydraulické výšky h , pak se v souladu s daným snižováním zvyšuje efektivní napětí σ_{ef} v kapalině

v návaznosti na snížení tlaku. Jsou známy dva mechanismy, vedoucí k uvolnění vody zadržené v porézním prostředí.

Prvním mechanismem je komprese zvodnělé vrstvy, která je způsobena efektivním napětím a závisí na stlačitelnosti dané zvodnělé vrstvy α . Druhým mechanismem je rozpínavost vody způsobená poklesem tlaku ve vodě p , což je závislé na stlačitelnosti kapaliny β . (PECH, 2010)

$$S_s = \rho g(\alpha + n\beta v)$$

Specifická storativita je dána součtem dvou členů rovnic uvedených níže:

$$dV_v = \alpha \rho g \quad - \alpha \text{ znázorňuje stlačitelnost zvodně}$$

$$dV_v = \beta_v n \rho g \quad - \beta_v \text{ znázorňuje stlačitelnost kapaliny}$$

7. Proudění podzemní vody

Podzemní voda je zpravidla téměř vždy v pohybu, ačkoliv rychlosti tohoto pohybu jsou velmi malé, nabývají hodnot v rozmezí 1 až 500 m/rok. Podzemní voda se pohybuje převážně v laterálním (horizontálním) směru, pokud uvažujeme pohyb podzemní vody ve vadózní vrstvě, zde se může podzemní voda pohybovat i ve vertikálním směru.

7.1 Darcyho zákon

Při analýze pohybu podzemní vody jsou skutečné složité trasy molekul vody, které prochází skrz porézní prostředí, zjednodušeny a jsou považovány za hladké dráhy označované jako proudnice. Jsou přímé a rovnoběžné, což znamená že tok je rovnoměrný, tedy že je konstantní spolu se vzdáleností. Podzemní voda se může pohybovat i tokem nerovnoměrným, při kterém se proudnice mohou různě ohýbat, případně rozbíhat nebo sbíhat například během toku podzemní vody ke studnám nebo při dvourozměrných a trojrozměrných tocích.

Problematikou proudění podzemní vody se zabýval francouzský hydrolog Henry Darcy (1856), který jako první na základě experimentu, jehož průběh spočíval ve zkoumání průsaku vody písčítými vrstvami, zjistil, že rychlost proudění porézním prostředím je přímo úměrná hydraulickému gradientu. (BOUWER, 1978) Díky těmto poznatkům mohl publikovat Darcyho zákon, který je možné dnes vyjádřit rovnicí:

$$Q = K S_a \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Kde platí, že:

Q – průtočné množství vody [$L^3 \cdot T^{-1}$]

K – koeficient hydraulické vodivosti [$L \cdot T^{-1}$]

S_a – plocha průtočného průřezu [L^2]

h_1, h_2 – piezometrické výšky v průřezu 1 a 2 [L]

Z rovnice Darcyho zákona vysvětlené výše je možné vyjádřit vztah pro výpočet Darcyho rychlosti:

$$v = K \frac{h_1 - h_2}{L}$$

Darcyho rychlost nelze chápat jako rychlost kapaliny, jelikož je to rychlost vody, která jako kdyby se pohybovala celým průřezem kolmým na tok jak přes pórovitou část půdy, tak přes pevné částice půdy. (BOUWER, 1978) Potřebujeme-li z tohoto vztahu získat skutečnou rychlost v pórech, je nezbytné danou Darcyho rychlost vydělit efektivní pórovitostí: (PECH, 2010)

$$v_{sk} = \frac{v}{n_e}$$

Kde platí, že:

v_{sk} – skutečná rychlost vody pohybující se v pórech [$L \cdot T^{-1}$]

v – fiktivní Darcyho rychlost [$L \cdot T^{-1}$]

n_e – efektivní pórovitost

Darcyho zákon je definovaný v mezích, které jsou stanoveny pomocí Reynoldsova čísla, zkráceně Re . Jak uvádí (BEAR, 1979), chceme-li znát hranici přechodu mezi jednotlivými druhy proudění, potřebujeme k tomu určit kritickou hodnotu Reynoldsova čísla Re_{krit} . Jako kritická je pro proudění podzemní vody stanovena hodnota $Re = 1$. Pro výpočet konkrétní hodnoty Re se používá rovnice, kterou uvádí: (HÁLEK & ŠVEC, 1979)

$$Re_f = \frac{\rho v d_e}{\mu}$$

Kde platí, že:

Re_f – Reynoldsovo filtrační číslo

v – Darcyho filtrační rychlost [$L \cdot T^{-1}$]

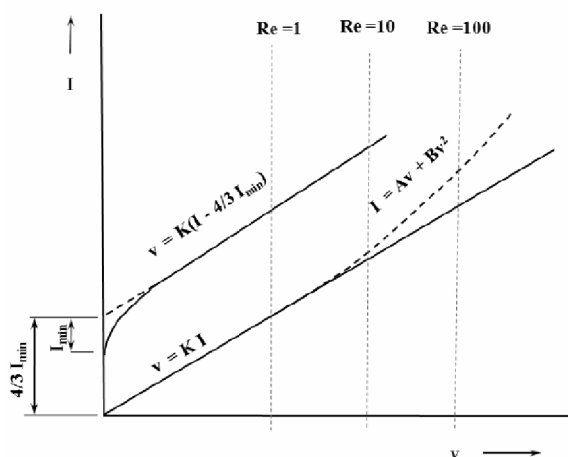
d_e – efektivní průměr zrna [L]

μ – dynamická viskozita [$M.L^{-1}.T^{-1}$]

Pro jednotlivé oblasti, ve kterých se může proudění vyskytovat, jsou uvedeny konkrétní hodnoty Reynoldsova čísla v tabulce níže.

Re	0-10	Proudění laminární
Re	10-100	Přechodná nelineární oblast
Re	>100	Proudění turbulentní

Tabulka 1- Hodnoty Re pro jednotlivé oblasti proudění (AUTOR, 2024)



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

Prelineární proudění

Jedná-li se především o jemnozrné materiály, obvykle hlavně o materiály, které mají jílovitou případně prachovitou strukturu, nastává proudění prelineární. Z důvodu velkých molekulárních sil jsou zde molekuly vody silně spojeny a voda začíná proudit pouze v případě, kdy je dosažena nebo překročena hodnota pro minimální hydraulický gradient. Tato hodnota se liší v závislosti na konkrétním materiálu, pro hlinité a prachovité půdy není hodnota zpravidla větší než 0,5, proti tomu v půdách jílovitých se vyskytuje v rozmezí od 0,5 do 1.

Lineární proudění

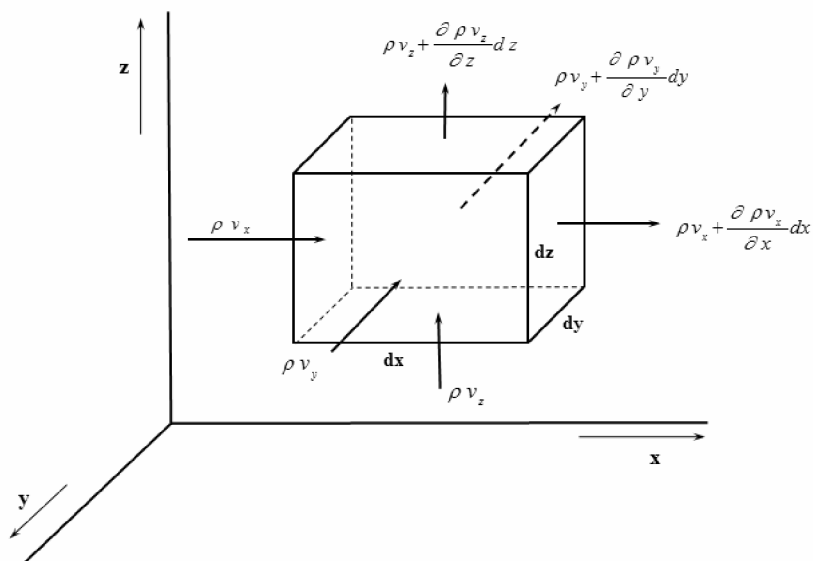
Oblast lineárního proudění má ideální předpoklady pro aplikaci Darcyho zákona, který je zde platný až do hodnoty $Re = 1$. Do překročení hodnoty Re přibližně 10 dochází k odchylce od lineárního průběhu proudění. Taková odchylka nemá vliv na platnost Darcyho zákona, vzhledem k tomu, že je velmi malá a tím pádem zanedbatelná. Obecně lze tuto oblast charakterizovat především dominantním laminárním prouděním, které je doprovázeno silným působením viskózních sil. Síly, zde působící, nahrazují působení vnitřního tření a jejich výskyt závisí především na přitažlivosti sil mezi jednotlivými částicemi.

