

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A

ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



Disertační práce

Hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu

Autor disertační práce:

Ing. Jiří Holub

Školitel:

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval školiteli prof. Ing. Pavlu Pechovi, CSc. za odborné vedení při zpracování disertační práce a firmě Vodní Zdroje a.s. za poskytnutí dat z čerpacích zkoušek. Dále školiteli a všem co se podíleli na vzniku této práce, děkuji za spolupráci na publikační činnosti, konzultace a cenné rady v průběhu celého doktorského studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: Hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele.

V dne

Podpis autora

Souhrn

Čerpací zkouška patří k nejběžnějším metodám vyhodnocení hydraulickým parametrů zvodně. Mezi základní parametry řadíme transmisivitu a storativitu zvodně, tyto dva hydraulické parametry charakterizují vlastnosti zvodnělého prostředí. Pro jejich vyhodnocení se používají metody odvozené z klasického Theisova modelu. Vyskytují se i další parametry, které ovlivňují výsledek čerpací zkoušky, mezi ně patří koeficient dodatečných odporů a storativita vrtu. Oba tyto parametry jsou však v Theisově modelu zanedbány. Vyhodnocení dat z čerpacích zkoušek obvykle probíhá za pomoci Jacobovy semilogaritmické metody přímky, tato metoda byla odvozena z Theisova modelu, který je založen na neustáleném proudění podzemní vody k vrtu bez vlivu dodatečných odporů a storativity vrtu. Nicméně zanedbání efektu dodatečných odporů a storativity vrtu může vést k špatné interpretaci výsledků čerpací zkoušky. A dále zapříčinit znehodnocení navazujících prací, kam vstupují charakteristiky zvodnělého prostředí jako parametry, například řešení kontaminace prostředí. Vzhledem k časové a energetické náročnosti čerpací zkoušky je vhodné těmto chybám co nejvíce předcházet. Na semilogaritmickém grafu snížení hladiny podzemní vody si můžeme všimnout dvou přímkových úseků, tento tvar signalizuje vliv dodatečných odporů a storativity vrtu na průběh čerpací zkoušky. Zde budou představeny metody vyhodnocení parametrů transmisivity, storativity zvodně, dodatečných odporů a storativity vrtu z dat z čerpací zkoušky, které vykazují právě tento charakteristický průběh snížení.

Klíčová slova

Hydrodynamická zkouška, dodatečné odpory, storativita vrtu, skutečný vrt

Abstract

Pumping test is a fundamental method to determinate aquifer hydraulic parameters. The main hydraulic parameters are the transmissivity and the aquifer storage coefficient. These two hydraulic parameters define the basic physical properties of the aquifer. For evaluation of these parameters are used the models based on Theis model is commonly used. There are other parameters corresponding to real conditions during the pumping test, such as the skin effect and the wellbore storage. The skin effect and the wellbore storage are neglected in the Theis solution. The evaluation of pumping test data is usually carried out by estimation through the Jacob method involves matching a straight line to drawdown data plotted on a semi-log graph. This method is derived from the Theis solution for the unsteady groundwater flow where the skin effect and the wellbore storage is not comprised. However, neglecting the skin effect and the wellbore storage can lead to false analysis. Due to further related activities, such as solutions of contaminant transport where the hydraulic parameters are involved but also the energy and the time consumption of acquisition of pumping test data, it is desirable to prevent erroneous analysis. The pumping-well data plotted on a semi-logarithmic paper can obtain two apparent straight lines. Accordingly, this characteristic curve shape indicates occurrence of wellbore storage and skin effect in the conducted pumping test. Here the evaluation method is developed to estimate the transmissivity, the aquifer storage coefficient, skin effect and wellbore storage from the pumping test data showing this characteristic curve shape.

Keywords

Pumping test, skin effect, wellbore storage, real well

Obsah

Prohlášení.....	3
Souhrn.....	4
Klíčová slova	4
Abstract.....	5
Keywords	5
Obsah	6
Seznam vzorců.....	9
Seznam obrázků.....	11
Seznam použitých symbolů	13
Úvod.....	16
Cíl a metodika práce	18
Cíle práce	18
Metodika	19
Základní kroky metodického postupu	20
Terénní měření.....	20
Specifikace terénních dat.....	21
Vyhodnocení základních hydraulických parametrů	21
Sestavení modelu.....	22
Granty.....	22
Autorské vědecké výstupy	23
Využití datové sady a užitý software.....	24
1. Literární rešerše	26
1.1. Základní popis horninového prostředí a jeho fyzikální charakteristiky ve vztahu k podzemním vodám	26

1.1.1. Podzemní voda	26
1.1.2. Klasifikace zvodnělých vrstev	26
1.1.3. Pórovitost.....	27
1.1.4. Propustnost	27
1.1.5. Hydraulická vodivost.....	28
1.1.6. Transmisivita	28
1.1.7. Storativita	29
1.1.8. Homogenita a anizotropie půdního prostředí	29
1.2. Základní fyzikální popis pohybu vody v horninovém prostředí	30
1.2.1. Darcyho zákon.....	30
1.2.2. Omezení platnosti Darcyho zákona	32
1.2.3. Ustálené (stacionární) proudění podzemní vody	33
1.2.4. Dupuitovy postuláty	35
1.2.5. Neustálené proudění podzemní vody	35
1.3. Proudění podzemní vody k vrtu	37
1.3.1. Hydrodynamické zkoušky	37
1.3.2. Neustálené rotačně symetrické proudění	39
1.3.3. Neustálené proudění k ideálnímu vrtu.....	40
1.4. Proudění podzemní vody v kontextu reálného vrtu	42
1.4.1. Storativita vrtu	42
1.4.2. Dodatečné odpory.....	46
1.4.3. Rovnice popisující proudění ke skutečnému vrtu	49
1.4.4. Stehfest algoritmus	50
1.4.5. Stanovení dodatečných odporů z prvního přímkového úseku snížení	50
2. Vlastní práce	52
2.1. Základní popis aplikace.....	52
2.2. Systémové požadavky aplikace ze strany klienta	55

2.3. Struktura aplikace.....	56
2.3.1. Popis aplikace a uživatelské rozhraní.....	56
2.3.2. Výpočetní modul	58
2.4. Datový model aplikace.....	63
2.5 Případové studie vyhodnocení čerpacích zkoušek	63
2.5.1. Čerpací zkoušky před regenerací, lokalita Bela Crkva	64
2.5.2. Čerpací zkoušky po regeneraci vrtu B6, lokalita Bela Crkva	70
2.5.3. Čerpací zkoušky, lokalita Veletov	73
3. Diskuze a závěr.....	80
Seznam literatury	82
Seznam příloh	86

Seznam vzorců

Vzorec (1.1)	27
Vzorec (1.2)	27
Vzorec (1.3)	28
Vzorec (1.4)	28
Vzorec (1.5)	29
Vzorec (1.6)	29
Vzorec (1.7)	29
Vzorec (1.8)	29
Vzorec (2.1)	30
Vzorec (2.2)	31
Vzorec (2.3)	31
Vzorec (2.4)	31
Vzorec (2.5)	31
Vzorec (2.6)	31
Vzorec (2.7)	31
Vzorec (2.8)	33
Vzorec (2.9)	33
Vzorec (2.10)	33
Vzorec (2.11)	34
Vzorec (2.12)	34
Vzorec (2.13)	35
Vzorec (2.14)	35
Vzorec (2.15)	35
Vzorec (2.16)	36
Vzorec (2.17)	36
Vzorec (2.18)	36
Vzorec (2.19)	36
Vzorec (2.20)	36

Vzorec (3.1)	37
Vzorec (3.2)	38
Vzorec (3.3)	39
Vzorec (3.4)	40
Vzorec (3.5)	41
Vzorec (3.6)	41
Vzorec (3.7)	41
Vzorec (3.8)	41
Vzorec (3.9)	41
Vzorec (3.10)	41
Vzorec (4.1)	43
Vzorec (4.2)	43
Vzorec (4.3)	43
Vzorec (4.4)	45
Vzorec (4.5)	45
Vzorec (4.6)	45
Vzorec (4.7)	46
Vzorec (4.8)	46
Vzorec (4.9)	47
Vzorec (4.10)	47
Vzorec (4.11)	47
Vzorec (4.12)	48
Vzorec (4.13)	49
Vzorec (4.14)	49
Vzorec (4.15)	49
Vzorec (4.16)	50
Vzorec (4.17)	51
Vzorec (4.18)	51
Vzorec (4.19)	51

Seznam obrázků

Obr.: 1. Meze platnosti Darcyho zákona, kde Re označuje hodnoty Reynoldsova čísla.....	32
Obr.: 2. Elementární objem.....	34
Obr.: 3. Schéma standardního vrtu pro jímání podzemí vody	38
Obr.: 4. a) Ukazuje vliv dodatečných odporů a průběh čerpací zkoušky, q_2 představuje množství vody odebrané z vlastního objemu vrtu a q_1 reprezentuje objem vody z kolektoru. b) Časový průběh jednotlivých složek čerpaného množství Q	42
Obr.: 5. Tvar křivky reprezentující průběh snížení na vrtu s vlivem vlastního objemu vrtu. První přímková část A definuje úsek s vlivem vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů.	44
Obr.: 6. Jednotkový sklon na počátku čerpací zkoušky po vynesení do grafu $\log s_v$ vs. $\log t$, kde s_v je naměřené snížení na vrtu.	45
Obr.: 7. Snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory	47
Obr.: 8. Bezrozměrné snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory a vlastním objemem vrtu	51
Obr.: 9. Logo aplikace RadFlow	53
Obr.: 10. Registrační formulář aplikace.....	57
Obr.: 11. Formulář pro vytvoření nového modelu a tabulky pro správu	57
Obr.: 12. Implementace Theisovy metody typové křivky v programu Radflow (jen pro ideální vrt).....	59
Obr.: 13. Implementace Jacobovy semilogaritmické metoda přímky v programu Radflow	60
Obr.: 14. Analýza parametrů reálného vrtu pomocí programu RadFlow	61
Obr.: 15. Analýza dodatečných odporů pomocí programu RadFlow	62
Obr.: 16. UML diagram datového modelu aplikace RadFlow	63
Obr.: 17. Mapa lokalizace vrtů s čerpací stanicí oblasti Bela Crkva, Republika srbská	65
Obr.: 18. Geologický popis hornin a zemin vrtů B3 a B6 (poskytli Vodní zdroje a.s., vytvořeno pomocí programu GeProDo)	66

Obr.: 19. Snížení hladiny podzemní vody ve vrtu B3 a B6 s hodnotami snížení na pozorovacích objektech.	67
Obr.: 20. Bezrozměrného snížení hladiny podzemní vody v semi-logaritmickém měřítku a analytická funkce popisující snížení na reálném vrtu dle Agarwal et al., 1970.	69
Obr.: 21. Snímek perforovaného úseku vrtu B6 před regenerací	71
Obr.: 22. Snímek perforovaného úseku vrtu B6 po regeneraci	71
Obr.: 23. Stanovení koeficientů reálné vrtu v prostředí programu RadFlow.	72
Obr.: 24. Zkoumaná lokalita Veletov, vrt KV-2 a KV-9 (zdroj: https://www.openstreetmap.org).....	75
Obr.: 25. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu VK-2	76
Obr.: 26. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu VK-9	76
Obr.: 27. Vyhodnocení transmisivity z čerpací zkoušky na vrtu VK-9 pomocí programu RadFlow.....	77
Obr.: 28. Vyhodnocení dodatečných odporů z čerpací zkoušky na vrtu VK-9 pomocí programu RadFlow.	78

Seznam použitých symbolů

b - výška zvodnělé vrstvy [L]

C - jednotkový faktor storativity vrtu [L^2]

C_d - bezrozměrný parametr storativity vrtu

d - průměr efektivního zrna [L]

g - gravitační zrychlení [$L.T^{-2}$]

h - piezometrická výška [L]

h_0 - počáteční piezometrická výška hladiny podzemní vod [L]

K - hydraulické vodivost [$L.T^{-1}$]

K_0 - modifikovaná Besselova funkce druhého druhu nultého řádu

K_1 - Besselova funkce druhého druhu prvního řádu

k_p – koeficient propustnosti [L^2]

n - pórovitost

n_e - efektivní porovitost

p - Laplaceův transformační parametr

Q - objemový průtok [$L^3.T^{-1}$]

q - specifický průtok [$L^2.T^{-1}$].

r – radiální vzdálenost [L]

r_c - poloměr neperforované části vrtu [L]

r_d - je dosah depresního kužele [L]

Re - bezrozměrné Reynoldsovo číslo [-]

r_p - poloměr výstroje vrtu [L]

r_v - poloměr hydraulicky dokonalého vrtu [L]

r_w - poloměr vrtu [L]

s - snížení hladiny ve studni [L]

S - storativita zvodně [-]

s_d – bezrozměrné snížení

S_s – specifická storativita [L^{-1}]

s_{te} - snížení vycházející z Theisova modelu [L]

s_v - snížení ve vrtu [L]

s_w - snížení způsobené dodatečnými odpory [L]

s_{wd} - Bezrozměrné snížení hladiny [-]

t – čas [T]

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

t_d – bezrozměrný čas

t_s – doba trvání vlivu vlastního objemu vrtu na průběh hydrodynamické zkoušky [T]

T_s - transmisivity v oblasti s působením dodatečných odporů [$L^2.T^{-1}$]

u - argument Theisovy studňové funkce

V – objem [L^3]

v – rychlost [$L.T^{-1}$]

v_s - střední hodnota rychlosti proudění kapaliny [$L.T^{-1}$]

W - bezrozměrný koeficient dodatečných odporů [-]

$W(u)$ – Theisova studňová funkce

x, y, z - souřadnice [L]

α - stlačitelnost zvodnělé vrstvy

β - úhel

β_v - stlačitelnost kapaliny

μ - dynamická viskozita, [M.L⁻¹.T⁻¹]

ρ - hustota kapaliny [M.L⁻³],

ν - kinematická viskozita [L².T⁻¹]

Úvod

V souvislosti s diskutovanými změnami klimatu jsou mnohdy zdroje podzemní vody uváděny jako jedna z oblastí, kde může dojít k nežádoucím změnám, z toho důvodu je důležité se touto problematikou zabývat, hledat nová řešení a zpřesňovat ta stávající. Pro Českou republiku jsou zdroje podzemních vod jedním ze základních zdrojů pitné vody, v nezanedbatelné míře jsou také využívány při zemědělské a průmyslové výrobě. V současnosti můžeme pozorovat na mnoha místech České republiky začínající problémy s touto komoditou, například vznikající a dlouhodobě trvající úbytky zásob v oblastech s nižší srážkovým úhrnem.

Hydrogeologická prostředí jsou velmi často heterogenní, nicméně popis aktuálního stavu zásob podzemních vod a s tím související fyzikální charakterizace prostředí v kontextu dlouhodobého využívání zásob podzemních vod je nezbytná. Hydrodynamická zkouška patří mezi základní v praxi využívané metody pro stanovení hydraulických charakteristik zvodnělých vrstev. Mezi hlavní vyhodnocované parametry kolektoru řadíme transmisivitu a storativitu. Tyto dva hlavní parametry definují základní fyzikální vlastnosti zvodně, pro jejichž stanovení se používají metody odvozené z analytického řešení základní rovnice proudění podzemní vody, které byly odvozené za předpokladu ideálního vrtu. Jsou zde však další parametry definující skutečný stav vrtu a jeho nejbližšího okolí v průběhu hydrodynamické zkoušky, které nejsou zahrnuty v řešení ideálního vrtu, v podobě dodatečných odporů a storativity vrtu. Tyto dva parametry se v běžně používaných metodách pro vyhodnocování hydrodynamických zkoušek nezohledňují, přestože jejich zanedbání, může vést k chybnému vyhodnocení skutečného stavu hydrogeologického prostředí a stavu vrtu. Z důvodu dále navazujících činností, ale také časové a energetické náročnosti pořízení dat z hydrodynamických zkoušek je žádoucí, těmto chybným analýzám předejít nebo maximálně minimalizovat jejich dopad. Znalost hodnoty dodatečných odporů je nezbytná při stanovení propustnosti a průtočnosti z dat snížení hladiny podzemní vody v podmínkách ustáleného proudění a dále může sloužit jako základní kritérium při posuzování regenerace vrtu s ohledem na změny hydraulických parametrů vrtu před a po zásahu.

Tématem disertační práce je modelování hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu. Předmětem modelování je stanovení dodatečných hydraulických parametrů reálného vrtu, tedy dodatečných odporů a vlivu vlastního objemu vrtu z dat hydrodynamické zkoušky. K tomuto účelu autor práce sestavil aplikační program, který je jedním z hlavních výstupů práce. Výsledný model je založen na analytickém řešení proudění podzemní vody k vrtu s vlivem dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu. V úvodní část disertační práce se autor věnuje vymezení metodiky zpracování a překládaným cílům disertační práce. Následující část předkládané práce obsahuje stručný přehled dané problematiky v podobě literární rešerše. V první části je uveden základní popis a charakteristika hydrogeologického prostředí, následuje fyzikální popis proudění v horninovém prostředí a jeho limity. V poslední části této kapitoly se autor věnuje popisu hydrodynamické zkoušky v podobě proudění podzemní vody v okolí vrtu, včetně charakterizace parametrů dodatečných odporů a storativity vrtu. Zpracováním výsledků je věnována následující kapitola označená jako vlastní práce. Kde dochází k metodickému zpracování terénních dat z čerpacích zkoušek dle postupů vycházejících z teoretické části, stanovených cílů a metodických postupů. Závěrečná část je věnována zhodnocení dosažených výsledků práce a předkládá možné doporučení pro danou problematiku.

Cíl a metodika práce

Níže si rozvedeme jednotlivé cíle a metodiku disertační práce s názvem „Hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu“, vymezení je nutné pro správnou formulaci přínosů autora k řešené problematice.

Cíle práce

- 1) Teoretická část práce se zabývá problematikou proudění podzemních vod, vyhodnocováním dat čerpacích zkoušek a parametrů skutečného vrtu.
- 2) Vyhodnocení dodatečných odporů a storativity vrtu (wellbore storage) z dat hydrodynamické zkoušky
- 3) Sestavení aplikačního programu pro vyhodnocení hydrodynamických zkoušek s vlivem dodatečných odporů a storativity vrtu na základě analytického popisu snížení hladiny podzemní vody na skutečném vrtu.
- 4) Stanovení charakteristik skutečného vrtu v podobě dodatečných odporů a storativity vrtu z první přímkové části semilogaritmického grafu $s(t)$ vs. $\log t$ (funkce reprezentuje pozorované snížení s na vrtu v průběhu čerpání), při znalosti transmisivity a storativity porézního prostředí.
- 5) Ověření a validace metod pro určení charakteristik skutečného vrtu na terénních datech čerpací zkoušky, pomocí aplikačního softwaru.

Hlavním cílem práce je sestavení modelu pro vyhodnocení dodatečných odporů a storativity vrtu z dat hydrodynamických zkoušek. Samotný model bude založen na analytickém řešení snížení hladiny podzemní vody s vlivem těchto faktorů. Dodatečné odpory a storativita vrtu jsou faktory, které ovlivňují průběh hydrodynamické zkoušky a způsobují rozdíl ve skutečně měřených hodnotách snížení hladiny oproti teoretickému snížení, které je založeno na Theisově modelu snížení hladiny podzemní vody. Jak je

uveďeno v literárním rozboru Theisův model byl odvozen pro ideální vrt, kde přítomnost dodatečných odporů a vliv vlastního objemu vrtu byla zanedbána. Zanedbání vlivu těchto faktorů může způsobit chybnou interpretaci dat z hydrodynamické zkoušky a zapříčinit znehodnocení vyhodnocení provedené terénní zkoušky. Pro účel vyhodnocení parametrů skutečného vrtu bude autorem sestaven aplikační program, umožňující zpracování terénních dat z čerpacích zkoušek, kde je předpokládán výskyt dodatečných odporů a vliv storativity vrtu. Následné ověření aplikačního modelu v podobě validace výsledných hodnot dodatečných odporů a storativity vrtu bude předmětem práce. Dalším cílem je upravení softwarového modelu pro vyhodnocení parametrů z počáteční části čerpací zkoušky, kde je dominantní vliv storativity vrtu na měřené snížení hladiny podzemní vody ve vrtu a jeho nejbližším okolí a ověření možnosti využití aplikace při vyhodnocování čerpacích zkoušek v praxi. Hlavním přínosem práce je vytvoření aplikačního nástroje, který bude umožňovat stanovení parametrů skutečného vrtu a jeho ověření na datech reálných čerpacích zkoušek. Znalost těchto parametrů je důležitá při stanovení propustnosti a průtočnosti z dat snížení hladiny podzemní vody na čerpaném vrtu v podmínkách ustáleného proudění a dále může sloužit jako základní kritérium pro stanovení potřeb regenerace daného vrtu nebo pro vyhodnocení úspěšnosti provedeného regeneračního zásahu.

