

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

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
ENVIROMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**

**VYHODNOCOVÁNÍ EFEKTU
REGENERACE Z HYDRODYNAMICKÝCH
ZKOUŠEK NA VRTECH**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VEDOUcí PRÁCE:

prof. ING. PAVEL PECH, CSc.

DIPLOMANT:

Bc. PAVEL ČERNÝ

2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Pavel Černý

Voda v krajině

Název práce

Vyhodnocování efektu regenerace z hydrodynamických zkoušek na vrtech

Název anglicky

Evaluation of regeneration effect from hydrodynamic tests on wells

Cíle práce

Cílem práce je popsat metodu vyhodnocení hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu, kdy bereme v úvahu existenci skinového efektu a objemu vrtu.

Aplikovat alespoň dva postupy vyhodnocení skin faktoru na vrtu v Machníně a ve Velkém Hubenově.

Metodika

Zpracovat literární rešerši k vyhodnocování dodatečných odporů na vrtech, kdy je brán v úvahu i vliv objemu vody ve vrtu v počáteční části hydrodynamické zkoušky.

Popis zkoumané lokality a regenerace provedené na vrtech v Machníně a Velkém Hubenově.

Vyhodnocení hydrodynamických zkoušek před a po regeneraci.

Zhodnotit efekt regeneračního zásahu.

Diskuse.

Závěr.

Doporučený rozsah práce

40-50 str.

Klíčová slova

vrt, hydrodynamická zkouška, dodatečné odpory, regenerace

Doporučené zdroje informací

BEAR, J. : Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, Inc., New York, 1979

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

PECH, P.: Speciální případy hydrauliky podzemních vod. 2010. ČZU-VÚV TGM.

SHON, J. Basic Well Logging and Formation Evaluation. 2015. ISBN 978-87-403-0979-9

VALENTOVÁ, J. Hydraulika podzemních vod. Skripta. 2002. 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. Daniel Kahuda

Elektronicky schváleno dne 12. 3. 2019

doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 16. 03. 2019

Čestné prohlášení

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

V Praze, dne

.....

Poděkování

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

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vyhodnocováním efektu regenerace z hydrodynamických zkoušek na vrtech. V rešeršní části je řešena problematika pohybu vody v porézním prostředí, a také neustálené proudění k reálnému a ideálnímu vrtu. Další část se zabývá hydrodynamickými zkouškami, zejména čerpací a stoupací zkouškou. Do praktické části byly zahrnuty vrty na dvou lokalitách, u kterých proběhla regenerace čerpací zkouškou. Nejprve proběhly podrobné místní a geologické průzkumy, které mají samostatnou kapitolu. Poté následuje vyhodnocení naměřených dat z čerpací zkoušky před a po regeneraci; dosažené výsledky jsou podrobně vysvětleny a diskutovány. Jsou zde také uvedeny 2 druhy výpočtů skin efektu metodou zaleženou na Agarwalově řešení základní rovnice a vyjádřením z rovnice velikosti dodatečného snížení v odběrovém vrtu. Prostudováním rešeršní části si student osvojí znalosti a dovednosti v problematice proudění podzemní vody k reálnému vrtu a způsoby vyhodnocení naměřených dat. Získané znalosti si může ověřit v praktické části.

Klíčová slova:

hydrodynamická zkouška, vrt, dodatečné odpory, regenerace

Abstract

The thesis deals with the evaluation of regeneration effect from hydrodynamic tests on wells. The research part deals with the problem of water movement in the porous environment and also the unsteady flow to the real and ideal well. Next part deals with hydrodynamic tests, especially pumping and rising test. The practical part included wells in two locations where the pumping test was regenerated. First, detailed local and geological surveys were carried out with a separate chapter. This is followed by evaluation of the measured data from the pumping test before and after regeneration; the results are explained and discussed in detail. There are also mentioned two types of skin effect calculations using the type curve method and the expression of the stress level reduction equation. By studying the research part, the student will acquire knowledge and skills in the problems of groundwater flow to the real well and methods of evaluation of measured data. The acquired knowledge can be verified in the practical part.

Keywords:

hydrodynamic test, wells, additional resistances, regeneration

Obsah

Úvod	10
Cíle práce	11
Metodika	12
1. Zákonitosti pohybu vody v porézním prostředí	13
1.1. Darcyho zákon	13
1.2. Meze platnosti Darcyho zákona	15
1.3. Rovnice kontinuity porézního prostředí	17
1.4. Proudění zvodnělou vrstvou s napjatou hladinou	17
1.5. Proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou	18
1.6. Dupuitovy postuláty	19
2. Proudění podzemní vody k ideálnímu vrtu	21
2.1. Neustálené rotačně symetrické proudění	21
2.2. Theisova metoda typové křivky	23
2.3. Jacobova semilogaritmická metoda přímky	24
3. Neustálené proudění ke skutečnému vrtu	28
3.1. Bezrozměrné parametry	28
3.2. Dodatečné odpory	30
3.3. Zásobnost vrtu	33
4. Hydrodynamické zkoušky	35
4.1. Čerpací zkoušky	36
4.2. Stoupací zkoušky	36
5. Popis zkoumané lokality a horninového prostředí (Velký Hubenov)	39
5.1. Vyhodnocení vrtů Velký Hubenov (před regenerací)	40
5.2. Vyhodnocení vrtů Velký Hubenov (po regeneraci)	45
6. Popis zkoumané lokality a horninového prostředí (Machnín)	49

6.1. Vyhodnocení vrtů Machnín (před regeneraci)	50
6.2. Vyhodnocení vrtů Machnín (po regeneraci)	53
7. Diskuze	57
8. Závěr	59
Přehled literatury a použitých zdrojů	60
Seznam příloh	63
Přílohy	64

Úvod

V dnešní době, v době 21. století je velice řešené téma ubývání pitné vody v důsledku dlouhých suchých období. V základní odborné literatuře, například od (VALENOTOVÁ, 2007) se dozvídáme, že největší zásobu pitné vody tvoří podzemní voda. Od nepaměti tyto zdroje byly velice cenné a lidé se snažili a stále snaží o co nejefektivnější využití. Problémem proudění podzemní vody se koncem 19. století zabývala řada vědců, jmenovitě Chamberlin (1885) a King (1899). Ve svých studiích předpokládali, že podzemní voda proudí z výše položeného do níže položeného místa. A nemýlili se. Avšak podle mého názoru průkopníkem byl Henry Darcy, který na základě svých experimentů stanovil Darcyho zákon - zákon laminárního režimu proudění podzemní vody v porézním prostředí (rok 1856). Postupem času se vědci věnovali stále diskutovanějšímu tématu proudění podzemní vody k vrtu. V tomto odvětví zase vynikal Charles Vernon Theis, který položil základy pro zjišťování hydraulických parametrů porézního prostředí ze záznamu snížení hladiny podzemní vody ve vrtu, a také poukázal na spojitost mezi prouděním podzemní vody a přenosem tepla za přispění profesora matematiky C. I. Lubina. Ovšem jeho experimenty probíhali na ideálních vrtech, u kterých se nepředpokládaly dodatečné odpory a bezrozměrné parametry. Tyto dodatečné odpory odchyľují hodnoty snížení vody od modelu proudění k ideálnímu vrtu. Dodatečných odporů je několik, základní dělení je obsaženo například v literatuře (PECH, 2010). Vědci se snažili oddělit jednotlivé složky dodatečných odporů, ale narazili na řadu problémů. Avšak v roce 1953 Van Evendigen a Hurst poprvé definují tzv. skin factor, který způsobuje dodatečné snížení ve vrtu. Následně stanovují první rovnice pro jejich výpočet. Podle mého názoru se jedná o nový poznatek, který obohatil danou problematiku. Diplomová práce předkládá vyhodnocení dat z čerpacích zkoušek na reálných vrtech před a po regeneračním zásahu, které jsou podrobně interpretovány a diskutovány tak, aby si čtenář/student osvojil danou problematiku, kterou může poté reálně aplikovat v praxi.

Cíle práce

Popsat metodu vyhodnocení hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu, kdy bereme v úvahu existenci skinového efektu a objemu vrtu. Dále aplikovat minimálně dva postupy vyhodnocení skin faktoru na vrtu v Machíně a ve Velkém Hubenově.

Metodika

Na začátku práce bylo potřeba připomenout a vysvětlit proudění podzemní vody v porézním prostředí, zejména Darcyho zákon, rovnici kontinuity porézního prostředí, proudění zvodnělou vrstvou s napjatou a volnou hladinou a Dupuitovy postuláty.

Další část – proudění podzemní vody k ideálnímu vrtu zahrnuje vysvětlení neustáleného rotačně symetrického proudění zvodnělou vrstvou, kde jsou uvedeny jednotlivé předpoklady řešení. Dále je popsána aplikace Theisovi metody typové křivky a Jacobovi semilogaritmické metody přímky. Po této části diplomové práce následuje vysvětlení neustáleného proudění ke skutečnému vrtu, kde je popsán průsak podzemní vody k reálnému vrtu ve zvodni s napjatou hladinou. Jsou zde uvedeny jednotlivé bezrozměrné parametry, dodatečné odpory a je zde vysvětlena zásobnost vrtu. Navíc tato kapitola obsahuje i vysvětlení a definici skin factoru neboli skin efektu. Následuje kapitola hydrodynamických zkoušek, kde je popsán princip použití čerpací a stoupací zkoušky.

Dostáváme se k praktické části, do které byly zahrnuty 2 lokality (Velký Hubenov a Machnín). Nejdříve u každé lokality proběhl podrobný geologický a místní průzkum. Zdrojem podrobných informací byly také interní materiály společnosti Vodních zdrojů. Následovalo rychlé seznámení s jednotlivými vrty na lokalitě a naměřenými daty čerpací zkoušky před a po regeneraci. Poté proběhlo vyhodnocení a interpretace měřených dat, které jsou podrobně popsány a vysvětleny s odkazem na rešeršní část. Vyhodnocení také obsahuje dva způsoby určení skin efektu. Výsledky byly dány do přehledných tabulek, popřípadě grafů, které obsahují dosažené údaje před a po regeneraci čerpací zkouškou. Následně proběhla diskuze těchto výsledků a regeneračního zásahu. V závěrečné kapitole je zhodnocen efekt regeneračního zásahu s odkazem na dosažené výsledky u každé lokality.

1. Zákonitosti pohybu podzemní vody v porézním prostředí

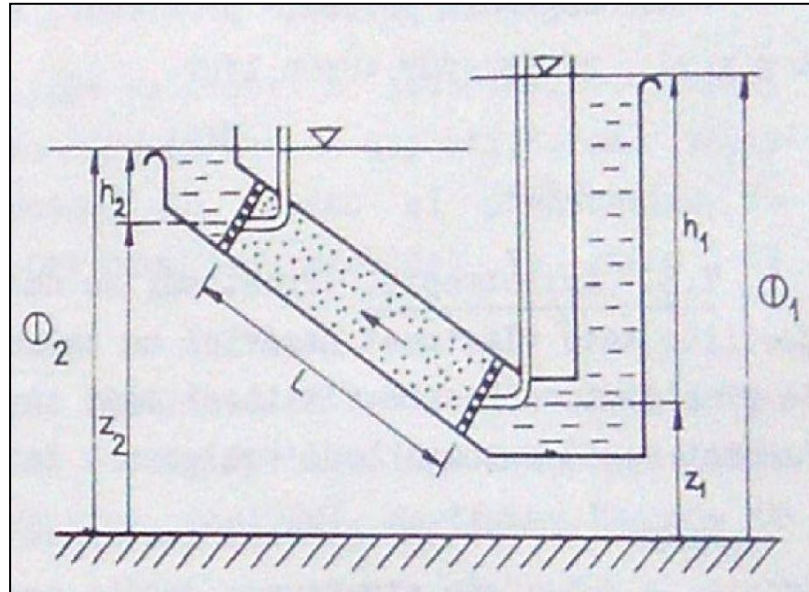
V rámci hydrologického cyklu se voda pohybuje z míst, kde probíhá přirozená nebo umělá dotace, do míst přirozeného/umělého odběru. Charakteristickým znakem podzemní vody je nízká rychlost proudění. Koncem 19. století se zabývala problémem proudění podzemní vody řada vědců, například Chamberlin (1885) a King (1899), kteří ve svých studiích předpokládali, že podzemní voda proudí z výše do níže položených oblastí. Odborně řečeno, proudění vody probíhá z místa s vyšší mechanickou energií do místa s nižší mechanickou energií (VALENTOVÁ, 2010). Mechanická energie vody udává potenciál proudění (práce, kterou voda musí překonat k přemístění do zvoleného bodu). V praxi využíváme místo potencionálu proudění hydraulickou výšku H [L]. Hodnota hydraulické výšky je dána součtem geodetické výšky z a tlakové výšky h_p . ρ udává hustotu kapaliny a g gravitační zrychlení; rovnice (1.1.1.)

$$H = z + \frac{h_p}{\rho g} \quad 1.1.1.$$

1.1. Darcyho zákon

Henry Philibert Gaspard Darcy se narodil roku 1803 ve městě Dijon. V tomto městě probíhal jeho celoživotní výzkum až do roku 1858, kdy zemřel. Ve své knize *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon - Veřejné fontány města Dijon*, 1856 (SIMMONS, 2008) popisuje své experimentální sledování průsaků vody písčivými vrstvami a stanovuje zákon odporu proudění vody v porézním prostředí. Jeho experiment probíhal ve válci naplněném pískem s konstantním příčným průřezem S a Darcy určil, že při rovnoměrném filtračním proudění je průtok vody závislý na hydraulické vodivosti, ploše průtočného průřezu a hydraulickém spádu (PECH, 2010). Obrázek č. 1 znázorňuje zjednodušené schéma proudění vody podle Darcyho.

$$Q = KS \frac{\phi_1 - \phi_2}{L} \quad 1.1.2.$$



Obrázek č. 1 – Darcyho experiment (MLS, 1988)

Rovnice (1.1.2.) viz výše je Darcyho zákon, kde: Q je výsledný průtok [$L^3 \cdot T^{-1}$], K je hydraulická vodivost [$L \cdot T^{-1}$], S – plocha průtočného průřezu [L^2], $\Phi_1 - \Phi_2$ je rozdíl piezometrických výšek [L] a L – délka (vzdálenost) profilů [L].

Rovnici (1.1.2.) můžeme také zapsat v diferenciální formě (KURÁŽ, 2014).

$$v = -K \frac{dh}{dx} \quad 1.1.3.$$

Poměr zlomku s hodnoty dh/dx představuje hydraulický gradient, v značí (darcyovskou rychlost)¹ v jednotkách [$L \cdot T^{-1}$]. Tato rovnice platí pouze pro jednorozměrné proudění vody v homogenním prostředí. Pro vyjádření trojrozměrného proudění podzemní vody použijeme rovnici (1.1.4.)

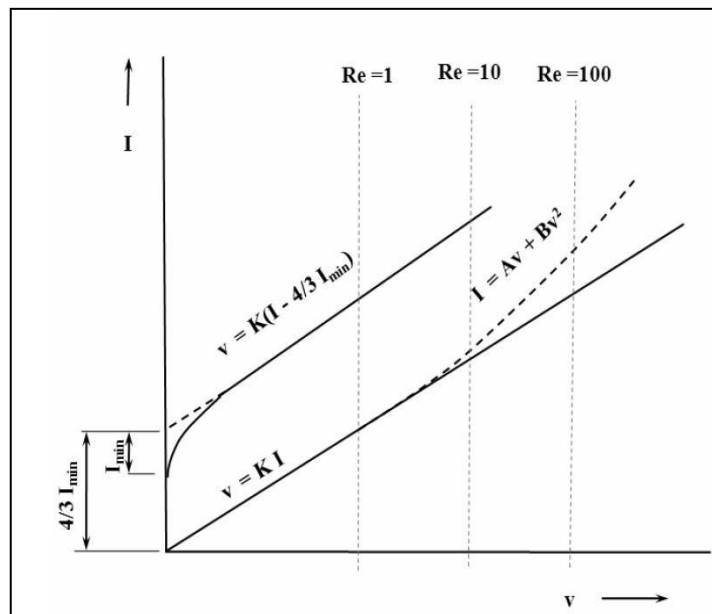
$$\begin{aligned} v_x &= -K \frac{\partial H}{\partial x} \\ v &= K \text{ grad}H \text{ nebo } v_y = -K \frac{\partial H}{\partial y} \\ v_z &= -K \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned} \quad 1.1.4.$$

Kde vektor v obsahuje složky v_x, v_y, v_z , které jsou ve směru os x, y, z . Pokud proudění probíhá v homogenním prostředí, konstanta hydraulické vodivosti $K(x, y, z) = C$.

¹Fiktivní rychlost [$L \cdot T^{-1}$], kdy průtok proteče celou plochou zvoleného průtočného průřezu.

1.2. Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon je lineární zákon, který vyjadřuje lineární závislost rychlosti proudící vody porézním prostředím a hydraulickým gradientem. Lineární závislost je platná v určitých hodnotách gradientu hydraulické výšky; neplatí v celém rozmezí od 0 do ∞ . Na obrázku č. 2 níže můžeme vidět kritické hodnoty (přechody) proudění mezi laminárním a turbulentním prouděním. Svislá osa y obsahuje hodnoty hydraulického spádu I a vodorovná osa x rychlost proudění v .



Obrázek č. 2 – Meze platnosti Darcyho zákona (PECH, 2010)

V praxi se všeobecně pro určení přechodu používá Reynoldsovo číslo (Re). Reynoldsovo číslo je slovně definováno v odborné literatuře jako: „bezrozměrné číslo, vyjadřující poměr mezi inerciálními a viskózními silami působícími na proudící kapalinu“². Zjednodušeně řečeno, poměr inerciálních a viskózních sil je de facto poměr setrvačných a třecích sil. Pro určení přechodu proudění využíváme kritické hodnoty Re_{krit} (BEAR, 1979).