Postlineární proudění

Pokud Re nabývá hodnoty větší než 10, je možné tento stav označit jako proudění postlineární. V důsledku rostoucí rychlosti, za předpokladu splnění podmínky, že hodnota Re je v rozmezí 10 až 100, zůstává proudění bez přerušení v režimu laminárního proudění. Viskózní síly zde již dominantní nejsou, místo nich se stávají dominantní síly setrvačné. Zvětší-li se hodnota Re na více než 100, pak proudění plynule přejde to režimu turbulentního. (VALENTOVÁ, 2018)

7.2 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity matematicky popisuje tok podzemní vody. Vychází z principů bilance zachování hmoty, energie a hybnosti. Princip zachování hmoty říká, že pro daný časový úsek je rozdíl mezi hmotnostmi (v tomto případě se jedná o množství vody), která proudí dovnitř přes imaginární hranici a hmotností, která přes imaginární hranici proudí ven. (KARAMOUZ et al., 2020) Rovnice kontinuity vychází z elementárního rovnoběžnostěnu, jehož strany, rovnoběžné s osami souřadnicového systému mají danou délku dx , dy , dz . (MUCHA & ŠESTAKOV, 1987)



Obrázek 4- Elementární rovnoběžnostěn (PECH, 2010)

Celkový hmotnostní tok v elementárním rovnoběžnostěnu za čas dt

$$\left[-\frac{\partial[\rho q_x]}{\partial x} - \frac{\partial[\rho q_y]}{\partial y} - \frac{\partial[\rho q_z]}{\partial z} \right] dx dy dz$$

Kde platí, že:

q_x , q_y a q_z – jsou jednotlivé složky rychlosti proudění podzemní vody v oblasti rovnoběžnostěnu rovnoběžné s osami souřadnicového systému [$L \cdot T^{-1}$]

ρ – hustota proudící kapaliny [$M \cdot L^{-3}$]

8. Dodatečné odpory

Během využívání vrtu, kdy probíhá čerpání vody a s tím související proudění vody z okolní zvodnělé vrstvy do vrtu, případně v okamžiku během provádění nálevových nebo vlačovacích zkoušek dochází ke vzniku ztrát, které jsou zapříčiněny působením dodatečných odporů vyskytujících se přímo ve vrtu, ale i v jeho blízkém okolí.

Tyto ztráty vznikají v nesouladu s ideálním modelem proudění, protože skutečné snížení hladiny bývá zpravidla větší, než je předpokládané snížení, které by vzniklo během hydraulického zásahu do ideálního vrtu. (JETEL, 1982) Dodatečné odpory jsou

dle dostupné literatury vysvětleny jako soubor dílčích odporů, jelikož jejich dělení na jednotlivé složky je velmi obtížné a nelze je jednoznačně rozdělit, používá se proto pro jejich nahrazení sumární bezrozměrný koeficient s označením w , který je možné nazvat také jako skin faktor. Působení dodatečných odporů ve vrtu lze vysvětlit pomocí rovnice, obsahující vzniklé celkové snížení zapříčiněné skrze dodatečné odpory: (PECH, 2010)

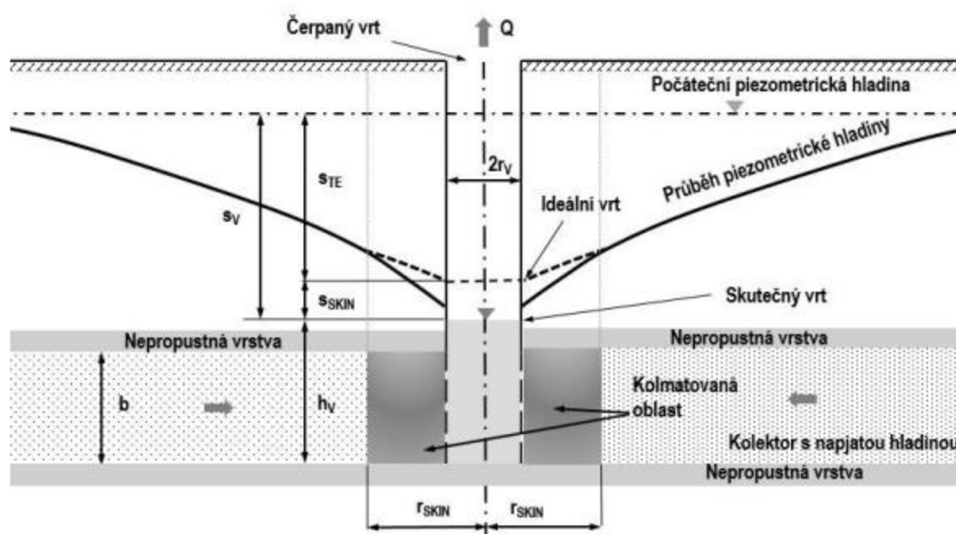
$$S_w = S_K + S_F + S_P + S_I + S_T + S_{TP} + S_O$$

S_w – celkové snížení ve vrtu způsobené dodatečnými odpory [L]

S_O – snížení způsobené dalšími druhy dodatečných odporů [L]

Dodatečné odpory dělí (JETEL, 1982) takto:

- 1) **Odpory kolmatační S_K** – kolmatační odpory jsou popsány podrobněji v kapitole 9.1
- 2) **Odpory vznikající zmenšením aktivního průřezu S_F** – v místě kde jsou stěny vrtu vyztužené perforovanou pažnicí, případně v místě, kde je umístěný filtr
- 3) **Odpory vznikající neúplným otevřením mocnosti zvodně S_P** – viz kapitola 9.2
- 4) **Odpory vznikající uvnitř vrtů** – viz kapitola 9.3
- 5) **Odpory vznikající turbulentním prouděním S_{TP}** – vznikají v oblasti zvodně u čerpaného vrtu



Obrázek 5- Dodatečné odpory na reálném vrtu (KAHUDA et al., 2021)

8.1 Kolmatační odpory

Propustnost porézního prostředí může být ovlivněna různými způsoby, které jsou skupinově popsány jako kolmatační odpory. Především se jedná například o ucpávání pórů jemným materiálem nebo může být poškozena původní vlastní struktura porézního prostředí v bezprostřední blízkosti odběrového vrtu. Toto poškození struktury může vzniknout při neodborném rotačním vrtání, kdy výplach vznikající jako vedlejší produkt vlastního vrtání proniká přímo do zvodnělé vrstvy, ve které vytváří tzv. kalovou kůru. Okrajově může dojít k přílišnému utužení okolního porézního prostředí. Tento jev vzniká zpravidla pokud se volí speciální nárazové vrtání, což má za následek opět snížení propustnosti. (PECH, 2010)

8.2 Odpory vznikající neúplným otevřením mocnosti zvodně

Vrty, jež jsou délkou svého filtru menší, než je mocnost přilehlé zvodnělé vrstvy se označují jako studny s neúplným průnikem, někdy i jako tzv. neúplné vrty. Proudění vody v krátké vzdálenosti od částečně pronikajícího vrtu může být jak horizontální, tak vertikální. Snížení hladiny ve vrtu s částečným průnikem může být větší, ale i menší než je pokles hladiny v plně pronikajícím čerpaném vrtu.

Efekty neúplného otevření mocnosti zvodně se zvyšují během raných fází čerpací zkoušky a poté dochází k jejich stabilizaci. Tyto efekty mohou být negativní nebo pozitivní v závislosti na geometrii studny. Například pokud je čerpaný a pozorovací vrt otevřený v horní nebo dolní části zvodně, pokles hladiny v pozorovacím vrtu je větší než v plně pronikajících vrtech. Pokud je čerpaný vrt otevřený na vrcholu zvodně a pozorovací vrt je otevřený na dně zvodně nebo naopak, pokles hladiny v pozorovacím vrtu je menší než v případě plně pronikajících podmínek. (WALTON, 2006)

8.3 Odpory vznikající uvnitř vrtů

Do této skupiny dodatečných odporů se řadí odpory vznikající díky ucpávání filtru S_f , v průběhu kterého dochází k usazování částic obsypového materiálu nebo částí okolní horniny v otvorech filtru. Specifickým případem usazování je také chemická inkrustace. Do této skupiny řadíme také odpory související se třením S_T . Tyto odpory vznikají třením molekul kapaliny o stěny vrtu nebo i třením mezi vlastními molekulami kapaliny. Dále lze do této skupiny zařadit odpory vznikající díky bláně, která se tvoří na vnitřní straně filtru. (JETEL, 1982)

8.4 Skin faktor

Dodatečné odpory, způsobující zónu změněné propustnosti, nemusí být uvažovány a je možné je nahradit fiktivní tenkou vrstvou, též lze označit jako povlak, která se nachází na plášti vrtu. Díky tomu je rovnice nestacionárního radiálního proudění platná až od vnější hranice vrtu. Vrtu, které skinový efekt nemají, jsou nazývány jako „ideální vrtu“. Pokud kapalina projde skinovou vrstvou, podléhá změně tlaku, kdy tlak na straně vrtu se skinovým efektem je roven skutečnému tlaku. Skin faktor může nabývat kladných i záporných hodnot. (JELMERT, 2013) Snížení způsobené dodatečnými odpory lze vyjádřit rovnicí, jak publikoval (van Everdingen, 1953):

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

Kde platí, že:

Q = čerpané množství [L³T⁻¹]

T – koeficient transmisivity [L².T⁻¹]

w – koeficient dodatečných odporů (tzv. skin faktor) [-]

Rovnice pro bezrozměrný koeficient dodatečných odporů w vycházející z Jacobovy semilogaritmické metody:

$$w = \frac{2\pi T s_v}{Q} - \frac{1}{2} \ln \frac{2,246 T t}{r_v^2 S}$$

Kde platí, že:

T – koeficient transmisivity [L².T⁻¹]

s_v – snížení na vrtu v čase t [L]

t – čas na Jacobově semilogaritmické přímce [S]

S – koeficient storativity [-]

r_v – poloměr vrtu [L]

Pokud nastane situace, že hodnota w je kladná, znamená to, že propustnost skinové zóny je vůči kolektoru snížena a skinový efekt je označený jako kladný. Opakem je skinový efekt záporný, který nastane za předpokladu, že je propustnost skinové zóny vůči kolektoru vyšší. (JETEL, 1982) Za dolní hranici pro skinový faktor

se považuje hodnota $w = -6$. Nižších hodnot lze dosáhnout pouze ve speciálních případech, ovšem vysokých kladných hodnot lze dosáhnou běžně.