Metodika

Disertační práce obsahuje hlavní dvě části, literární rešerši a výzkumnou část disertační práce, která je označena jako vlastní práci autora. Literární rešerše představuje teoretický přehled stavu poznání v oblasti hydrauliky podzemních vod v kontextu vyhodnocování základních hydraulických parametrů zvodně a vrtu. Výzkumná část se skládá z několika oblastí řešení, které byly zpracovány v průběhu plnění cílů práce. V první části výzkumné práce je popsán aplikační program RadFlow pro vyhodnocování dat čerpacích zkoušek, který je jedním z hlavních výstupů práce. V další části výzkumné práce dochází k vyhodnocení parametrů hydraulického (hydrogeologického) prostředí na reálných datech čerpacích zkoušek, popisu lokality a stanovení parametrů skutečného vrtu. Závěrem je pak posouzen vliv parametrů skutečného vrtu na průběh vyhodnocovaných čerpacích zkoušek

z hlediska regenerace vrtu, optimálního využívání zásob podzemních vod a představeny jsou příležitosti pro navazující budoucí výzkum.

Základní kroky metodického postupu

- 1) Studium odborné literatury
- 2) Terénní hydrodynamické zkoušky.
- 3) Vyhodnocení základní terénní hydrodynamické zkoušky, stanovení transmisivity a storativity zvodně.
- 4) Sestavení modelu pro vyhodnocení dodatečných odporů a storativity vrtu, na základě analytického řešení pro snížení hladiny podzemní vody s vlivem těchto faktorů.
- 5) Stanovení parametru dodatečných odporů na základě znalosti počáteční fáze čerpací zkoušky.
- 6) Validace hodnot z modelu pomocí metod pro determinaci parametrů skutečného vrtu.

Terénní měření

Hydrodynamická zkouška patří mezi nejběžnější metody průzkumu hydrogeologických vrstev. Výsledkem čerpací zkoušky je odezva zvodně v podobě snížení hladiny podzemní vody na množství čerpané vody z kolektoru, pro správný průběh je nezbytné dodržení konstantního čerpaného množství po celou dobu průběhu zkoušky, jde o základní předpoklad neustáleného modelu proudění podzemní vody k vrtu (Theisův model ideálního vrtu). Tato skutečnost je při samotném provádění zkoušky často problematická, avšak pro vyhodnocení hodnot transmisivity a storativity nezbytná, bez znalosti těchto základních hydraulických parametrů není možné vyhodnocení parametrů skutečného vrtu. Pro stanovení hodnoty storativity zvodně je nezbytné provést měření snížení hladiny podzemní vody na pozorovacím vrtu v závislosti na čase.

Specifikace terénních dat

Pro prezentovanou metodu vyhodnocení je nutné zaznamenat snížení hladiny podzemní vody na samotném počátku čerpací zkoušky, kdy dominuje dotace z vlastního objemu vrtu a nikoliv z porézního materiálu, kterým je tvořena zvodeň. Využitelnost terénních dat je dále limitována volbou délky časového kroku, kdy je potřebné zvolit dostatečně krátký časový krok na počátku zkoušky, aby bylo možné určit parametr storativity vrtu, tento jev má dominantní vliv právě na začátku zkoušky. Parametr dodatečných odporů ovlivňuje celý průběh čerpací zkoušky na odběrném vrtu a jeho nejbližším okolí, přesto bylo prokázáno, že neovlivňuje vyhodnocení transmisivity kolektoru z čerpací zkoušky pomocí Jacobovy metody. Před samotným stanovením parametrů transmisivity a storativity z dat čerpací zkoušky předchází kontrola, zda v průběhu čerpání nedošlo k ovlivnění výsledků snížení hladiny vlivem dotace vody přes hranice kolektoru, způsobenou například polopropustnou hranicí kolektoru, v případě potvrzení této skutečnosti jsou data znehodnocena a nemohou být dále vyhodnocena pomocí zde prezentované metody. Toto ověření můžeme provést porovnáním průběhu funkce snížení s hladiny podzemní vody v průběhu čerpání zkoušky s funkcí vycházející z Thiesova modelu.

Vyhodnocení základních hydraulických parametrů

Základními charakteristikami zvodnělého prostředí je transmisivita a storativita zvodně. Tyto hydraulické vlastnosti slouží jako vstupní parametry pro popis rotačně-symetrického proudění s vlivem storativity vrtu a dodatečných odporů, které publikovat Agarwal, 1970. Pro vyhodnocení transmisivity a storativity zvodně byla zvolena Jacobova semilogaritmická metoda přímky. Po vynesení hodnot snížení hladiny podzemní vody vs. logaritmus času t do semilogaritmického grafu můžeme často nalézt dva přímkové úseky grafu, kdy tento tvar křivky signalizuje ovlivnění čerpací zkoušky storativitou vrtu a dodatečnými odpory. Druhá přímková část semilogaritmického grafu, kde snížení hladiny podzemní vody již není ovlivněno vlastní zásobou vody v čerpaném vrtu, slouží k určení hodnoty transmisivity.

Sestavení modelu

Na základě analytického řešení proudění podzemní vody k vrtu s vlivem dodatečných odporů a storativity vrtu bude sestaven aplikační program. Vstupními parametry do modelu pro vyhodnocení parametrů skutečného vrtu jsou průběh snížení hladiny podzemní vody na čerpacím vrtu a hydraulické parametry zvodně. V rovnici pro bezrozměrné snížení hladiny podzemní vody s výskytem dodatečných odporů a storativity vrtu vystupují čtyři neznámé parametry: transmisivita, storativita, faktor storativity vrtu a bezrozměrná hodnota dodatečných odporů. Odhad těchto čtyř parametrů z rovnice pro snížení hladiny podzemní vody pomocí iterační procedury, při které se jednotlivé parametry nastavují tak, abychom dosáhli co nejlepší shody, není zdaleka jednoduché aplikovat. Tento proces může být časově velmi náročný. Odhad transmisivity vrtu je možný z dat čerpací zkoušky, vyhodnocení lze provést na druhém přímkovém úseku funkce $s(t)$ za pomoci metody Jacobovy semilogaritmické přímky, pro odhad hodnoty storativity je nutné změřit průběh snížení v pozorovacím vrtu, které vzniká jako odezva na čerpání během samotné čerpací zkoušky. Na základě znalosti parametrů transmisivity a storativity zvodně můžeme stanovit ostatní parametry.

Granty

V průběhu řešení výzkumné části práce autor získal podporu několika grantových agentur. Jedná se o dva projekty financované Interní grantovou agenturou České zemědělské univerzity v Praze (IGA). Dále pak dílčí cíle výzkumné práce se stali součástí řešení projektu Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR poskytnuté od Technologická agentura ČR (TA0). Výčet všech grantů pro podporu výzkumu je uveden níže:

- Modelování hydrodynamické zkoušky na reálných vrtech, poskytovatel GA FZP, doba řešení 2013 - 2013
- TA02021249 Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR, poskytovatel TAČR, doba řešení 2012 – 2015
- Matematické a fyzikální modelování proudění dešťové vody ve sněhové pokrývce, poskytovatel GA FZP, doba řešení 2014 – 2014

Autorské vědecké výstupy

V průběhu studia se autor práce stal autorem případně spoluautorem těchto vědeckých výstupů:

- HOLUB, J. – PECH, P. - KURÁŽ, M. – MÁČA, P. – KAHUDA, D. Evaluation of a pumping test with skin effect and wellbore storage on confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia. Int. J. Water
- KURÁŽ, M. – HOLUB, J. – JEŘÁBEK, J. Numerical solution of the Richards equation based catchment runoff model with dd-adaptivity algorithm and Boussinesq equation estimator. Pollack Periodica, 2017, roč. 12, č. 1, s. 29-44. ISSN: 1788-1994.
- JURAS, R. – PAVLÁSEK, J. – VITVAR, T. – ŠANDA, M. – HOLUB, J. – JANKOVEC, J. – LINDA, M. Isotopic tracing of the outflow during artificial rain-on-snow event. Journal of Hydrology, 2016, roč. 2016, č. 541, s. 1145-1154. ISSN: 0022-1694.
- HOLUB, J.; idPublikace = 67989; Název: Modelování hydrodynamické zkoušky na reálných vrtech pomocí aplikačního softwaru
- HOLUB, J. Aplikace na vyhodnocení čerpacích zkoušek., Application for the evaluation of pumping tests., pumping test, skin effect, wellbore storage, pumping test analysis, 2015, DA - Hydrologie a limnologie, RadFlow, <http://radflow.cz>, Aplikační software, Snížení nákladů spojených s provedení čerpací zkoušky a následného vyhodnocení., KVHEM, Fakulta životního prostředí, ČZU v Praze, 60460709, CZ - Česká republika, N - Využití výsledku jiným subjektem je možné bez nabytí licence (výsledek není licencován), N - Poskytovatel licence na výsledek nepožaduje licenční poplatek

- HOLUB, J. – KURÁŽ, M. Web based configurator for DRUtES model, Web based configurator for DRUtES model, php interface, graphical user interface for high-performance computers, 2015, DA - Hydrologie a limnologie, GUI Online Interface for DRUtES, http://drutes.org/src/dru_online.tgz, Jedná se online aplikaci, ke své instalaci vyžadují systém s funkční instalací Apache serveru s aktivními PHP moduly., Aplikace umožňuje vzdálenou správu výpočtu řešení Richardsovy rovnice na tzv. high-performance systémech. V běžně používaných komerčních softwarech nemá alternativu. Pořizovací cena licence komerčních produktů s grafickým prostředím pro high-performance systémy zpravidla přesahuje částku 100.000Kč. Software je vydán jako tzv. opensource pod GPL v. 3 licenci., Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze, 60460709, CZ - Česká republika, A - K využití výsledku jiným subjektem je vždy nutné nabytí licence, N - Poskytovatel licence na výsledek nepožaduje licenční poplatek

- HOLUB, J. – PECH, P. RadFlow, RadFlow, well, real well, skin effect, 2013, DA - Hydrologie a limnologie, RadFlow, <http://www.kvhem.cz/vyzkum/software/>, Program v jazyku Java, autorizovaný software, freeware, Zefektivnění vyhodnocení hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech, snížení nákladů na čerpací zkoušky, KVHEM, Fakulta životního prostředí, ČZU v Praze, 60460709, CZ - Česká republika, N - Využití výsledku jiným subjektem je možné bez nabytí licence (výsledek není licencován), N - Poskytovatel licence na výsledek nepožaduje licenční poplatek

Využití datové sady a užitý software

Zde bych ještě jednou chtěl poděkovat organizaci Vodní zdroje a.s. za poskytnutí datové sady pro účely vyhodnocení. Výsledky analýz a data k jednotlivým čerpacím zkouškám jsou součástí přiloženého paměťového média (CD disku). Většina provedených

analýz a výpočtů byla provedena pomocí programu Radflow, který je jedním z hlavních cílů práce. Při vývoji samotného aplikačního programu jsem využíval jako vývojové prostředí NetBeans verze 8.0.

Dále pro účely grafických výstupu jsem použil program R a dále jiné programy jako například MS Office Excel. V práci se také vyskytují matematické rovnice a předpisy, jejich formát odpovídá tradičnímu zápisu. Matematické předpisy a rovnice v textu práce jsou vloženy pomocí doplňku MS Office 2010.

1. Literární řešerše

1.1. Základní popis horninového prostředí a jeho fyzikální charakteristiky ve vztahu k podzemním vodám

1.1.1. Podzemní voda

Vodu nacházející se pod zemským povrhem označujeme jako podpovrchová voda. Předmětem zájmu této práce bude podpovrchová voda, která se vyskytuje v nasycené zóně (zóna saturace) půdních a geologických celků a pro kterou se používá označení podzemní voda (*Valentová, 2007*).

1.1.2. Klasifikace zvodnělých vrstev

K pohybu podzemních vod dochází díky spojitosti propustných oběhových cest mezi filtrační a vývěrovou oblastí. Čas, za který podzemní voda tuto cestu urazí, nazýváme doba zdržení. Oblast kde k takovému proudění nedochází, nebo je značně omezeno vůči okolním vrstvám, označujeme jako izolátor. Pokud však geologická formace může částečně vodu propouštět, označujeme ji jako polopropustnou vrstvu (poloizolátor). Označení oblasti za propustnou, nepropustnou nebo polopropustnou je vždy relativním pojmem, protože žádnou horninu nemůžeme označit za zcela absolutně propustnou nebo nepropustnou. Hlavním kritériem zůstává rozdíl v propustnosti sousedních vrstev (*Valentová, 2007, Jetel, 1982*).

Zvodnělé oblasti můžeme rozdělit na kolektory s volnou a napjatou hladinou, v závislosti na tlakových podmínkách na hladině podzemní vody (*Freeze at Cherry, 1979*). V závislosti na tlakových podmínkách na hladině podzemní vody dělíme zvodnělé vrstvy na tyto kategorie:

a) Zvodnělé vrstvy s napjatou hladinou

Za zvodnělý kolektor s napjatou hladinou můžeme označit takový kolektor, který je omezen shora i zdola nepropustným prostředím. V případě průniku horní vrstvou, voda

vystoupí nad úroveň svrchní hraniční nepropustné vrstvy. Jestliže ze studny voda samovolně vytéká na zemský povrch, můžeme tuto studnu označit za artézskou.

b) Zvodnělé vrstvy s volnou hladinou

Je takový kolektor, který je shora ohraničen hladinou podzemní vody, kde je atmosférický tlak. Kolektor s volnou hladinou může být dotován vodou přímo z oblasti, která je nad kolektorem.

c) Zvodnělé vrstvy s přetékáním

Kolektor, který je dotován z horní nebo dolní vrstvy tvořící hranice kolektoru, označujeme jako kolektor s přetékáním. Přestože hraniční vrstvy často označujeme jako izolátory, v tom případě se spíše jedná o polopropustné vrstvy, umožňující částeční průnik vody (Pech, 2010).

1.1.3. Pórovitost

Pórovitost zvodnělého prostředí je dána podílem celkového objemu pórů V_p , které se nacházejí ve vymezeném objemu zvodnělého prostředí V_t . Při vynásobení stem dostaneme procentuální podíl pórů v celkovém objemu vzorku (Freeze at Cherry, 1979).

$$n = V_p / V_t \quad (1.1)$$

Půdy patří mezi nejvíce porézní materiály v přírodě. Pórovitost závisí hlavně na velikosti zrn tvořící horninové prostředí a na tvaru a uspořádání horninových částic (Heath, 1983).

1.1.4. Propustnost

Na rozdíl od hydraulické vodivosti, propustnost je závislá pouze na charakteristikách porézního prostředí. Určuje schopnost materiálu propouštět vodu bez ohledu na fyzikální vlastnosti kapaliny (Pech, 2010). Její hodnotu můžeme určit např. empirickým vztahem (Bazer, Schweiger, 1969).

$$k_p = C d_{10}^2 \quad (1.2)$$

kde C je koeficient, jehož hodnota je určena druhem porézního materiálu (45 pro jílový písek a 140 pro čistý písek) a d je efektivní průměr zrna, za který je často brán průměr d_{10} ; k_p – koeficient propustnosti [L^2]

1.1.5. Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost patří mezi základní hydraulické charakteristiky zvodnělých vrstev. Koeficient K vyskytující se v Darcyho rovnici (2.1), která popisuje pohyb vody porézním prostředím, se nazývá hydraulická vodivost, tento parametr má rozměr rychlosti [$L.T^{-1}$].

Mezi veličiny ovlivňující hydraulickou vodivost řadíme hustotu kapaliny a její viskozitu. Z charakteristik porézního půdního prostředí má význam zejména zrnitostní složení a tvar zrn pórů, pórovitost a měrný povrch. Hydraulickou vodivost můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$K = \frac{k_p * \rho * g}{\mu} \quad (1.3)$$

kde k_p se nazývá propustnost porézního prostředí [L^2], ρ hustota kapaliny [$M.L^{-3}$], g představuje gravitační zrychlení [$L.T^{-2}$] a μ dynamická viskozita, kterou můžeme vyjádřit jako součin hustoty a kinematické viskozity [$M.L^{-1}.T^{-1}$] (Valentová, 2007).

1.1.6. Transmisivita

Transmisivita označuje schopnost propouštět vodu porézním horninovým prostředím. V případě, že se jedná o homogenní kolektor, definujeme ji jako součin koeficientu hydraulické vodivosti a výšky zvodnělé vrstvy (*Jetel*, 1982).

$$T = b K \quad (1.4)$$

kde K je hydraulická vodivost [$L.T^{-1}$] a b výška zvodnělé vrstvy [L], T – transmisivita [$L^2.T^{-1}$]

1.1.7. Storativita

Storativita je parametr určující schopnost nasyceného zvodnělého prostředí přijímat nebo uvolňovat určité množství vody. Specifická storativita S_s porézního prostředí je hodnota představující schopnost nasyceného porézního prostředí akumulovat určité množství vody a je definována jako objem vody, který se uvolní z jednotkového objemu zvodnělé vrstvy při jednotkové snížení piezometrické výšky.

Specifická storativita S_s [L^{-1}] je definována součtem dvou členů. První člen je určen:

$$dV_v = \alpha \rho g \quad (1.5)$$

kde α stlačitelnost zvodnělé vrstvy, ρ [$M.L^{-3}$] hustota kapaliny a g představuje gravitační zrychlení [$L.T^{-2}$]

a druhý člen:

$$dV_v = \beta_v n \rho g \quad (1.6)$$

kde β_v je koeficient stlačitelností kapaliny a n poróvitost.

Po součtu těchto členů můžeme specifickou storativitu vyjádřit vztahem:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta_v) \quad (1.7)$$

kde S_s je specifická storativita [L^{-1}]

Bezrozměrný parametr storativity zvodně S je definován vztahem:

$$S = S_s b \quad (1.8)$$

kde b výška kolektoru [L], bezrozměrný koeficient storativity je definován jako objem vody uvolněný z objemu výšky b s plochou postavy rovné $1m^2$ při jednotkovém poklesu piezometrické výšky (*Freeze at Cherry, 1979*).

1.1.8. Homogenita a anizotropie půdního prostředí

Jestliže hodnota hydraulické vodivosti K je pro celý kolektor konstantní, můžeme dané prostřední označit za homogenní. V opačném případě se jedná o heterogenní formaci,

v případě definice souřadného systému xyz lze vyjádřit hodnotu hydraulické vodivosti jako funkci těchto prostorových proměnných $K(x,y,z)$. Výsledné hodnoty funkce pro heterogenní kolektor nejsou konstantní. (Freeze, Cherry, 1979). V geologickém prostředí se můžeme setkat s celou řadou druhů heterogenity hydraulické vodivosti, například: heterogenita s náhlou změnou heterogenity, nebo heterogenita s postupnou změnou hydraulické vodivosti.

Pokud hodnota hydraulické vodivosti nezávisí na směru, jedná se o izotropní prostředí. V opačném případě označujeme prostředí za anizotropní, tedy hydraulická vodivost se liší v závislosti na směru. Tento fakt můžeme po zavedení souřadného systému xyz vyjádřit vztahem $K_x \neq K_y \neq K_z$ (Pech, 2010).

1.2. Základní fyzikální popis pohybu vody v horninovém prostředí

1.2.1. Darcyho zákon

Darcyho zákon objevil francouzský inženýr Henry Darcy v roce 1856, stanovil závislost mezi proteklým množstvím vody Q [L^3T^{-1}], které se přímo úměrně zvětšuje s rozdílem hydraulických výšek a nepřímo úměrně s délkou L , kde byly měřeny hodnoty hydraulické výšky. Tento vztah se vyjadřuje pomocí rovnice:

$$Q = K S \frac{(H_1 - H_2)}{L} \quad (2.1)$$

Nasycená hydraulická vodivost K je základní charakteristika porézního prostředí, má rozměr rychlosti [$L.T^{-1}$] a S je plocha průtočného průřezu [L^2]. Hodnoty $H_1[L]$ a $H_2[L]$ představují hydraulickou výšku na vstupu a výstupu aparatury, vzdálenost mezi nimi je reprezentována hodnotou L [L]. Směr proudu je určen gradientem potenciálu hydraulické výšky (Freeze, Cherry, 1979).