$Re_{krit} 0 - 10$ laminární proudění

$Re_{krit} 10 - 100$ přechodná (nelineární oblast)

$Re_{krit} > 100$ turbulentní proudění

²VALENTOVÁ, J. Hydraulika podzemní vody. Vyd. 3. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03625-9, 16 s.

V jemnozrnných materiálech Darcyho vztah platí až po překročení kritické hodnoty hydraulického gradientu a můžeme ho poté přepsat pomocí rovnice (1.2.1.) (MUCHA, 1987).

$$v = K \left(I - \frac{4}{3} I_{min} \right) \quad 1.2.1.$$

Z rovnice vyplývá, že voda obsažená v pórech se dá do pohybu, ale jenom její určitá část. K značí hydraulickou vodivost a I hydraulický spád. Hodnota I_{min} se pohybuje podle zrnitostního složení zeminy - pro hlinité okolo 0,30 až 0,50 a jílovité 0,5 až 1,0 (PECH, 2010).

Nyní se dostáváme k rovnici pro určení Reynoldsova čísla .

$$Re = \frac{v d_e}{\mu} \quad 1.2.2.$$

Výsledná hodnota Reynoldsova čísla Re , jak jsme se dozvěděli na začátku kapitoly, je bezrozměrné číslo, μ - značí kinematickou viskozitu v jednotkách $[M.L^2.T^{-1}]$, v - rychlost proudění kapaliny v jednotkách $[L.T^{-1}]$ a poslední člen d_e efektivní průměr zrna $[L]$. Hodnotu d_e můžeme vyjádřit například vztahem: $d_e = \sqrt{k_p}$ (WARD, 1964), kde k_p je koeficient propustnosti $[L^2]$. V praxi se často setkáme s průměrem d_{10} - ve zkoumaném vzorku se nachází právě 10% zrn, které mají menší průměr než d_{10} .

V rozmezí Re 0 až 10 je zaručena platnost Darcyho vztahu. Při dosažení hodnot blízko Re 10, nastává nepatrné odchýlení od lineárního průběhu, které je znázorněno na obrázku č. 2. Po dosažení hodnoty větších Re 10 dochází k postupně se zvětšujícím odchýlení od lineárního průběhu, které vyjádříme rovnicí (1.2.3.) pro odporový zákon (PECH, 2010). A, B představují koeficienty a v rychlost proudění.

$$I = Av + Bv^2 \quad 1.2.3.$$

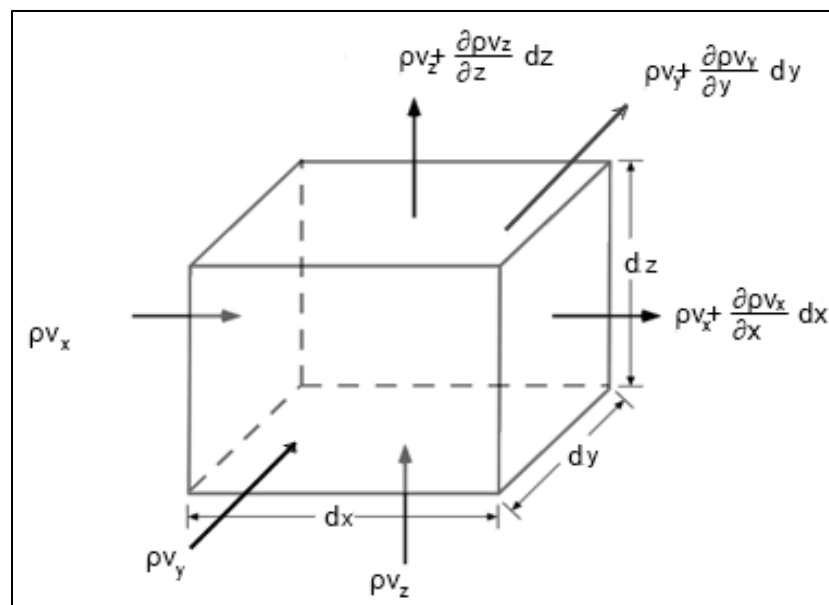
V hodnotách $Re > 100$ již zcela převládá turbulentní proudění, a po úpravě rovnice (1.2.3.) má tvar:

$$I = Bv^2 \quad 1.2.4.$$

1.3. Rovnice kontinuity porézního prostředí

Rovnice kontinuity se řadí mezi základní fyzikální zákony. Je vyjádřením zákona zachování hmoty, při kterém platí zákon zachování hmoty, a v porézním prostředí se převážně nachází v plně nasycené zvodnělé vrstvě (HÁLEK A ŠVEC, 1973). Představme si elementární rovnoběžnostěn v proudu podzemní vody, který je znázorněn na obrázku č. 3. Strany jsou rovnoběžné s jednotlivými souřadnicovými osami (x , y , z) a mají rozměry dx , dy , a dz . Rovnice kontinuity má platnost za předpokladu, že v našem uvažovaném rovnoběžnostěnu nedojde ke ztrátám či dotaci vody. Respektive vstupní objem hmoty se musí rovnat výstupnímu objemu hmotě vody. Rovnice kontinuity vypadá následovně (1.3.1.). ∂v_x , ∂v_y , a ∂v_z jsou rychlosti proudění ve směrech jednotlivých souřadnicových os.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad 1.3.1.$$



Obrázek č. 3 - Elementární rovnoběžnostěn (FREEZE A CHERRY, 1979)

1.4. Proudění zvodnělou zvodní s napjatou hladinou

Při proudění kapaliny k vrtu s napjatou hladinou bývají hydrodynamické podmínky mnohem jednodušší než u vrtu s volnou hladinou (PECH, 2010). Pokud se zaměříme na proudění podzemní vody vrstvou s volnou hladinou, zjistíme, že dochází ke změně úrovně hladiny vody v čase t a zároveň se mění mocnost zvodnění porézního prostředí a transmisivita T nasycené vrstvy. Základní rovnice

trojrozměrného neustáleného proudění podzemní vody s napjatou hladinou vychází z Darcyho vztahu (1.1.2.) a z rovnice kontinuity porézního prostředí (1.3.1.); a po úpravě má tvar:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad 1.4.1.$$

Snížení s můžeme vyjádřit jako: $s = H - h$, kde H představuje hodnotu piezometrické výšky v čase $t = 0$ nebo v dosahu depresního kužele [L] a h piezometrickou výšku v daném bodě [L]. Transmisivita T je dána součinem hydraulické vodivosti K [L.T⁻¹] a mocnosti zvodnělé vrstvy b [L]. S značí koeficient zásobnosti, nebo-li storativity [-], který byl odvozen ze specifické storativity S_s . Zlomek v pravé části rovnice $\frac{\partial s}{\partial t}$ představuje vyvolané snížení s za časový interval t [T].

1.5. Proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou

Jak již bylo řečeno na začátku kapitoly 1.4., proudění zvodnělou vrstvou s volnou hladinou má jednodušší hydrodynamické podmínky. Pokud zahájíme čerpání z vrtu, tak zvodnělá vrstva, respektive její transmisivita, není v dosahu depresního kužele konstantní, ale je funkcí vzdálenosti od vrtu (PECH, 2010).

Z rovnic, které popisují proudění podzemní vody s napjatou hladinou, se uplatňují tyto předpoklady pro proudění s volnou hladinou: průměrná transmisivita T_p je rovna prvnímu přiblížení aritmetického průměru z transmisivity T_0 na obvodě depresní zóny a snížení transmisivity T_v na plášti vrtu, vyjádřené rovnicí.

$$T_p = \frac{T_0 + T_v}{2} \quad 1.5.1.$$

V praxi existují různé techniky výpočtu podle vstupních dat. Pro účely této diplomové práce uvedu variantu, při které ve výpočtech pro proudění podzemní vody s volnou hladinou upravíme hodnoty snížení hladiny ve vrtu opravným snížením s_v .

$$s_c = s_v \frac{H'}{H} = s_v - \frac{s_v^2}{2H} \quad 1.5.2.$$

Kde: s_c ... opravné snížení pro proudění s volnou hladinou [L]

s_v ... snížení hladiny vody ve vrtu [L]

H' ... mocnost redukované zvodnělé porézni vrstvy [L]

H ... mocnost zvodnělé vrstvy v dosahu depresního kužele [L]

1.6. Dupuitovy postuláty

Dupuitovy postuláty se zabývají řešením proudění podzemní vody s volnou hladinou. V případě rovnoměrného proudění je volná hladina proudnicí a v každém bodě této hladiny jsou vektory hustoty toku směry tečny k hladině (MLS, 1988). Velikost lze vyjádřit rovnicí (1.6.1.), která vychází z diferenciální formy Darcyho zákona:

$$v_s = -K \frac{dH}{dl} = -K \sin \theta \quad 1.6.1.$$

Kde: $\sin \theta$... je úhel, který svírá tečna k hladině s vodorovným směrem.

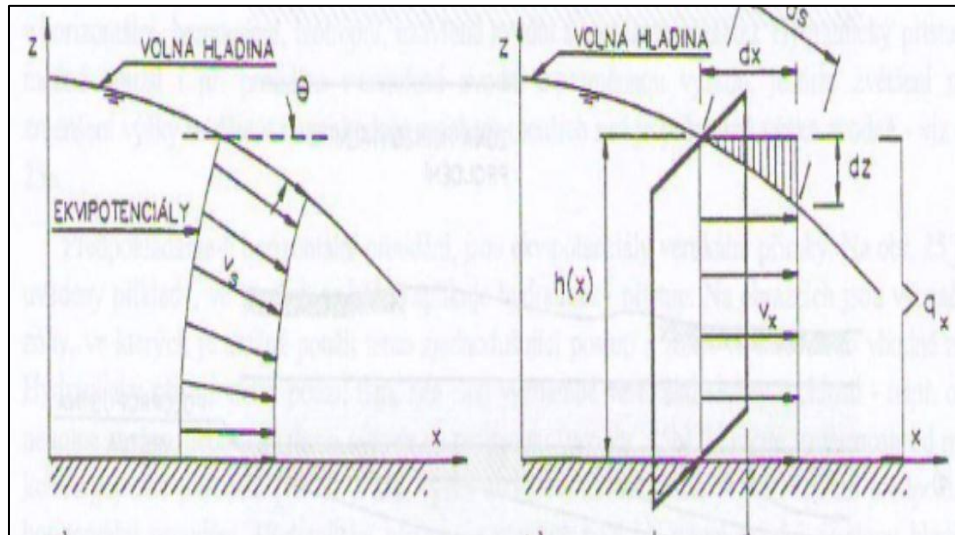
Dupuitova teorie je založená na zjednodušených postulátech. To znamená, že sklon hladiny podzemní vody je velmi malý (v hodnotách 1/1000 až 10/1000) a lze tento směr považovat za horizontální (BEAR, 1972). Je možné jej vyjádřit rovnicí (1.6.2.), kde hydraulická výška $H(x, y, z)$ a hladina podzemní vody $h(x, y)$ mají stejné hodnoty, proudnice představují vodorovné přímky a křivky jsou ekvipotenciály kolmé na proudnice.

$$\frac{dH}{dx}(x, y, z) = \frac{dh}{dx}(x, y) \quad 1.6.2.$$

V rovnici (1.6.1.) se hodnoty úhlu θ pohybují do sklonu cca 10°. Tím pádem platí $\sin \theta = dh/ds$ a je možné tento výraz nahradit $\operatorname{tg} \theta = dh/dx$. Hydraulická výška poté není funkcí vertikální souřadnice z , ale $H = h(x)$.

Velikost rychlosti představuje rovnice (1.6.3.), kde rychlost je proti směru osy z viz obrázek č. 4. Vertikální složka rychlosti je záporná nad nepropustným podložím.

$$v_z(x, z) = -\frac{zq_x^2}{Kh^3(x)} \quad 1.6.3.$$



Obrázek č. 4 - Dupuitovy postuláty (VALENTOVÁ, 2010)

2. Proudění podzemní vody k ideálnímu vrtu

Na začátku této kapitoly definuji pár slovy ideální vrt. Je to takový vrt, u kterého se neuvažují dodatečné odpory vně i v blízkém okolí; přibližně 5m od osy vrtu (PECH a kol., 2015). A také se nebere v úvahu vliv objemu vody na počátku čerpací zkoušky. Depresní křivka má začátek na hladině vody v čerpaném vrtu.

2.1. Neustálené rotačně symetrické proudění

Pro tento případ proudění budeme předpokládat horizontální proudění vody zvodnělou vrstvou, která má napjatou hladinu a je omezena nepropustnými vrstvami stejně vzdálenými. Při řešení neustáleného rotačně symetrického proudění vycházíme z rovnice (1.4.1.) v kapitole 1.4. Jelikož se jedná o horizontální proudění, můžeme z rovnice vyloučit vertikální složku. Poté dostáváme rovnici ve tvaru (2.1.1.)

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad 2.1.1.$$

Rovnici následně zderivujeme a upravíme pro převedení do cylindrických souřadnic, a to proměnnou $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ (PECH, 2010) a platí:

$$\frac{\partial s}{\partial x} = \frac{\partial s \partial r}{\partial r \partial x} = \frac{\partial s}{\partial r \sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\partial s}{\partial r r} \quad 2.1.2.$$

Poté provedeme druhou derivaci:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 s x^2}{\partial r^2 r^2} + \frac{\partial s y^2}{\partial r r^3} \quad 2.1.3.$$

Na závěr obdobně vyřešíme derivaci pro y :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 s y^2}{\partial r^2 r^2} + \frac{\partial s x^2}{\partial r r^3} \quad 2.1.4.$$

Tento tvar (2.1.4.) spolu s tvarem derivace (2.1.3.) dosadíme do první rovnice (2.1.1.) a získáme základní rovnici (2.1.5.), která popisuje neustálené rotačně symetrické proudění podzemní vody k vrtu v požadovaných cylindrických souřadnicích.

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad 2.1.5.$$

Kde: s ... je snížení [L]

r ... radiální vzdálenost [L]

S ... storativita zvodnělé vrstvy [-]

T ... transmisivita zvodnělé vrstvy [$L^2 \cdot T^{-1}$]

t ... čas [T]

Řešení poprvé publikoval americký vědec Charles Vernon Theis (1935), který de facto položil základy pro zjišťování hydraulických parametrů porézního prostředí ze záznamu snížení hladiny podzemní vody ve vrtu. Při řešení vycházel z následujících předpokladů (THEIS, 1935):

1. jedná se o zvodnělou vrstvu s napjatou hladinou,
2. zvodnělá vrstva je homogenní a izotropní,
3. výška zvodnělé vrstvy se nemění v řešené oblasti,
4. jedná se o nestlačitelnou kapalinu,
5. koeficienty transmisivity a storativity jsou neměnné v čase a prostoru,
6. čerpané množství vody z vrtu je konstantní,
7. vrt je v neomezené (zvodnělé vrstvě)³,
8. po celou dobu čerpací zkoušky platí Darcyho vztah,
9. piezometrická výška hladiny podzemní vody v čase $t = 0$ je ve všech místech zvodnělé vrstvy konstantní a je rovna H ,
10. poloměr vrtu je zanedbatelně malý – $r = 0$
11. platí definice ideálního vrtu, viz kapitola 2.

Theis si uvědomil spojitost mezi prouděním podzemní vody a přenosem tepla a s pomocí profesora matematiky C. I. Lubina (FETTER, 2001) určil následující tvar snížení.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad 2.1.6.$$

³Vrt nedosáhne během čerpání k nepropustné ani napájecí hranici.

Kde $W(u)$ představuje Theisovu studňovou funkci [-], která je ve tvaru exponenciálního integrálu a pro hydrogeologické účely se využívá její aproximace nekonečné řady (THEIS, 1935).

$$W(u) = -0,577216 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2*2!} + \frac{u^3}{3*3!} - \frac{u^4}{4*4!} \dots \quad 2.1.7.$$

A u vyjadřuje bezrozměrný argument Theisovy studňové funkce

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad 2.1.8.$$

Kde: t ... čas [T]

r ... radiální vzdálenost [L]

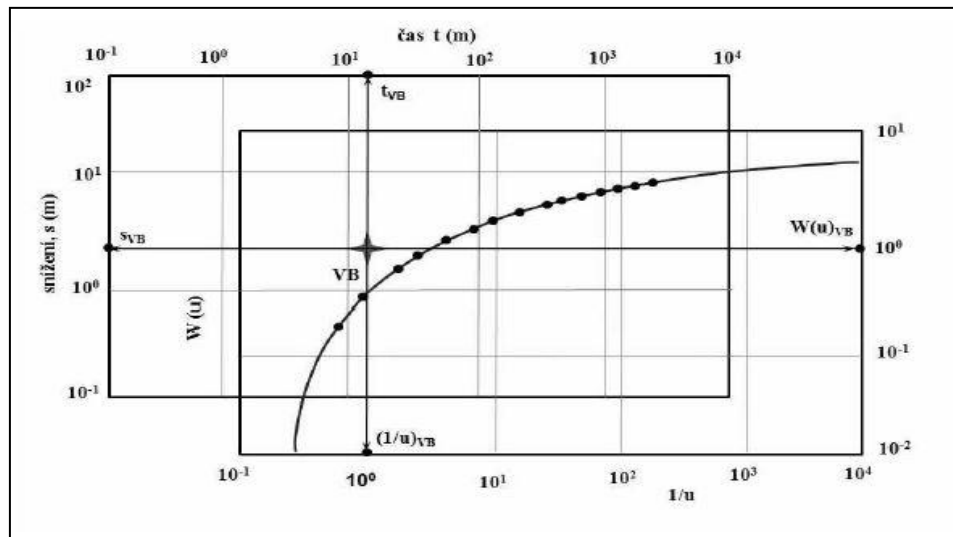
T ... koeficient transmisivity [$L^2 \cdot T^{-1}$]

S ... storativita zvodnělé vrstvy [-]

2.2. Theisova metoda typové křivky

Metodu Theisovy typové křivky lze použít na odčerpávaném vrtu, pokud jsou dodrženy následující podmínky: objem vrtu se blíží nulové hodnotě a dodatečné odpory v blízkém okolí a na vrtu jsou zanedbatelné (PECH, 2010). Rovnice (2.1.6.) a (2.2.1.) představuje základ pro vyhodnocení přítokových zkoušek do vrtu za nestacionárního režimu proudění a mohou být také použity pro vyhodnocení transmisivity T a storativity S z hodnot čerpací zkoušky, kde známe přítok Q i ostatní parametry.