9. Regenerace vrtů

Při standardním používání vrtu je běžným procesem jeho zanášení. K provedení regenerace vrtu přistupujeme tehdy, pokud dojde k podstatnému snížení průchodnosti perforované části výstroje tzv. inkrustaci nebo kolmataci. Inkrustace je děj, při kterém dochází k ulpívání vrstvy chemického nebo biologického původu na perforovaných stěnách výstroje vrtu. Na tvorbě této vrstvy se podílí zejména sloučeniny vápníku a hořčíku spolu se sloučeninami železa a manganu. (SWISTOCK, 2021) Oproti tomu proces kolmatace popisujeme jako ucpávání pórů jemným horninovým materiálem. (KAHUDA et al., 2021) Postupné zanášení perforované části vrtu označuje (TESAŘÍK et al., 1984) jako stárnutí studny, čímž myslí proces, při kterém dochází ke snížení vydatnosti vrtu v čase nebo ke snížení hladiny při neměnné vydatnosti.

Pokud vrt svou vydatností již kapacitně nevyhovuje, je provedena kamerová prohlídka, kterou se vizuálně kontroluje rozsah a typ inkrustace, ověří se skutečný stav výstroje vrtu a z této skutečnosti se navrhne vhodná metoda pro regeneraci vrtu. (VODNÍ ZDROJE EKOMONITOR SPOL. s.r.o., 2009) V dnešní době se jako možnosti regenerace používají metody mechanické, chemické a poměrně novou metodou je používání ultrazvuku. Vyhodnocení úspěšnosti provedené regenerace vrtu se následně provádí pomocí hydrodynamických zkoušek.

9.1 Mechanická regenerace

V rámci mechanické regenerace se v dnešní době používají postupy zahrnující použití speciálních nástrojů. Jedná se o různé druhy kartáčů, které jsou obvykle připojené k vrtné soupravě, mechanické obroušování stěn vrtu je doprovázeno tlakovou vodou a tlakovým vzduchem. (SWISTOCK, 2021) Pomocí tření kartáčů s různým tvarem a tvrdostí o stěny výstroje vrtu dochází k obroušení inkrustů. Uvolněné nečistoty jsou následně stírány pomocí gumových manžet. V průběhu regenerace je do vrtu zavedena hadice, skrz kterou proudí do vrtu tlakový vzduch. Tato technologie je pojmenována jako airlift. Proud stlačeného vzduchu zajišťuje, že oddělené inkrusty jsou vynášeny na hladinu. Stejným způsobem se čistí i dno vrtu. Kal usazený na dně je opět transportován pomocí airliftu ven z vrtu. Regenerace pomocí kartáčů se aplikuje do té doby, dokud z výtlaku airliftu nevytéká pouze čistá voda. (VODNÍ ZDROJE EKOMONITOR SPOL. s.r.o., 2009)

Další možností mechanické regenerace je vysokotlaký systém WellJet. Jedná se o systém vyvinutý v USA, který čistí stěny výstroje vrtu pomocí tlakové vody o tlaku až 1380 bar. Tlak v systému je plně regulovatelný, je tak možné jej použít ve vrtech

s různou úrovní zanesení. Vysokotlakou hlavicí se pohybuje postupně dolů a nahoru v celé hloubce vrtu. Pro vyčištění vrtu od uvolněných inkrustů se opět používá technologie airlift. (SMITH, 2016)

Ne tak často používanou metodou, kterou se v dnešní době zabývají i firmy v ČR, je metoda hydropulzní. Při použití této metody jsou pomocí zařízení umístěného ve vrtu generovány vysokoenergetické pulsy stlačeného vzduchu, případně jiného plynu. (SMITH, 2016) Při těchto pulzech dochází ke vzniku hydraulických rázových vln. Současně nastává kavitační efekt v důsledku náhlých změn objemu. Tato kavitační situace generuje „vakuovou bublinu“, následně se rozpadající, přičemž vytváří hydraulickou sací vlnu. Je možné říci, že opakované krátké tlakové impulzy (s rychlostí přibližně 2 000 m/s) vedou k uvolnění jemnozrnných železitých a manganičitých usazenin nejen z povrchu výstroje studny, ale také ze zvodnělých štěrkových vrstev v okolí nebo v samotné čištěné studni či vrtu. (LIDAŘÍK, s.r.o., 2017)

K mechanické regeneraci řadíme i metodu ultrazvukovou. Ultrazvuk je zvuková vlna s frekvencí nad 16 kHz, která způsobuje kavitaci. Kavitaci chápeme jako tvorbu bublin a destrukci bublin v kapalině. Destrukce bublin způsobuje silné mechanické účinky, uvolňující usazeniny ve vrtu. Podle způsobu a velikosti zanešení vrtu se navrhuje výkon, frekvence a doba ošetření pomocí ultrazvuku. (AL-JUBOORI & BOWTELL, 2019) Ultrazvukové vlnění je možné vytvořit třemi způsoby:

1. Mechanicky – založené na principu malých ladících vidliček a píšťalek, charakteristické pro svou nízkou frekvenci a výkon.
2. Magneto-strikčně – vzniká kmitáním zpravidla kolem železné tyče v magnetickém poli elektromagnetu napájeného střídavým proudem, charakteristické pro svůj vysoký výkon, ale s frekvencí omezenou pouze do 100 kHz – používá se v lékařství.
3. Piezoelektricky – potřebujeme křemíkovou destičku, která je připojena k elektrodám se střídavým napětím a kmitá při stejné frekvenci jako napětí. Dochází k přeměně energie z elektrické na mechanickou, vibrující okolním prostředím. Oblastí použití jsou diagnostické a terapeutické účely. Vysoká frekvence vytvoří velmi krátkovlnné ultrazvukové vlny, kde se změny tlaku na úrovni MPa vyskytují při vyšší intenzitě. (KAHUDA et al., 2021)

Ultrazvuková metoda pro regeneraci vrtů představuje účinný nástroj, který může být efektivně využit při obnově nejen jímacích, ale i vsakovacích vrtů. Tento druh regenerace nabízí celou řadu výhod oproti jiným metodám. Její efektivita se projevuje především v degradaci kolmatujících nárůstů bez ohledu na to, zda jsou anorganického či organického původu. Působením ultrazvuku je dosažena účinnost i v prostoru za výstrojí a vně pláště vrtu. Co je důležité zdůraznit, je skutečnost, že tato metoda

nevyžaduje použití chemických látek a nevytváří žádné chemické reakce. Díky tomu nedochází k poškozování životního prostředí, ale především se také výrazně zkracuje doba pro přípravu a realizaci regeneračních prací. V porovnání s chemickými metodami se jedná o výrazné zkrácení, jelikož ultrazvuk lze aplikovat bez nutnosti získání souhlasu vodoprávních úřadů či jiných orgánů státní správy. (KAHUDA et al., 2021)

9.2 Chemická regenerace

Regenerace pomocí chemických prostředků se obvykle aplikuje jako další úroveň po mechanickém čištění, může být však použita i samostatně. Regenerace probíhá pomocí silných kyselých roztoků v různých formách, jejichž úkolem je usazené inkrusty rozpustit. Jakmile dojde k jejich rozpuštění, jsou tyto částice spolu s chemickým roztokem vypláchnuty ven z vrtu. Volba typu chemického roztoku závisí na druhu a mocnosti usazených inkrustů. U starších vrtů je běžné, že se po správně provedené chemické regeneraci vrátí jejich vydatnost na původní hodnotu. (SWISTOCK, 2021)

Jednou ze základních složek chemické regenerace je kyselina chlorovodíková HCL. Používání chloru k regeneraci studní se datuje do první poloviny 20. století, ovšem v posledních letech se ukázalo, že její používání není úplně nejefektivnější. Kyselina chlorovodíková má tendenci k rozpouštění minerálů, se kterými přijde do styku jako první, tím pádem ztrácí svoji účinnost. Je také agresivní vůči kovům, což má negativní vliv na výstroj některých vrtů. (SMITH, 2016) To, že kyselinu chlorovodíkovou je vhodné použít pouze při antikorozi výstroji vrtu, zmiňuje i (JEDLIČKA & KOŽÍŠEK, 1981). Dále uvádí, že je důležité dbát na opatrnost, protože reakcí kyseliny chlorovodíkové bez obsahu arsenu vzniká velké množství oxidu uhličitého. Ten je těžší než vzduch a usazuje se na dně šachet. Další možností může být použití kyseliny sírové, která má ovšem dobu rozpouštění inkrustací delší a její použití je vzhledem k tomu časově náročnější.