Pokud známe průtok Q přes plochu vzorku S , po vydělení těchto hodnot obdržíme hustotu toku v . Hustota toku je označována jako Darcyho rychlost a má rozměr rychlosti [$L.T^{-1}$] (Valentová, 2007).

$$v = \frac{Q}{S} \quad (2.2)$$

Ve skutečnosti se voda pohybuje jen propustnými efektivními póry a nevyplňuje celou plochu vzorku. Pro získání skutečné hodnoty rychlosti je potřeba Darcyho rychlosti upravit. Je-li efektivní pórovitost n_e , pak skutečná plocha pórů $S_n = n_e S$. Skutečnou rychlost $v_{sk} [L.T^{-1}]$ vyjádříme ze vztahu:

$$v_{sk} = \frac{v}{n_e} = \frac{Q}{n_e S} \quad (2.3)$$

Efektivní pórovitost je definována vztahem:

$$n_e = \frac{V_{pe}}{V_t} \quad (2.4)$$

kde V_{pe} je součet objemu pórů, kterými se voda může skutečně pohybovat a V_t je celkový objem vzorku $[L^3]$.

Při řešení pohybu podzemní vody zůstává předmětem zájmu nejčastěji Darcyho rychlost (2.2). V praxi se při vyhodnocování proudění vody porézním prostředím nahrazuje skutečný materiál kontinuem, pro které zavádíme makroskopické parametry, jako je hydraulická vodivost (Bear, Cheng, 2010).

Darcyho rychlost lze definovat, jako:

$$v = -K \frac{H_1 - H_2}{L} = -K \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad (2.5)$$

nebo v diferenciální formě:

$$v = -K \frac{dH}{dl} \quad (2.6)$$

kde dH/dl je hydraulický gradient. Tato rovnice platí pro jednosměrné (jednorozměrné) proudění v homogenním izotropním prostředí.

V případě třírozměrného heterogenního anizotropního proudění rychlost $v [L.T^{-1}]$ rozepíšeme po složkách, kde xyz reprezentují osy souřadného systému.

$$\begin{aligned} v_x &= -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ v_y &= -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.7)$$

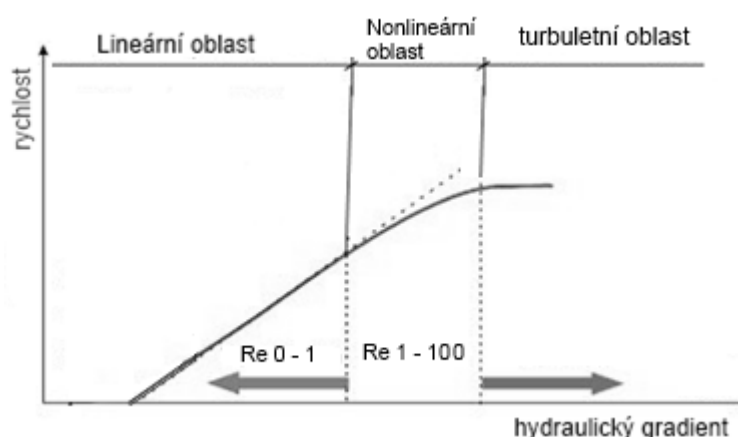
$$v_z = -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

kde K pro jednotlivé složky tvoří tenzor hydraulické vodivosti (Freeze, Cherry, 1979).

1.2.2. Omezení platnosti Darcyho zákona

Lineární závislost vyjádřena Darcyho zákonem je reprezentována vztahem rychlosti proudění (hustota toku) a hydraulickým gradientem. Lineární závislost má však své omezení, kde již Darcyho zákon neplatí, jak ukazuje obrázek č. 1, tyto hraniční hodnoty (Valentová, 2007). V mechanice tekutin je určen přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním Reynoldsovo číslem Re , konkrétně jeho kritickými hodnotami. Kritickou hodnotou se rozumí taková velikost Re , která zajišťuje laminární režim proudění.

Pro půdní prostředí udává Richardson kritickou hodnotu Reynoldsova čísla přibližně 1 a Lindquist 1 až 4. Pavlovskij zahrnuje do Reynoldsova čísla i vliv pórovitosti a kritické hodnoty uvádí v intervalu od 7 do 9. Rozdílné kritické hodnoty Reynoldsova čísla lze vysvětlit odlišnou metodikou pokusů při experimentech a také tím, že Reynoldsovo číslo není pro půdní prostředí přesně vystihující charakteristikou. Navíc hranici mezi lineárním a postlineárním prouděním je obtížné přesně stanovit, protože přechod z jednoho režimu proudění do druhého je plynulý (Kazda, 1997).



Obr.: 1. Meze platnosti Darcyho zákona, kde Re označuje hodnoty Reynoldsova čísla

V případě jemnozrnných materiálů, kde je voda vázána silnými molekulárními silami, Darcyho vztah začíná platit až po překročení určité hodnoty hydraulického gradientu (Pech, 2010). Pro velmi hrubozrné materiály, kde převládají setrvačné síly nad viskózními,

dochází k porušení lineární závislosti mezi rychlostí toku a hydraulickým gradientem, kdy určujícím parametrem se stává bezrozměrné Reynoldsovo číslo Re (Valentová, 2007).

$$Re = \frac{v_s * d}{\nu} \quad (2.8)$$

kde v_s je střední hodnota rychlosti proudění kapaliny [$L.T^{-1}$], ν kinematická viskozita [$L^2.T^{-1}$] a d reprezentuje průměr efektivního zrna [L].

Platnost Darcyho vztahu se uvažuje v rozmezí hodnot Reynoldsova čísla 0 až 10.

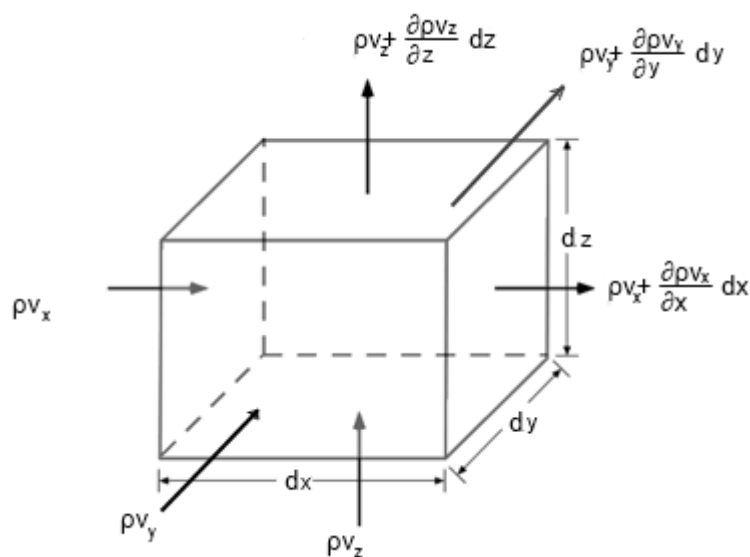
1.2.3. Ustálené (stacionární) proudění podzemní vody

Proudění, pro které platí, že vektory rychlosti proudového pole v daném místě jsou v čase konstantní, označujeme jako proudění ustálené. Uvažujeme-li elementární objem porézního materiálu viz. obrázek č. 2 a tento element označíme za elementární objem. Pak zákon kontinuity při tomto režimu proudění stanovuje, že množství přitékající vody do elementárního objemu se rovná objemu vody, který daný elementární objem opustí, za předpokladu, že v uvažovaném objemu nedochází ke vzniku ani zániku bilancované vody. Tento vztah vyjadřuje zápisem:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.9)$$

kde v_x , v_y a v_z jsou složky rychlosti proudění a ρ je hustota kapaliny. Pokud označíme danou kapalinu za nestlačitelnou, pak platí, že funkce $\rho(x,y,z)$ je konstantní. Výše uvedenou rovnici lze zjednodušit do tvaru:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$



Obr.: 2. Elementární objem.

Substitucí Darcyho zákona pro v_x , v_y a v_z získáme rovnice popisující ustálené proudění anizotropním porézním materiálem.

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = 0 \quad (2.11)$$

kde h hydraulická výška a K_x , K_y a K_z představují hydraulickou vodivost v jednotlivých směrech souřadného systému. Pro izotropní medium platí $K_x = K_y = K_z$, a v případě, že jde také o homogenní prostředí hodnota $K(x,y,z)$ je konstantní. Po následné úpravě pro izotropní homogenní prostředí tedy platí vztah:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (2.12)$$

Tato rovnice je jedna ze základních parciálních diferenciálních rovnic, označovaná jako Laplaceova rovnice. Řešením rovnice (2.12) získáme funkci $h(x,y,z)$, která popisuje hodnoty hydraulické výšky v jednotlivých bodech trojrozměrné oblasti řešení. Stává se tak základní rovnicí pro popis proudění podzemní vody v porézních materiálech v ustáleném režimu proudění (*Freeze, Cherry, 1979*).

1.2.4. Dupuitovy postuláty

Při ustáleném proudění podzemní vody s volnou hladinou, často zavádíme zjednodušující Dupuitovy postuláty. Postuláty jsou založeny na předpokladu, že sklon hladiny podzemní vody je malý v rozsahu 1/1000 až 1/100, z toho důvodu lze směr proudění aproximovat na horizontální (*Valentová, 2007*). Dupuitovy postuláty lze definovat tímto způsobem:

- 1) hydraulická výška $H(x,y,z)$ je rovna výšce podzemní vody $h(x,y)$, proudnice jsou vodorovné přímky a ekvipotenciály svislice
- 2) gradient potenciálu je dán sklonem volné hladiny a je po svislici konstantní.

Po zavedení těchto postulátů můžeme vyjádřit hustotu toku $[L.T^{-1}]$ pro homogenní izotropní prostředí ve směru osy x jako:

$$v_x = -K \frac{dh}{dx} \quad (2.13)$$

Průtok vztažený na jeden metr šířky zvodně je definován vztahem:

$$q = -Kh(x) \frac{dh}{dx} \quad (2.14)$$

kde K - hydraulická vodivost, $h(x)$ - hladina podzemní vody, dh/dx - hydraulický gradient a q - specifický průtok $[L^2.T^{-1}]$.

Dupuitovy postuláty se často používají při řešení proudění podzemní vody (s volnou hladinou), daný problém nám značně zjednoduší, přesto výsledky lze při splnění základních předpokladů považovat za zcela relevantní (*Freeze, Cherry, 1979*).

1.2.5. Neustálené proudění podzemní vody

Při neustáleném proudění elementárním objemem reprezentovaným porézním materiálem platí, že celková rychlost proudící kapaliny v elementárním objemu se rovná časové změně objemu kapaliny uvnitř elementu. Pomocí rovnice kontinuity můžete tuto skutečnost vyjádřit vztahem:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = n \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2.15)$$

kde n je pórovitost materiálu. Víme, že změna hustoty ρ a změna pórovitosti n jsou způsobeny změnou hodnoty hydraulické výšky a specifická storativita je definována jako množství uvolněné vody z jednotkového objemu zvodnělé vrstvy při jednotkovém poklesu hydraulické výšky, tedy časovou změnu objemu lze vyjádřit jako:

$$\rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.16)$$

Za předpokladu, že $\rho \frac{\partial v_x}{\partial x}$ je mnohonásobně větší než $v_x \frac{\partial \rho}{\partial x}$ můžeme hustotu ρ zanedbat na obou stranách rovnice a po dosazení za v_x , v_y a v_z z předpisu pro Darcyho rychlost získáme vztah pro popis neustáleného anizotropního proudění nasyceným porézním materiálem:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.17)$$

Pro homogenní izotropní porézní prostředí rovnici proudění redukuje rovnici (2.17) na tvar:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.18)$$

Nebo vyjádření pomocí předpisu pro specifickou storativitu S_s :

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = \frac{\rho g (\alpha + n\beta_v)}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.19)$$

Rovnice (2.19) je označovaná jako difúzní rovnice, jejíž řešení je funkce $h(x,y,z,t)$, která popisuje časové rozložení hydraulické výšky v zájmové oblasti. Řešení rovnice vyžaduje znalost těchto hydrogeologických parametrů: K , α , a n , dále parametrů kapaliny ρ a β_v . Pro speciální případ horizontálního kolektoru s napjatou hladinou o mocnosti b , lze rovnici vyjádřit ve tvaru:

$$\left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.20)$$

kde bezrozměrný koeficient storativity $S = S_s b$ a transmisivita kolektoru $T = Kb$, řešením je funkce $h(x,y,t)$, která reprezentuje rozložení hydraulické výšky v horizontálním kolektoru v čase t . Řešení rovnice (2.20) vyžaduje znalost hydraulických parametrů, storativity a transmisivity zvodně (Freeze, Cherry, 1979).

1.3. Proudění podzemní vody k vrtu

1.3.1. Hydrodynamické zkoušky

Za hydrodynamické zkoušky označujeme procesy, kterými na hydrogeologických objektech (vrt, studna) na základě pozorování účinku zásahu do hydrogeologického systému stanovujeme hydraulické charakteristiky pozorované oblasti (*Jetel*, 1982). Pro účely této práce jsou zde uvedeny jen nejběžnější metody průzkumu, základní hydrodynamické zkoušky můžeme rozdělit do těchto skupin:

- 1) Čerpací zkouška, při níž se ze zkušebního objektu odebírá konstantní množství vody a zaznamenává se reakce zvodnělé vrstvy ve smyslu poklesu hladiny podzemní vody nebo tlaku na pozorovaném objektu. Čerpací zkoušku můžeme rozdělit dle režimu proudění podzemní vody k pozorovanému objektu:

1a) Čerpací zkouška za ustáleného režimu proudění, jedná se o nejjednodušší způsob vyhodnocení hydraulických parametrů, kdy při konstantním čerpaném množství vody je dosaženo ustáleného režimu proudění v okolí vrtu. Při samotném vyhodnocení se vychází z Dupuitových předpokladů a Thiemových rovnic ustáleného přítoku do studně. Výpočet transmisivity pro zvodně s napjatou hladinou ze snížení hladiny s_v na hydraulicky dokonalém vrtu lze použít tento základní vzorec:

$$T = \frac{Q}{2\pi s_v} \ln \frac{r_d}{r_v} \quad (3.1)$$

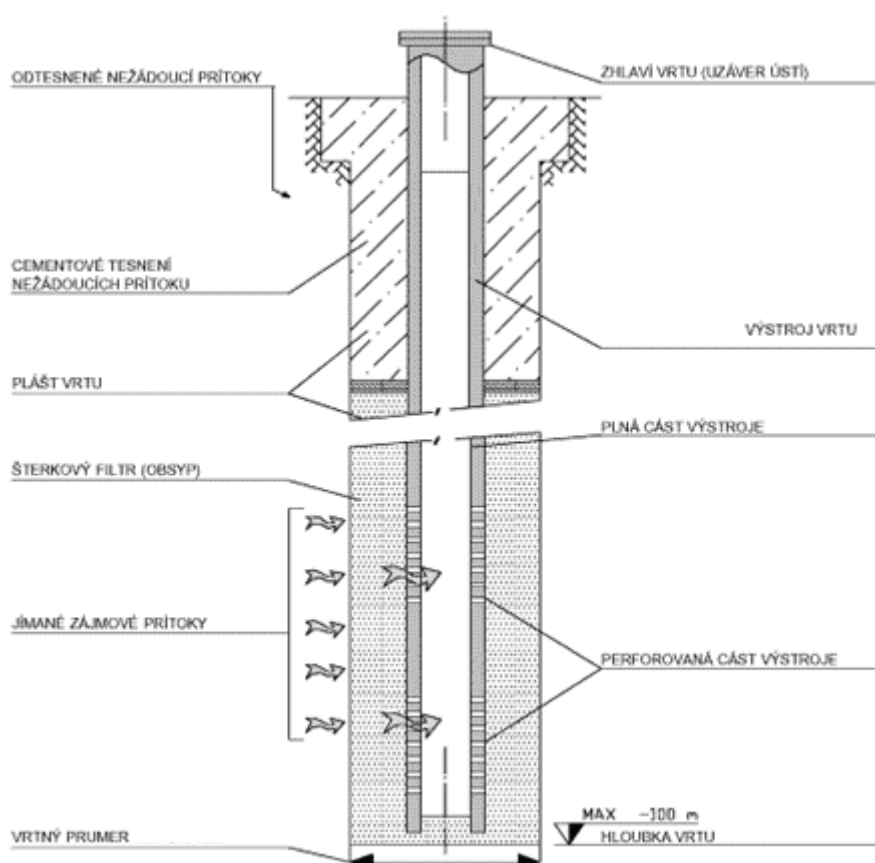
kde Q [$L^3 \cdot T^{-1}$] čerpané množství, r_d [L] je dosah deprese (depresního kuželu) vyvolané odběrem ze zvodně a r_v [L] je poloměr hydraulicky dokonalého vrtu, s_v je snížení ve vrtu [L].

1b) Čerpací zkouška za neustáleného režimu proudění, z vrtu je čerpáno konstantní množství podzemní vody a ve stanovených časových intervalech je měřen pokles hladiny vody v čerpaném objektu. V případě potřeby stanovení storativity zvodně je nutné zaznamenat snížení hladiny podzemní vody, které je vyvoláno odběrem vody z čerpaného vrtu na pozorovacím objektu. Základní fyzikální popis neustáleného režimu proudění ke studni formulovat Theis (1935), této problematice bude věnována samostatná kapitola této práce a názvem: „Neustálené proudění k ideálnímu vrtu“.

- 2) Stoupací zkouška, při níž se pozoruje průběh vzestupu hladiny nebo tlaku ve zkušebním objektu po ukončení čerpání. Vzhledem k charakteru proudění v okolí vrtu po ukončení čerpání je nutné vycházet z principů neustáleného proudění. Teoretické základy definovat Theis (1935). Základní principem je superpozice neustáleného kladného a záporného přítoku do vrtu v časovém posunutí, které odpovídá době odběru před stoupací zkouškou. Zbytkové snížení s^* , které je určeno rozdílem statické výšky hladiny a výšky hladiny v čase t průběhu čerpací zkoušky můžeme vyjádřit jako:

$$s^* = \frac{Q}{4\pi T} (W_{(u)} - W_{(u_s)}) \quad (3.2)$$

kde $W_{(u)}$ a $W_{(u_s)}$ jsou studňové funkce pro $u = r^2 S/T (t_p + t)$, $u_s = (r^2 S/Tt)$, kde t_p je délka trvání odběru Q před stoupací zkouškou a t je čas od okamžiku zastavení odběru.



Obr.: 3. Schéma standardního vrtu pro jímání podzemí vody

1.3.2. Neustálené rotačně symetrické proudění

Rotačně symetrické proudění je takové proudění, které je ve všech rovinách, procházející osou vrtu stejné a jehož vektor rychlosti v libovolném bodě x a čase t leží v rovině dané osou vrtu a bodem x . V případě proudění v napjaté zvodnělé vrstvě hydraulická výška a její gradient je po zavedení Dupuitových postulátů konstantní na vertikále, a protože je proudění symetrické, bude v rovnici popisující proudění podzemních vod vystupovat pouze jedna nezávisle proměnná r – proudění se poté stává jednorozměrným. Pro popis tohoto proudění používáme cylindrické souřadnice, které jsou definovány průvodičem r (vzdálenost od osy symetrie), souřadnicí z určující vertikální osu a úhlem průmětu průvodiče θ (Valentová, 2007). Diferenciální rovnice popisující radiálně symetrické proudění ve zvodnělé vrstvě s napjatou hladinou ve tvaru pro snížení hladiny definujeme jako:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (3.3)$$

kde S - storativita zvodně, T je transmisivita zvodnělého prostředí, r – radiální vzdálenost, t – čas, s – snížení.

Tento tvar rovnice nejčastěji používáme při řešení proudění podzemních vod, kde jako hlavní kritérium výpočtu vystupuje snížení hladiny v průběhu hydrodynamické zkoušky (Theis, 1935). Při čerpání vody z vrtu dochází k uvolňování vody z pórů a v důsledku toho dochází ke snižování hladiny, tvoří se depresní kužel. U kolektorů s napjatou hladinou vlivem stlačitelnosti prostředí a vody nedochází k poklesu hladiny podzemní vody, nýbrž k poklesu piezometrické výšky, která má také tvar depresního kužele (Freeze, Cherry, 1979).

Při čerpání ze studny považujeme proudění za nestacionární, za předpokladu nekonečného dosahu kolektoru a stále se zvětšujícího dosahu depresního kužele. Dosah snížení studny r_d [L] definuje vzdálenost vlivu depresního kužele na tvar hladiny podzemní vody, při dostatečně dlouhé době čerpání je dosaženo pseudo-stacionárního režimu. Pro určení dosahu depresního kužele během přechodu na stacionární režim je možné použít empirický vzorec dle Sichardta:

$$r_d = 3000 * s * K^{1/2} \quad (3.4)$$

kde s je snížení hladiny ve studni $[L]$ a K hydraulická vodivost $[L.T^{-1}]$.