Prvním krokem aplikace metody typové křivky je vytvoření grafu; vynesení hodnot snížení vody ve vrtu a času z čerpací zkoušky do odděleného grafu v log - log měřítku separátně. Ovšem je důležité, aby zmíněné grafy měly shodné logaritmické měřítko.



Obrázek č. 5 – Theisova metoda typové křivky (PECH, 2010)

V dalším kroku posuneme křivku, kterou jsme získali z čerpací zkoušky, po Theisově typové křivce než dosáhneme shody. Poté si zvolíme libovolný vztahový bod, pojmenujeme ho například VB . Pro tento bod odečítáme hodnoty s_{VB} a $W(u)_{VB}$ pro získání koeficientu transmisivity (2.2.1.) a hodnoty $(l/u)_{VB}$ a t_{VB} pro koeficient storativity (2.2.2.). Odečtené hodnoty pro určení transmisivity T dosadíme do základní rovnice (2.2.1.) a hodnoty storativity S do rovnice (2.1.6.).

$$T = \frac{Q}{4\pi s_{VB}} W(u)_{VB} \quad 2.2.1.$$

$$S = \frac{4Tu_{VB}t_{VB}}{r^2} \quad 2.2.2.$$

Kde: T ... hodnota transmisivity [$L^2 \cdot T^{-1}$]

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

t_{VB} ... čas [T]

r ... radiální souřadnice [L]

2.3. Jacobova semilogaritmická metoda přímky

Theisova metoda typové křivky byla modifikována Jacobem roku 1946. Jacob upravil rovnici Theisovy studňové funkce $W(u)$ za podmínek: hodnota l/u je větší než 100 s chybou menší než 0,25% (PECH, 2010). Postupně zanedbal členy pravé strany rovnice, vyjma prvních dvou, a semilogaritmická aproximace studňové funkce (2.3.1.) poté vypadá následovně (JACOB, 1946).

$$W(u) = -0,577216 - \ln u \quad 2.3.1.$$

Po úpravě a nahrazení argumentu u v Theisově studňové funkci dostáváme výslednou rovnici:

$$W(u) \cong \ln \frac{2,246Tt}{r^2S} \quad 2.3.2.$$

Pokud do výrazu (2.3.2.) dosadíme rovnici (2.1.6.) dostaneme vztah vyjadřující snížení s :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2,246Tt}{r^2S} \quad 2.3.3.$$

Nahrazením přirozeného logaritmu \ln za dekadický logaritmus \log získáme upravený vztah pro snížení (2.3.4.), který je v arbitrární vzdálenosti od osy odčerpávaného vrtu v čase t (PECH, 2010).

$$s = \frac{0,183Q}{T} \log \frac{2,246Tt}{r^2S} \quad 2.3.4.$$

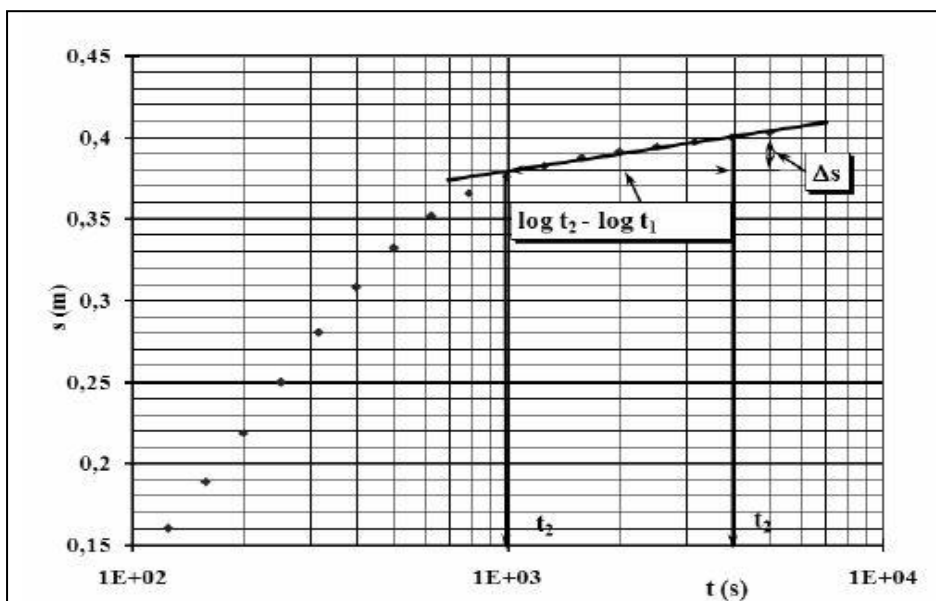
Při vynášení křivky z čerpací zkoušky záleží především na délce časového úseku, viz obrázek grafu č. 6. Delší časové úseky křivky se transformují do přímky se sklonem, který vyjadřuje rovnice (2.3.5.)

$$i = (s_2 - s_1) / (\log t_2 - \log t_1) \quad 2.3.5.$$

Kde: i ... výsledný sklon přímky [-]

s_1, s_2 ... snížení na vrtu [L]

$\log t_1, \log t_2$... logaritmus času [T]



Obrázek č. 6 – Graf čerpací zkoušky (PECH, 2010)

Výsledný sklon přímky i ze vztahu (2.3.5.) dosadíme do rovnice pro výpočet koeficientu transmisivity (2.3.6.), který má následující tvar:

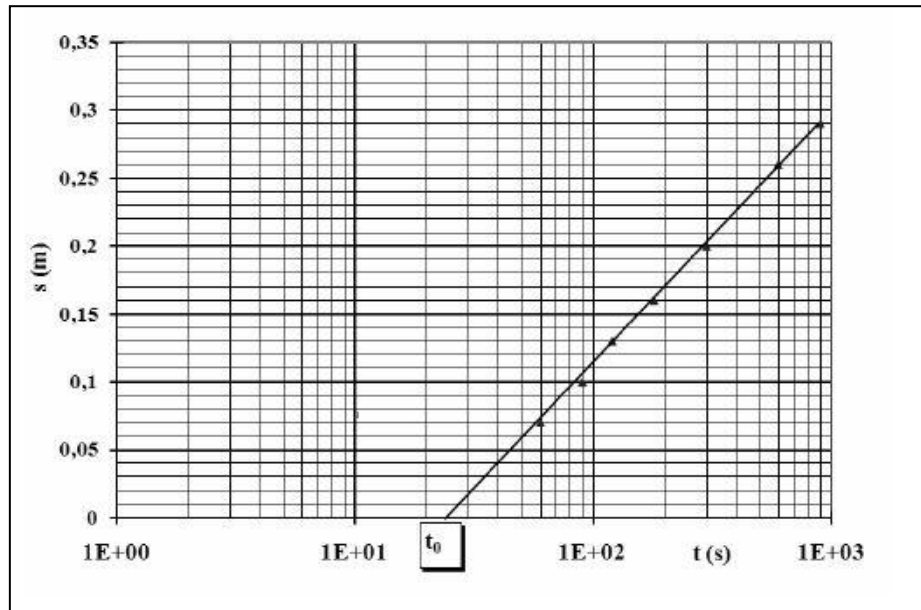
$$T = 0,183 \frac{Q}{i} \quad 2.3.6.$$

Kde: T ... je koeficient transmisivity [$L^2 \cdot T^{-1}$]

Q ... čerpané množství z vrtu [$L^3 \cdot T^{-1}$]

i ... sklon přímky [-]

Pokud máme k dispozici údaje z pozorovacího vrtu, můžeme určit koeficient storativity Jacobovou metodou, na základě zjištěných hodnot snížení hladiny v čase t . Na semilogaritmickém grafu (obrázek č. 7) vidíme, že body leží na přímce. Osa x obsahuje logaritmus času [T] a osa y snížení [L]. Počáteční časový bod t_0 udává začátek snížení piezometrické hladiny na pozorovacím vrtu, kde hodnota snížení je ještě nulová.



Obrázek č. 7 – Graf čerpací zkoušky, pozorovací vrt (PECH, 2010)

Výpočet koeficientu storativity (2.3.7.) vypadá následovně:

$$S = 2,246 \frac{T t_0}{r^2} \quad 2.3.7.$$

Kde: S ... koeficient storativity [-]

t_0 ... čas průsečíku extrapolované přímky [T]

r ... vzdálenost pozorovacího vrtu od osy odčerpávaného vrtu [L]

T ... koeficient transmisivity [$L^2 \cdot T^{-1}$]

3. Neustálené proudění ke skutečnému vrtu

V této kapitole diplomové práce je popsán průsak podzemní vody k reálnému vrtu, který se nachází ve zvodni s napjatou hladinou a je v bezrozměrných parametrech.

Reálný vrt můžeme definovat jako vrt, kde platí kladné nebo záporné dodatečné odpory, a v počátečním čase nedochází k zanedbání odčerpávaného objemu vody. Jednotlivé odpory závisí na nasyceném porézním prostředí, viskozitě kapaliny μ a dodatečných ztrátách, které vznikají v blízkém okolí a na stěnách uvnitř vrtu. Při uvažování ideálního vrtu zanedbáváme dodatečné odpory a objem vrtu, které neovlivňují průběh přítokových zkoušek. Podrobněji je tato problematika popsána v kapitole 3.2.

3.1. Bezrozměrné parametry

Bezrozměrné parametry zvodnělé vrstvy dělíme na: bezrozměrné snížení piezometrické výšky ve vzdálenosti r od vrtu (3.1.1.), bezrozměrný čas (3.1.2.), bezrozměrný poloměr (3.1.3.), bezrozměrné snížení hladiny vody v odběrovém vrtu (3.1.4.), bezrozměrný koeficient storativity vrtu (3.1.5.) a bezrozměrný koeficient dodatečných odporů (3.1.6.). Nyní uvedu základní rovnice; vyjádření jednotlivých parametrů (PECH, 1988).

- bezrozměrné snížení

$$s_D(r_D, t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h(r, t)) \quad 3.1.1.$$

Kde: T ... transmisivita [$L^2 \cdot T^{-1}$]

Q ... odběr vody z vrtu [$L^3 \cdot T^{-1}$]

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

H ... piezometrická výška před zahájením hydrodynamické zkoušky, $t = 0$ [L]

t ... měřený čas od počátku hydrodynamické zkoušky [T]

t_D ... bezrozměrný čas [-]

r_D ... bezrozměrný poloměr [-]

- bezrozměrný čas

$$t_D = \frac{Tt}{r_V^2 S} \quad 3.1.2.$$

kde: r_V ... poloměr odčerpávaného vrtu [L]

S ... storativita [-]

T ... transmisivita [$L^2 \cdot T^{-1}$]

t ... čas [T]

- bezrozměrný poloměr

$$r_D = \frac{r}{r_V} \quad 3.1.3.$$

kde: r ... vzdálenost od osy odčerpávaného vrtu [-]

- bezrozměrné snížení ve vrtu

$$s_{VD}(t_D) = \frac{2\pi T}{Q} (H - h_V(t)) \quad 3.1.4.$$

kde: h_V ... výška hladiny v čase t (odběrový vrt) [L]

Q ... čerpané množství z odběrového vrtu [$L^3 \cdot T^{-1}$]

H ... primární piezometrická výška v čase t rovna 0 [L]

- bezrozměrná storativita vrtu

$$C_D = \frac{C}{2\pi r_V^2 S} \quad 3.1.5.$$

kde: C ... jednotkový faktor storativity vrtu [-]

S ... storativita [-]

- bezrozměrný koeficient dodatečných odporů

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} \quad 3.1.6.$$

kde: s_w ... část snížení v řešeném vrtu, které připadá na vliv dodatečných odporů [L]

3.2. Dodatečné odpory

Dodatečné odpory mohou být vysvětleny jako soubor jevů, které svým působením na skutečném vrtu, odchylojí hodnoty snížení vody od modelu proudění vody k úplnému (ideálnímu) vrtu. Poté naměřené snížení hladiny vody v řešeném (skutečném) vrtu bude logicky větší než v hydrodynamicky dokonalém vrtu bez těchto dodatečných odporů. Rozdíl bude také ve vykreslené depresní křivce hladiny podzemní vody.

Druhy dodatečných odporů lze rozdělit na odpory: při zhotovování vrtu (technické), hydromechanické, chemické a biologické. Důležité je znát velikost vzniklých odporů a jimi způsobené dodatečné snížení. Výsledné hodnoty dále slouží ke stanovení koeficientu filtrace za stacionárního režimu (PECH, 2003).

Část snížení, které připadá na působení dodatečných odporů lze rozdělit takto:

s_K - odpory vznikající kolmatací (zanesením vtokových otvorů) vrtu.

V průběhu exploatace vrtu dochází ke snížení průtočnosti vlivem zanášení pórů, nebo k narušení původní struktury porézního prostředí vlivem hloubení odběrového vrtu. Například rotační způsob vrtání má za následek vzniku tzv. kalové kůry⁴, a při nárazovém vrtání je ztuhne porézní prostředí a ovlivní se tak jeho propustnost. Snížení:

s_F – způsobené odpory vznikající zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu.

Typicky se může zmenšit aktivní průřez stěny vrtu filtrem, nebo perforovanou pažnicí.

s_P – odpory vznikající neúplným průnikem.

Tak zvané neúplné vrty, jejichž otevřený úsek neprochází celou mocností zvodnělého kolektoru a jedná se o obecný případ studny úplné (ČÍŽEK, 2011).

s_I – odpory vznikající ucpáváním.

⁴Snížení propustnosti porézního prostředí důsledkem vniknutí výplachu do zvodnělé vrstvy (PECH, 2010).

Dochází k zachycování částic horniny, popřípadě obsypu, ve filtrech vlivem chemické inkrustace nebo působením mikroorganismů.

s_T – třením proudící kapaliny,

o stěny vrtu a jejím vnitřním třením. Zde zahrnujeme také dodatečné odpory, které vznikají turbulencí uvnitř vrtu.

s_{TP} – turbulentním režimem proudění v blízkosti odběrového vrtu.

s_O – dalšími druhy dodatečných odporů

Celkové snížení vyjádříme součtem uvažovaných dodatečných odporů (3.2.1.), v našem případě tedy:

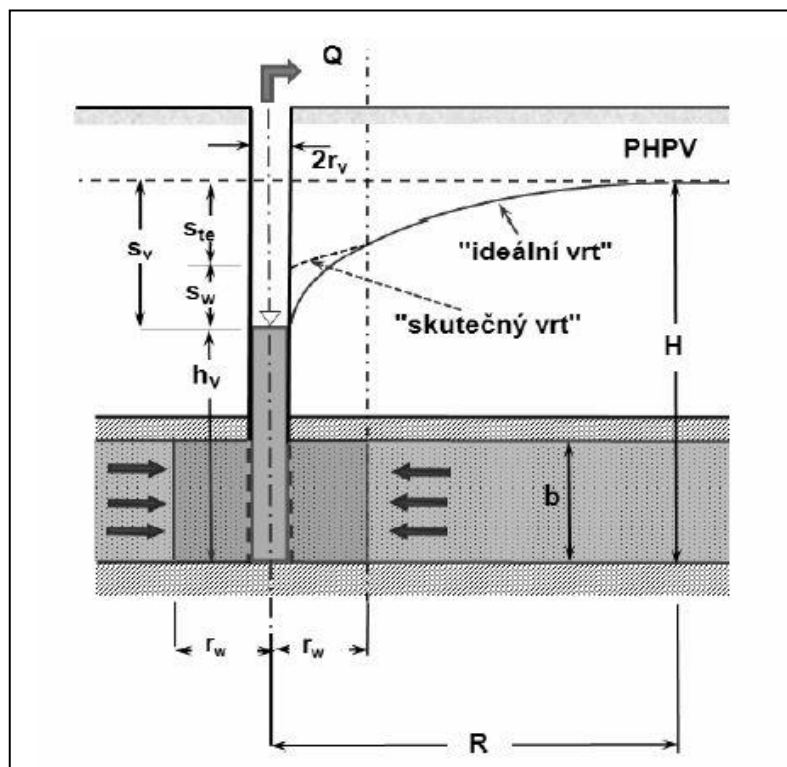
$$s_W = s_K + s_F + s_P + s_I + s_T + s_{TP} + s_O \quad 3.2.1.$$

Kde: s_W ... je celkové snížení způsobené vlivem jednotlivých dodatečných odporů.

Pokud bychom chtěli oddělit jednotlivé složky dodatečných odporů, narazíme na řadu problémů. V mnoha publikacích, které se zabývají zmíněnou problematikou, uvažují sumarizaci dodatečných odporů ve formě bezrozměrného koeficientu W – neboli skin faktoru. Nyní zkráceně vysvětlím tento pojem.

„Skin factor“ neboli skin effect byl poprvé definován van Everdingenem a Hurstem v roce 1953. Můžeme ho definovat jako překážku toku, která je způsobena nekonečně tenkým poškozením oblasti kolem vrtu. Dodatečný pokles tlaku přes tento efekt je úměrný průtoku kapaliny ve vrtu a chová se jako ustálené proudění (WATTENBARGER, 1967).

Vraťme se k dodatečným odporům. Celkové snížení hladiny vody, které bylo naměřené v odběrovém vrtu během probíhající přítokové zkoušky, určíme následujícím vztahem (3.2.2.) viz obrázek č. 8.