10. Hydrodynamické zkoušky

Podle (JETEL, 1982) můžeme chápat hydrodynamické zkoušky jako skupinu procesů, kterými při jejich aplikaci na vrtu dokážeme určit jeho hydraulické charakteristiky.

Základní dělení hydrodynamických zkoušek:

1) Čerpací zkouška

Ze sledovaného vrtu čerpáme za určitý čas konstantní množství vody. Sledujeme snížení hladiny zvodně a ztrátu tlaku.

2) Odběrová zkouška

Odebíráme vodu ze sledovaného vrtu, buď konstantně nebo proměnlivě.

3) Stoupací zkouška

Po snížení hladiny vody ze sledovaného vrtu sledujeme rychlost plnění a tlak ve vrtu.

4) Přítoková zkouška

Posuzujeme na základě přítoku vody do sledovaného vrtu.

5) Diferenční zkouška

Zajímá nás změna výšky hladiny nebo tlaku při změně odebíraného množství vody, avšak nesmí dojít k přerušení odběru.

6) Nálevová zkouška

Sledujeme vztah mezi výškou hladiny ve vrtu a množstvím vody přitékajícím do vrtu.

7) Trubková zkouška

Používáme speciální tester, který se skládá z trubek a je zapuštěný ve vrtu.

8) Vtlačovací zkouška

Stojí na principu sledování závislosti tlaku ve vrtu, za použití množství vody, které se vtlačuje do vrtu přetlakem.

10.1 Čerpací zkouška

Zkrácený základní popis čerpací zkoušky je vysvětlený v předchozí kapitole. Pokud bude dbáno na správné provedení čerpací zkoušky je vhodné, aby vyjma testovaného čerpaného vrtu byl v okolí také minimálně jeden vrt pozorovací. Pozorovací vrt slouží především ke sledování velikosti změny ve snížení hladiny, které je vždy závislé na čerpání v testovaném vrtu. (CHEN a LAN, 2008) Podle režimu proudění vody z okolí k testovanému vrtu se čerpací zkouška dělí na:

Čerpací zkouška s ustáleným režimem – jedná se o nenáročnou poměrně hojně se vyskytující metodu používanou pro zhodnocení proudění podzemní vody k testovanému čerpanému vrtu s napjatou hladinou, jejíž základ byl odvozený z Dupuitových předpokladů, které platí bez výjimky pouze pro zvodnělou vrstvu s volnou hladinou. Tato metoda se zakládá na odebírání konstantního množství vody určitého objemu z vrtu a zároveň je v průběhu proudění vody dosaženo ustáleného režimu proudění v jeho okolí. (RIVERA a RAGHAVAN, 1979) Vzniklé celkové snížení ve vrtu je možné vyjádřit pomocí rovnice, která je založena na Theisově studňové funkci, ale je následně upravená pomocí semilogaritmické aproximace tak, jak popisuje (JACOB, 1946):

Rovnice platná pro ideální vrt:

$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,246Tt}{r_v^2 S}$$

Kde platí, že:

s_v – snížení na vrtu [L]

Q – čerpané množství [L^3T^{-1}]

T – koeficient transmisivity [L^2T^{-1}]

r_v^2 – poloměr hydrodynamicky dokonalého vrtu [L]

t – čas [T]

S – koeficient storativity [-]

Pokud uvažujeme reálný vrt, je nutné k rovnici platné pro ideální vrt připočítat dodatečné odpory:

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2,246Tt}{r_v^2 S} + 2w \right)$$

w – koeficient dodatečných odporů [-]

Transmisivitu je pak možné přesně určit z rovnice pro proudění podzemní vody k vrtu s napjatou hladinou:

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

Q – čerpané množství [L^3T^{-1}]

s_v – snížení na vrtu [L]

r_d – dosah deprese vyvolané odběrem ze zvodně [L]

r_v – poloměr hydrodynamicky dokonalého vrtu [L]

Uvažujeme-li vrt s volnou hladinou, je nutné užít rovnici:

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

H – mocnost zvodnělé vrstvy [L]

h_v – výška vody ve vrtu [L]

R – poloměr dosahu depresního kužele [L]

Čerpací zkouška s neustáleným režimem – stejným způsobem, tak jako známe v případě čerpací zkoušky s ustáleným režimem proudění, dochází k čerpání stálého množství vody z vrtu. Sledujeme pokles vody v testovaném vrtu, který v daném časovém kroku zaznamenáváme. Požadavkem může být i určení storativity, je tedy nutné zaznamenat i snížení na pozorovacím vrtu. (ČERNÝ, 2017) K analýze čerpacích zkoušek v průběhu neustáleného proudění je standardním postupem používána kombinace grafických a analytických metod. Tyto metody mají svou funkci založenou na principu porovnání naměřených hodnot z pozorovaného vrtu, především se jedná o snížení hladiny v závislosti na čase s teoreticky odvozenými typovými křivkami. Důležité je dbát na to, aby byly hodnoty přesně vyneseny do grafu, musí být zobrazeny ve stejném měřítku jako typové křivky, aby bylo možné co nejlépe provést jejich srovnání. Pokud je úkolem provést výpočet storativity a transmisivity, je nutné z grafu odečíst konkrétní souřadnice libovolného bodu z grafu, které získáme právě srovnáním naměřených hodnot s typovými křivkami. (VALENTOVÁ, 2018)

10.2 Odběrová zkouška

Odběrovou zkoušku při ustáleném proudění považuje (JETEL, 1982) za teoreticky nejjednodušší způsob výpočtu hydraulických parametrů. V průběhu odběrové zkoušky nastane konstantní snížení hladiny, přičemž nebereme ohled na časový průběh odebíraného množství vody. Snížení v závislosti na čase je vyjádřené pomocí Jacob – Lohmanovy rovnice:

$$Q = 2\pi TsvG(\lambda)$$

Kde platí, že:

T – koeficient průtočnosti [L^2T^{-1}]

sv – konstantní snížení hladiny ve vrtu [L]

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

10.3 Stoupací zkouška

V čase průběhu stoupací zkoušky ve zvoleném vrtu musí nastat přerušení konstantního odběru veškerého množství vody, což má za následek způsobení stoupání hladiny ve sledovaném vrtu. V daném časovém úseku se z vrtu vyčerpá určité

množství vody, avšak po přerušení čerpání hladina ve vrtu stále stoupá, ačkoliv aktivní čerpání vody z vrtu je již zastaveno. Zároveň do vrtu nepřerušeně stále přitéká stejné množství vody z povrchu rovnající se čerpanému objemu.

Hydrolog C. V. Theis, jenž se zasadil o výzkum vyhodnocení tohoto jevu, v roce 1935 definoval metodu superpozice. Díky této metodě můžeme nyní stanovit zbytkové snížení vzniklé během stoupací zkoušky, které je součtem snížení způsobeného pokračujícím čerpáním a záporného snížení simulovaného na fiktivním vsakovacím vrtu. (CHARBENEAU, 2006) Alternativně je možné k výpočtu zbytkového snížení stoupací zkoušky použít Theisovu rovnici:

$$s^* = s + s_{st}$$

Kde platí, že:

s^* – výsledné snížení ve vrtu [L]

s – snížení právě probíhající čerpací zkoušky [L]

s_{st} – vzestup hladiny v průběhu čerpací zkoušky [L]

Dále, jak píše (PECH, 2010), je možné stoupací zkoušku, resp. imaginární vsakovací vrt, definovat rovnicí, která má základy v Theisově studňové funkci:

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

Kde platí, že:

u_{st} – parametr Theisovy studňové funkce pro stoupací zkoušku

r – radiální vzdálenost od osy čerpaného vrtu [L]

t^* – čas měřený od počátku zastavení čerpání [T]

S' – koeficient storativity stanovený ze stoupací zkoušky [-]