1.3.3. Neustálené proudění k ideálnímu vrtu

Theis (1935) byl první kdo publikoval analytické řešení rovnice pro neustálené proudění podzemní vody (3.1). Tento přínos do problematiky proudění podzemní vody znamenal značný pokrok pro daný obor. Výše uvedené řešení bylo odvozeno na základě těchto předpokladů:

- a) Zvodnělá vrstva je považována za homogenní a izotropní s neomezenou hranicí zvodně (v průběhu čerpání není dosaženo nepropustné ani napájecí hranice).
- b) Výška zvodnělé vrstvy je konstantní v celé oblasti řešení.
- c) Jedná se o nestlačitelnou kapalinu a hodnoty storativity a transmisivity jsou považovány za konstantní v čase i prostoru.
- d) Čerpané množství vody z kolektoru je konstantní.
- e) Na počátku je uvažováno s konstantní piezometrickou výškou hladiny podzemní vody.
- f) V průběhu čerpání platí Darcyho vztah.
- g) Objem vlastního objemu vrtu a vliv dodatečných odporů na průběh snížení je zanedbán.
- h) Jedná se o úplný vrt.
- i) Uvažuje se napjatá zvodnělá vrstva.

Při jeho řešení byly uvažovány tyto počáteční podmínky:

$$h(r, 0) = h_0 \quad \text{pro } r > 0$$

kde h_0 je počáteční piezometrická výška hladiny podzemní vody.

a okrajové podmínky, které předpokládají neomezenou hranici zvodně (pro nekonečnou hranici je předpokládáno s nulovým snížením):

$$h(\infty, t) = h_0 \quad \text{pro } t > 0$$

a konstantní čerpané množství $Q [L^3.T^{-1}]$ ve studni: $\lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial h}{\partial r} \right) = \frac{Q}{2\pi T}$ pro $t > 0$

Hledaným řešením je funkce $h(r,t)$, která popisuje průběh hydraulické výšky v zájmové oblasti od počátku čerpání Q . Snížení s [L] je definováno jako: $h_0 - h(r,t)$.

Výsledné řešení můžeme vyjádřit ve tvaru pro snížení:

$$s = h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u} du}{u} \quad (3.5)$$

kde u je argument Theisovy studňové funkce: $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

Integrál v rovnici (3.5) označujeme jako exponenciální integrál, pro speciální definici hodnoty u , dostaneme rovnici snížení podzemní vody ve tvaru:

$$s = h_0 - h(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (3.6)$$

kde funkce $W(u)$ je reprezentována studňovou funkcí, která odpovídá integrální exponenciální funkci a lze ji vyjádřit ve tvaru nekonečné řady:

$$W(u) = -0.577216 - \ln u + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{u^n}{n! n} \quad (3.7)$$

pro $n = 1, 2, 3 \dots$

Pro hodnoty $1/u > 100$ s chybou menší než 0,25% lze Theisovu studňovou funkci ve tvaru (3.6) zjednodušit pomocí Jacobovy (Jacob, 1946) aproximace zanedbáním třetího a vyššího členu ve funkci (3.7). Předpis studňové funkce můžeme poté vyjádřit jako:

$$W(u) \approx -0.577216 - \ln(u) \quad (3.8)$$

Dosažením za argument Theisovy studňové funkce u , lze po úpravě vyjádřit výsledný aproximativní tvar Theisovy studňové funkce jako:

$$W(u) \approx \ln \frac{2.246 T t}{r^2 S} \quad (3.9)$$

Dosažením rovnice (3.8) do rovnice (3.6) dostáváme tvar pro snížení:

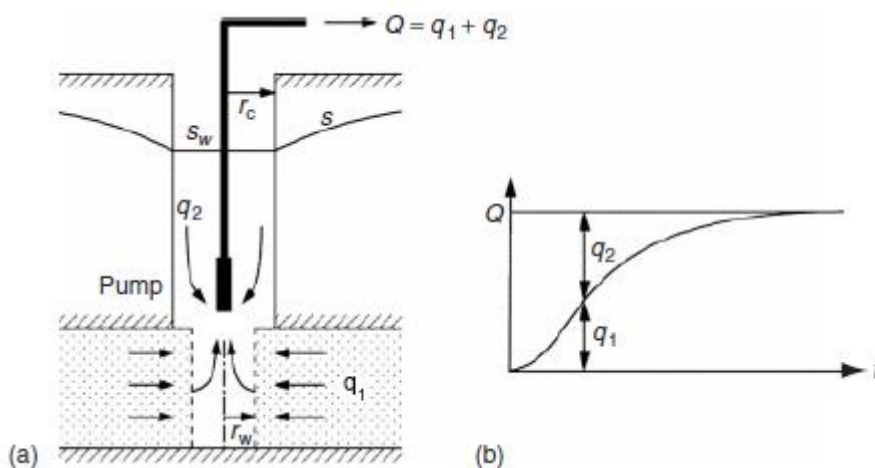
$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.246 T t}{r^2 S} \quad (3.10)$$

1.4. Proudění podzemní vody v kontextu reálného vrtu

Za reálný vrt označujeme objekt, kde dodatečné odpory v okolí vrtu jsou nenulové a není zanedbán vliv vlastního objemu vrtu na počátku čerpání. Oba tyto faktory ovlivňují průběh čerpacích zkoušek a podílejí se výsledných hodnotách snížení hladiny podzemní vody v pozorovaných vrtech.

1.4.1. Storativita vrtu

Pokud poloměr čerpacího vrtu není zanedbatelný, poté na samotném začátku čerpací zkoušky odebírané množství vody pochází z vlastního objemu vrtu a nikoliv z okolního porézního prostředí (*Papadopoulos and Cooper, 1967; Moench, 1985*), na úplném počátku hydrodynamické zkoušky můžeme množství čerpané z vlastního objemu vrtu označit za dominantní, jak ukazuje obrázek č. 4a. Vliv storativity vrtu na průběh čerpací zkoušky trvá jen několik minut a časem se snižuje viz. obrázek č. 4b (*Fenske, 1977*), přesto jeho zanedbáním dojde k nadhodnocení hodnoty storativity, přestože vlastní objem vrtu ovlivňuje hodnoty snížení jen na počátku čerpací zkoušky (*Black and Kipp, 1977*).



Obr.: 4. a) Ukazuje vliv vlastního objemu vrtu na průběh čerpací zkoušky, q_2 představuje množství vody odebrané z vlastního objemu vrtu a q_1 reprezentuje objem vody z kolektoru.
b) Časový průběh jednotlivých složek čerpaného množství Q

Odpovídající řešení vlivu vlastní zásoby vrtu na průběh čerpací zkoušky publikoval van Everdingen and Hurst již v roce 1949. Analytický model snížení zahrnující vliv objemu vrtu na průběh snížení hladiny podzemní vody byl popsán Papadopoulos and Cooper (1967). Řešení bylo založeno na popisu neustáleného proudění podzemní vody dle Thiesova modelu, s tím rozdílem, že zde byl uvažován konečný rozměr poloměru vrtu (v Thiesově řešení je vrt považován za ideální, tedy poloměr vrtu je nulový). Dobu trvání t_s vlivu vlastního objemu vrtu na průběh hydrodynamické zkoušky lze definovat pro čerpací vrt (*Papadopoulos and Cooper, 1967*):

$$t_s = 250 (r_c^2 - r_p^2) / T \quad (4.1)$$

a pro pozorovací vrt:

$$t_s = 2500 (r_c^2 - r_p^2) / T \quad (4.2)$$

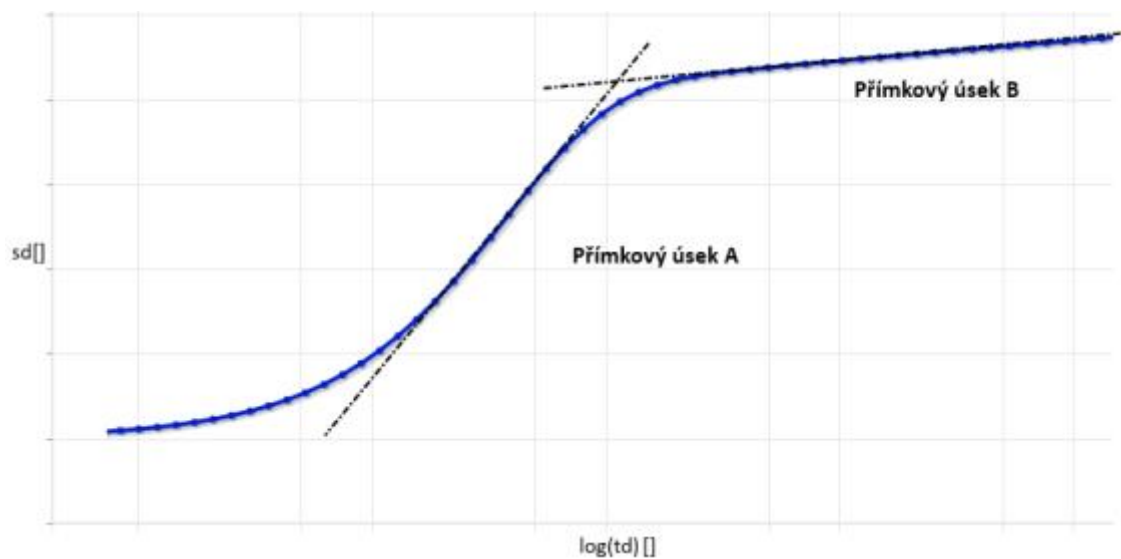
kde r_c je poloměr neperforované části vrtu [L], tato část je umístěna nad jímací částí vrtu a r_p je poloměr výstroje vrtu [L].

Při řešení proudění podzemních vod s vlivem vlastního objemu vrtu je často zaváděn bezrozměrný parametr storativity vrtu ve tvaru (bezrozměrná storativita vrtu – wellbore storage):

$$C_d = \frac{c}{2\pi r_v^2 S} \quad (4.3)$$

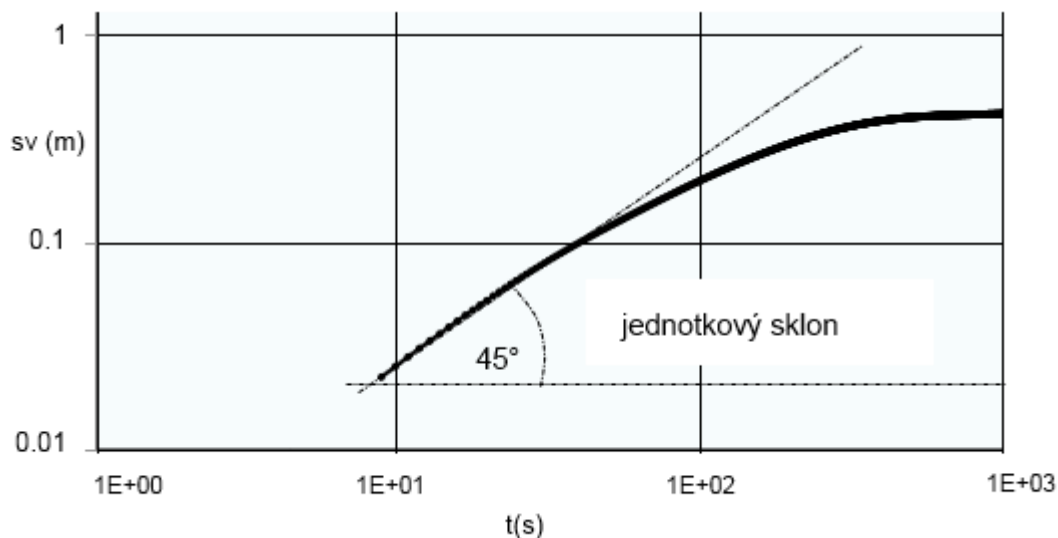
kde r_v je poloměr vrtu, S storativita zvodně a C jednotkový faktor storativity vrtu.

Pro data z hydrodynamických zkoušek s vlivem storativity vrtu a dodatečných odporů jsou charakteristické dvě přímkové části. Průběh první přímkové části semilogaritmického grafu označené jako *A* (obrázek č. 5) čerpací zkoušky ovlivňují hodnoty vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů (*Garcia-Rivera and Raghavan, 1979; Tiab, 1995; Chen and Lan, 2009*). Validní vyhodnocení zkoušky pomocí metod založených na Theis modelu se provádí na druhé přímkové části *B* (obrázek č. 5) semilogaritmického grafu snížení hladiny podzemní vody, která již není zatížena vlivem čerpání vlastního objemu vrtu (*Agarwal et al. 1970, Ramey 1976*). Pro první přímkový úsek *A* je charakteristický vyšší sklon než v případě druhého přímkového úseku *B* na semilogaritmickém grafu $s(t)$, jak ukazuje obrázek č. 5.



Obr.: 5. Tvar křivky reprezentující průběh snížení na vrtu s vlivem vlastního objemu vrtu. První přímková část A definuje úsek s vlivem vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů.

Charakteristickým rysem počátečního úseku snížení během čerpací zkoušky je jednotkový sklon (45°) po vynesení do logaritmického grafu. Během této fáze hydrodynamické zkoušky je množství čerpané vod z vlastního objemu vrtu dominantní (Ramey, 1970; Garcia-Rivera and Raghavan, 1979).



Obr.: 6. Jednotkový sklon na počátku čerpací zkoušky po vynesení do grafu $\log s_v$ vs. $\log t$, kde s_v je naměřené snížení na vrtu.

Vlastní objem vrtu je často charakterizován pomocí jednotkového faktoru storativity vrtu C [L^2], který lze definovat ve zjednodušeném tvaru jako (Ramey, 1970):

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad (4.4)$$

kde ΔV je objemová změna a Δh je změna výšky hladiny ve vrtu.

Vztah mezi celkovým čerpaným objemem a objem vody pocházející ze zvodnělé vrstvy lze definovat jako:

$$Q_p = Q - C \frac{ds_v}{dt} \quad (4.5)$$

kde Q [$L^3.T^{-1}$] je celkové čerpané množství a Q_p [$L^3.T^{-1}$] objem pocházející ze zvodnělé vrstvy

Pro samotný začátek čerpací zkoušky, který je charakterizován jednotkovým sklonem, kdy čerpaný objem pochází z vlastního objemu vrtu a nikoliv ze zvodnělé vrstvy, můžeme uvažovat Q_p za nulové. Po aplikaci $Q_p/Q = 0$ do rovnice (4.5) dostaneme vztah:

$$1 - C_d \frac{ds_d}{dt_d} = 0 \quad (4.6)$$

Po následné úpravě rovnice (4.6) lze jednotkový faktor storativity vrtu definovat jako:

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} \quad (4.7)$$

kde t_j a s_j je dvojice odpovídajících si hodnot v přímkovém jednotkovém úseku grafu $\log s_v$ vs. $\log t$.

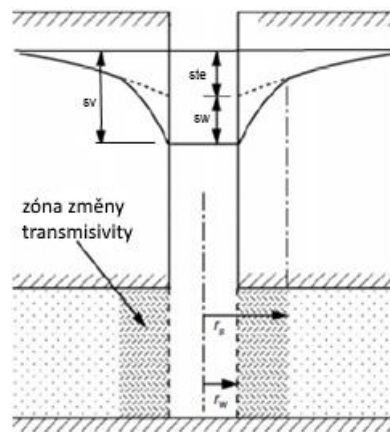
1.4.2. Dodatečné odpory

Zaznamenané snížení na vrtu v průběhu čerpací zkoušky může být ovlivněno dodatečnými odpory. Oblast výskytu těchto faktorů je lokalizována v okolí stěny vrtu, kde způsobuje změnu v propustnosti porézního materiálu. Tato oblast může vykazovat nižší, ale také vyšší propustnost než samotná zvodnělá vrstva. Koncept dodatečných odporů poprvé představil van Everdingen (1953) v petrolejářské literatuře, později pak Agarwal et al. (1970) publikoval analytické řešení proudění podzemní vody k vrtu s dodatečnými odpory a vlivem vlastního objemu vrtu. Hodnoty snížení na čerpaném objektu mohou být značně ovlivněny dodatečnými odpory. Jejich vliv na výsledná pozorované snížení hladiny podzemních vody způsobuje oblast v těsném okolí vrtu a na stěně vrtu. Oblast výskytu zpravidla nepřesahuje vzdálenost 6 m od osy vrtu (Van Everdingen, 1953). Oblast je typická pozměněnou charakterizací porézního materiálu ve smyslu hydraulických vlastností, v důsledku čehož dochází ke změně měřených hodnot snížení hladiny podzemní vody na pozorovaném objektu vůči snížení, které vychází z teoretického Theisova modelu pro ideální vrt, jak ukazuje obrázek č. 7.

Tento vztah můžeme vyjádřit jako:

$$s_v = s_{te} + s_w \quad (4.8)$$

kde s_v [L] je pozorované snížení na vrtu vlivem čerpání, s_w je snížení způsobené dodatečnými odpory [L] a s_{te} je snížení vycházející z Theisova modelu [L].



Obr.: 7. Snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory

Vliv dodatečných odporů na celkové snížení lze kvantifikovat, za předpokladu ustáleného proudění van Everdingen, 1953:

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (4.9)$$

kde W [-] je bezrozměrný koeficient dodatečných odporů a $Q[L^3.T^{-1}]$ je množství čerpané vody.

koeficient dodatečných odporů lze vyjádřit:

$$W = \frac{T - T_s}{T} \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \quad (4.10)$$

kde r_w je poloměr vrtu a T_s je hodnota transmissivity v oblasti s působením dodatečných odporů charakterizovaná poloměrem r_s a T je hodnota transmissivity bez vlivu dodatečných odporů. Z předpisu vyplývá, že v případě, pokud T_s je větší, než hodnota transmissivity kolektoru, pak hodnota koeficientu dodatečných odporů je záporná a naopak. Tedy dodatečné odpory mohou pozorované snížení hladiny ovlivňovat ve smyslu jejího nadhodnocení, ale také podhodnocení oproti teoretickému snížení v závislosti na změně hydraulické vodivosti zasažené oblasti.

V případě velmi malého rozdílu hodnot T_s a T , lze rovnici (4.10) upravit na tvar:

$$W = \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) \quad (4.11)$$

Při řešení proudění podzemních vod s vlivem dodatečných odporů je často zaváděn bezrozměrný koeficient dodatečných odporů ve tvaru:

$$W = \frac{2Ts_w}{Q} \quad (4.12)$$

Dodatečné odpory jsou způsobeny řadou jevů, které vznikají během samotného zhotovení vrtu, ale také v průběhu čerpaní podzemní vody z vrtu. Při vrtání horninovým prostředím dochází ke kolmataci okolí vrtu, což sebou přináší změnu hydraulických vlastností porézního prostředí (nejbližší okolí vrtu) a následný vliv na přítok podzemní vody do vrtu. Mezi další dodatečné odpory můžeme zařadit zmenšení aktivní plochy vrtu, turbulentní režim proudění v blízkosti vrtu, hloubka vrtu neodpovídá mocnosti kolektoru a další. Jednotlivé složky dodatečných odporů lze rozdělit na (Jetel, 1982):

- a) Kolmatace vrtu – ucpání pórů jemným materiálem, čímž dochází ke snížení průtočnosti porézního prostředí nebo v důsledku narušení struktury materiálu při hloubení nebo následném vystrojování objektu.
- b) Zmenšení aktivního průřezu stěny – omezení průtočnosti vlivem instalace filtru, perforované pažnice apod.
- c) Neúplný průnik – vrt neprochází celou mocností kolektoru.
- d) Ucpání filtru – zachycování částic hornin nebo obsypu v otvorech filtru. Chemická inkrustace a ucpání otvorů filtru působením mikroorganismů a bakterií.
- e) Tření proudící kapaliny o stěny vrtu a jejím vnitřním třením.
- f) Turbulentní režim proudění ve zvodnělé vrstvě, zejména pak v blízkosti odběrového vrtu.
- g) Ostatní druhy dodatečných odporů

Díky velkému množství faktorů, které definují výslednou hodnotu dodatečných odporů, je obtížné jejich přesné dílčí určení, z toho důvodu se často zavádí sumární vyjádření celkového snížení všech dodatečných odporů s_w , které reprezentuje část snížení přímo ovlivněnou výskytem dodatečných odporů.