Obrázek č. 8 – Snížení v odběrovém vrtu s dodatečnými odpory (PECH, 2010)

$$s_v = s_{te} + s_w \quad 3.2.2.$$

Kde: s_v ... celkové snížení hladiny v odběrovém vrtu [L]

s_{te} ... snížení hladiny vody na vrtu bez uvažování dodatečných odporů [L]

s_w ... dodatečné snížení hladiny vody ve vrtu způsobené dodatečnými odpory [L]

Při zanedbání třecích sil proudící kapaliny a turbulentního režimu proudění v odběrovém vrtu je velikost dodatečného snížení podle vztahu (3.2.3.) a závisí na odebírané vydatnosti Q (VAN EVERDINGEN, 1953).

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} W \quad 3.2.3.$$

Kde: W ... je koeficient dodatečných odporů [-]

Na závěr se vraťme ke kapitole 2.3, kde byla popsána metoda vyhodnocení pomocí Jacobovy semilogaritmické metody přímky. Dodatečné odpory neovlivňují sklon přímkového úseku a změny se neprojevují ani na pozorovacím vrtu při výpočtech transmisivity T a koeficientu hydraulické vodivosti K . Dodatečné odpory v tomto případě ovlivní pouze délku a tvar počátečního úseku (PECH, 2010a).

3.3. Zásobnost vrtu

Neboli storativita vrtu se dá vyložit jako dodatečné plnění nebo prázdnění vrtu. Tento efekt velice ovlivňuje počáteční úsek přítokové zkoušky, a pokud není storativita vrtu zahrnuta do výpočtu (přítokových zkoušek)⁵, dostáváme nepřesné výsledky.

Představme si vrt, ze kterého začneme v čase $t = 0$ čerpat určité množství vody, kde $Q = konst.$ V tomto případě máme nulový přítok do vrtu ze zvodnělé vrstvy, označme ho $Q_p = 0$, neboť je čerpána voda z vlastního objemu vrtu. S narůstajícím časovým úsekem t se bude měnit množství odčerpávané vody do hodnoty Q a postupně se bude zmenšovat vliv vlastního objemu vrtu, až dosáhne zanedbatelných hodnot oproti přítoku z okolní zvodnělé vrstvy Q_p .

Touto problematikou se zabýval Ramey (1970), který zkoumal u naftových vrtů vliv objemu na průběh stoupací zkoušky v počátečním časovém úseku. Je považován za autora tak zvaného jednotkového faktoru storativity vrtu C , který ve zjednodušeném tvaru (3.3.1) zapíšeme následovně:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad 3.3.1$$

Kde: C ... faktor storativity vrtu [L^2]

ΔV ... změna objemu vrtu [L^3]

Δh ... změna výšky vody ve vrtu [L]

Ramey ve svém dlouholetém výzkumu zjistil, že v počátečním úseku přítokových čerpacích a stoupacích zkoušek se nachází ve vyhodnoceném grafu jednotkový sklon tj. 45° , a to zejména pro hodnoty bezrozměrné storativity vrtu C_D . Tento fakt byl ověřen Laplaceovou transformací řešením (parciální diferenciální rovnice)⁶ ve tvaru pro snížení hladiny (RAMEY a COBB, 1971). Problematiku Laplaceovy transformace nebyla zahrnuta do diplomové práce, pouze odkážu na autora Stehfest (1970), který se problematikou inverzní Laplaceovy transformace důkladněji zabýval.

⁵Část čerpací zkoušky, která předchází úseku vyhodnotitelnému Jacobovou semilogaritmickou aproximací (PECH, 2010).

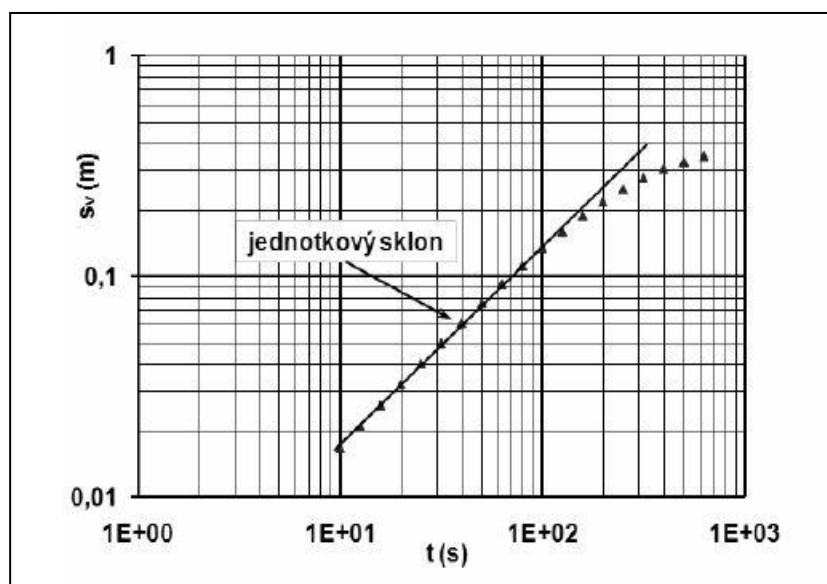
⁶Integrální transformace, která reálné funkci přiřazuje funkci komplexní (PÍRKO, 1970).

Na obrázku č. 9 níže je znázorněn jednotkový sklon přímkové části na počátku čerpací zkoušky v log-log grafu. Na ose x je čas t [T] a na ose y snížení vody v odběrovém vrtu s_v [L]. V grafické závislosti logaritmus s_v a logaritmus t přetrvává přímková část, než dojde k vyčerpání veškeré vody z vlastního objemu vrtu, v našem případě tedy do doby $Qp/Q = 0$.

Na závěr uvedu vztah pro výpočet bezrozměrného jednotkového faktoru storativity vrtu C (RAMEY, 1970).

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} \quad 3.3.2.$$

Kde: t_j a s_j ... je dvojice hodnot $\log s_v$ vs. $\log t$ na úseku jednotkového sklonu.



Obrázek č. 9 – Znázornění závislosti mezi $\log s_v$ a $\log t$ (PECH, 2010)

4. Hydrodynamické zkoušky

Hydrodynamické zkoušky můžeme charakterizovat jako metody pro stanovení hydraulických charakteristik na hydrogeologickém objektu, které zjistíme na základě pozorování hydrodynamického zásahu do geohydrodynamického systému (JETEL, 1991). Základní dělení je následovné: přítokové zkoušky (odběrové, čerpací, přetokové, stoupací, diferenční), nálevové, vtlačovací a expresní zkoušky (JETEL, 1982). V této diplomové práci se budu zabývat pouze čerpací a stoupací zkouškou, které jsou popsány v kapitolách č. 4.1. a 4.2. níže. Podrobnější definicí hydrodynamických zkoušek se zabývám ve své bakalářské práci Vyhodnocování hydrodynamických zkoušek.

4.1. Čerpací zkoušky

Čerpací zkoušku dělíme na zkoušku při ustáleném a při neustáleném režimu. Začneme tedy u **ustáleného režimu čerpací zkoušky**.

Z historického hlediska se tento typ čerpacích zkoušek stal de facto jediný ve světě, který se používal až do roku 1935. Výhodou této zkoušky byla její snadná interpretace, ovšem nevýhodou byla delší doba čerpání do ustáleného stavu.

Princip této metody spočívá v čerpání vody z vrtu do té doby, dokud se neustálí hladina vody ve vrtu. Předpokládá se platnost Dupuitových předpokladů pro volnou hladinu, dle které se zanedbává vertikální složka proudění $i = dh/dr$ (HÁLEK a ŠVEC, 1979). Hodnotu transmisivity stanovíme z rovnice (4.1.1), která vychází z proudění podzemní vody s napjatou hladinou

$$T = \frac{Q}{2\pi s_v} \ln \frac{r_d}{r_v} \quad 4.1.1.$$

kde: Q ... čerpané množství [$L^3 \cdot T^{-1}$]

r_d ... dosah depresního kužele vyvolané odběrem ze zvodně [L]

r_v ... poloměr vrtu [L]

s_v ... snížení na vrtu [L]

a volnou hladinou:

$$Q = \frac{\pi K(H^2 - h_v^2)}{\ln\left(\frac{R}{r_v}\right)} \quad 4.1.2.$$

Kde: H ... mocnost zvodnělé vrstvy v čase 0 [L]

h_v ... výška vody ve vrtu [L]

R ... poloměr dosahu depresního kužele [L]

r_v ... poloměr studny [L]

K ... hydraulická vodivost [L.T⁻¹]

U vrtu, který se nachází v napjatém kolektoru, dochází k horizontálnímu proudění přes celou mocnost kolektoru b . Rovnice má tvar (4.1.3.) a nazývá se Thiemova rovnice (ŠRÁČEK a KUCHOVSKÝ, 2003).

$$Q = 2\pi K b \frac{(h_2 - h_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad 4.1.3.$$

Kde: b ... mocnost kolektoru [L]

$h_2 - h_1$... hydraulické výšky v pozorovacích vrtech [L]

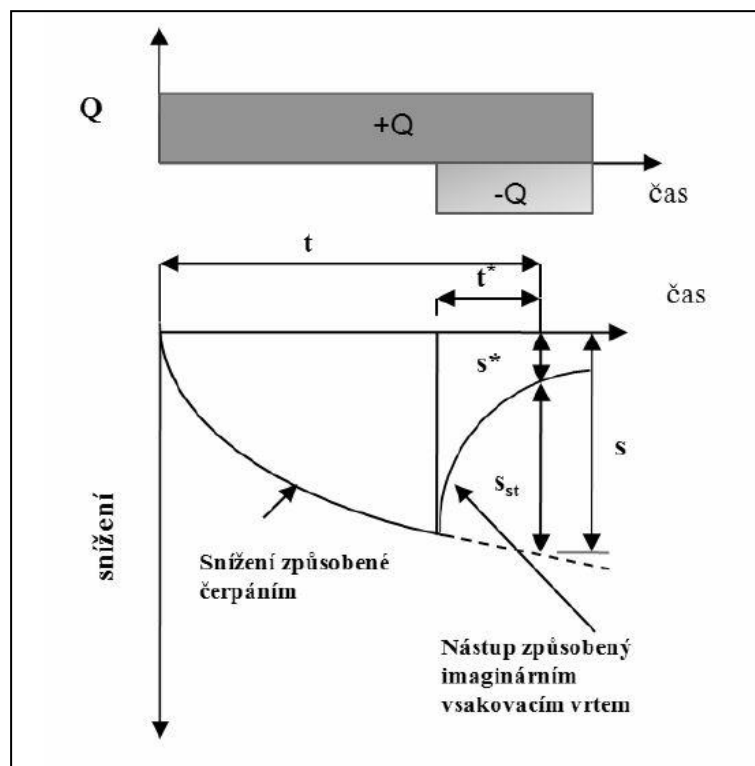
$r_2 - r_1$... vzdálenost pozorovacích vrtů od čerpaného vrtu [L]

Při **neustáleném režimu čerpací zkoušky** je čerpáno konstantní množství podzemní vody. Na námi zkoumaném objektu pozorujeme pokles hladiny, který v daných časových intervalech zaznamenáme. Pokud je vyžadováno stanovení storativity, tak zaznamenáváme i snížení na pozorovacím vrtu. Tato metoda neustáleného proudění se v tehdejší Československu zavedla až v roce 1960 (ŠRÁČEK a KUCHOVSKÝ, 2003).

4.2. Stoupací zkoušky

Vzhledem k charakteru proudění, který se projevuje při vzestupu hladiny či tlaku v daném vrtu po zastavení odběru je nutné časový průběh stoupací zkoušky interpretovat z principů neustáleného proudění. Při interpretaci průběhu stoupání hladiny ve vrtu (i pozorovacím) se využívá tzv. metoda superpozice definované C. V. Theisem v roce 1935. Vysvětlení metody superpozice v odborné literatuře je následující: „Když z vrtu čerpáme množství vody Q po daný časový interval a potom

čerpání skončí, snížení je stejné, jako by čerpání pokračovalo se stejným odčerpávaným množstvím a po ukončení čerpání zároveň docházelo k plnění vrtu se stejným množstvím vody.⁷ K této definici pouze dodám, že hladina nacházející se ve zvodnělém kolektoru, vystoupá na stejnou úroveň jako před začátkem čerpání. Na obrázku č. 10 je znázorněna stoupací zkouška, kde $-Q$ představuje simulaci přítoku vody zavedením imaginárního vsakovacího vrtu, který je ve zvodnělé vrstvě.



Obrázek č. 10 – znázornění průběhu stoupací zkoušky (PECH, 2010)

Pokud to situace vyžaduje a potřebujeme zjistit zbytkové snížení během probíhající stoupací zkoušky, hodnotu stanovíme vztahem (4.2.1.) (KRESIC, 2006), tedy součtem negativního snížení na zavedeném imaginárním vsakovacím vrtu a součtem snížení při pokračování čerpání (CHARBEBEAU, 2006).

$$s^* = s + s_{st} \quad 4.2.1.$$

Kde: s^* ... snížení naměřené během stoupací zkoušky [L]

s ... snížení z imaginární čerpací zkoušky [L]

s_{st} ... zvýšení hladiny v průběhu stoupací zkoušky [L]

⁷PECH, P., 2010: Speciální případy hydrauliky podzemí vody. Nakladatelství VÚV T. G. Masaryka, Praha. 60 s.

A pro výsledné snížení hladiny platí rovnice (KRESIC, 2006).

$$s^* = \frac{+Q}{4\pi T} W(u) + \frac{-Q}{4\pi T} W(u_{st}) \quad 4.2.2.$$

Kde: u ... je Theisova studňová funkce pro čerpací zkoušku (4.2.3.)

u_{st} ... je Theisova studňová funkce pro imaginární vsakovací vrt (4.2.4.)

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt^*} \quad 4.2.3.$$

Kde: r ... vzdálenost od osy odčerpávaného vrtu [L]

S ... storativita [-]

T ... transmisivita (průtočnost) [$L^2 \cdot T^{-1}$]

t ... měřený čas od začátku čerpání [T]

$$u_{st} = \frac{r^2 S'}{4Tt^*} \quad 4.2.4.$$

Kde: t^* ... měřený čas od zastavení čerpání [T]

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

5. Popis zkoumané lokality a horninového prostředí (Velký Hubenov)

K účelům této diplomové práce jsem vybral vrty, které momentálně řeší akciová společnost Vodní zdroje a nachází se na území Ústeckého kraje (Velký Hubenov) a Libereckého kraje (Machnín). Nyní se zaměříme na lokalitu ve Velkém Hubenově. Vrty se nachází mezi vesnicemi Velký Hubenov a Sukorady. Vrty měli pracovní označení O2 – pozorovací a O3 – čerpaný. Geologické poměry na zájmové lokalitě, zobrazené v příloze č. 1, jsou velmi různorodé. Lokalita spadá do soustavy Českého masívu – pokryvné útvary a postvariské magmatity. Nejvíce převládá křemenný a vápnito-jílovitý pískovec z období křída, který se řadí mezi zpevněné sedimenty. Geologicky nejvyšší chronostratigrafická jednotka je mezozoikum⁸. Dále se na lokalitě vyskytují spraše a sprašové hlíny z období čtvrtohor, kde se jedná o jednotku kenozoikum⁹ (PETRÁNEK, 2007). V jednotce kenozoikum, v oblasti nivního sedimentu, se také nachází zkoumané vrty, kde převládá nezpevněný sediment, zejména písek.

Tabulka č. 1 obsahuje podrobné údaje vrtů. Vzdálenost mezi pozorovacím vrtem O2 a čerpaným O3 byl stanoven na 50 metrů. Z tohoto údaje můžeme určit, zda se pozorovací vrt nachází v kolmatační zóně (KAHUDA a kol. 2016) – více je tato problematika popsána v kapitole 3.2. dodatečné odpory.

<u>Velký Hubenov</u>	<i>Průměr vrtu [mm]</i>	<i>Průměr výstroje vrtu [mm]</i>	<i>Výstroj</i>	<i>Hloubka vrtu [m]</i>	Q_{max} [l/s]	HPV_{ust} [m.p.t.]	HPV_{provoz} [m.p.t.]
O2 - pozorovací	600	377	ocel	80	20	přetok	3,46
O3 - čerpaný	600	300	překližka	60	23	přetok	2,94

Tabulka č. 1 – Podrobný popis vrtů Velký Hubenov (VODNÍ ZDROJE A.S., 2015)

Jak můžeme vidět, průměry vrtů jsou totožné (600 mm), avšak výstroj je rozdílná. U pozorovacího vrtu byl použit materiál ocel a u čerpaného vrtu překližka. Ocelové zárubnice se zejména používají díky své fyzické odolnosti a životnosti. Problém nastává tehdy, pokud dochází ke styku s chemicky agresivními vodami, protože ocel může korodovat. A proto se do oceli přidávají různé kovy, které zlepšují

⁸Kenozoikum – éra zahrnující třetihory a čtvrtohory.

⁹Mezozoikum – éra druhohor.

odolnost. V případě ušlechtilé oceli je pořizovací cena vyšší než u běžné, ale investice z hlediska času a životnosti se vyplácí (DATEL, 2014). Bohužel k těmto vrtům nebyly k dispozici podrobnější informace, které by popisovaly výstroj, nebo rozbor vody. Oba vrty pronikají do napjaté zvodně (O2 pozorovací – 80 m, O3 čerpaný – 60 m), ale nedosahují nepropustného podloží; jedná se o neúplné vrty.

5.1. Vyhodnocení vrtů Velký Hubenov (před regenerací)

Na lokalitě ve Velkém Hubenově proběhla čerpací zkouška (ČZ) vrtu O3. Postupně byly zaznamenány výsledky před a po regeneraci, které interpretují grafy č. 2 a 4. Naměřené data vyhodnotíme dle Jacobovy semilogaritmické metody přímky, zejména použijeme rovnice (2.3.6.) a určíme hodnotu storativity ze vztahu (2.3.7.). Pro výpočet skin efektu jsem zvolil metodu založenou na Agarwalově řešení základní rovnice – odvozením vztahu pro sklon prvního přímkového úseku (PECH a kol., 2015) a vyjádření dodatečných odporů W z rovnice (5.1.2.). Všechny výpočetní postupy vysvětlím níže.