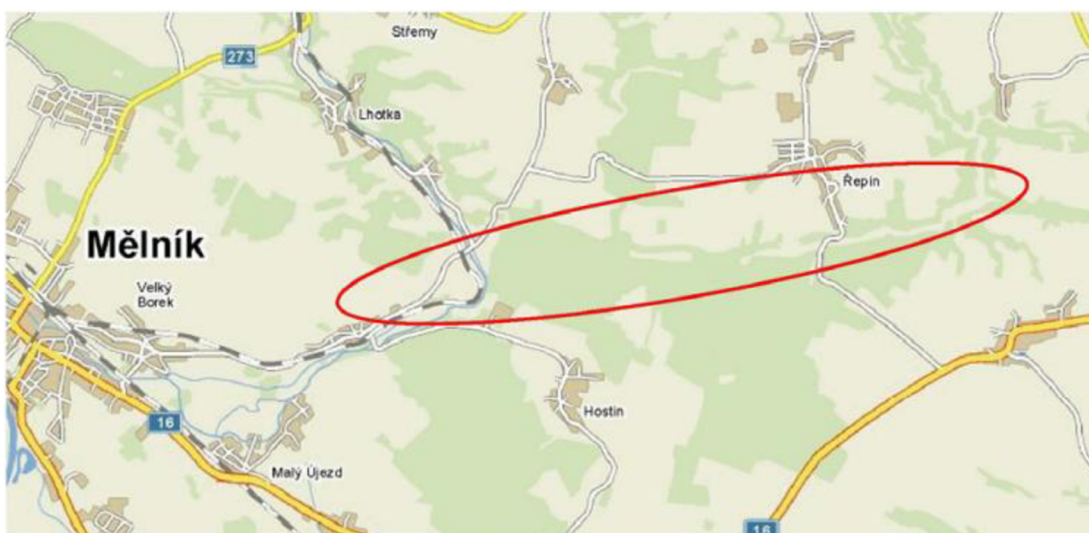
T – koeficient transmisivity [L^2T^{-1}]

11. Vyhodnocení efektu provedené regenerace

V této části bakalářské práce bude vyhodnocen efekt provedené regenerace za využití naměřených dat z provedených čerpacích zkoušek.

11.1 Popis lokality

Pro vyhodnocení efektu provedené regenerace byly zvoleny dva vrty v lokalitě jímacího území Mělnická Vrutice–Řepín, které je ve správě společnosti Středočeské vodárny a.s., konkrétně se jedná o vrty DV5 a Ř2. Lokalita se nachází ve Středočeském kraji zhruba 6 km severovýchodně od města Mělník a celkem je v ní využíváno 76 vodárenských vrtů. Voda z tohoto zdroje se vyznačuje vysokou kvalitou, proto je možné ji bez větších úprav, pouze s hygienickým zabezpečením plynným chlórem, distribuovat nadregionálním skupinovým vodovodem K-S-K-M (Kladno-Slaný-Kralupy-Mělník) odběratelům v okresech Mělník, Kladno, částech Prahy–východ a Prahy–západ. Kolem vlastních prostorů vrtů jsou umístěna ochranná pásma I. stupně, která jsou oplocená a udržovaná odpovídajícím způsobem. (ECODIS s.r.o., 2013)



Obrázek 6 - Lokalita Mělnická Vrutice – Řepín (www.mapy.cz, 2024)

11.2 Geologická situace řešené lokality

Podzemní voda je zde jímána z kolektoru středního turonu. Podle geomorfologického členění ČSR (Demek et al., 1987) leží zájmové území v prostoru okrsku Košátecká tabule, která je v rámci vyšších celků součástí:

soustavy: Česká tabule,

podsoustavy: Středočeská tabule,

celku: Jizerská tabule,

podcelku: Dolnojizerská tabule,

okrsek: Košátecká tabule.

11.3 Popis jednotlivých vrtů

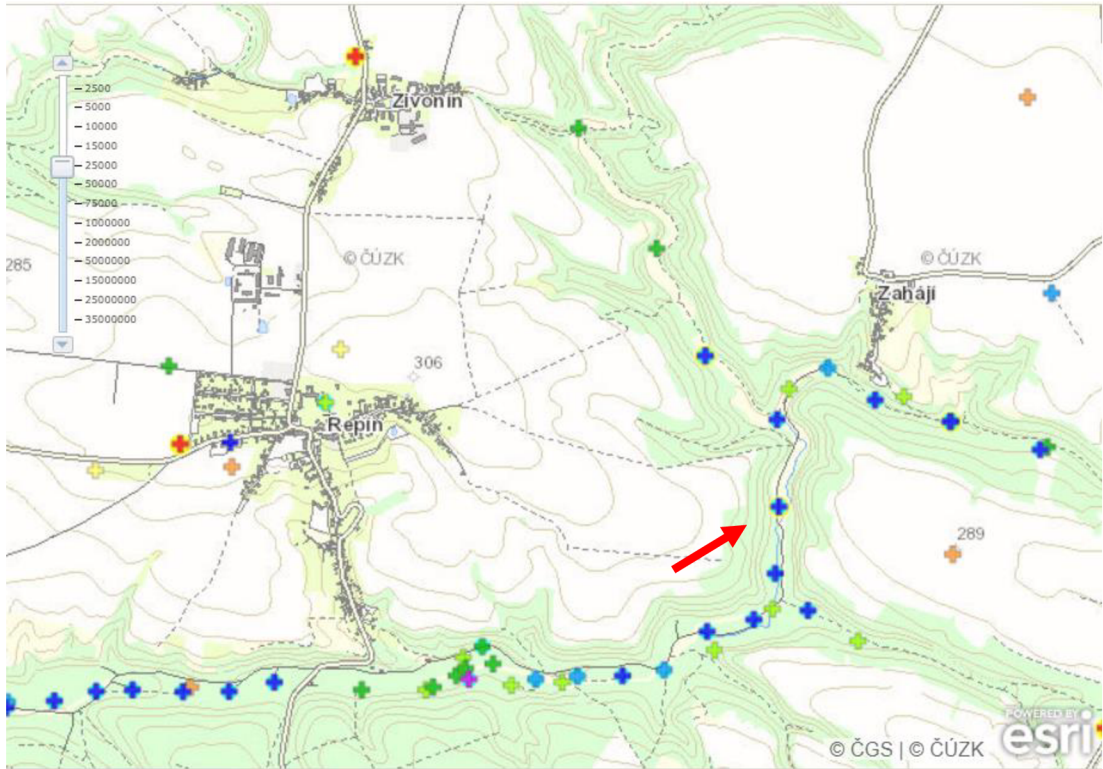
Vrty se nachází vzájemně na protilehlých koncích jímacího území. Jedná se o vrty s ocelovou výstrojí o průměru 426 mm u vrtu DV5 a 355 mm u vrtu Ř2.

Jméno vrtu	DV5
Typ objektu	Vrt svislý
Rok	1973
Hloubka [m]	58
X	1014617
Y	721581
Nadmořská výška [m]	227,33
Účel	hydrogeologický

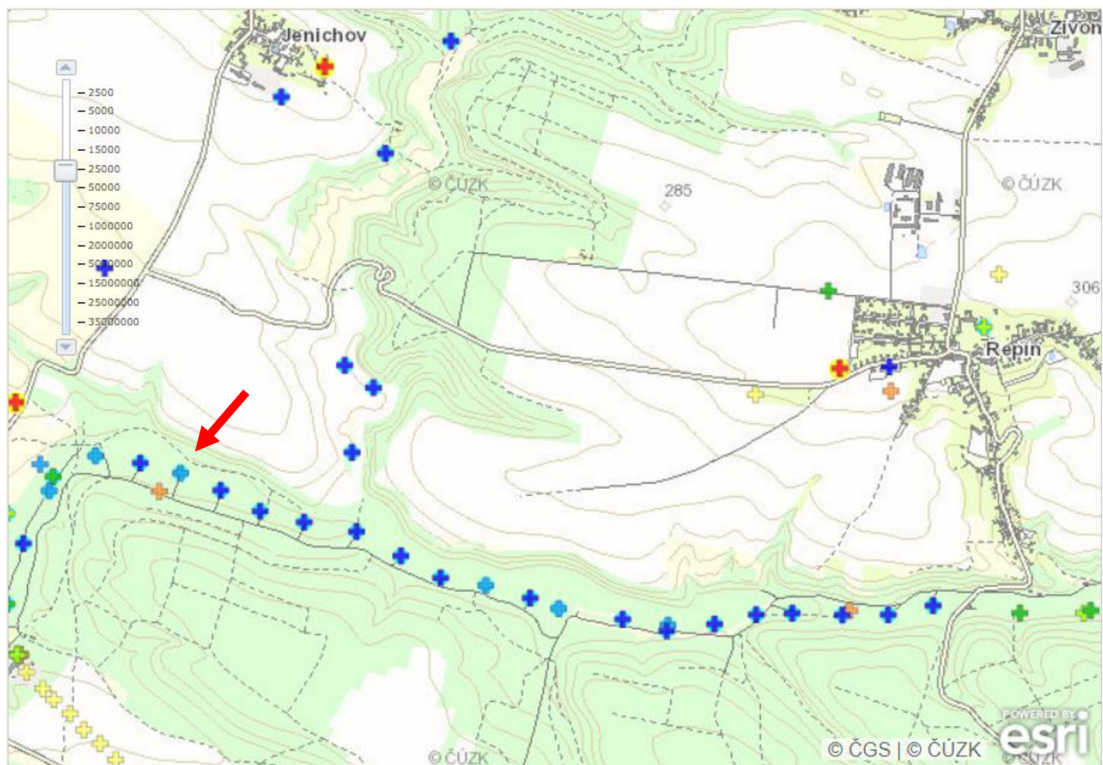
Tabulka 2 - Údaje o vrtu DV5 (www.geology.cz, 2024)