Při vyhodnocování hydrodynamický zkoušek pomocí Jacobovy aproximace bylo prokázáno, že výskyt dodatečných odporů nemá na vyhodnocené hodnoty transmisivity T vliv. V počáteční fázi se Agarwal et al. (1970) řešení shoduje s řešením Papadopoulos and

Cooper (1967), kde bylo uvažováno pouze s vlivem vlastního objemu vrtu a prokazuje počáteční dominantní vliv tohoto faktoru. Pro delší časový krok se průběh funkce Agarwal et al. (1970) paralelně shoduje s přímkovou částí funkce Jacobova aproximativního řešení. Dodatečné odpory tedy ovlivňují délku a tvar počátečního úseku, nikoliv pak směrnici přímkové části grafu pro vyhodnocení pomocí Jacobovy semilogaritmické metody.

1.4.3. Rovnice popisující proudění ke skutečnému vrtu

Parametry vlastní objem vrtu a dodatečné odpory mohou ovlivňovat průběh samotné čerpací zkoušky. Kombinace těchto efektů může také ovlivnit pozorované snížení na pozorovacím vrtu, které vzniká jako odezva na snížení hladiny podzemní vody v oblasti, zanedbáním těchto faktorů může dojít k chybnému vyhodnocení základních hydraulických charakteristik v podobě transmisivity a storativity vrtu pomocí standardně používaných metod (Agarwal et al. 1970; Jargon 1976).

Bezrozměrné snížení hladiny s_{wd} podzemní vody v homogenním a izotropním kolektoru s najatou hladinou, vlastním objemem vrtu a dodatečnými odpory vyjádřil Agarwal et al. (1970) ve tvaru:

$$s_{wd}(t_d) = L^{-1} \left\langle \frac{K_0(\sqrt{p}) + W\sqrt{p} K_1(\sqrt{p})}{p(\sqrt{p} K_1(\sqrt{p}) + C_d(K_0(\sqrt{p}) + W\sqrt{p} K_1(\sqrt{p})))} \right\rangle \quad (4.13)$$

kde $t_d = Tt / (r_w^2 S)$ je bezrozměrný čas, $p = i (\ln 2 / t_d)$ je Laplaceův transformační parametr kde i je aktuální hodnota Stehfestova parametru (viz. Stehfest algoritmus), K_0 and K_1 jsou modifikované Besselovy funkce druhého druhu a nultého respektive prvního řádu, W je bezrozměrný parametr dodatečných odporů a C_d bezrozměrný parametr storativity vrtu, L^{-1} reprezentuje Laplaceovu inverzní transformaci.

Hodnoty bezrozměrných parametrů storativity vrtu C_d a dodatečných odporů W jsou definovány ve tvaru (bezrozměrná storativita vrtu - wellbore storage a dodatečné odpory - skin effect):

$$C_d = \frac{c}{2\pi r_w^2 S} \quad (4.14)$$

$$W = \frac{2Ts_w}{Q} \quad (4.15)$$

1.4.4. Stehfest algoritmus

Stehfestův algoritmus je inverzní algoritmus pro řešení inverzní Laplaceovy transformace. Tento algoritmus je velmi rychlý a zvláště vhodný pro funkce vykazující hladký průběh (Stehfest H., 1970). Stehfestův algoritmus lze aplikovat na matematický model čerpací zkoušky, který je založený na Laplaceově transformační funkci popisující proudění podzemní vody a lze jej využít pro hodnoty bezrozměrného času $t_d > 0$ (Moench and Ogata, 1984). Stehfestův algoritmus je definován pro $t > 0$, pro nalezení Laplaceova obrazu $F(p)$ lze použít tento aproximativní vzorec:

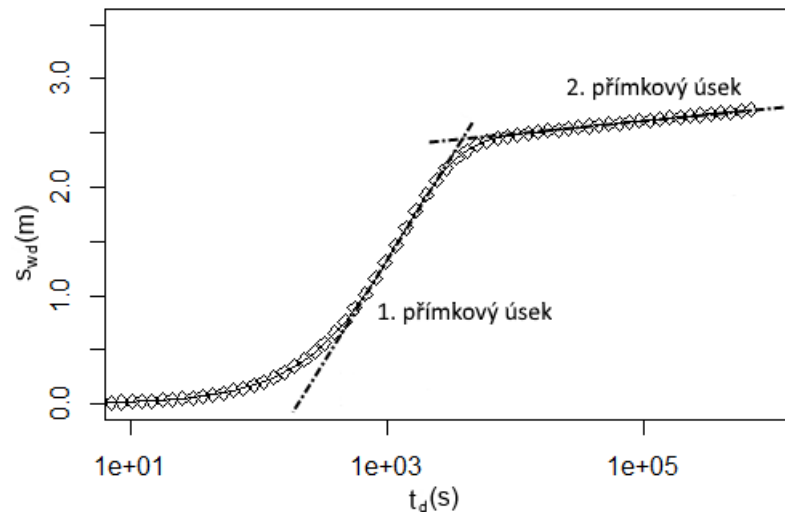
$$f(t) \approx \left[\frac{\ln 2}{t} \right] \sum_{i=1}^N V_i F[i(\ln 2)/t] \quad (4.16)$$

$$\text{kde } V_i = (-1)^{\binom{N}{2}+i} \sum_{k=(i+1)/2}^{\min(i, N/2)} \left[k^{\frac{N}{2}} (2k!) \right] / \left[\left(\frac{N}{2} - k \right)! k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)! \right]$$

kde t je čas, $i(\ln 2)/t$ je nahrazený parametr Laplace transformace p a N Stehfestova podmínka, optimální hodnota parametru N pro modelování čerpací zkoušky je 8 (Walton W. C., 2006).

1.4.5. Stanovení dodatečných odporů z prvního přímkového úseku snížení

Po vynesení závislosti bezrozměrného snížení hladiny vs. bezrozměrný čas můžeme v semilogaritmickém grafu rozlišit dva přímkové úseky, jak ukazuje obrázek č. 8. Na tuto skutečnost již upozornili Rivera a Raghavan (1979) při vyhodnocování zkoušek na naftových vrtech. První přímkovou část na počátku čerpací zkoušky definuje vliv vlastního objemu vrtu a dodatečné odpory v okolí vrtu. Tudíž je nevhodný pro vyhodnocení pomocí metod, které byly odvozeny z předpokladů ideálního vrtu (např. Jacobova semilogaritmická metoda přímkou). Pro tento účel je nutné využít až druhý přímkový úsek, který už není těmito jevy zatížen.



Obr.: 8. Bezrozměrné snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory a vlastním objemem vrtu

Bezrozměrný sklon v semilogaritmickém grafu čerpací zkoušky můžeme označit jako:

$$i_{zd} = \frac{2\pi T i_z}{Q} \quad (4.17)$$

Dále byl definován v Pech (2005) vztah pro první přímkový úsek v závislosti na hodnotě vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů ve tvaru:

$$i_{zd} = 0.86W + 1.0127(\log C_D) + 1.0237 \quad (4.18)$$

kde C_D je bezrozměrný koeficient storativity vrtu a W je bezrozměrný koeficient dodatečných odporů

Po dosazení za i_{zd} dostáváme vztah pro dodatečné odpory:

$$W = \frac{1}{0.86} \left(\frac{2\pi T i_z}{Q} - 1.027 (\log C_D - 1.0237) \right) \quad (4.19)$$

2. Vlastní práce

Autor si klade za cíl popsat implementaci výpočetního softwaru pro vyhodnocení parametrů hydrodynamických zkoušek. Následně demonstrovat jeho využití pro zpracování dat z terénních zkoušek a poukázat tak na možnosti využití nástroje v praxi. Pro případové studie byla použita reálná data pořízená při provádění čerpacích zkoušek na různých lokalitách, některá měření byla provedena opakovaně za účelem zhodnocení provedených technických zásahů na pozorovaném vrtném objektu. Metody a teoretický základ vyhodnocování datových sad je popsán v teoretické části práce, zde již budou jen popsány samotné techniky stanovení parametrů horninového prostředí pomocí výpočetního softwaru, který byl pro tento účel vytvořen. Hlavní důraz je věnován popisu parametrů reprezentující skutečný vrt, jako jsou dodatečné odpory a storativita vrtu, jejichž hodnoty jsou dále zasazeny do kontextu hodnocení regenerace vrtného objektu. Na zde uvedené postupy lze nahlížet jako na metodiku vyhodnocování parametrů skutečného vrtu.

Avšak práce si neklade za cíl popsat všechnu realizovanou naprogramovanou funkcionalitu aplikačního softwaru pro hodnocení čerpacích zkoušek, která sama o sobě přesahuje obsahově zaměření této práce. A také proto je celý kód programu veřejně dostupný na platformě GitHub (na adrese: https://github.com/jHolub/new_drutes), kde je možné si aplikaci stáhnout a dále s ní svobodně nakládat, také je možné prostřednictvím podnětů od uživatelů aplikaci dále rozvíjet.

2.1. Základní popis aplikace

Na základě autorovi praxe při vývoji softwaru a s přihlédnutím na řešenou problematiku bylo rozhodnuto, že aplikační software bude webová aplikace. Toto řešení zajistí snadnou uživatelskou dostupnost a poskytne možnost pravidelných záloh uživatelských dat. Pro tento účel bylo nezbytné zajistit webovou doménu, pod kterou bude aplikace provozována a také přístupná prostřednictvím webového prohlížeče. Již před započatím práce na vývoji byl předložen název aplikace jako: RadFlow (odvozený z anglické definice pro rotační proudění “Radial flow”). S přihlédnutím k názvu aplikace

byla zvolena doména aplikace radflow.cz, kde je možné kýžený software nalézt potažmo s ním pracovat.



Obr.: 9. Logo aplikace RadFlow

Jelikož požadavky na webový hosting aplikace se ničím nelišily od standardně provozovaných internetových aplikací, bylo možné využít služeb společnosti WEDOS (<https://hosting.wedos.com/cs/>) k provozování této domény. Níže jsou uvedeny základní parametry webového hostingu:

Parametry	Webhosting
Diskový prostor pro web *	Neomezeně
Množství přenesených dat (traffic)	Neomezeně
Databáze MySQL/MariaDB 10.1 (celkový limit 1 GB)**	Neomezeně
PHP 5.X, PHP 7 (vysoké parametry s možností změn)	Ano
Počet e-mailových schránek (celkový limit 5 GB)**	Neomezeně
Antivir, Antispam, POP3, IMAP4, SMTP, Webrozhnutí	Ano
Zabezpečená komunikace SMTPS, POP3S, IMAPS	Ano
Autoodpovědač, přesměrování pošty, doménový koš	Ano
Počet subdomén	Neomezeně

1 alias zdarma (neomezený počet za příplatek)	Ano
FTP účet, FTPS, zamykání FTP, WebFTP	Ano
Počet dalších FTP účtů (do podadresářů)	Neomezeně
Nastavení chybových stránek a hlášek (htaccess)	Ano
Podpora hezkých URL, mod_rewrite (htaccess)	Ano
Komprese (mod_deflate), mod_expires (parametry Apache)	
Omezování přístupů podle IP adres (htaccess)	Ano
Zaheslování adresáře (htaccess)	Ano
Podpora různých OpenSource aplikací (Drupal, Joomla...)	Ano
Vhodné pro náročné a navštěvované weby, vysoký výkon	Ano
Zkušební doba 7 dní s garancí vrácení peněz až 180 dní	Ano
CRON (periodické spouštění skriptů)	Ano
Podpora HTTPS se sdíleným i vlastním certifikátem	Ano
Provoz webu s www. i bez www.	Ano
Podpora IPv6 ***	Ano
On-line správa přes zákaznické centrum	Ano
Statistiky návštěvnosti přes Google Analytics	Ano
Web bez reklam, možnost umístění vlastních	Ano
Zřízení služby ZDARMA, bez smluvních závazků	Ano

Vedení DNS s možností plné editace zákazníkem	Ano
Umístění serverů na páteřní síti	Ano
NONSTOP zákaznická podpora a technický dohled	Ano
Ochrana firewallem	Ano
DDoS ochrana + IDS/IPS ochrana	Ano
Roční frekvence plateb	Ano
Možnost platby - 12 způsobů	Ano
Týdenní zálohování **	Ano
Značkové servery, vlastní datacentrum a vlastní síť	Ano
Profesionální řešení služby (jedno z nejlepších v ČR)	Ano
Certifikace dle norem ISO 9001 a ISO 14001 a ISO 27001 od TÜV SÜD	Ano
Garance dostupnosti	99,99%

2.2. Systémové požadavky aplikace ze strany klienta

Webová aplikace RadFlow si neklade žádné nadstandartní softwarové nároky a byla v průběhu vývoje testována pro všechny nejčastěji používané webové prohlížeče. Zde je výčet prohlížečů (klientů), pro které byl proveden test kompatibility:

- a) Microsoft Internet Explorer verze 8 a vyšší,
- b) Mozilla Firefox verze 4 a vyšší,
- c) Opera libovolná verze,
- d) Safari,
- e) Chrome

Zde je na místě upozornit, že pro některé starší verze prohlížečů, které zde nejsou uvedeny nelze zajistit správnou funkčnost aplikace. Pro nápravu těmto uživatelům doporučuji aktualizaci webového prohlížeče.

2.3. Struktura aplikace

Již na počátku vývoje aplikace RadFlow byla koncipována jako systém umožňující snadnou rozšiřitelnost v podobě přidání dalších výpočetních modulů. Na jednotlivé moduly lze nahlížet jako na samostatné analytické metody s přesně definovanými vstupními a výstupními parametry (rozhraní), s takto definovanou logikou je zajištěna jednoduchá správa a rozšiřitelnost nástrojů. Základní funkčnost modulů a jádra aplikace je implementována s ohledem na snadné přidávání nebo odebírání funkčnosti aplikace bez vlivu na jednotlivé moduly. Mezi základní moduly aplikace řadíme:

- a) Uživatelský modul – obsluha uživatelských účtů, autentizace a autorizace uživatele
- b) Modul správy datových sad – nahrávání a správa dat k analýze
- c) Výpočetní moduly – zpracování vstupních dat pomocí požadované logiky
- d) Uživatelské rozhraní – GUI aplikace pro obsluhu a zadávání parametrů do aplikace

2.3.1. Popis aplikace a uživatelské rozhraní

Na úvodní stránce webové aplikace RadFlow uživatel získá základní informace o způsobu a možnostech využití aplikace, je seznámen s autorským týmem a s metodami zpracování dat. Pro přístup do výpočetní části je nezbytné vytvoření uživatelského účtu, který poskytuje možnost uživatelská data ukládat a následně editovat. Veškerá uživatelem nahraná data nebo vyhodnocené parametry jsou přístupná jen pod jedním účtem. Samotná registrace do systému je velmi jednoduchá postačuje vyplnit e-mail uživatele a zadat přihlašovací heslo. Následná autentizace uživatele se provede pomocí menu v horní liště.

Registrace do aplikace Radflow.

E - mail:

Heslo:

Potvrzení hesla:

Vytvořit účet

Zavři

Obr.: 10. Registrační formulář aplikace

Po přihlášení do systému je uživateli zpřístupněná záložka ‘Čerpací zkoušky’ a po výběru modelu ‘Analýza dat’, kde je možné vidět výčet analytických metod zpracování dat a spravovat data z čerpacích zkoušek. V prvních kroku je nutné vytvořit samotnou datovou sadu (model) pomocí vyplnění formuláře s požadovaným názvem modelu. Takto vytvořené modely se ukládají k založenému uživatelskému účtu. Žádný jiný uživatel k nim nemá přístup a po dobu platnosti účtu tam také zůstávají data fyzicky uložena.

Nový model

Název (pouze alfa-bet znaků):

Vytvoř

Čerpací zkoušky

POŘADÍ	NÁZEV	DATUM	ZVOLIT	ODSTRANIT	EDITOVAT
1.	B1	-	✓		
2.	B3	-	✓		
3.	B6	-	✓		
4.	Hv1	-	✓		

Obr.: 11. Formulář pro vytvoření nového modelu a tabulky pro správu

Samotný model obsahuje řadu vstupních parametrů, které je možné vyplnit již na počátku nebo po provedení požadovaných analýz nad vstupními daty. Základními parametry modelu jsou data z čerpacích zkoušek a volitelná data z pozorovacího vrtu (snížení v čase na pozorovaných objektech, data nutná pro vyhodnocení storativity vrtu) ve formátu CSV, kde první sloupeček je reprezentován časem od počátku testu a druhý naměřeným snížením hladiny podzemní vody. Dalšími parametry modelu jsou: storativita, transmissivita, čerpané množství, vzdálenost vrtu pozorovacího, poloměr vrtu, storativita vrtu a dodatečné odpory. Některé zde uvedené parametry jsou výstupy analýz aplikačního softwaru a je možná jejich editace v průběhu práce.

2.3.2. Výpočetní modul

Analytické metody vyhodnocení dat jsou přístupné v programu RadFlow po volbě datové sady ve formě modelu. Metody lze využívat bez omezení datového zdroje pouze s přihlédnutím na požadovaný datový formát (formát CSV), vzájemně lze kombinovat a zpětně upravovat jejich výsledné hodnoty. Každý výsledek analýzy je možné dle uvážení přiřadit k datovému zdroji, tímto je zajištěna opětovná dostupnost vyhodnocených parametrů bez nutnosti externího ukládání. Dále budou popsány jednotlivá analytické postupy zpracování dat z čerpacích zkoušek pomocí implementace v programu RadFlow.

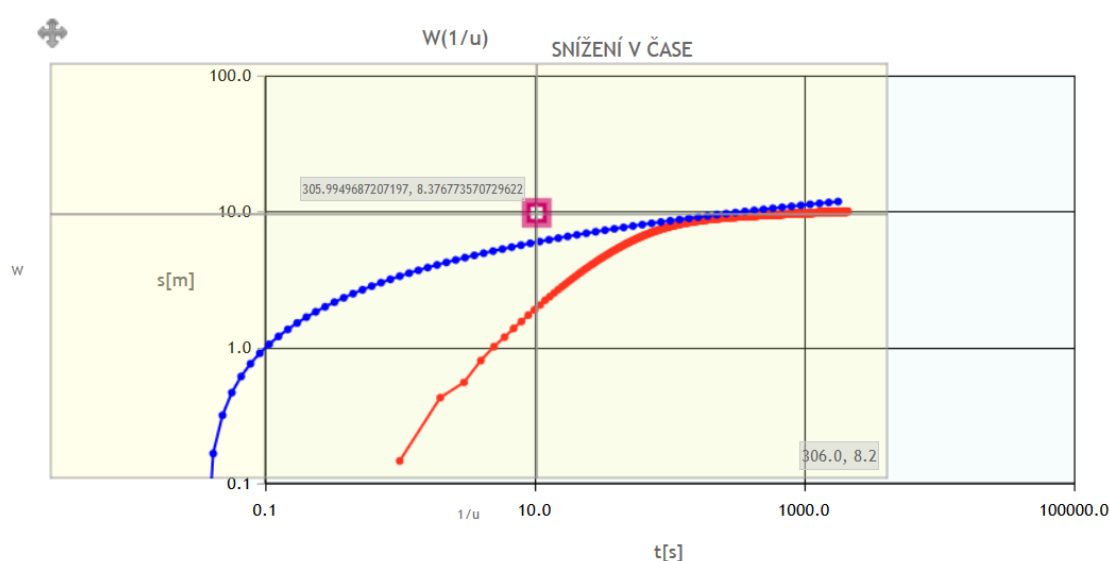
Theisova metoda typové křivky

Tato metoda často slouží jako základ pro vyhodnocení čerpacích zkoušek za nestacionárního režimu proudění, v literatuře je často označovaná jako Theisova metoda typové křivky. Metodu můžeme použít pro vyhodnocení transmissivity a v případě znalosti snížení na pozorovacím vrtu i storativity z dat čerpacích zkoušek při konstantním čerpaném množství vody. Principem metody je porovnání grafů snížení hladiny v průběhu čerpání a funkce $W(1/u)$ v logaritmickém měřítku. Postup provedení požadované analýzy je popsán níže:

1. Vytvoření modelu a nahrání dat z čerpací zkoušky.
2. V logaritmickém grafu snížení hladiny podzemní vody určíme přímkovou část a kurzorem myši vedeme graf $W(1/u)$ v bodě shody zvolíme libovolný vztažný bod VB.

3. Po bod VB dále provedeme odečet hodnot snížení s a času t z grafu $s(t)$ a definuje parametry výpočtu: čerpané množství, vzdálenost pozorovacího vrtu a hodnoty snížení hladiny podzemní vody a času čerpání pro vztažný bod VB.

4. Následně je možné určit hodnoty transmisivity a storativity vrtu. Výsledné hodnoty je možné uložit jako parametry datové sady a následně s nimi pracovat případně znovu editovat.