Jak již bylo řečeno, regenerace proběhla na vrtu O3. Podrobnější technický popis je uveden v tabulce č. 1 výše. V našem případě jsou důležité údaje: hloubka vrtu $h_w = 60$ m, průměr výstroje vrtu $d_v = 300$ mm a vzdálenost pozorovacího objektu l_p (vrt O2) 50 m. Čerpací zkouška před regenerací trvala celkem 59 minut. Nyní přejdeme k samotnému vyhodnocení měřených dat.

Čerpaná vydatnost vrtu, označme si jí Q , byla stanovena na 26,75 l/s. Počáteční úroveň hladiny podzemní vody ve vrtu $h_0 = 1,63$ m a úroveň hladiny podzemní vody na konci čerpací zkoušky byla $h_1 = 9,79$ m. Dále můžeme určit mocnost zvodně M na základě známých hodnot hloubky vrtu a počáteční úrovní hladiny podzemní vody.

$$M = h_w - h_0 = 60 - 1,63 = 58,37 \text{ m}$$

Pokles úrovně hladiny podzemní vody s [m] při čerpací zkoušce zjistíme ze vztahu:

$$s = h_1 - h_0 = 9,79 - 1,63 = 8,16 \text{ m}$$

Dále určíme specifickou vydatnost q [l/s/m]:

$$q = \frac{Q}{s} = \frac{26,75}{8,16} = 3,28 \text{ l/s/m}$$

Nyní určíme index transmisivity Y , který vychází ze specifické vydatnosti q . Index transmisivity je dán vztahem $Y = \log(10^6 C)$, kde C představuje právě specifickou vydatnost q v [l/s/m] (JETEL a KRÁSNÝ, 1968). Tento index má výhodu při použití v regionálním srovnávacím parametru, protože většina hodnot specifických kapacit je distribuována logaritmickým měřítkem. Převodem specifické vydatnosti na index transmisivity se umožní popisná statistická analýza (KNOPMAN, 1990).

$$Y = \log(10^6 * q) = \log(10^6 * 3,28) = 6,52 [-]$$

Následně vypočítáme index hydraulické vodivosti Z , který se liší od indexu transmisivity vstupující hodnotou mocnosti zvodně M .

$$Z = \log\left(\frac{10^6 * q}{M}\right) = \log\left(\frac{10^6 * 3,28}{58,37}\right) = 4,75 [-]$$

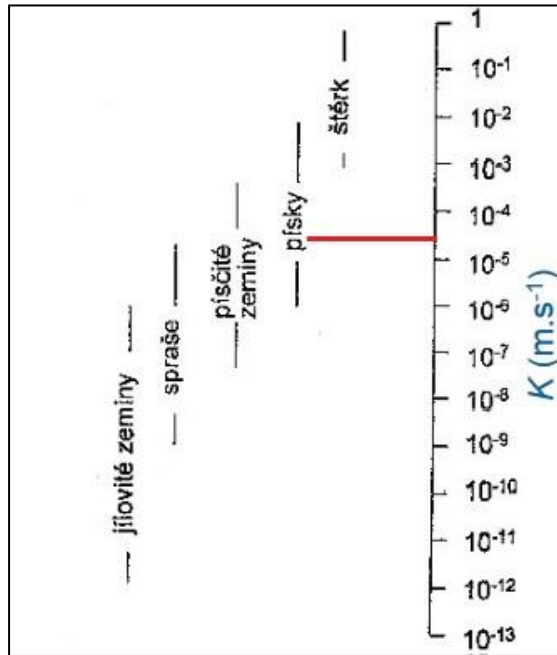
Transmisivitu zvodně T stanovíme rovnicí pro proudění podzemní vody k vrtu s napjatou hladinou z rovnice (4.1.1.).

$$T = \left[\left(\frac{Q}{2\pi * s}\right) * \ln\left(\frac{r_d}{r_v}\right)\right] = \left(\frac{0,02675}{51,27}\right) * \ln\left(\frac{63,095}{0,15}\right) = 0,00315 [m^2/s]$$

Koeficient nasycené hydraulické vodivosti zjistíme poupravením vztahu pro výpočet transmisivity, kde v našem případě máme vypočtenou transmisivitu T a známe mocnost zvodně M :

$$K = \frac{T}{M} = \frac{0,00315}{58,37} = 5,39 * 10^{-5} [m/s]$$

Na základě hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti můžeme předběžně zjistit geologické prostředí v okolí zkoumaného vrtu. K určení lze použít např. graf z odborné literatury, který je zobrazen na obrázku č. 11 níže. Jedná se pouze o orientační stanovení, protože během čerpání může dojít k přeskupení zrn, a tím pádem i změně hodnoty hydraulické vodivosti. Nejlepší metodou stanovení geologického prostředí v okolí vrtu je hydrogeologický průzkum.

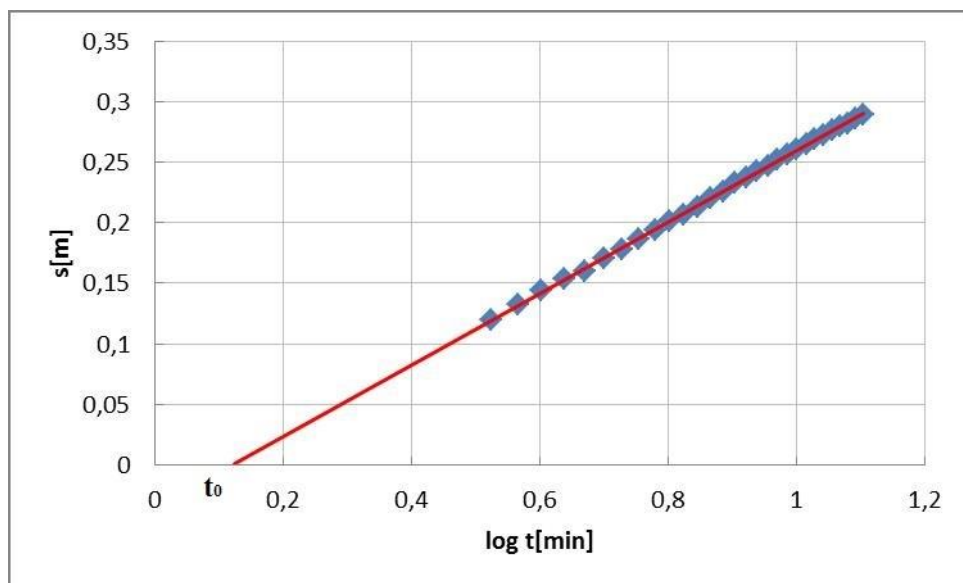


Obrázek č. 11 – Koeficient nasycené vodivosti K , upraveno (CÍSLEROVÁ 1989)

Nyní můžeme vypočítat orientační dosah depresního kužele, který vzniká vlivem prázdnění zvodně. K určení deprese kuželu existuje mnoho vztahů. Například z poloempirických od autorů: Lembke, Webera nebo Kusakina. V našem případě jsem vybral empirický vztah od autora Siechartha.

$$R = 3000 * s * K^{0,5} = 3000 * 8,16 * 5,39 * 10^{-4} = 179 \text{ m}$$

Pro výpočet koeficientu storativity Jacobovou metodou použijeme vztah (2.3.7.), protože máme k dispozici data z pozorovacího vrtu, které znázorňuje graf č. 1. Více je tato problematika popsána v kapitole 2.3.



Graf č. 1 – Snížení na pozorovacím vrtu před regenerací (AUTOR, 2019)

Počáteční časový bod t_0 udává začátek snížení piezometrické hladiny na pozorovacím vrtu. Hodnota t_0 je v našem případě 0,118 [min]. Převedeme ji na sekundy:

$$t_0 = 10^{0,118} * 60 = 78,73 \text{ [s]}$$

A nyní dosadíme hodnoty do vztahu (2.3.7.)

$$S = 2,246 * \frac{T t_0}{r^2} = 2,246 * \frac{0,0315 * 78,73}{50^2} = 0,000223 \text{ [-]}$$

Dostáváme se k určení hodnoty skin efektu metodou založenou na Agarwalově řešení. Z tabulky č. 1 zjistíme průměr výstroje vrtu r , který převedeme na poloměr r_v . V tomto případě je důležitý převod jednotek, neboť výstroj vrtu je uvedena v mm.

$$r_v = \frac{r}{2000} = \frac{300}{2000} = 0,15 \text{ [m]}$$

Faktor storativity vrtu určíme následujícím vztahem. Opět je nutné dávat pozor na převod jednotek, a to zejména u čerpané vydatnosti, kterou dosadíme v [m³/s]. Zlomek $1/lp$ vyjadřuje převrácenou hodnotu sklonu při prázdnění vrtu (PECH, 1987).

$$C = Q * \left(\frac{1}{lp}\right) = 0,02675 * \left(\frac{1}{0,044}\right) = 0,6094 \text{ [m}^2\text{]}$$

Následně stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu C_D ze vztahu (3.1.5).

$$C_D = \frac{C}{2 * \pi * r_v^2 * S} = \frac{0,6094}{2 * \pi * 0,0225 * 0,000223} = 19292 \text{ [-]}$$

A také bezrozměrný koeficient dodatečných odporů W , kde I představuje sklon první přímkové části v $\log s_v$ vs. $\log t$ o hodnotě 5,16.

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * T * I}{Q} - 1,0127(\log C_D) - 1,0237 \right)$$

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * 0,0315 * 5,16}{0,02675} - 1,0127 * (\log 19292,63) - 1,032 \right) = 1,79 \text{ [-]}$$

Výpočet snížení hladiny ve vrtu vychází z rovnice (3.2.3.), které je způsobeno dodatečnými odpory:

$$S_w = \left(\frac{Q}{2 * \pi * T} \right) * W = \left(\frac{0,02675}{2 * \pi * 0,00315} \right) * (1,79) = 2,42 \text{ [m]}$$

Dalším způsobem jak určit hodnotu skin efektu je vyjádřením hodnoty dodatečných odporů $2W$ z rovnice (5.1.2), která je zobrazena níže. Pokud v první

části rovnice separujeme nelineární odpory s_T – tření proudící kapaliny a s_{TP} – turbulentní režim proudění v blízkosti odběrového vrtu, tak velikost dodatečného snížení v odběrovém vrtu bude závislá na čerpané vydatnosti Q , která je dle vztahu (VAN EVERDINGEN, 1953).

$$s_v = \frac{Q}{2\pi T} W \quad 5.1.1.$$

Na grafu č. 2 je znázorněn průběh čerpací zkoušky, který je rozdělen na jednotlivé úseky. Nyní budeme pracovat pouze s 1. úsekem – prázdnění vrtu. Na přímlce určíme libovolný časový bod t , který dosadíme do rovnice, například $t = 0,1$ [min]. Zbylé koeficienty již máme vypočteny nebo jsou zadané.

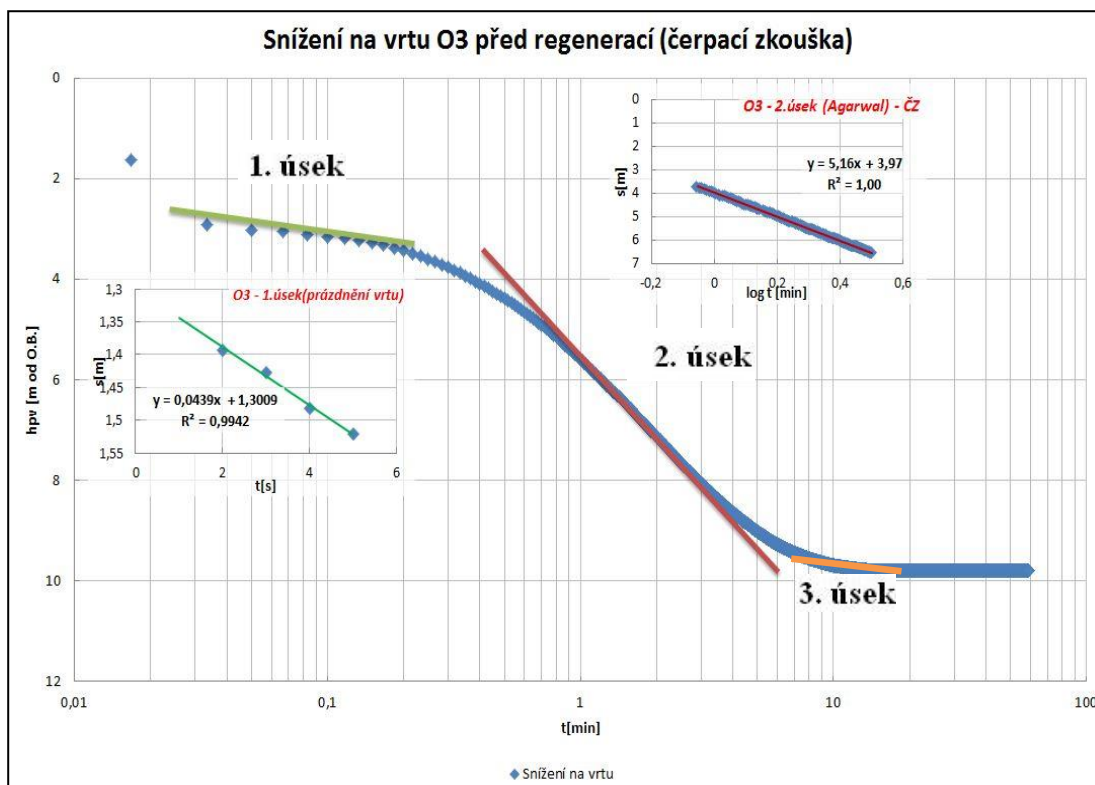
$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2,246 T t}{r^2 S} + 2W \right) \quad 5.1.2.$$

$$\frac{26,75}{4\pi * 0,00315} \left(\ln \frac{2,246 * 0,00315 * 0,1}{0,15^2 * 0,000223} + 2W \right) = 4,07 \text{ [m]}$$

Interpretovaná data z čerpací zkoušky vrtu O3 před regenerací jsou zobrazeny v grafu č. 2. Na začátek rozdělím data z čerpací zkoušky (celkem 3 části) a jednotlivé části zobrazím ve stejném grafu.

1. **úsek** – prázdnění vrtu (wellbore - storage),
2. **úsek** – tzv. přechodová část, která je charakteristická hydraulickými odpory kolmatační zóny, pláště a doznívajícím prázdněním vrtu (transition phase),
3. **úsek** – na tomto úseku platí Jacobova semilogaritmická aproximace.

V grafu osa x znázorňuje dobu trvání čerpací zkoušky v minutách. V našem případě ČZ zkouška trvala 3553 sekund, což je po převodu na minuty 59,22 minut. Osa y obsahuje hodnoty hladiny podzemní vody v metrech během ČZ. Na začátku byla hladina na 1,63 m a klesala na úroveň 9,79 m. Tato hodnota ustáleného stavu hladiny nastala ve 2862. sekundě (47,7 minut od začátku čerpaní). Vnořené detailnější grafy interpretují: 1. úsek prázdnění vrtu; osa x obsahuje čas t [s] a osa y snížení s [m], 2. úsek – vyhodnocení dle metody Agarwal, kde osa x je logaritmus času t [min] osa y snížení s [m].



Graf č. 2 – Snížení na vrtu O3 před regenerací (AUTOR, 2019)

5.2. Vyhodnocení vrtů Velký Hubenov (po regeneraci)

V této části uvedu výsledky vrtu po regeneraci. Postup vyhodnocování je totožný jako v předchozí kapitole. Avšak u vyhodnocení transmisivity T jsem zvolil rovnici (2.3.6), která je obsažena v kapitole 2.3.

Čerpaná vydatnost Q byla stanovena na 25,71 l/s. Počáteční úroveň hladiny podzemní vody $h_0 = 1,63$ m, na konci ČZ $h_1 = 8,25$ m. Mocnost zvodně $M = 58,37$ m.

Pokles úrovně hladiny podzemní vody s při čerpací zkoušce,

$$s = h_1 - h_0 = 8,25 - 1,63 = 6,62 \text{ [m]}$$

specifická vydatnost q ,

$$q = \frac{Q}{s} = \frac{25,71}{6,62} = 3,88 \text{ [l/s/m]}$$

index transmisivity Y ,

$$Y = \log(10^6 * q) = \log(10^6 * 3,88) = 6,59 \text{ [-]}$$

index konduktivity Z .

$$Z = \log\left(\frac{10^6 * q}{M}\right) = \log\left(\frac{10^6 * 3,88}{58,37}\right) = 4,82 [-]$$

Hydraulický gradient byl stanoven na hodnotu $I = 0,2014 [-]$, kterou dosadíme do rovnice transmisivity (2.3.6.),

$$T = 0,183 * \frac{Q}{I} = 0,183 * (0,02571) = 0,0234 [m^2/s]$$

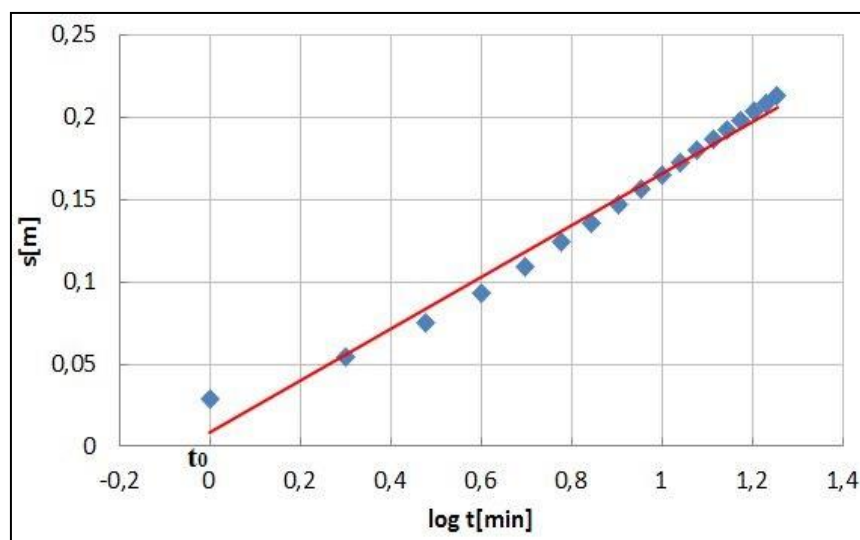
nasyčená hydraulická vodivost K ,

$$K = \frac{T}{M} = \frac{0,0234}{58,37} = 0,0004 [m/s]$$

orientační hodnota dosahu deprese dle Siehardta R .

$$R = 3000 * s * K^{0,5} = 3000 * 6,62 * 0,0004 = 397,34 [m]$$

Nyní se dostáváme k určení začátku snížení hladiny na pozorovacím vrtu; $t_0 = 0,3$ [min], což je po převodu 18,12 [s].