Jméno vrtu	Ř2
Typ objektu	Vrt svislý
Rok	1933
Hloubka [m]	48,54
X	1014800
Y	727050
Nadmořská výška [m]	195,82
Účel	hydrogeologický

Tabulka 3 - Údaje o vrtu Ř2 (www.geology.cz, 2024)



Obrázek 7 - Umístění vrtu DV5 1:25000 (www.geology.cz, 2024)



Obrázek 8 - Umístění vrtu Ř2 1:25000 (www.geology.cz, 2024)

11.4 Provedený regenerační zásah

Na obou vrtech byly práce prováděny dle následujícího schématu:

1. Čerpací zkouška před regenerací
2. Prohlídka vrtu TV kamerou před regenerací
3. Vlastní regenerační práce (mechanické čištění, chemická regenerace, odčerpání a likvidace použitých chemikálií). Původně zamýšlené použití ultrazvukové metody nebylo realizováno vzhledem k technickým problémům.
4. Prohlídka vrtu TV sondou po regeneraci
5. Čerpací zkouška po regeneraci.



Obrázek 9 - Poškození výstroje vrtu Ř2 (VODNÍ ZDROJE a.s., 2019)

11.5 Vyhodnocení efektu regeneračního zásahu

Vyhodnocení efektu provedené regenerace bude využito Jacobovy semilogaritmické aproximace za pomoci rovnic, které byly podrobně vysvětleny v teoretické části této práce. Použijeme především vztahy pro výpočet transmisivity, velikosti dodatečných odporů a snížení způsobeného dodatečnými odpory.

Vrt DV5 – před regenerací

Pro danou lokalitu byla určena konstantní storativita S zvodně = 0,005.

Čerpané množství během hydrodynamické zkoušky bylo 0,0065 [m³.s⁻¹].

Výpočet koeficientu transmisivity:

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} \log \frac{t_2}{t_1}$$

$$T = \frac{0,183 * 0,0065}{0,3} \log \frac{1000}{100}$$

$$T = 0,003965 \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Velikost dodatečných odporů:

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

$$w_1 = \frac{2\pi 0,003965 * 2,53}{0,0065} - \frac{1}{2} \left(\ln 100 + \ln \frac{0,003965}{0,213^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_1 = 5,56$$

$$w_2 = \frac{2\pi 0,003965 * 2,7244}{0,0065} - \frac{1}{2} \left(\ln 500 + \ln \frac{0,003965}{0,213^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_2 = 5,50$$

$$w_3 = \frac{2\pi 0,003965 * 2,83}{0,0065} - \frac{1}{2} \left(\ln 1000 + \ln \frac{0,003965}{0,213^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_3 = 5,56$$

Aritmetický průměr koeficientu dodatečných odporů:

$$w = w_1 + w_2 + w_3$$

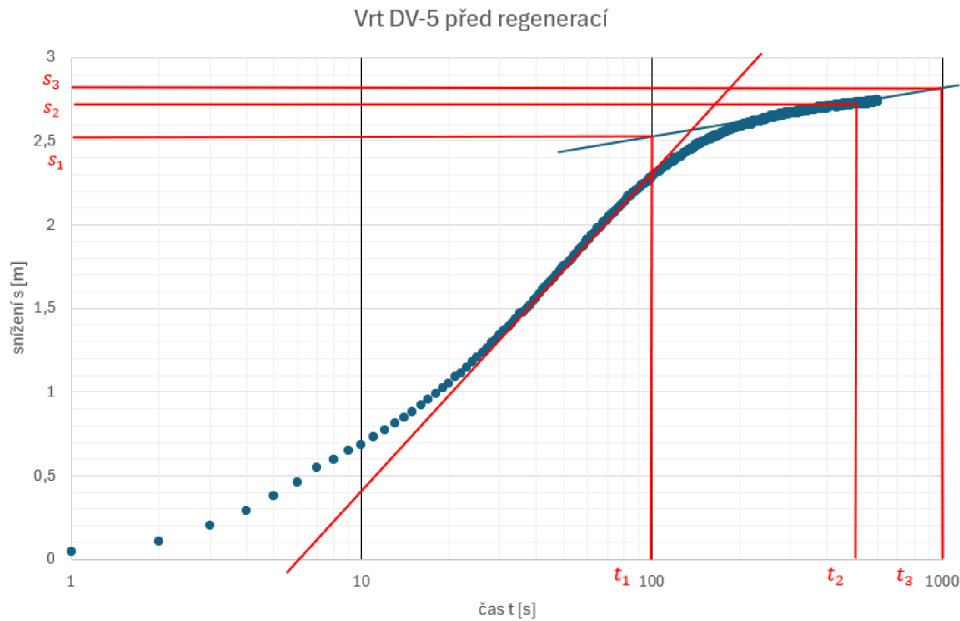
$$w = 5,54$$

Snížení způsobené dodatečnými odpory:

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

$$s_w = \frac{0,0065}{2\pi 0,003965} 5,54$$

$$s_w = 1,45 \text{ m}$$



Obrázek 10 - Průběh HDZ na vrtu DV5 před regenerací (AUTOR, 2024)

Vrt DV5 – po regeneraci

Hodnota koeficientu transmisivity, storativity a čerpané množství zůstává stejné jako před regenerací:

$$T = 0,003965 \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Velikost dodatečných odporů:

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

$$w_1 = \frac{2\pi 0,003965 * 2,18}{0,0065} - \frac{1}{2} \left(\ln 100 + \ln \frac{0,003965}{0,213^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_1 = 4,22$$

$$w_2 = \frac{2\pi 0,003965 * 2,33}{0,0065} - \frac{1}{2} \left(\ln 500 + \ln \frac{0,003965}{0,213^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_2 = 3,99$$

$$w_3 = \frac{2\pi 0,003965 * 2,43}{0,0065} - \frac{1}{2} \left(\ln 1000 + \ln \frac{0,003965}{0,213^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_3 = 4,02$$

Aritmetický průměr koeficientu dodatečných odporů:

$$w = w_1 + w_2 + w_3$$

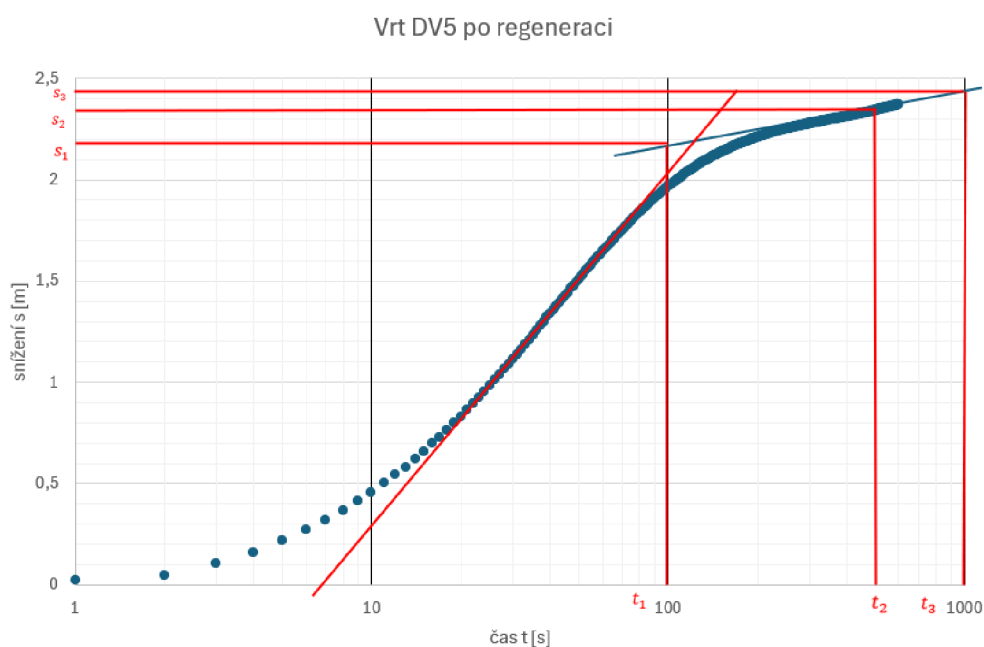
$$w = 4,08$$

Snížení způsobené dodatečnými odpory:

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

$$s_w = \frac{0,0065}{2\pi \cdot 0,003965} \cdot 4,08$$

$$s_w = 1,06 \text{ m}$$



Obrázek 11 - Průběh HDZ na vrtu DV5 po regeneraci (AUTOR, 2024)

Vrt Ř2 – před regenerací

Jelikož se vrt Ř2 nachází ve stejné lokalitě se stejným geologickým podložím, zůstává koeficient storativity S na stejné hodnotě 0,005.