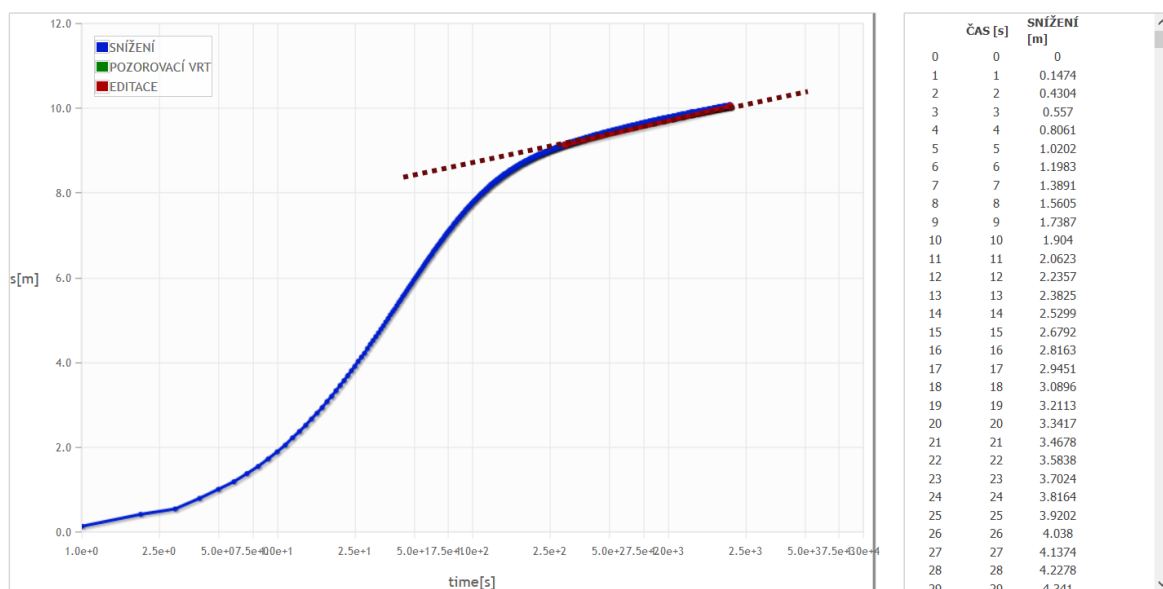


Obr.: 12. Implementace Theisovy metody typové křivky v programu Radflow (jen pro ideální vrt)

Jacobova semilogaritmická metoda přímky

Jacobova semilogaritmická metoda přímky je aproximací Theisovy studňové funkce, kdy uvažuje zanedbání třetího a dalších členů v Theisovy stupňové funkci. Zde je vhodné uvést, že analýza se provádí na druhém přímkovém úseku snížení hladiny podzemní vody, jak ukazuje obrázek č. 13. Na počátku můžeme také pozorovat přímkový úsek ten je však ovlivněn vlastním objemem vrtu a je zcela nevhodný pro zde popisovanou analýzu. Aplikace umožňuje provést analýzu dat pomocí této metody. Postup analýzy transmisivity a v případě znalosti snížení na pozorovacím vrtu i storativity je popsán níže:

1. Vytvoříme patřičný model a datovou sadu (pro určení storativity je nutné nahrát také data z pozorovacího vrtu).
2. Po nahrání datové sady v menu aplikace přejdeme do analytické části (Analýza dat -> Jacob. metoda).
3. Pracovní panel je rozdělen na několik částí: graf závislosti snížení hladiny podzemní vody na čase čerpání, tabelární hodnoty snížení a formulář základních parametrů výpočtu v podobě – čerpané množství, vzdálenost pozorovacího vrtu a hodnoty t_0 průmět přímky snížení na pozorovacím vrtu do časové osy.
4. Dále v grafu kurzorem myši definujeme sklon přímkové části grafu $t(s)$ je označen jako i .
5. Poté je možné přejít k samotnému výpočtu transmisivity potažmo storativity vrtu. Výsledné hodnoty je možné uložit jako parametry datové sady a následně s nimi pracovat případně znovu editovat.



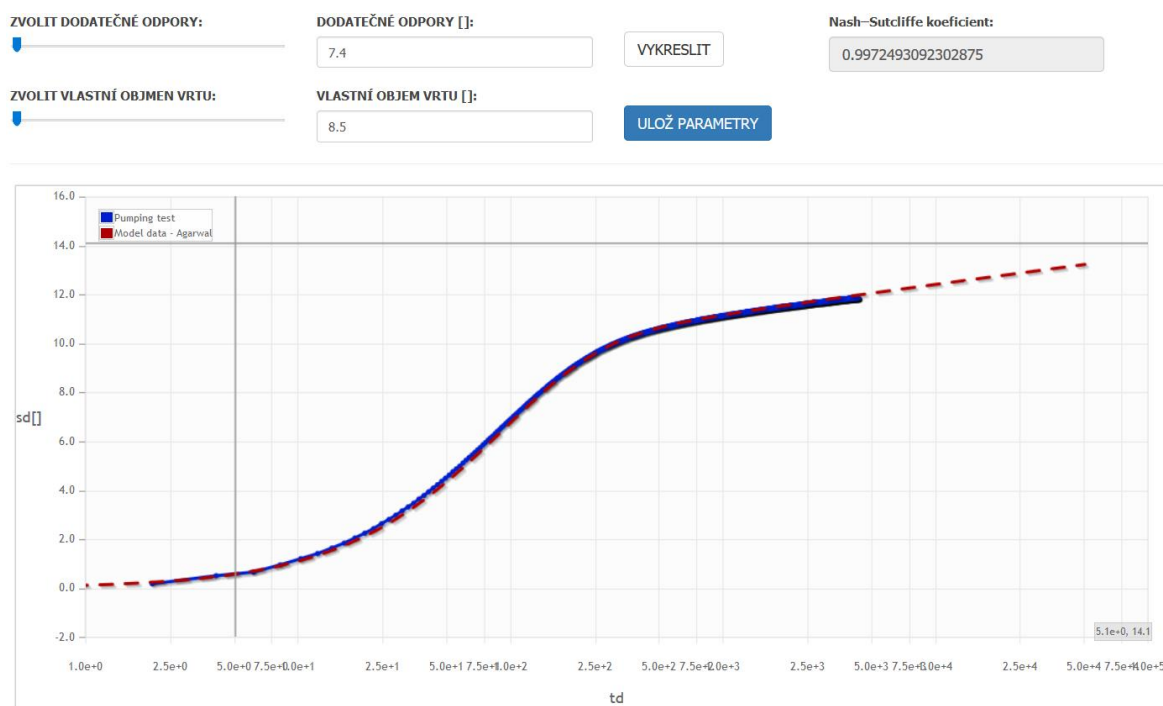
Obr.: 13. Implementace Jacobovy semilogaritmické metoda přímky v programu Radflow

Vyhodnocení dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu

Zde je popsán postup stanovení parametrů skutečného vrtu v podobě dodatečných odporů a storativity vrtu z dat čerpací zkoušky při nestacionárním radiálně-symetrickém

proudění ze zvodně s napjatou hladinou. Charakteristickým rysem přítomnosti vlivu parametrů reálného vrtu je výskyt dvou přímkových úseků v grafu snížení podzemní vody. Samotný teoretický základ je popsán v teoretické části práce, zde je popsán postup výpočtu jednotlivých parametrů pomocí programu RadFlow.

1. Výpočtu předchází tvorba modelu s nahráním požadované datové sady, snížení hladiny v průběhu čerpaní.
2. Pro analýzu je nutné předchozí určení hodnot storativity a transmisivity vrtu. K tomuto účelu je možné využít dříve popsané analýzy v programu RadFlow (Jacobova semilogaritmická metoda přímky).
3. Uživatel pomocí posuvníku parametrizuje hodnoty dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu. Pro přesnější stanovení parametrů lze také jejich hodnoty definovat ručně.
4. Výsledkem parametrizačního procesu je nalezení nejlepší možné shody, po jeho nalezení je možné parametry uložit jako parametry modelu. Pro kontrolu je také možné využít statistický ukazatel - Nash–Sutcliffe koeficient.

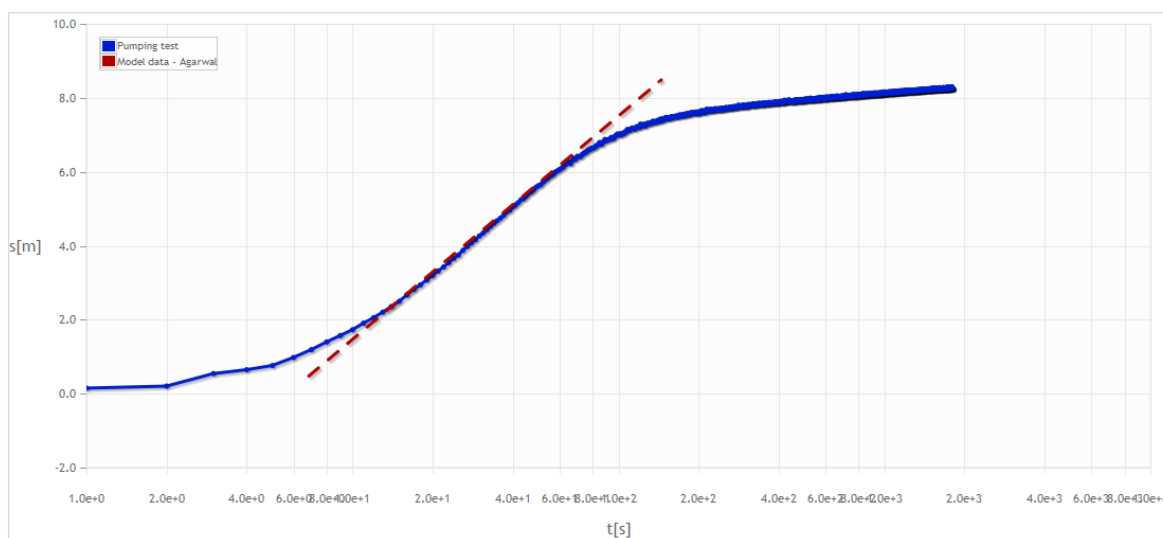


Obr.: 14. Analýza parametrů reálného vrtu pomocí programu RadFlow

Vyhodnocení dodatečných odporů na základě hodnoty storativity vrtu

Zde je popsán způsob stanovení hodnoty dodatečných odporů na základě znalosti hodnoty storativity vrtu. Předpokladem pro analýzu je výskyt prvního přímkového úseku v bezrozměrném semilogaritmickém grafu. Tato analýza je vhodná pro vyhodnocení krátkodobých čerpacích zkoušek.

1. Pro analýzu je nutné předchozí určení hodnot storativity a transmisivity zvodně z druhého přímkového úseky čerpací zkoušky.
2. Stanovení hodnoty vlastního objemu vrtu.
3. Uživatel kurzorem myši definuje první přímkový úsek grafu $s_d(t_d)$.
4. Následně je programově vypočtena hodnota sklonu první přímkové části i_z a stanovena hodnota bezrozměrného koeficientu dodatečných odporů W_d . Výslednou analýzu je možné opět uložit jako parametry vrtu.

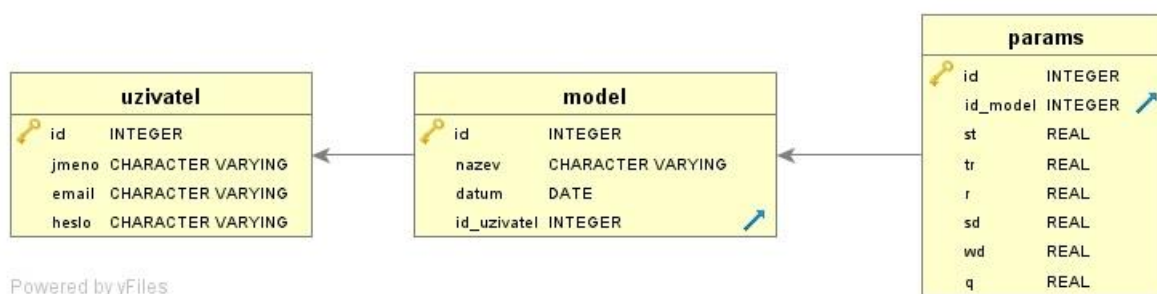


Obr.: 15. Analýza dodatečných odporů pomocí programu RadFlow

2.4. Datový model aplikace

Cílem datového modelu je tvorba vhodné datové struktury pro vyvíjený software a databázový systém, který aplikaci slouží k uložení uživatelských a systémových dat. Výsledný model se skládá z jednotlivých entit, které nejčastěji reprezentují objekty reálného světa. Samotné entity k popsání jednotlivých vazem samozřejmě nestačí, k tomu účel je nutné použít logické vazby mezi objekty. Pro účely aplikace byly navrženy tři entity: uživatel, model a parametry modelu. Každý objekt obsahuje logickou referenci na jinou entitu, tímto je zajištěna konzistence dat.

Jako databázový systém pro uložení uživatelských a systémových dat byl zvolen open-source objektově-relační databázový systém PostgreSQL.



Obr.: 16. UML diagram datového modelu aplikace RadFlow

2.5 Případové studie vyhodnocení čerpacích zkoušek

Obsahem této části práce je praktická ukázka vyhodnocení reálných dat čerpacích zkoušek s využitím aplikačního programu RadFlow. Tento text může také posloužit jako návod pro zájemce o praktické využití programu. Zde bych rád poděkoval firmě Vodní zdroje a.s. za poskytnutí datových sad měření a poskytnutí popisných informací k čerpacím zkouškám. Hlavním cílem analýzy dat je stanovení základních hydraulických charakteristik prostředí v podobě transmisivity a storativity. K tomu účelu bylo nezbytné provést také

měření na pozorovacím objektu v průběhu čerpacích zkoušek. Pořízená data snížení hladiny podzemní vody po vynesení do grafu vykazují charakteristický průběh (dvě přímkové části), který naznačuje přítomnost dodatečných odporů a vliv vlastního objemu vrtu. Tento průběh je možné pozorovat díky velmi krátkému časovému intervalu odečtu snížení hladiny (nejlépe v sekundovém intervalu) na čerpaném objektu. Stanovení parametrů reálného vrtu je také nedílnou součástí zde prezentovaného vyhodnocení dat. Tomu však předchází určení koeficientů transmisivity a storativity zvodnělé vrstvy, pomocí výše popsané Jacobovy semilogaritmické metody přímk. Následně tyto základní charakteristiky použijeme ke stanovení parametrů reálného vrtu z analytického předpisu pro bezrozměrné snížení hladiny podzemní vody v homogenním a izotropním kolektoru s najatou hladinou, storativitou vrtu a dodatečnými odpory dle Agarwal et al. (1970). Bylo prokázáno, že zanedbání parametrů reálného vrtu může vést desinterpretaci výsledků čerpací zkoušky a následné znehodnotit navazující činnosti, do kterých hodnoty vstupují. Dále jsou tyto parametry předpokladem pro získání relevantní informace o stavu vrtu s možností sledování vývoje kolmatace vrtu v kontextu návrhu možné regenerace vrtného objektu.

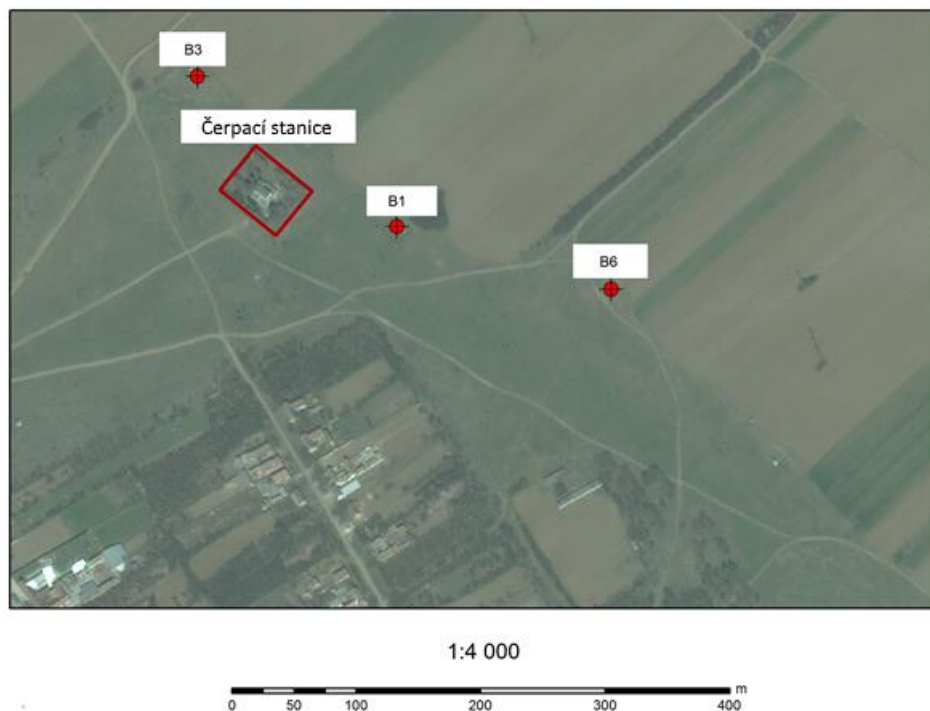
2.5.1. Čerpací zkoušky před regenerací, lokalita Bela Crkva

Zde bude prezentován postup zpracování dat z čerpací zkoušky včetně vyhodnocení parametrů skutečného vrtu. Tento postup může být chápán jako návod pro zpracování dat z hydrodynamických zkoušek v praxi. Následně je prezentováno zhodnocení provedené regenerace vrtu a její výsledky za pomoci charakteristik skutečného vrtu.

Základní popis zájmového území

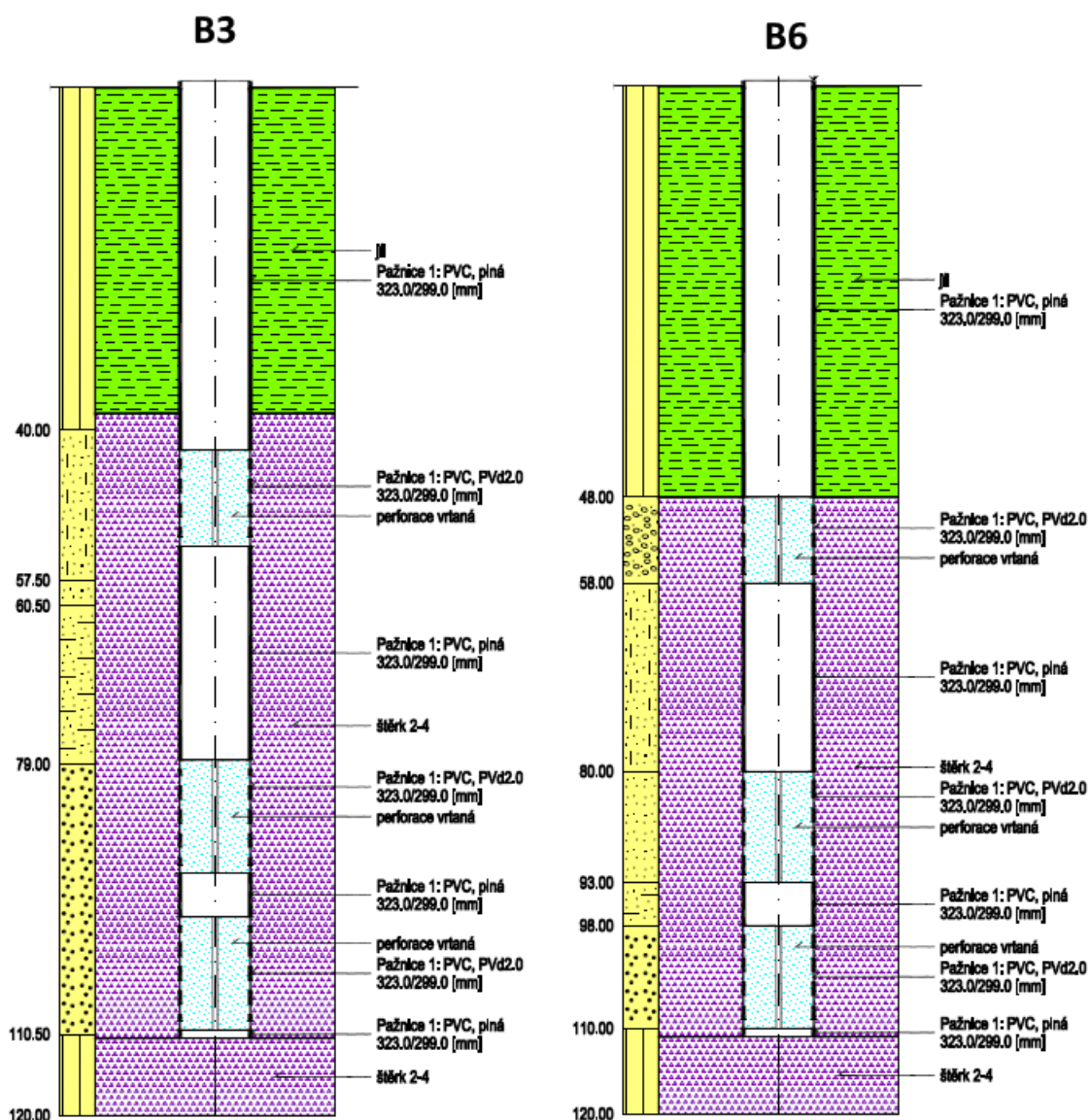
V rámci koncepce zásobování pitnou vodou municipality Bela Crkva, Republika srbská bylo provedeno několik čerpacích zkoušek v okolí lokality Strza. Hlavním cílem bylo posílení managementu vodních zdrojů a hygienické situace obyvatel dané oblasti. Oblast a její okolí je charakteristická chladnějším klimatem, které je specifické dlouhým a teplým létem a chladnější zimou se sněhovými přeháňkami. Čerpací zkoušky byly provedeny na kolektoru v oblasti Strza východně od provincie Vojvodina. Detail zájmového území ukazuje obrázek č. 17. Celkem se v oblasti nacházejí tři vrty označené B1, B3 a B6. Zde je prezentováno vyhodnocení hydraulických parametrů pro vrty označené jako B3 a B6, na vrtu B1 byla provedena pouze krátkodobá čerpací zkouška, tudíž nelze stanovit parametr

transmisivity pomocí Jacobovy semilogaritmické metody přímky. Z toho důvodu jsou data z vrtu B1 z analýzy vyřazeny.