Graf č. 3 – Snížení na pozorovacím vrtu po regeneraci (AUTOR, 2019)

Následuje výpočet koeficientu storativity z rovnice (2.3.7)

$$S = 2,246 * \frac{T t_0}{r^2} = 2,246 * \frac{0,0234 * 18,12}{50^2} = 0,000381 [-]$$

Stanovení hodnoty skin efektu dle Agarwala je totožné jako v předchozí kapitole. Průměr výstroje vrtu je $r = 300$ [mm] a po převodu na poloměr $r_v = 0,15$ [m].

Faktor storativity vrtu:

$$C = Q * \left(\frac{1}{lp}\right) = 0,02571 * \left(\frac{1}{0,0055}\right) = 4,675 [m^2]$$

Bezrozměrná storativita vrtu C_D – počítáno ze vztahu (3.1.5.).

$$C_D = \frac{C}{2 * \pi * r_v^2 * S} = \frac{4,675}{2 * \pi * 0,0225 * 0,000381} = 86794,84 [-]$$

Následuje výpočet bezrozměrného koeficientu dodatečných odporů W . Hodnota sklonu první přímkové části v $\log s_v$ vs. $\log t$ byla stanovena na $I = 0,63$.

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * T * I}{Q} - 1,0127(\log C_D) - 1,0237 \right)$$

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * 0,0234 * 0,63}{0,02571} - 1,0127 * (\log 86794,84) - 1,032 \right) = 2,82 [-]$$

Snížení způsobeno dodatečnými odpory dle Agarwala, rovnice (3.2.3.).

$$S_W = \left(\frac{Q}{2 * \pi * T} \right) * W = \left(\frac{0,02571}{2 * \pi * 0,0234} \right) * 2,82 = 0,49 [m]$$

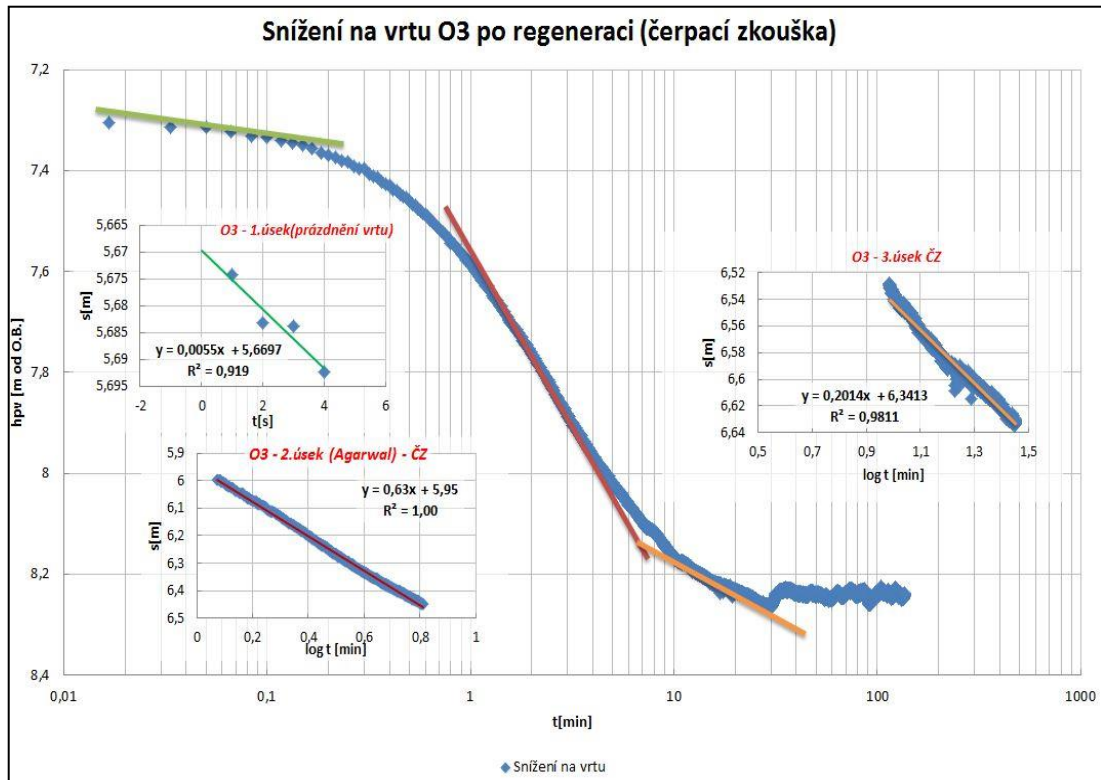
A výpočet skin efektu vyjádřením koeficientu dodatečných odporů $2W$ (5.1.2.). Časový bod z 1. přímkového úseku byl určen na $t = 0,1$ [min].

$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2,246 * T t}{r^2 S} + 2W \right)$$

$$\frac{25,71}{4 * \pi * 0,0234} \left(\ln \frac{2,246 * 0,0234 * 0,1}{0,15^2 * 0,000381} + 2W \right) = 0,315 [m]$$

Dostáváme se ke konci vyhodnocení vrtu O3 po regeneraci. Graf č. 4 čerpací zkoušky po regeneraci obsahuje stejné informace jako graf č. 2 před regenerací vrtu. V tomto případě čerpací zkouška trvala celkem 8128 sekund (135,47 minut) a čerpaná vydatnost byla 25,71 l/s. Na začátku čerpání byla naměřena hladina vody na úrovni 1,63 m a během zkoušky klesala na ustálený stav 8,24 m. Tento ustálený stav nastal v 7578. sekundě (126,30 minut od začátku čerpání).

Tabulka č. 2 obsahuje dosažené hodnoty během čerpacích zkoušek před a po regeneraci na vrtu O3. Výsledky budou podrobněji diskutovány v předposlední a poslední kapitole této diplomové práce.



Graf č. 4 – Snížení na vrtu O3 po regeneraci (AUTOR, 2019)

Hodnoty vrtu O3	před regenerací	po regeneraci	Hodnoty vrtu O3	Před regenerací	Po regeneraci
Mocnost zvodně M [m]	58,37	58,37	Snížení hladiny dodatečnými odpory S_w (van Everdingen) [m]	2,42	0,49
Pokles úrovně hladiny podzemní vody s [m]	8,16	6,62	Vyjádření dodatečných odporů W z rovnice (5.1.2.) [m]	4,07	0,315
Specifická vydatnost q [l/s/m]	3,28	3,88	Nasyčená hydraulická vodivost K [m/s]	5,4E-05	0,0004
Index transmisivity Y [-]	6,52	6,59	Dosah deprese dle Sieachardta [m]	179,87	397,34
Index hydraulické vodivosti Z [-]	4,75	4,82	Storativita S [-]	0,00022	0,00038
Transmisivita T [m ² /s]	0,00315	0,0234			

Tabulka č. 2 – Stanovené hodnoty před a po regeneraci vrtu O3 (AUTOR, 2019)

6. Popis zkoumané lokality a horninového prostředí (Machnín)

Touto kapitolou se dostáváme k popisu a vyhodnocení vrtů na lokalitě Machnín, která se nachází u západního předměstí města Liberce. Z hydrogeologického hlediska se vrty nachází na jediném kolektoru podzemní vody. Dle provedeného průzkumu má tento majoritní kolektor přítok, který je vázán na pukliny v bazálních proterozoických¹⁰ žulách a jejich zvětralin (štěrkopísky). Na jihovýchodním okraji byly zaznamenány známky paleozoických¹¹ hornin, především brekcie a uhlí. Nad touto vrstvou se nacházejí terciérní vodonosné sedimenty štěrku, písku a v menší míře i pískovce a křemence viz příloha č. 2.

Na lokalitě se celkem nachází 4 vrty s označením MA-1 až MA-4, kde ve dvou etapách byly provedeny mechanické regenerace, a to: metodou air-lift a kartáčování stěn výstroje. U vrtů MA-1 a MA-2 navíc proběhla chemická regenerace, při které byla použita směs roztoku na bázi kyseliny chlorovodíkové. U skupiny 5 starších gravitačních jímacích vrtů, které jsou na lokalitě, se bohužel mechanická regenerace neuskutečnila na základě špatného technického stavu. Podle zjištěných informací vrty s označením římských číslic I až V byly uvedeny do provozu v roce 1936. Na základě této skutečnosti se využili jako pozorovací vrty pro měření úrovně hladiny podzemní vody.

Dále budeme pracovat s vrtem MA-1. Stejně jako v předchozí kapitole vyhodnotíme naměřená data před a po regeneraci čerpací zkoušky. Tabulka č. 3 obsahuje podrobné údaje o vrtu MA-1. Bohužel k dispozici nebyly podrobnější údaje o pozorovacím vrtu; označme si ho například jako MA-P1.

Machnín	Hloubka výstroje vrtu [m]	Průměr výstroje vrtu [mm]	Hloubka vrtu [m]	Výstroj	Q_{max} [l/s]
MA-1 čerpaný	20	400	14,2	kamenina	2,1
Vzdálenost pozorovacího vrtu MA-P1 je 42,5 m					

Tabulka č. 3 – Podrobný popis vrtu Machnín (VODNÍ ZDROJE A.S., 2015)

¹⁰proterozoikum – éra starohor, prekambria.

¹¹paleozoikum – éra prvohor.

6.1. Vyhodnocení vrtu Machnín (před regenerací)

Na lokalitě v Machníně, jak již bylo řečeno, proběhla čerpací zkouška u vrtu MA-1. Postup záznamu výsledků před a po regeneraci byl totožný jako u vrtu ve Velkém Hubenově. Stejně tak i vyhodnocení naměřených dat. Výsledky před a po regeneraci interpretují grafy č. 6 a 8.

Z tabulky č. 3 budeme potřebovat údaje o hloubce vrtu $h_w = 14,2$ m a čerpané vydatnosti $Q = 2,1$ l/s. Počáteční úroveň hladiny podzemní vody byla $h_0 = 2,63$ m a během čerpací zkoušky klesla na úroveň $h_1 = 3,64$ m.

S těmito údaji můžeme vypočítat mocnost zvodně M a pokles úrovně hladiny podzemní vody s .

$$M = h_w - h_0 = 14,2 - 2,63 = 11,57 \text{ [m]}$$

$$s = h_1 - h_0 = 3,64 - 2,63 = 1,01 \text{ [m]}$$

Dále určíme specifickou vydatnost q ,

$$q = \frac{Q}{s} = \frac{2,1}{1,01} = 2,079 \text{ [l/s/m]}$$

index transmisivity Y ,

$$Y = \log(10^6 * q) = \log(10^6 * 2,079) = 6,32 \text{ [-]}$$

a index hydraulické vodivosti Z .

$$Z = \log\left(\frac{10^6 * q}{M}\right) = \log\left(\frac{10^6 * 2,079}{11,57}\right) = 5,25 \text{ [-]}$$

Dostáváme se k výpočtu transmisivity T pomocí rovnice (2.3.6). Hydraulický gradient, který vstupuje do výpočtu, byl stanoven na hodnotu $I = 0,0635$ [-].

$$T = 0,183 * \frac{Q}{I} = 0,183 * \left(\frac{0,0021}{0,0635}\right) = 0,00605 \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Nyní zjistíme hodnotu koeficientu nasycené hydraulické vodivosti.

$$K = \frac{T}{M} = \frac{0,00605}{11,57} = 0,000523 \text{ [m/s]}$$

Na základě této zjištěné hodnoty můžeme orientačně určit geologické prostředí v okolí zkoumaného vrtu, stejně jako v kapitole č. 5.1. Jedná se pouze o orientační hodnoty, neboť jak již bylo řečeno, během čerpání může dojít k přeskupení zrn. To je

způsobeno přírůstkem efektivního napětí, který vyvolá zmenšení objemu horniny; dojde k přeskupení zrn a vytlačení vody z pórů. Hodnota nasycené hydraulické vodivosti $5,23 \cdot 10^{-4}$ odpovídá prostředí s písčitymi zeminami. Kontrolu lze provést na obrázku č. 11.

Následuje výpočet orientačního dosahu depresního kužele dle Siehardta.

$$R = 3000 * s * K^{0,5} = 3000 * 1,01 * 0,000523^{0,5} = 69,35 [m]$$

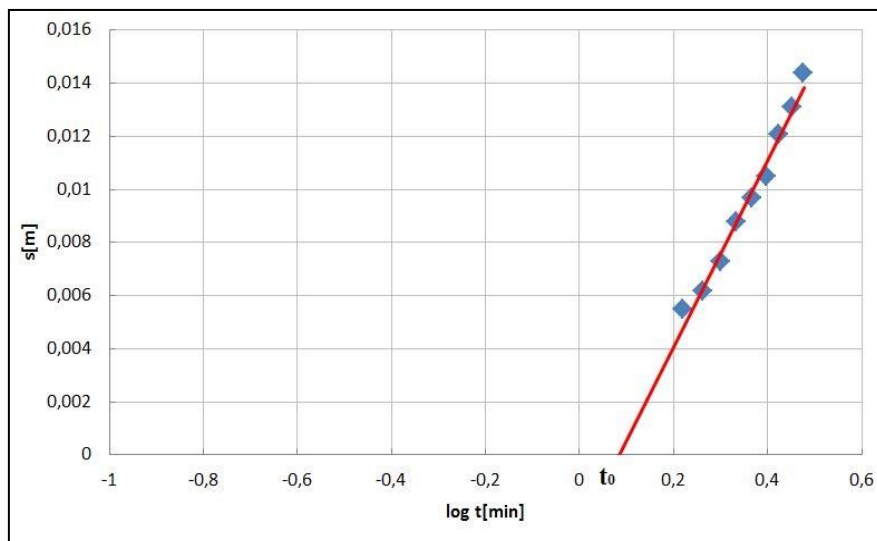
Začátek snížení hladiny na pozorovacím vrtu byl zjištěn z grafu č. 5 $t_0 = 0,085$ [min].

Tuto hodnotu převedeme na sekundy.

$$t_0 = 10^{\log t_0} * 60 = 10^{0,085} * 60 = 72,97 [s]$$

Hodnoty dosadíme do vztahu (2.3.7.) pro výpočet bezrozměrné storativity S .

$$S = 2,246 * \frac{T t_0}{r^2} = 2,246 * \frac{0,00605 * 72,97}{42,5^2} = 0,000549 [-]$$



Graf č. 5 – Snížení na pozorovacím vrtu před regenerací Machnín (AUTOR, 2019)

Následuje výpočet skin efektu metodou dle Agarwala. Nejdříve zjistíme průměr výstroje vrtu r , který poté převedeme na poloměr r_v .

$$r_v = \frac{r}{2000} = \frac{400}{2000} = 0,2 [m]$$

Faktor storativity vrtu.

$$C = Q * \left(\frac{1}{lp} \right) = 0,0021 * \left(\frac{1}{0,0113} \right) = 0,1859 [m^2]$$

Dále stanovíme bezrozměrnou storativitu vrtu C_D ze vztahu (3.1.5.),

$$C_D = \frac{C}{2 * \pi * r_v^2 * S} = \frac{0,1859}{2 * \pi * 0,04 * 0,000549} = 1347,31 [-]$$

bezrozměrný koeficient dodatečných odporů W . Hodnota sklonu první přímkové části $I = 0,7332$.

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * T * I}{Q} - 1,0127(\log C_D) - 1,0237 \right)$$

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * 0,00605 * 0,7332}{2,1} - 1,0127 * (\log 1347,31) - 1,032 \right)$$

$$= 10,65 [-]$$

Stanovené hodnoty dosadíme do rovnice snížení hladiny dodatečnými odpory (3.2.3.).