Čerpané množství během hydrodynamické zkoušky bylo 0,0233 [m³.s⁻¹].

Výpočet koeficientu transmisivity:

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s} \log \frac{t_2}{t_1}$$

$$T = \frac{0,183 * 0,0233}{0,04} \log \frac{1000}{100}$$

$$T = 0,106598 \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Velikost dodatečných odporů:

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

$$w_1 = \frac{2\pi 0,106598 * 0,76}{0,0233} - \frac{1}{2} \left(\ln 100 + \ln \frac{0,106598}{0,1775^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_1 = 15,88$$

$$w_2 = \frac{2\pi 0,106598 * 0,78}{0,0233} - \frac{1}{2} \left(\ln 500 + \ln \frac{0,106598}{0,1775^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_2 = 15,65$$

$$w_3 = \frac{2\pi 0,106598 * 0,8}{0,0233} - \frac{1}{2} \left(\ln 1000 + \ln \frac{0,106598}{0,1775^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_3 = 15,88$$

Aritmetický průměr koeficientu dodatečných odporů:

$$w = w_1 + w_2 + w_3$$

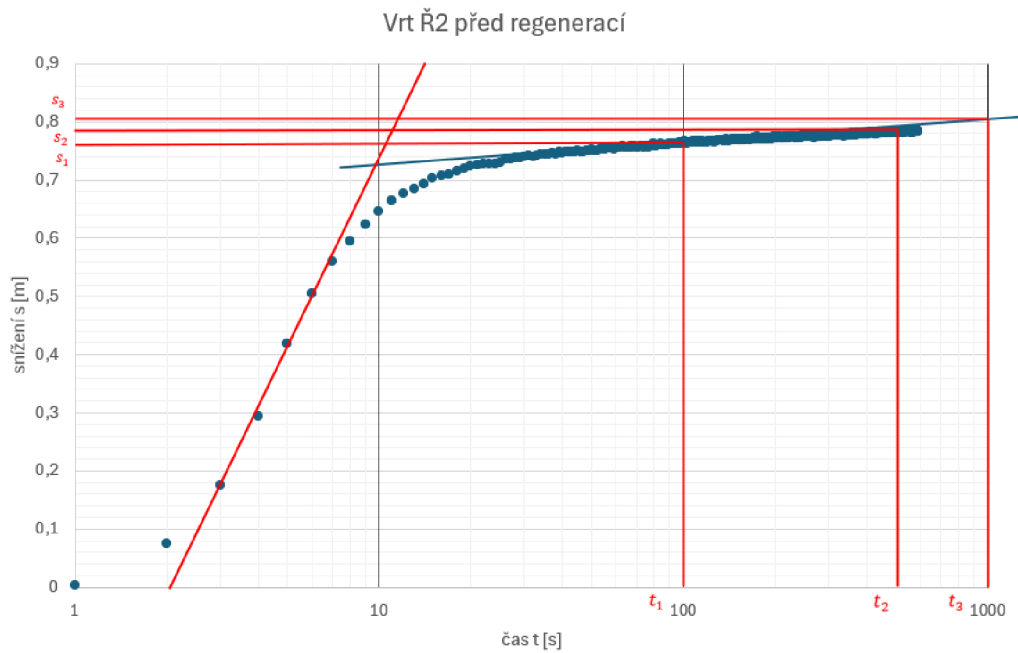
$$w = 15,80$$

Snížení způsobené dodatečnými odpory:

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

$$s_w = \frac{0,0233}{2\pi 0,106598} 15,80$$

$$s_w = 0,55\text{m}$$



Obrázek 12 - Průběh HDZ na vrtu Ř2 před regenerací (AUTOR, 2024)

Vrt Ř2 – po regeneraci

Hodnota koeficientu transmisivity, storativity a čerpané množství zůstává stejná jako před regenerací:

$$T = 0,106598 \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Velikost dodatečných odporů:

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

$$w_1 = \frac{2\pi 0,106598 * 0,70}{0,0233} - \frac{1}{2} \left(\ln 100 + \ln \frac{0,106598}{0,1775^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_1 = 14,34$$

$$w_2 = \frac{2\pi 0,106598 * 0,78}{0,0233} - \frac{1}{2} \left(\ln 500 + \ln \frac{0,106598}{0,1775^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_2 = 14,68$$

$$w_3 = \frac{2\pi 0,106598 * 2,83}{0,0233} - \frac{1}{2} \left(\ln 1000 + \ln \frac{0,106598}{0,1775^2 * 0,005} + 0,8091 \right)$$

$$w_3 = 14,91$$

Aritmetický průměr koeficientu dodatečných odporů:

$$w = w_1 + w_2 + w_3$$

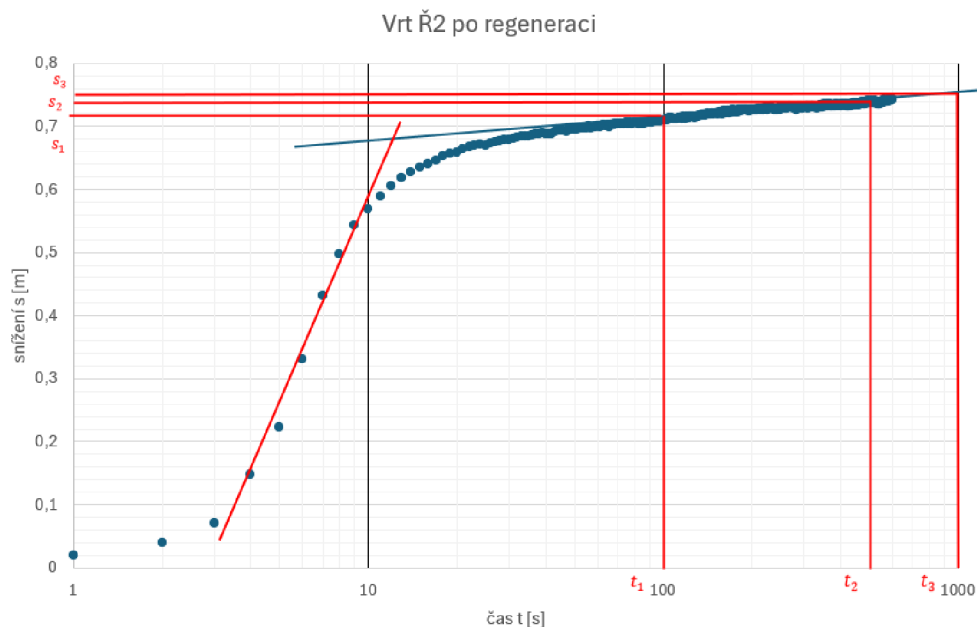
$$w = 14,64$$

Snížení způsobené dodatečnými odpory:

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

$$s_w = \frac{0,0233}{2\pi \cdot 0,106598} 14,64$$

$$s_w = 0,51 \text{ m}$$



Obrázek 13 - Průběh HDZ na vrtu Ř2 po regeneraci (AUTOR, 2024)

12. Diskuze

Z hodnot výsledků provedené regenerace, které jsou uvedeny níže v tabulce, je patrné, že po regeneraci nastalo zlepšení stavu vrtů ve všech parametrech. Došlo ke snížení velikosti dodatečných odporů a dodatečného snížení, přičemž u vrtu DV5 jsou rozdíly viditelné více než u vrtu Ř2. Provedenou regeneraci je možné považovat za úspěšnou pouze u vrtu DV5. Úspěšnost regenerace může být dána správnou volbou regenerační techniky, kdy bylo použito mechanické a následně chemické čištění. Je možné říci, že pokud by nenastaly technické problémy s ultrazvukovou sondou a došlo k jejímu nasazení, byla by regenerace mnohem úspěšnější. Podle nálezů z kamerové

prohlídky, která prokázala značné poškození výstroje vrtu Ř2 korozi viz obrázek, bylo možné předpokládat, že regenerace neproběhne v takovém rozsahu, jak bylo původně plánováno.

Vrt DV5	
Před regenerací	Po regeneraci
$S = 0,005$	$S = 0,005$
$T = 0,003965$	$T = 0,003965$
$w_1 = 5,56$	$w_1 = 4,22$
$w_2 = 5,50$	$w_2 = 3,99$
$w_3 = 5,56$	$w_3 = 4,02$
$\bar{W} = 5,54$	$\bar{W} = 4,08$
$s_w = 1,45$	$s_w = 1,06$

Tabulka 4 – Výsledky vrt DV5 (AUTOR, 2024)

Vrt Ř2	
Před regenerací	Po regeneraci
$S = 0,005$	$S = 0,005$
$T = 0,106598$	$T = 0,106598$
$w_1 = 15,88$	$w_1 = 14,34$
$w_2 = 15,65$	$w_2 = 14,68$
$w_3 = 15,88$	$w_3 = 14,91$
$\bar{W} = 15,80$	$\bar{W} = 14,64$
$s_w = 0,55$	$s_w = 0,51$

Tabulka 5 – Výsledky vrt Ř2 (AUTOR, 2024)

13. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vyhodnotit efekt provedeného regeneračního zásahu na dvou vrtech, kdy byly vybrány vrty DV5 a Ř2 v lokalitě Mělnická Vrutice–Řepín. Pro vyhodnocení byla použita data naměřená během provedených

hydrodynamických zkoušek před a po regeneraci, přičemž data byla následně zpracována pomocí Jacobovy semilogaritmické aproximace.