Obr.: 17. Mapa lokalizace vrtů s čerpací stanicí oblasti Bela Crkva, Republika srbská

Mocnost zvodně činí 120 metrů pro oba zkoumané objekty B3 a B6. Vrtý jsou vrtány průměrem 32 cm a čerpaná vydatnost činila $14 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, taktéž pro oba vrtý. Snížení hladiny podzemní vody vlivem čerpání bylo zaznamenáváno s velmi krátkým intervalem hned od počátku čerpání, což zaručuje možnost vyhodnocení parametrů reálného vrtu z prvního přímkového úseku snížení. Hydrogeologická poměry vrt B3 a B6 jsou znázorněny na obrázku č. 18, detailní popis je přiložen v příloze.

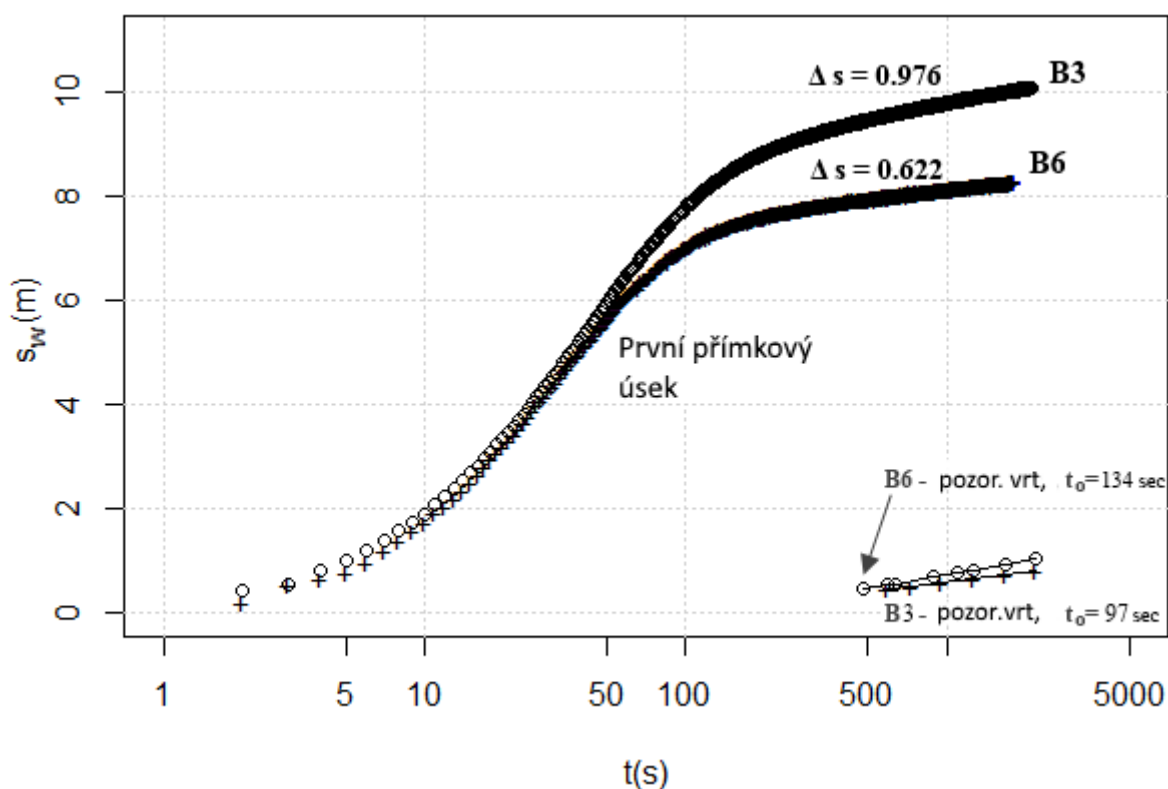


Obr.: 18. Geologický popis hornin a zemin vrtů B3 a B6 (poskytli Vodní zdroje a.s., vytvořeno pomocí programu GeProDo)

Vyhodnocení čerpací zkoušky

Stanovení základních parametrů hydraulického prostředí v podobě trasmisivity a storativity zvodně se provádí na datech snížení hladiny podzemní vody za nestacionárního režimu proudění, které jsou zaznamenány od počátku konstantního odebíraného množství. Pro validitu pořízených dat je nutné zajistit předpoklad, že nedocházelo v průběhu čerpací zkoušky k dotaci zvodně prostřednictvím propustné vrstvy na hranici kolektoru nebo jiným

způsobem k dodatečnému zásobování vodou. V opačném případě, když dochází k ovlivnění čerpací zkoušky skrze hraniční propustné vrstvy, tak není možné data vyhodnotit pomocí zde popsaných metod vyhodnocení. Jak si můžeme všimnout na obrázku č. 19, který reprezentuje závislost snížení hladiny podzemní vody na pozorovaném objektu, graf $s_w(t)$ charakterizují dva přímkové úseky. Jejich výskyt indikuje vliv dodatečných odporů a storativity vrtu na průběh hydrodynamické zkoušky, první přímková část vykazuje větší sklon snížení, daný větším snížením hladiny podzemní vody na odběrném vrtu než výpočtové snížení v dokonalém vrtu, kde je vliv dodatečných odporů zanedbán.



Obr.: 19. Snížení hladiny podzemní vody ve vrtu B3 a B6 s hodnotami snížení na pozorovacích objektech.

Základní vlastnosti zvodnělého prostředí transmisivita a storativita byly vyhodnoceny pomocí Jacobovy semilogaritmické metody přímkou pro neustálené proudění podzemní vody z druhé přímkové části grafu snížení hladiny. Sklon grafu $s_w(t)$ druhého přímkového úseku nabýval hodnoty $\Delta s = 0.976$ m pro vrt B3 respektive 0.622 m pro vrt B6

odebírané množství činilo $Q = 14 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pro obě čerpací zkoušky. Hodnota transmisivity horninového prostředí byla určena z předpisu:

$$T = \frac{0.183 Q}{\Delta s}$$

Hodnota transmisivity zvodně byla stanovena na $0.00263 \text{ m}^2/\text{s}$ pro vrt B3 a $0.00412 \text{ m}^2/\text{s}$ pro vrt B6. Hydraulické vodivosti definované jako poměr transmisivity a mocnosti zvodnělé vrstvy je obsažena v tabulce č. 1. Hodnota hydraulické vodivosti koresponduje s převážně písčitém prostředím, které je charakteristické pro tuto oblast, kde byly čerpací zkoušky zhotoveny.

Stanovení storativity zvodně předchází určení koeficientu transmisivity a potřeba měření snížení alespoň na jednom pozorovacím vrtu vlivem odběru vody na zkoumaném vrtu. Průsečík přímky snížení na pozorovacím vrtu s časovou osou označujeme jako t_0 a vzdálenost pozorovacího objektu označujeme jako r . Koeficient storativity je pak určen předpisem:

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2}$$

Pro vyhodnocení parametrů reálného vrtu v podobě dodatečné odpory a vlastního objemu vrtu je nutné oba tyto základní parametry znát. Analytický předpis pro bezrozměrné snížení hladiny s_{wd} podzemní vody v homogenním a izotropním kolektoru s najatou hladinou, storativitou vrtu a dodatečnými odpory (dle Agarwal et al., 1970) byl popsán v teoretické části práce. Tento analytický vztah je vyjádřen v bezrozměrných jednotkách, z toho důvodu je nezbytné naměřené hodnoty snížení převést na bezrozměrné veličiny, bezrozměrné snížení je definováno (s_w je snížení na vrtu [L]):

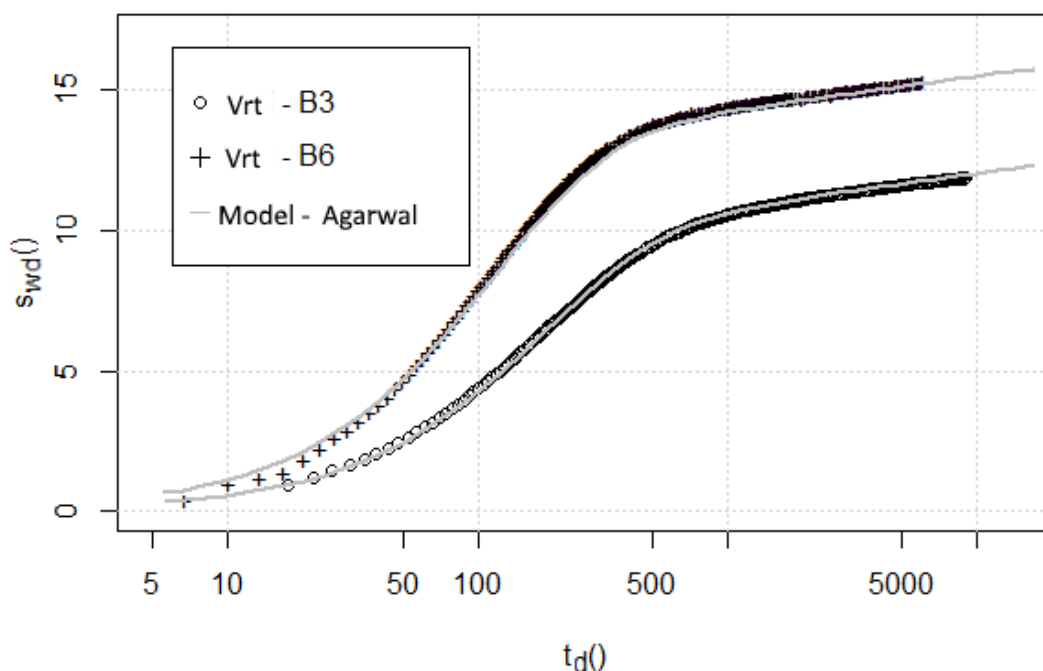
$$s_{wd} = \frac{2\pi T}{Q} s_w$$

Bezrozměrný čas definuje vztah:

$$t_d = \frac{T t}{r_w^2 S}$$

kde r_w poloměr odčerpávaného vrtu [L].

Vykreslením grafu závislosti bezrozměrného snížení a času v semi-logaritmickém měřítku získáme charakteristický sigmoidní tvar křivky, signalizující vliv parametrů reálného vrtu (obrázek č. 20).



Obr.: 20. Bezrozměrného snížení hladiny podzemní vody v semi-logaritmickém měřítku a analytická funkce popisující snížení na reálném vrtu dle Agarwal et al., 1970.

Postup vyhodnocení koeficientů dodatečných odporů a storativity vrtu vycházel z optimalizace těchto parametrů v modelové funkci ve smyslu nalezení co nejlepší shody mezi terénními daty a hodnotami modelu. Samotné optimalizaci předchází potřeba převodu dat snížení na bezrozměrné veličiny. Výsledky analýzy ukazuje tabulka č. 1, odečet parametrů reálného vrtu byl proveden při hodnotě koeficientu Nash-Sutcliffe 0.996 pro data z vrtu B3 a 0.992 pro vrt B6, což prokazuje excelentní shodu. Hodnota dodatečného snížení vody ve vrtu vlivem dodatečných odporů s_w pro ustálené proudění je definována vzorcem:

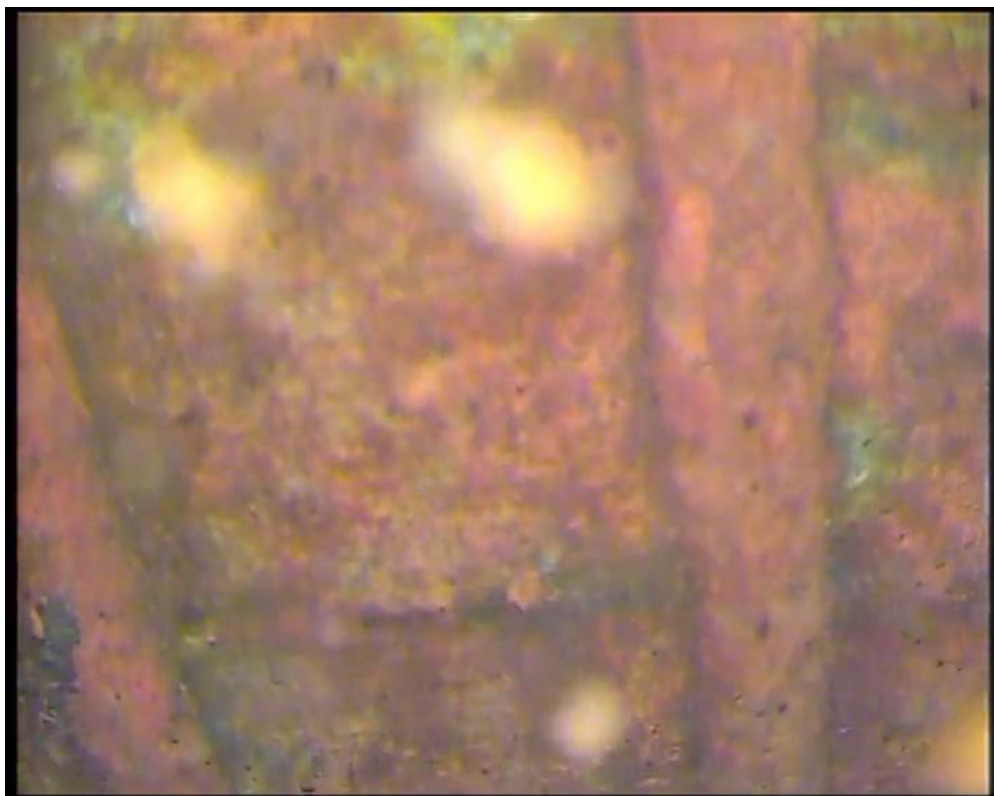
$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} W$$

Tabulka č. 1. *Hydraulické parametry z čerpací zkoušky u Bela Crkva, Republika Srpská. Nash-Sutcliffe koeficient (E_{ns}) ukazuje perfektní shodu terénním dat a modelu.*

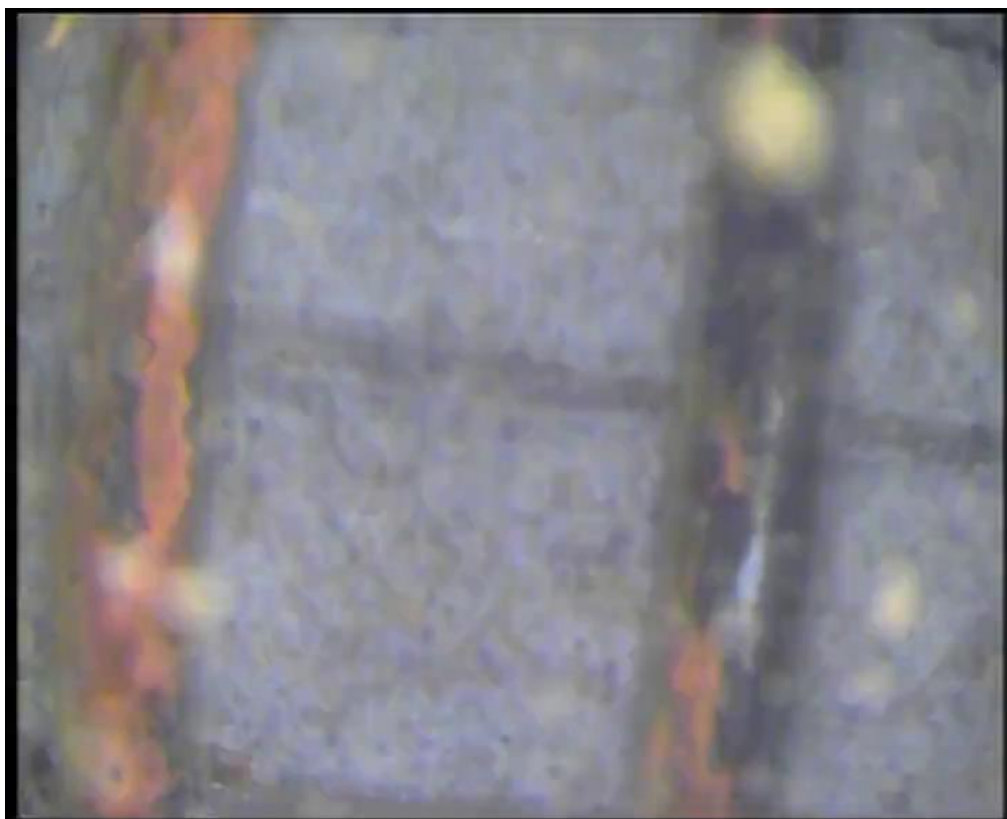
Parametry	vrt - B3	vrt - B6
Mocnost zvodně b [m]	57	35
Transmisivita zvodně T [m ² /s]	0.00263	0.00412
Hydraulická vodivost K [m/s]	4.61×10^{-5}	1.17×10^{-4}
Vzdálenost pozorovacího vrtu r [m]	5	5
t_0 [sec]	97	134
Storativita zvodně S	0.023	0.0496
Poloměr odčerpávaného vrtu r_w [m]	0.161	0.157
Dodatečné odpory W [-]	7.05	10.5
Storativita vrtu C_d [-]	17.5	8.5
Snížení způsobené dodateč. odpory s_w [m]	5.973	5.679
E_{ns}	0.996	0.992

2.5.2. Čerpací zkoušky po regeneraci vrtu B6, lokalita Bela Crkva

V následujícím textu je vyhodnocena čerpací zkouška z oblasti Bela Crkva vrt B6 po provedené regeneraci vrtu. Mechanicko-chemické regenerace vodárenského jímacího vrt B6 v katastru obce Straža byly provedeny v průběhu roku 2015, zpracovatelem byla firma VODNÍ ZDROJE, a.s. a účelem prací bylo zkapacitnění vodovodu Bela Crkva. Chemická regenerace vrtu byla prováděna pomocí aplikace chlornanu sodného a látky Syntron B, celková doba aplikace chemických látek byla 12 hodin v klidové režimu, pro optimální efektivitu chemické reakce. Mechanická část regenerace vrtu byla prováděna kombinací tlakových rázů a obrušováním vnitřní čisti výstroje vrtu. Výsledky regeneračního procesu jsou znázorněny pomocí kamerové zkoušky na obrázcích číslo 21. a 22. Na snímku je patrná značná kolmatace vrtu B6 před provedením regenerace, kolmatace je převážně způsobena kombinací bakteriálního nárůstu a vysrážení železitých vloček. Vrt B6 byl čištěn přerušovaným airliftem, při vynášení směsi vody a vzduchu byl zjištěn značný zákal. Nepřítomnost pískové složky na konci čištění signalizoval úspěšný zásah.