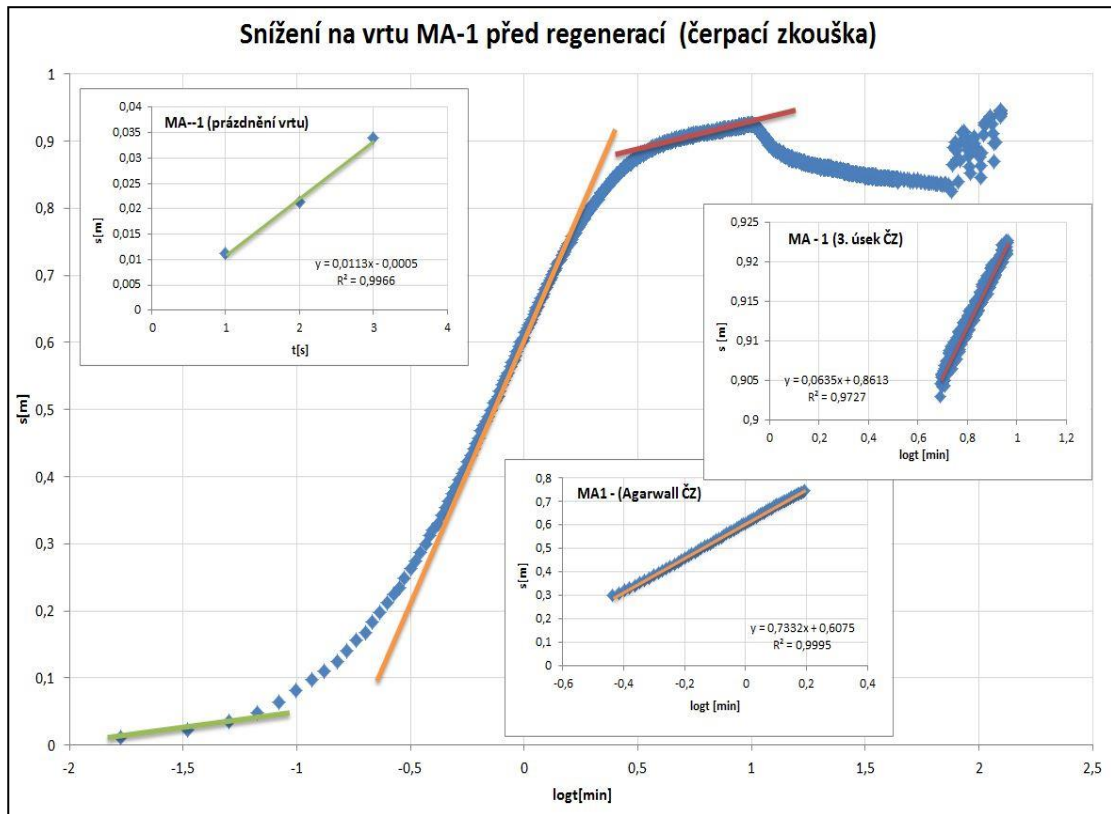
$$s_W = \left(\frac{Q}{2 * \pi * T} \right) * W = \left(\frac{0,0021}{2 * \pi * 0,00605} \right) * 10,65 = 0,59 [m]$$

Závěrem vyjádříme hodnotu skin efektu W . Časový bod z přímkového úseku byl určen na $t = 1,5$ [min].

$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2,246 * T t}{r^2 S} + 2W \right)$$

$$\frac{2,1}{4 * \pi * 0,00605} \left(\ln \frac{2,246 * 0,00605 * 1,5}{0,2^2 * 0,000549} + 2W \right) = 0,295 [m]$$

Na grafu č. 6 je zobrazen průběh a naměřená data čerpací zkoušky vrtu MA-1 před regenerací. Osa x obsahuje $\log t$ [min] a osa y snížení s [m]. Čerpací zkouška trvala celkem 124,5 [min]. Hladina ve vrtu během ČZ klesla o 1,01 [m] na úroveň 3,64 [m].



Graf č. 6 – Snížení na vrtu MA-1 před regenerací (AUTOR, 2019)

6.2. Vyhodnocení vrtu Machnín (po regeneraci)

U čerpací zkoušky vrtu MA-1 byla zachována čerpaná vydatnost $Q = 2,1$ [l/s]. Počáteční úroveň hladiny podzemní vody $h_0 = 2,71$ [m], na konci ČZ $h_1 = 3,49$ [m]. Určená mocnost zvodně $M = 11,49$ [m].

Pokles úrovně hladiny podzemní vody s při čerpací zkoušce,

$$s = h_1 - h_0 = 3,49 - 2,71 = 0,78 \text{ [m]}$$

specifická vydatnost q ,

$$q = \frac{Q}{s} = \frac{2,1}{0,78} = 2,69 \text{ [l/s/m]}$$

index transmisivity Y ,

$$Y = \log(10^6 * q) = \log(10^6 * 2,69) = 6,43 \text{ [-]}$$

index konduktivity Z .

$$Z = \log\left(\frac{10^6 * q}{M}\right) = \log\left(\frac{10^6 * 2,69}{11,49}\right) = 5,37 \text{ [m]}$$

Nyní dosadíme hodnotu hydraulického gradientu $I = 0,0355$ [-] do rovnice transmisivity T (2.3.6.),

$$T = 0,183 * \frac{Q}{I} = 0,183 * \left(\frac{0,0021}{0,0355} \right) = 0,01083 \text{ [m}^2/\text{s]}$$

a stanovíme nasycenou hydraulickou vodivost K .

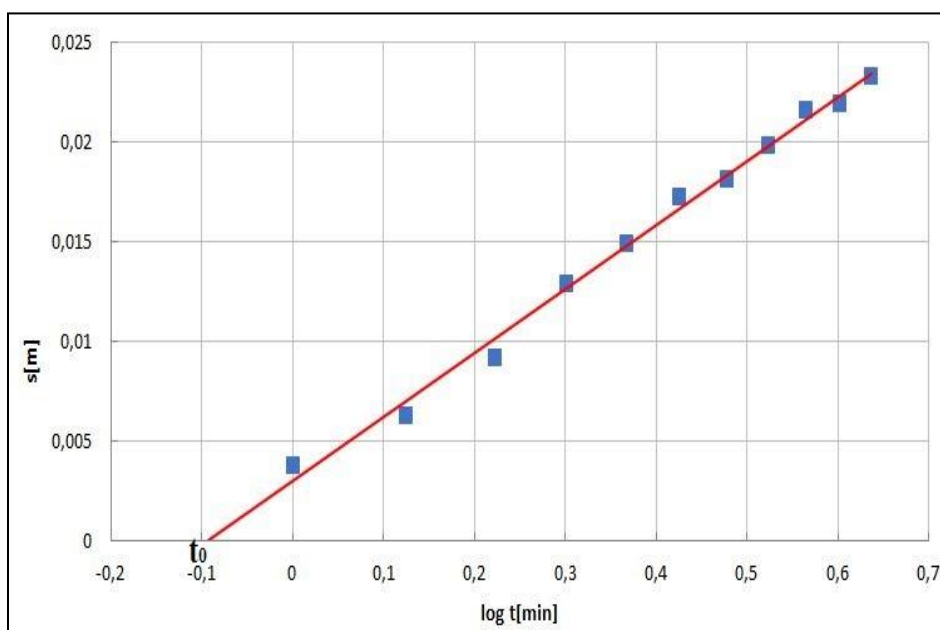
$$K = \frac{T}{M} = \frac{0,01083}{11,49} = 0,000943 \text{ [m/s]}$$

Pokud porovnáme nasycenou hydraulickou vodivost K v kapitole 6.1 (vrt MA-1 před regenerací), vidíme rozdíl ve výsledku. Před regenerací byla hydraulická vodivost K na hodnotě 0,000523 a po regeneraci byla stanovena na 0,000943. Řádově hodnota K se změnila o 0,00042 [m/s]. Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, změna hodnoty je způsobena efektivním napětím a přeskupením zrn, proto se jedná pouze o orientační hodnoty.

Orientační hodnota dosahu deprese dle Siehardta R .

$$R = 3000 * s * K^{0,5} = 3000 * 0,78 * 0,0307 = 72,04 \text{ [m]}$$

Následuje určení začátku snížení hladiny na pozorovacím vrtu, kde $\log t_0 = -0,9$ [min] $\rightarrow t_0 = 48,35$ [s],



Graf č. 7 – Snížení na pozorovacím vrtu po regeneraci (AUTOR, 2019)

a stanovení koeficientu bezrozměrné storativity z rovnice (2.3.7).

$$S = 2,246 * \frac{Tt_0}{r^2} = 2,246 * \frac{0,01083 * 48,35}{42,5} = 0,000651 [-]$$

Určení hodnoty skin efektu metodou dle Agarwala,

$$r_v = \frac{r}{2000} = \frac{400}{2000} = 0,2 [m]$$

faktor storativity vrtu,

$$C = Q * \left(\frac{1}{lp}\right) = 0,0021 * \left(\frac{1}{0,02}\right) = 0,1050 [m^2]$$

následuje určení bezrozměrné storativity vrtu C_D ze vztahu (3.1.5),

$$C_D = \frac{C}{2 * \pi * r_v^2 * S} = \frac{0,1050}{2 * \pi * 0,04 * 0,000651} = 641,91 [-]$$

a bezrozměrný koeficient dodatečných odporů W , sklon první přímkové části $I = 0,5639 [-]$.

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * T * I}{Q} - 1,0127(\log C_D) - 1,0237 \right)$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 * \pi * 0,001083 * 0,5639}{0,0021} - 1,0127 * (\log 641,91) - 1,032 \right) \\ &= 16,74 [-] \end{aligned}$$

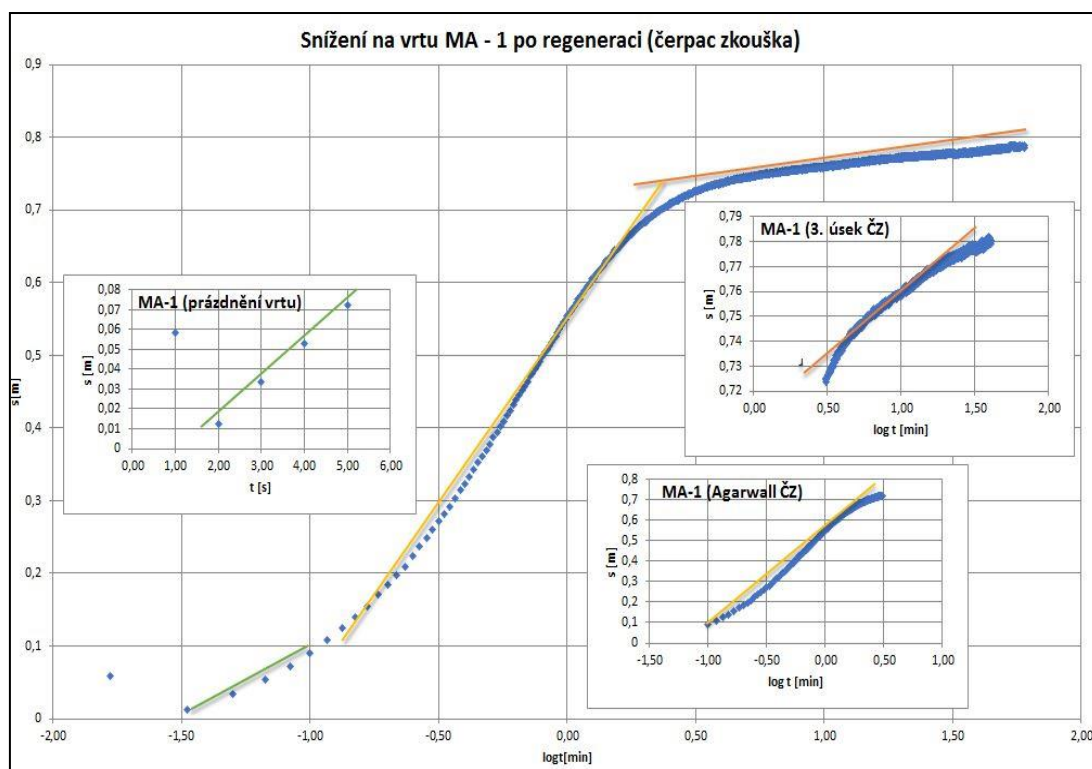
Výsledné snížené hladiny ve vrtu způsobené dodatečnými odpory:

$$S_w = \left(\frac{Q}{2 * \pi * T} \right) * W = \left(\frac{0,021}{2 * \pi * 0,01083} \right) * 16,74 = 0,52 [m]$$

A vyjádřením hodnoty skin efektu W z rovnice (5.1.2.). Časový bod z přímkového úseku byl určen na $t = 1,3$ [min].

$$\begin{aligned} s_v &= \frac{Q}{4 * \pi * T} \left(\ln \frac{2,246 * Tt}{r^2 S} + 2W \right) \\ \frac{2,1}{4 * \pi * 0,01083} \left(\ln \frac{2,246 * 0,01083 * 1,3}{0,2^2 * 0,000651} + 2W \right) &= 0,284 [m] \end{aligned}$$

Dostáváme se k závěru vyhodnocení vrtu MA-1 po regeneraci. Graf č. 8 obsahuje naměřené data z průběhu čerpací zkoušky. V tomto případě ČZ trvala 60,32 minut (3619 sekund) a hladina klesla o hodnotu 0,78 [m] na úroveň 3,50 [m], která byla dosažena v 52. minutě (3120 sekund).



Graf č. 8 – Snížení na vrtu MA – 1 po regeneraci (AUTOR, 2019)

Tabulka č. 4 obsahuje dosažené hodnoty během čerpacích zkoušek před a po regeneraci na vrtu MA-1. Výsledky budou podrobněji diskutovány v předposlední a poslední kapitole této diplomové práce.

Hodnoty vrtu MA-1	před regenerací	po regeneraci	Hodnoty vrtu MA-1	Před regenerací	Po regeneraci
Mocnost zvodně M [m]	11,57	11,49	Snížení hladiny dodatečnými odpory S_w (van Everdingen) [m]	0,59	0,52
Pokles úrovně hladiny podzemní vody s [m]	1,01	0,78	Vyjádření dodatečných odporů W z rovnice (5.1.2.) [m]	0,295	0,284
Specifická vydatnost q [l/s/m]	2,08	2,68	Nasycená hydraulická vodivost K [m/s]	0,000523	0,000942
Index transmisivity Y [-]	6,32	6,43	Dosah deprese dle Sieachardta [m]	69,35	72,04
Index hydraulické vodivosti Z [-]	5,25	5,37	Storativita S [-]	0,000652	0,000651
Transmisivita T [m ² /s]	0,00605	0,0108			

Tabulka č. 4 – Stanovené hodnoty před a po regeneraci vrtu MA-1 (AUTOR, 2019)

7. Diskuze

Pro přehlednost jsou všechny zjištěné hodnoty před a po regeneraci uvedeny v tabulce č. 2, v případě vrtu MA-1 pak v tabulce č. 4. Na lokalitě Velkého Hubenova byla mocnost zvodně stanovena na 58,37 [m]. Hloubka vrtu dosahovala 60 [m]. Pokud tyto hodnoty porovnáme s lokalitou Machnín, vidíme velké rozdíly jak v mocnosti zvodně (46,8 m), tak i v čerpané vydatnosti (24,65 l/s). Tím pádem můžeme říci, že vrty ve Velkém Hubenově se nachází na místě s vyšší zásobou a vydatností podzemních vod. Pokud se podíváme na hodnoty specifické vydatnosti q , vidíme kladné zlepšení u obou lokalit. U vrtu O3 a MA-1 přesně o 0,6 [l/s/m].

Hodnota transmisivity T vypočtená na vrtu O3 před regenerací je 0,0315 [m²/s] a po regeneraci 0,0234 [m²/s]. Z literatury víme, že transmisivita udává odporové charakteristiky prostředí, zejména průtočnost a také, že hodnoty transmisivity a storativity se mohou měnit maximálně do vzdálenosti 3 až 4 metrů od vrtu po vyčištění. V tomto případě můžeme říci, že u vrtu O3 došlo ke zlepšení průtočnosti do vzdálenosti 3 až 4 metrů od vrtu, stejně tak i u vrtu MA-1. Do odporových charakteristik také patří i storativita S , která udává zásobnost prostředí a je konstantní po celou dobu probíhajících zkoušek. U vrtu O3 vidíme nepatrnou změnu o 0,00016. U vrtu MA-1 de facto nedošlo k žádné změně, avšak je zde rozdíl 0,000001. Tyto nepatrné rozdíly u vrtů O3 a MA-1 můžeme zanedbat v souvislosti s prouděním podzemní vody a chyby měření.

Orientační dosah depresního kužele vrtu O3 dle Siehardta byl stanoven před regenerací na hodnotu 179,87 [m]. Důsledkem snížení hladiny vody ve vrtu během čerpací zkoušky se zvýšila po regeneraci hodnota dosahu na 397,34 [m]. U vrtu MA-1 je pouze malá změna dosahu depresního kužele; před regenerací 69,35 [m] a po regeneraci 72,04 [m]. Pokud porovnáme hodnoty dosahu deprese u obou vrtů před a po regeneraci, zjistíme, že se liší řádově o 200 m. Vysoká hodnota dosahu deprese vrtu O3 může být zapříčiněna snížením hladiny vody ve vrtu a hydraulickou vodivostí.

Nasyčená hydraulická vodivost K , jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, nám může posloužit k orientačnímu určení geologického prostředí v okolí vrtu. Změna objemu horniny je popsána v odborné literatuře jako přírůstek efektivního napětí působící na horninu, který vyvolá změnu objemu zrn a

dojde k přeskupení zrn. Toto přeskupení také doprovází vytlačování vody z pórů (TERZAGHI, 1925). Příkladem mohou být oba vrty. U vrtu O3 před regenerací byla hodnota hydraulické vodivosti $5,39 \cdot 10^{-5}$ a po regeneraci $4 \cdot 10^{-4}$. U vrtu MA-1 před regenerací $5,23 \cdot 10^{-4}$ a po regeneraci $9,43 \cdot 10^{-4}$ [m/s].

Nyní se zaměříme na snížení hladiny vyvolané dodatečnými odpory. Začneme u vrtu O3. Před regenerací byla určena hodnota snížení způsobená dodatečnými odpory na 2,42 [m]; po regeneraci na 0,49 [m]. Při porovnání těchto hodnot můžeme vidět zlepšení během regenerace skoro o 2 m. Stejně kladné hodnoty dostáváme i při vyjádření dodatečných odporů „druhým způsobem“; z rovnice pro určení velikosti dodatečného snížení v odběrovém vrtu, a to z rovnice (5.1.2.). Před regenerací 4,07 [m] a po regeneraci 0,315 [m]. Při porovnání výsledků těchto dvou metod zjistíme, že před a po regeneraci se liší o více jak 70%. U vrtu MA-1 bylo snížení dodatečnými odpory vypočteno před regenerací na 0,59 [m] a po regeneraci na 0,52 [m]. Z porovnání výsledků došlo k nepatrnému zlepšení o 0,07 [m]. Z toho vyplývá, že regenerace neměla žádný efekt. Druhou metodou zjištění dodatečných odporů byly hodnoty následující: před regenerací 0,295 [m] a po regeneraci 0,284 [m]. Což je kladný rozdíl o 0,11 [m], který potvrzuje, že regenerace na vrtu MA-1 neměla takřka žádný efekt.