Byla určena konstantní storativita $S = 5 * 10^{-3}$, která je platná pro oba vrty, jelikož se nachází v lokalitě se stejnou geologickou skladbou. Pro vrt DV5 byla výpočtem určena transmisivita $T = 3,965 * 10^{-3} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Došlo ke zmenšení koeficientu dodatečných odporů z hodnoty před regenerací 5,54 na 4,08 po provedené regeneraci, to je zlepšení zhruba o 26 %. Snížení způsobené dodatečnými odpory se zmenšilo také, konkrétně z hodnoty 1,45 m na 1,06 m, což znamená zlepšení o zhruba 26 %.

Pro vrt Ř2 byla výpočtem určená transmisivita $T = 1,06598 * 10^{-1} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Koeficient dodatečných odporů se na tomto vrtu zmenšil z hodnoty 15,80 před regenerací na 14,64 po regeneraci. To je zlepšení zhruba o 7 %. Podobně došlo i ke zmenšení snížení způsobeného dodatečnými odpory z hodnoty 0,55 m před regenerací na 0,51 m po regeneraci. I v tomto případě se jedná o zlepšení pouze o 7 %.

Pokud se podíváme na výsledky sumarizované v tabulkách uvedených výše, je možné vidět, že zlepšení nastalo ve všech sledovaných atributech obou vrtů. O úspěšné regeneraci je možné uvažovat pouze u vrtu DV5, kde došlo ke zlepšení o více než čtvrtinu, zatímco zlepšení, které se projevilo na vrtu Ř2 je tak minimální a mohlo být způsobeno i nepřesností v měření nebo výpočtu. Podle dostupných informací (VODNÍ ZDROJE a.s., 2022) bylo nakonec rozhodnuto o vyvrtání nového párového vrtu v rámci I. etapy projektu náhradních hydrogeologických vrtů v dané lokalitě.

Přehled použité literatury

Odborné publikace

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, s. 279–290. Trans AIME.

AL-JUBOORI, R., BOWTELL, L. A., 2019: Ultrasound Technology Integration into Drinking Water Treatment Train. IntechOpen, s. 1-23

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

BOUWER, H., 1978: Groundwater hydrology. McGraw – Hill, 480 s.

ČERNÝ, P., 2017: Vyhodnocování hydrodynamických zkoušek. Česká zemědělská univerzita, Fakulta životního prostředí, Praha. 50 s. (bakalářská práce). „nepublikováno”. Dep. SIC ČZU v Praze.

DEMEK, J., et al., 2006: Hory a nížiny. Zeměpisný lexikon ČR. AOPK ČR, Praha. 582 s.

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

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

CHEN, CH. - S., LAN, CH. – G., 2009: A Simple Data Analysis Method for a Pumping Test with Skin and Wellbore Storage Effects. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, roč. 20, č. 3, s. 557-562,

JACOB, C. E., 1946: Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., roč. 72, č. 5.

JEDLIČKA, P., KOŽÍŠEK, J., 1981: Provozně geologická příručka (Vyd. 1.). - SNTL Nakladatelství technické literatury. Praha. s. 351-352.

JELMERT, T. A., 2013: Introductory Well Testing. Bookboon. ISBN 978-87-403-0445-9

JETEL, J., 1982: Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha. 248 s.

KAHUDA, D., PECH, P., FICAJ, V., 2021: Regenerace hydrogeologických vrtů na bázi ultrazvuku. Vodní hospodářství, roč. 71, č. 11, s. 2-8. ISSN: 1211-0760.

- KAHUDA, D., PECH, P., FICAJ, V., PECHOVÁ, H., 2021: Well Rehabilitation via the Ultrasonic Method and Evaluation of Its Effectiveness from the Pumping Test. Coatings. 11, 1250
- KARAMOUZ, M., AHMADI, A., AKHBARI, M., 2020: Groundwater Hydrology. CRC Press, Boca Raton. Florida, 778 s.
- KRÁSNÝ, J., et al. 2012, Podzemní vody České republiky. Česká geologická služba, ISBN 978-80-7075-797-0
- MUCHA, I., ŠESTAKOV, V., 1987: Hydraulika podzemních vod. SNTL Nakladatelství technické literatury. Praha.
- PECH, P., 2010: Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Vydavatelství ČZU, Praha, 104 s. ISBN 978-80-87402-04-7.
- RIVERA, J. G., and RAGHAVAN, R., 1979: Analysis of Short-Time Pressure Data Dominated by Wellbore Storage and Skin. JPT.
- SMITH, S.A., 2016: Well Rehabilitation Methods – Not the Same as Always. Ground Water Science, s. 1-6
- SWISTOCK, B., RIZZO, D., FLOWERS, D., 2021: Water Well Maintenance and Rehabilitation. PennState Extension, s.1-5.
- TESAŘÍK, I., PELIKÁN, V., VOŠTRČIL, J., 1984: Vodárenství I – Jímání a úprava podzemních vod. VUT v Brně, Brno, 119 s.
- VALENTOVÁ, J., 2018: Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha, 178 s. ISBN 978-80-01-06483-2
- VODNÍ ZDROJE a.s., 2019: Regenerace Řepín „nepublikováno“. Dep.: Vodní zdroje, a.s. Praha 5.
- VODNÍ ZDROJE a.s., 2022: Projekt náhradních hydrogeologických vrtů – II. etapa „nepublikováno“. Dep.: Vodní zdroje, a.s. Praha 5.
- WALTON, W. C., 2006: Aquifer Test Modeling. CRC Press. Hardcover: 240 s. ISBN-10: 1420042920.

Internetové zdroje

- ECODIS s.r.o., 2013: Prodloužení nakládání s podzemními vodami u zdrojů v jímacím území Řepínského dolu, Zahájí a Mělnické Vrutici pro skupinový vodovod K-S-K-M (online) [cit. 2024.03.10], dostupné z <https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX1NUQzE3NDVfb3puYW1lbmlET0NfNTEyODcyMDQ2NjQ5Mzc1MzAyMy5wZGY/STC1745_oznameni.pdf>

KAŠPAR, J., 2009: Regenerace vodních zdrojů (online) [cit. 2024.01.10], dostupné z <<http://eshop.ekomonitor.cz/publikace/clanky/regenerace-vodnich-zdroju>>

LIDARÍK, s.r.o., 2017: Postup k intenzifikaci studní a vrtů (online) [cit. 2023.11.15], dostupné z <<https://www.lidarik.cz/ke-stazeni/hydropuls.pdf>>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Hydrologický cyklus (VALENTOVÁ, 2018)

Obrázek 2: Druhy zvodnělých vrstev (PECH, 2010)

Obrázek 3: Meze platnosti Darcyho zákona (PECH, 2010)

Obrázek 4: Elementární rovnoběžnostěn (PECH, 2010)

Obrázek 5: Dodatečné odpory na reálném vrtu (KAHUDA et al., 2021)

Obrázek 6: Lokalita Mělnická Vrutice – Řepín (SEZNAM.CZ a.s.) (online) [cit. 2024.03.17], dostupné z <<https://mapy.cz/zakladni?x=14.5764341&y=50.3558137&z=13>>

Obrázek 7: Umístění vrtu DV5 1:25000 (ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA) (online) [cit. 2024.03.17], dostupné z <<https://mapy.geology.cz/geo/>>

Obrázek 8: Umístění vrtu Ř2 1:25000 (ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA) (online) [cit. 2024.03.17], dostupné z <<https://mapy.geology.cz/geo/>>

Obrázek 9: Poškození výstroje vrtu Ř2 (VODNÍ ZDROJE a.s., 2019)

Obrázek 10: Průběh HDZ na vrtu DV5 před regenerací (AUTOR, 2024)

Obrázek 11: Průběh HDZ na vrtu DV5 po regeneraci (AUTOR, 2024)

Obrázek 12: Průběh HDZ na vrtu Ř2 před regenerací (AUTOR, 2024)

Obrázek 13: Průběh HDZ na vrtu Ř2 po regeneraci (AUTOR, 2024)

Seznam tabulek

Tabulka 1- Hodnoty R_e pro jednotlivé oblasti proudění (AUTOR, 2024)

Tabulka 2 - Údaje o vrtu DV5 (ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA) (online) [cit. 2024.03.18], dostupné z <http://www.geology.cz/app/gdo/d.php?item=3&ID=225282&tt_=d#>

Tabulka 3 - Údaje o vrtu Ř2 (ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA) (online) [cit. 2024.03.18], dostupné z <http://www.geology.cz/app/gdo/d.php?item=3&ID=206262&tt_=d>

Tabulka 4 – Výsledky vrt DV5 (AUTOR, 2024)

Tabulka 5 - Výsledky vrt Ě2 (AUTOR, 2024)