8. Závěr

Lokalita Velký Hubenov měla velice podrobný popis pozorovacího a čerpaného vrtu. Hůře na tom bylo geologické prostředí, kde jsem z interních materiálů pouze vyčetl základní informace; a to, že vrt se nachází v písčitých vrstvách zeminy a v nivním sedimentu. Dále nebyly k dispozici informace o uvedení vrtů do provozu. Podle informací od Ing. Kahudy a místního šetření byly vrty spuštěny přibližně v roce 1960 až 1970. Bohužel vrty ve Velkém Hubenově nepatří pod správu akciové společnosti Vodních zdrojů, měli za úkol pouze provést regeneraci čerpací zkouškou. Lépe jsou na tom vrty na lokalitě Machnín, kde je velice podrobný popis jak geologického prostředí, tak i jednotlivých vrtů.

U vrtu O3 můžeme říci, že regenerace proběhla v pořádku a dle očekávání. Argumentem mohou být zjištěné hodnoty specifické vydatnosti, kde vidíme zlepšení o 0,6 [l/s/m], dále hodnoty dodatečných odporů, které se snížili o 1,93 [m] a v případě vyjádření dodatečných odporů z rovnice (5.1.2.) pak 3,755 [m].

U vrtu MA-1 podle mého názoru regenerace sice proběhla bez větších komplikací, ale neměla žádný efekt. Vidíme zlepšení specifické vydatnosti q o 0,6 [l/s/m] a kladný pokles úrovně hladiny podzemní vody s o 0,23 [m]. Snížení dodatečnými odpory udává sice kladné snížení, ale pouze o 0,07 [m]. V případě vyjádření dodatečných odporů W z rovnice (5.1.2.) pak o 0,11 [m].

Závěrem můžeme říci, že regenerace měla kladný efekt na lokalitu ve Velkém Hubenově, ale na lokalitě Machnín neměla žádný efekt; argumentem opět mohou být dosažené a interpretované výsledky. Během probíhajících zkoušek nenastala žádná systematická ani nahodilá chyba nebo komplikace, které by ovlivnily měřená data a výsledky. Pokud se zaměříme na každou lokalitu zvlášť, můžeme zhodnotit výsledek regenerační zkoušky: u vrtu O3 podle mého názoru a hodnocení regenerace proběhla nad očekávání a u vrtu MA-1 hodnotím regeneraci bez efektu. Doporučuji provést u vrtů ve Velkém Hubenově podrobný geologický průzkum, který by určil a zpřesnil geologické prostředí. U vrtů v Machníně je zcela nezbytné provést kamerové zkoušky; vrt byl spuštěn v roce 1936, které by odhalily aktuální stav, zanešení nebo případné závady na výstroji vrtu.

Přehled literatury a použitých zdrojů

BEAR J., (1972): Dynamics of fluids in porous media. American Elsevier. New York. 764 p.

BEAR J., (1979): Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, Inc., New York.

ČÍŽEK P., (2011): Nová závazná ČSN 75 5115 – Jímání podzemní vody [online]. Praha cit [2019-02-28].

Dostupné z: <http://www.studny.info/Nova_%20CSN_755.htm>

Česká geologická služba, 2018 [online]. Praha: Aplikace geologické mapy, verze 1B.2. Cit [2019-03-31]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/app/ciselniky/lokalizace/index.php?start_y=670000&start_x=1070000>

CÍSLEROVÁ M., (1989): Inženýrská hydropedologie, určeno pro stud. fak. stavební. 1. vyd. Praha: ČVUT. 156 s. ISBN 80-01-00052-4.

DATEL J., (2014): Jímací objekty. Autor neznámý. Praha.

FETTER C. W., (2001): Applied hydrogeology, Vyd. 4, Merrill Publishing Company.

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

HÁLEK V., a ŠVEC J., (1979): Groundwater Hydraulics. Academia Praha.

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

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

JACOB C. E., (1946): Drawdown Test to Determine Effective Radius of Artesian Well. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., Vol. 72, No. 5.

JETEL J., (1982): Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech. ÚÚG Praha.

JETEL J., (1991): Hydrogeologie, inženýrská geologie. Český geologický ústav, Praha. ISBN 80-7075-026X, s 1-192.

- JETEL J., KRÁSNÝ J., (1968): Approximative aquifer characteristic in regional hydrogeological study. Věst. Ústř. Úst. geol. 43(5). Praha, 459 – 461.
- KAHUDA D., PECH P., MÁCA P., (2016): Monitoring vzniku kolmatace na vodárenských jímacích vrtech in situ. Vodní hospodářství, 2016, roč. 66, č. 4, s. 2-6. ISSN: 1211-0760.
- KNOPMAN D. S., (1990): Factors related to the water-yielding potential of rocks in the Piedmont and Valley and Ridge provinces of Pennsylvania. U. S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 90-4174.
- KURÁŽ M., (2014): HYDRODYNAMIKA PORÉRNÍHO PROSTŘEDÍ. Vydavatelství ČZU, Praha.
- KRESIC N., (2006): Hydrogeology and groundwater modeling. CrC Press, 807 p.
- MLS J., (1988): Hydraulika podzemní vody. Nakladatelství ČVUT, Praha.
- MUCHA I., (1987): Hydraulika podzemních vod. STNL Praha.
- PECH P. a kol., (2015): Provádění a vyhodnocování krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech. Vydavatelství ČZU, Praha.
- PECH P., (2010): Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Vydavatelství ČZU, Praha, ISBN 978-80-87402-04-7.
- PECH P., (2010a): Využití stoupacích zkoušek k vyhodnocení účinku regenerace vrtů. Vodohospodářské technicko- ekonomické informace, roč. 52, č. I, s. 23 - 25. ISSN: 0322-8916.
- PECH P., (1987): Vyhodnocování vlivu dodatečných odporů na jímacím vrtu. Vodní hospodářství, řada A, č. 12.
- 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.
- PETRÁNEK J., (2007): Geologická encyklopedie online [online]. Praha [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>>
- PÍRKO Z., (1970): Laplaceova transformace. Základy teorie a užití v elektrotechnice. Praha: Alfa Bratři-slava.

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.

RAMEY H. J. Jr., and COBB W. M., (1971): A general pressure build up theory for a well in a closed circular drainage area. J. Pet. Technology, Trans. AIME, 251, p. 1493–1501.

SIMMONS C., (2008): Henry Darcy (1803–1858): Immortalised by his scientific legacy. Hydrogeology Journal. 16. 1023-1038. 10.1007/s10040-008-0304-3.

ŠRÁČEK O., a KUCHOVSKÝ T., (2003): *Základy hydrogeologie*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita. 177 s. ISBN 80-210-3146-8.

TERZAGHI K., (1925): Principles of Soil Mechanics: IV – Settlement and Consolidation of Clay [online]. Wien [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <<https://www.scribd.com/doc/250735273/Terzaghi-1925>>

THEIS C. V., (1935): The relation between the lowering of the piezometric surface and therate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Trans. AGU, 16.

VALENTOVÁ J., (2007): *Hydraulika podzemní vody*. Vyd. 3. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03625-9, 16 s.

VALENTOVÁ J., (2010): *Hydraulika podzemní vody*. Nakladatelství ČVUT, Praha.

VAN EVERDINGEN A. F., (1953): The skin effect and its influence on the productive capacity of a well. Trans AIME, Vol. 198, p. 171–176.

VODNÍ ZDROJE A.S., (2015): *Popis vrtů a informace na lokalitě Velký Hubenov a Machnín „nepublikováno“*. Dep.: Vodní zdroje, a.s. Praha 5.

WARD J. C., (1964): *Turbulent Flow in Porous Media*. JHD, HY-5.

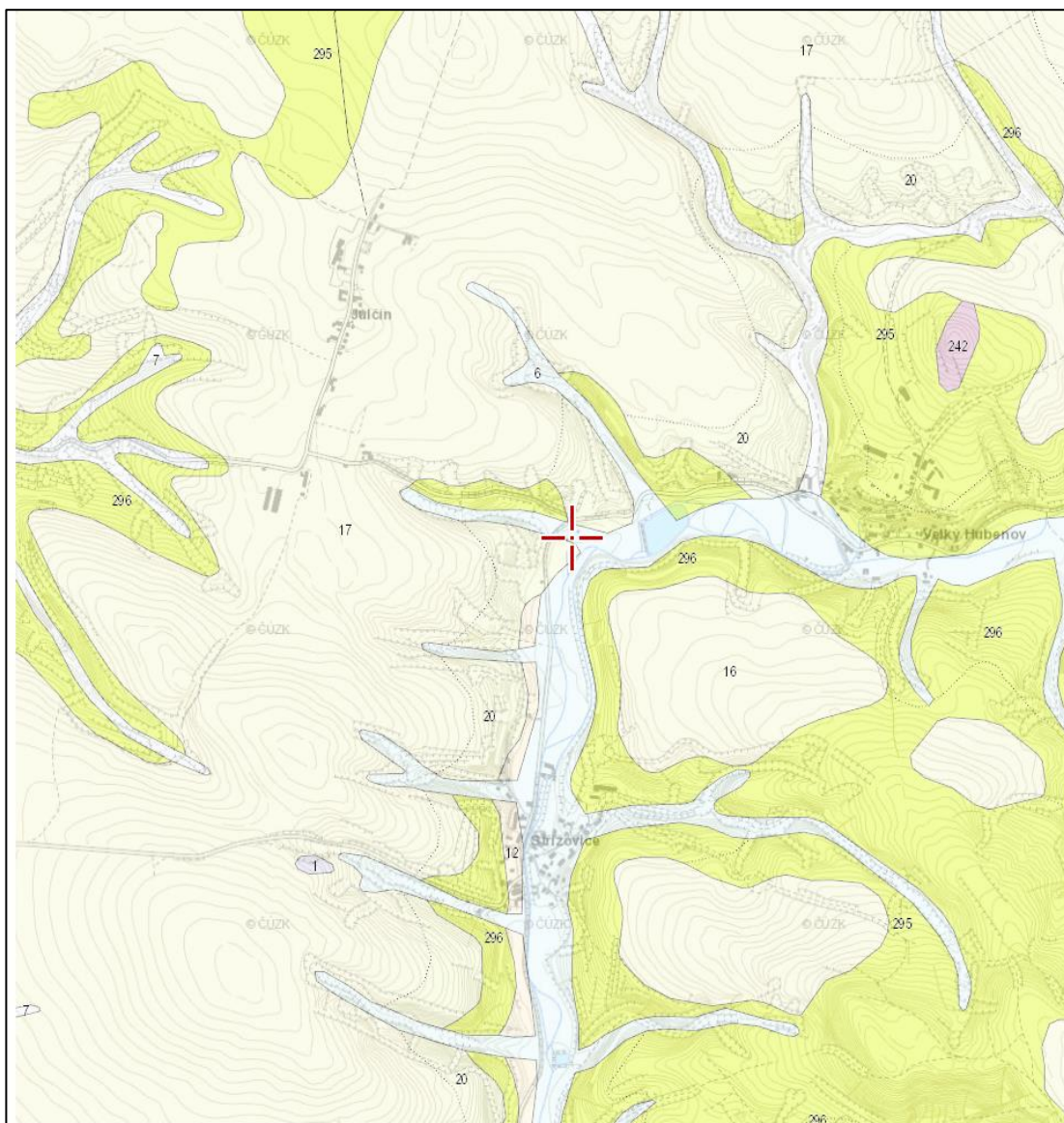
WATTENBARGER R. A., (1967): *Effects of Turbulence, Wellbore Damage, Wellbore Storage, and Vertical Fractures on Gas Well Testing*, Ph D thesis, Stanford U., Stanford, Calif.

Seznam příloh

Příloha č. 1 Geologická mapa lokality Velký Hubenov (1:50 000)

Příloha č. 2 Geologická mapa lokality Machnín (1:50 000)

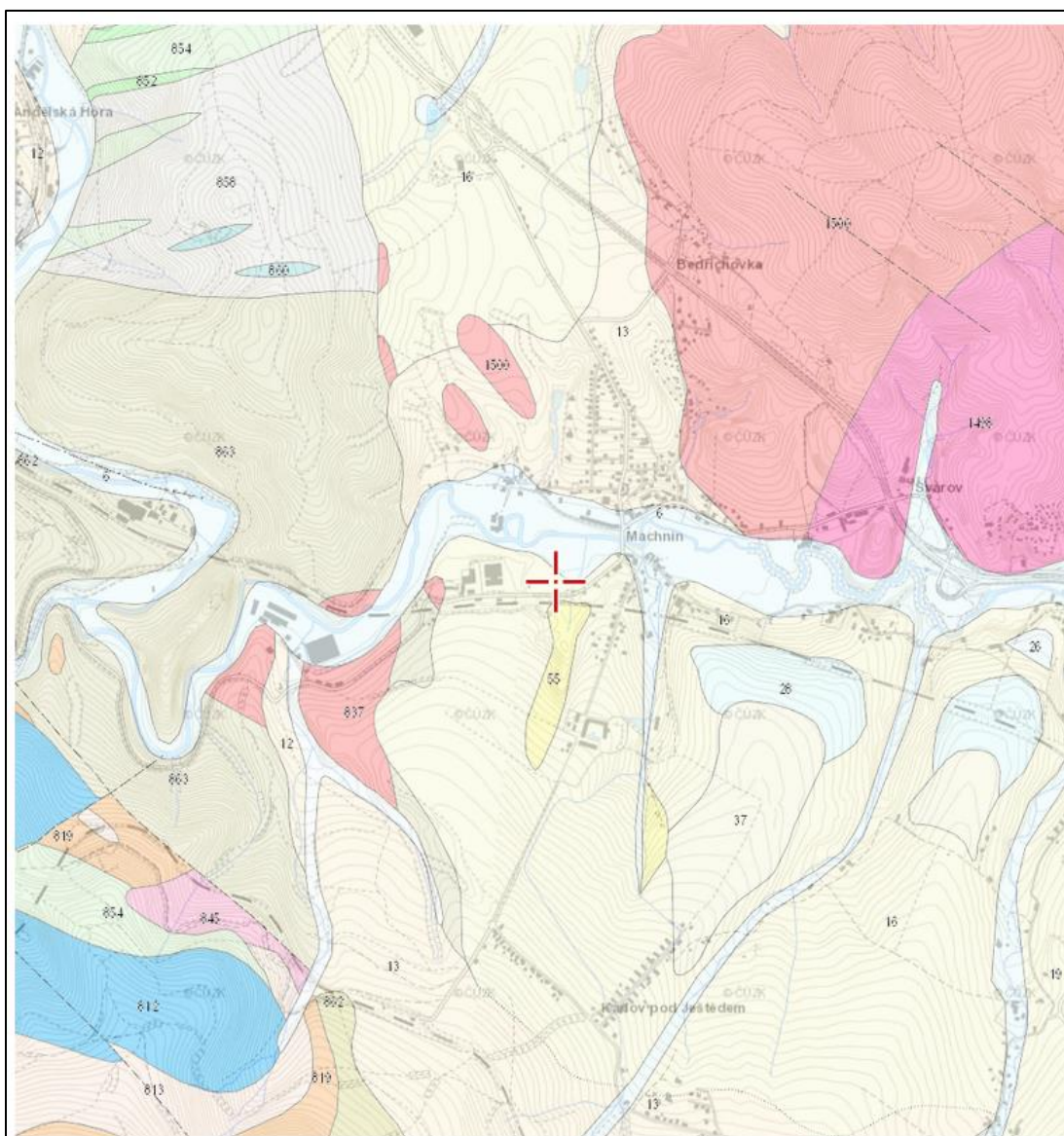
Příloha č. 1 – geologická mapa lokality Velký Hubenov (1:50 000)



Příloha č. 1 – Geologická mapa lokality Velký Hubenov (ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA, 2018)

[ID: 1] navážka, halda, výsypka, odval	[ID: 19] sprašová hlína
[ID: 6] nivní sediment	[ID: 20] sediment deluvioeolický
[ID: 7] smíšený sediment	[ID: 242] subvulkanické bazaltoidní brekcie
[ID: 12] písčito-hlinitý až hlinito-písčítý sediment	[ID: 295] pískovce křemenné, podřízeně štěrkovité pískovce
[ID: 16] spraš a sprašová hlína	[ID: 296] pískovce vápnito-jílovité, glaukonické
[ID: 17] spraš a sprašová hlína	

Příloha č. 2 – Geologická mapa lokality Machnín (1:50 000)



Příloha č. 2 – Geologická mapa lokality Machnín (ČESKÁ GEOLOGICKÁ SLUŽBA, 2018)

[ID: 6] nivní sediment	[ID: 26] písek, štěrk
[ID: 7] smíšený sediment	[ID: 28] písek, štěrk
[ID: 12] písčito-hlinitý až hlinito-písčítý sediment	[ID: 37] písek hlinitý až jíl písčítý
[ID: 13] kamenitý až hlinito-kamenitý sediment	[ID: 55] jíly, písky, štěrky
[ID: 16] spraš a sprašová hlína	[ID: 812] krystalický vápenec až dolomit
[ID: 19] sprašová hlína	[ID: 813] břidlice, porfyroid, kvarcit

[ID: 819]kvarcit	[ID: 1500]granit
[ID: 837]ortorula	[ID: 858]fylit
[ID: 845]granodiorit	[ID: 860]krystalický vápenec
[ID: 852]zelená břidlice	[ID: 862]kvarcitický fylit a kvarcit
[ID: 854] fylit	[ID: 863]metadroba, fylit
[ID: 1498]granit až granodiorit	