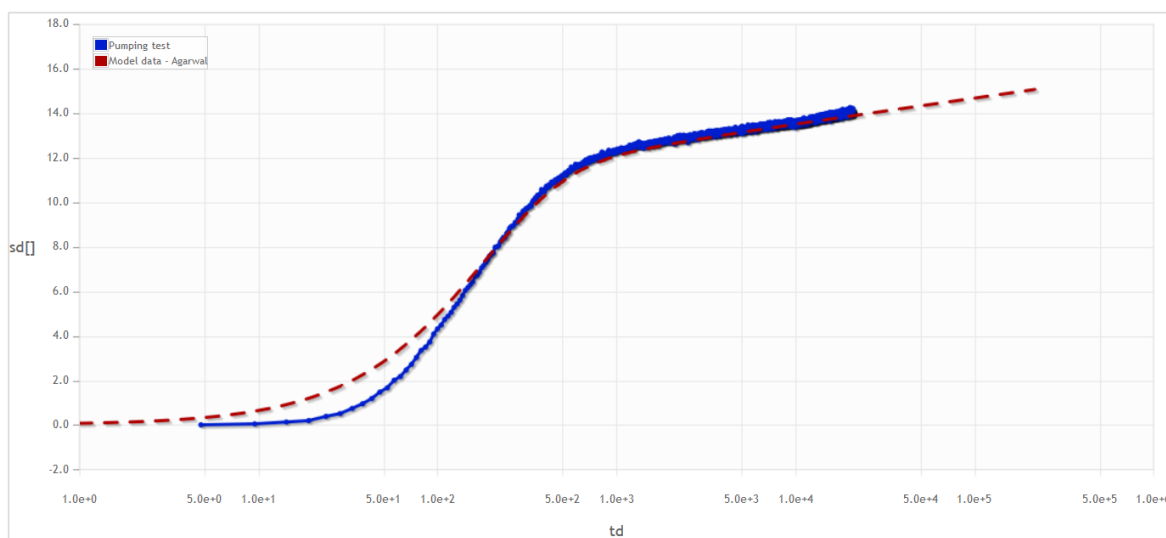
Obr.: 21. Snímek perforovaného úseku vrtu B6 před regenerací



Obr.: 22. Snímek perforovaného úseku vrtu B6 po regeneraci

Vyhodnocení čerpací zkoušky

Po provedené regeneraci vrtu B6 došlo k opětovnému vyhodnocení základních parametrů hydraulického prostředí v podobě transmisivity a storativity zvodně zkouška byla provedena za nestacionárního režimu proudění. Následně došlo ke stanovení hodnot koeficientů dodatečných odporů a koeficientu storativity vrtu pro zhodnocení provedené regenerace vrtu. Pro zachování co největší relevance výsledků analýzy ve smyslu finálního porovnání byly použité stejné metody vyhodnocení dat čerpací zkoušky před a po regeneraci vrtu. Pro úplnost zde uvedu použité metody, stanovení transmisivity a storativity zvodně bylo provedeno pomocí Jacobovy metody přímkou a stanovení parametrů reálného vrtu vycházelo z optimalizace parametrů pomocí analytické funkce dle Agarwal et al., 1970. Výsledky čerpací zkoušky jak můžeme vidět na obrázku č. 23, opět vykazují charakteristický tvar vypovídající o přítomnosti a vlivu koeficientů reálného vrtu na průběh čerpací zkoušky.



Obr.: 23. Stanovení koeficientů reálné vrtu v prostředí programu RadFlow.

Zhodnocení provedené regenerace vrtu B6 na základě parametrů dodatečných odporů.

Provedení opětovné hydrodynamické zkoušky po regeneraci na vrtu B6 prokázalo kladný vliv na snížení odporových parametrů vrtu. Pokles hladiny před provedením regenerace vrtu při čerpaném množství $0.014 \text{ m}^3/\text{s}$ dosáhl na konci 8.29 m a snížení

způsobené dodatečnými odpory vyhodnocené vyšlo 5.679 m. Hodnota parametru dodatečných odporů činila 10.5. Po regeneraci s přihlédnutím na čerpané množství vody vychází mírné zlepšení odporových parametrů. Konkrétně hodnota snížení způsobené dodatečnými odpory je 3.617 m a celkové snížení hladiny podzemní vody činilo 6.5 m. Samotný koeficient dodatečných odporů byl snížen z původních 10.5 na hodnotu 8.3, což odpovídá snížení o 21% z původní hodnoty. S přihlédnutím k výše uvedeným skutečnostem lze provedený regenerační proces označit na úspěšný, toto konstatování dále potvrzují přiložené obrázky 21. a 22., kde je vidět zásadní rozdíl v pořizovaném záznamech kolmatace vrtů z provedené kamerové zkoušky.

Tabulka č. 2. Hydraulické parametry čerpacích zkoušek provedených na vrtu B6 před a po regeneračním zásahu.

Parametry	vrt – B6 po reg.	vrt - B6 před reg.
Čerpaná vydatnost [m^3/s]	0.0118	0.014
Mocnost zvodně b [m]	35	35
Transmisivita zvodně T [m^2/s]	0.00431	0.00412
Hydraulická vodivost K [m/s]	1.23×10^{-4}	1.17×10^{-4}
Vzdálenost pozorovacího vrtu r [m]	5	5
t_0 [sec]	90	134
Storativita zvodně S [-]	0.0355	0.0496
Poloměr odčerpávaného vrtu r_w [m]	0.1615	0.157
Dodatečné odpory W [-]	8.3	10.5
Storativita vrtu C_d [-]	14	8.5
Snížení způsobené dodateč. odpory s_w [m]	3.617	5.679
E_{ns}	0.953	0.992

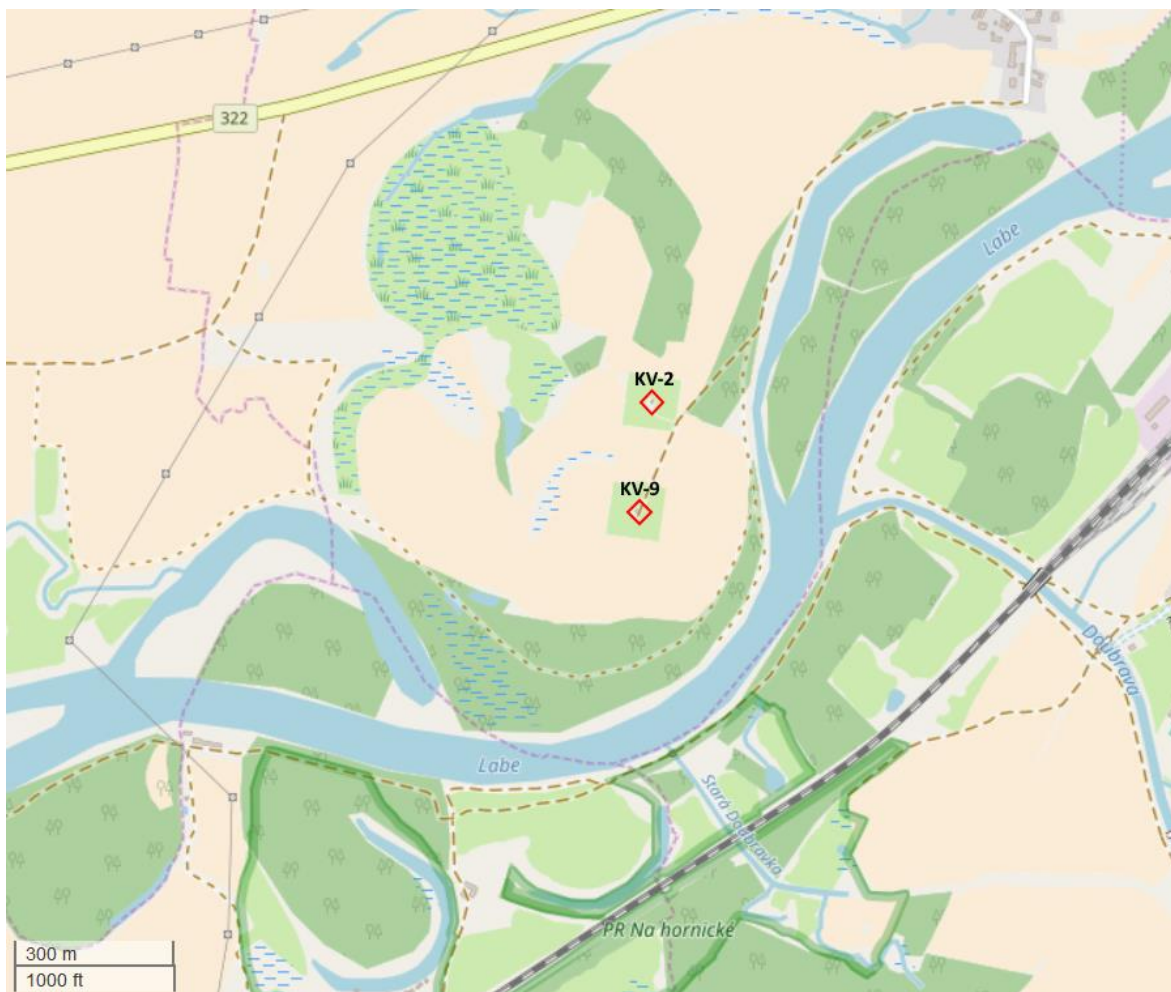
2.5.3. Čerpací zkoušky, lokalita Veletov

Cílem zde prezentovaného postupu vyhodnocení čerpací zkoušky je určení koeficientů skutečného vrtu a následné odvození stavu kolmatace vrtů. Tento zde zdokumentovaný příklad lze označit jako možný přístup vyhodnocení krátkodobých

čerpacích zkoušek v kontextu přípravy a správného načasování regenerace vrtu. Všechny zde provedené analýzy byly provedeny pomocí aplikačního programu RadFlow.

Základní popis lokality

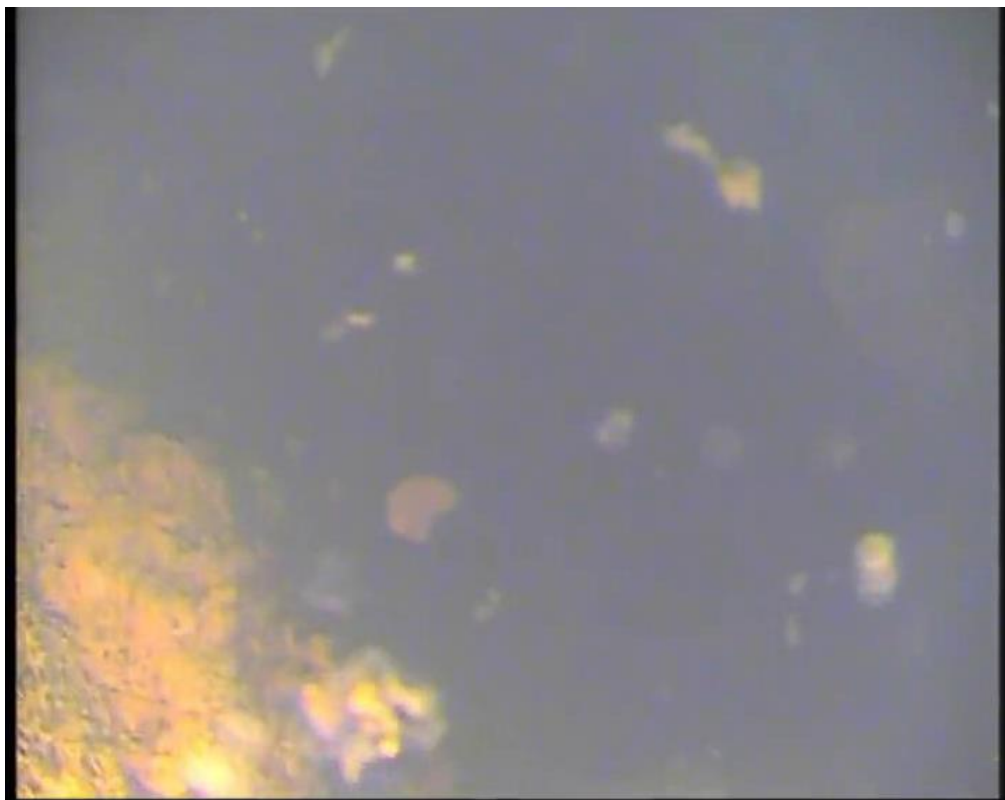
V rámci možného využití pro budoucí potřeby zásobování pitnou vodou byly provedeny poblíž obce Veletov v okrese Kolín čerpací zkoušky dne 22.2.2016 včetně kamerových zkoušek. Zájmová lokalita se nachází v mírně teplé klimatické oblasti s charakteristickým dlouhým, suchým létem a krátkou zimou s velmi krátkým trváním sněhové pokrývky. Průměrná roční teplota se pohybuje mezi 8-9 °C a dlouhodobí roční úhrn srážek je okolo 600 mm. Oblast se nachází v Českém masivu, podloží zkoumané lokality je tvořeno turonskými a písčitými slínovci s překryvem kvartérními říčními sedimenty s mocností 14 -15 m. Detailní hydrogeologická dokumentace vrtu KV-2 a KV-9 jsou obsaženy v příloze D a E. Oba vrty byly vrtány průměrem 162 cm do hloubky 5 m, dále navazuje průměr 135 cm, tento průměr pokračuje až na dno vrtu. Obsyp u obou vrtů je dvojitý, vnější obsyp má frakci 2–4 mm a vnitřní obsyp má frakci 8-16 mm. Vrty jsou v oblasti plné výstroje vystrojeny ocelí o vnějším průměrem 426 mm. Vrt KV-9 byl navíc v minulosti převystrojen na nižší průměr. Informace o této skutečnosti však nebyly v archivních datech k dispozici. Z terénního šetření je patrné, že byl vrt KV-9 upraven na ocelovou výstroj o vnějším průměru 225mm.



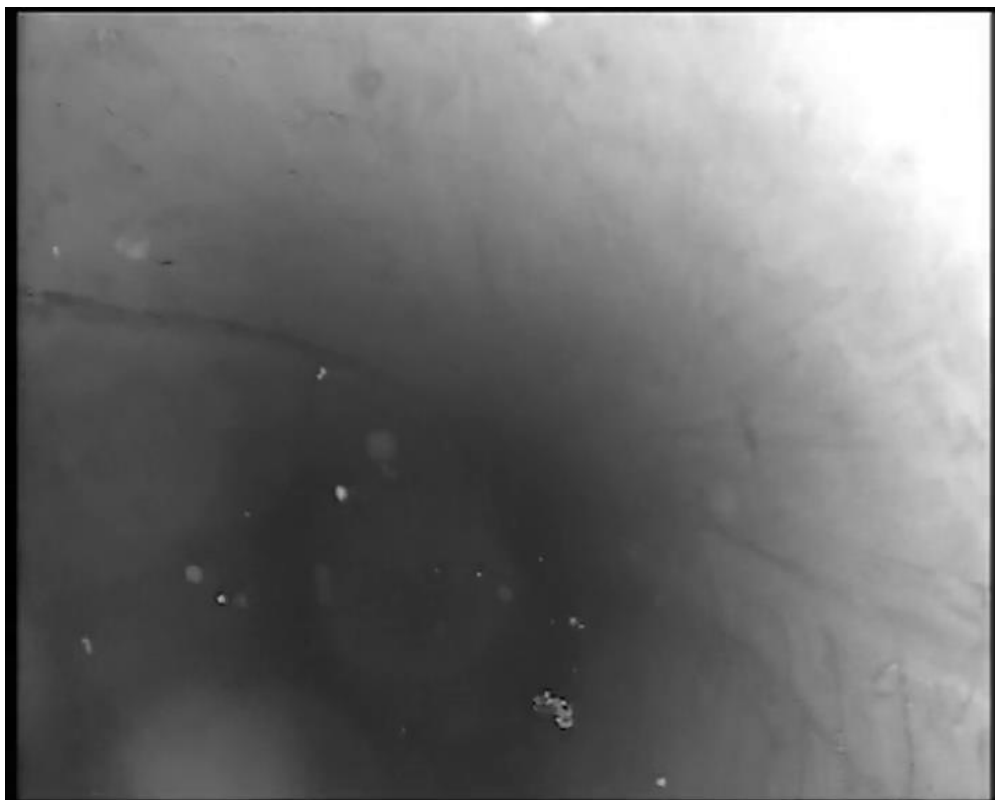
Obr.: 24. Zkoumaná lokalita Veletov, vrt KV -2 a KV -9 (zdroj: <https://www.openstreetmap.org>)

Sledovaná oblast byla v minulosti dobře prozkoumána z důvodu potřeby zásobování pitnou vodou oblast Kolínska. Kvartérní kolektor má přímou souvislost s povrchovým tokem Labe, které je vzdáleno jen několik desítek metrů od zkoumaných vrtů.

Dále byla na vrtech provedená kamerová zkouška za použití speciální kamery, která je určená pro prohlídku vrtaných objektů. Výsledkem kamerových zkoušek na vrtu KV -2 bylo zjištění velmi nízké viditelnosti. Způsobené velkým množstvím vznášejících částic, korespondující se silným nárůstem rzi, bakterií a jejich metabolitů. S ohledem na množství zákalu nebylo od hloubky 11 m možné dále v kamerovém průzkumu pokračovat. Naproti tomu vrt KV -9 vykazoval velmi dobrou viditelnost. Inkrustace je patrná v oblasti perforace vrtu a dále v hloubce 13 – 14 m. Výsledky kamerových zkoušek jsou přiloženy viz. obrázek č. 25. a 26.



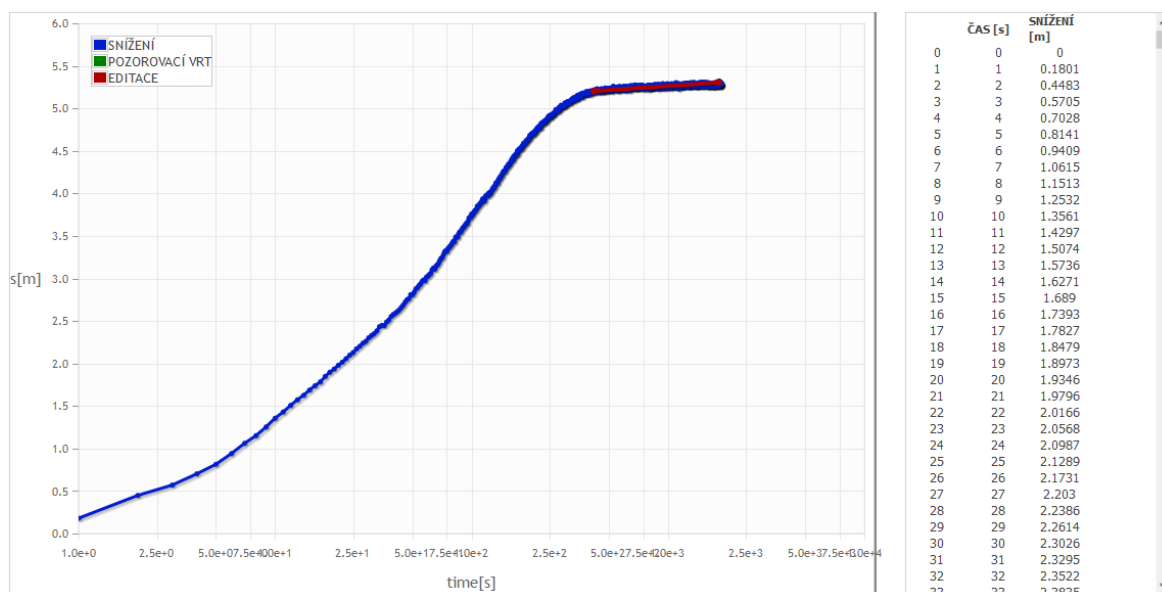
Obr.: 25. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu KV -2



Obr.: 26. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu KV -9

Vyhodnocení čerpací zkoušky

Hlavním cílem zde prezentované hydrodynamické zkoušky je posouzení stavu kolmatace vrtů pomocí parametru dodatečných odporů. K tomu účelu byla na sledovaném vrtu provedena krátkodobá čerpací zkouška. Celková doba trvání čerpání na vrtu KV -2 byla 64.6 min a na vrtu KV -9 31.23 min. Vzhledem ke krátké době odběru nedošlo k pozorování snížení hladiny podzemní vody na pozorovacím vrtu, z toho důvodu nemohla být z výsledků určena hodnota storativita zvodně s využitím metody Jacobovy semilogaritmické aproximace. S ohledem na historické hydrogeologické průzkumy byla hodnota storativity zvodně převzata z dříve provedených čerpacích zkoušek, kde byl tento parametr stanoven. Při určování koeficientů skutečného vrtu budeme zde vycházet z předpokladu, že v horninovém prostředí dochází k minimálním změnám ve středně dlouhém časovém intervalu (archivní data čerpacích zkoušek se datují rokem 1984).



Obr.: 27. Vyhodnocení transmisivity z čerpací zkoušky na vrtu KV -9 pomocí programu RadFlow.

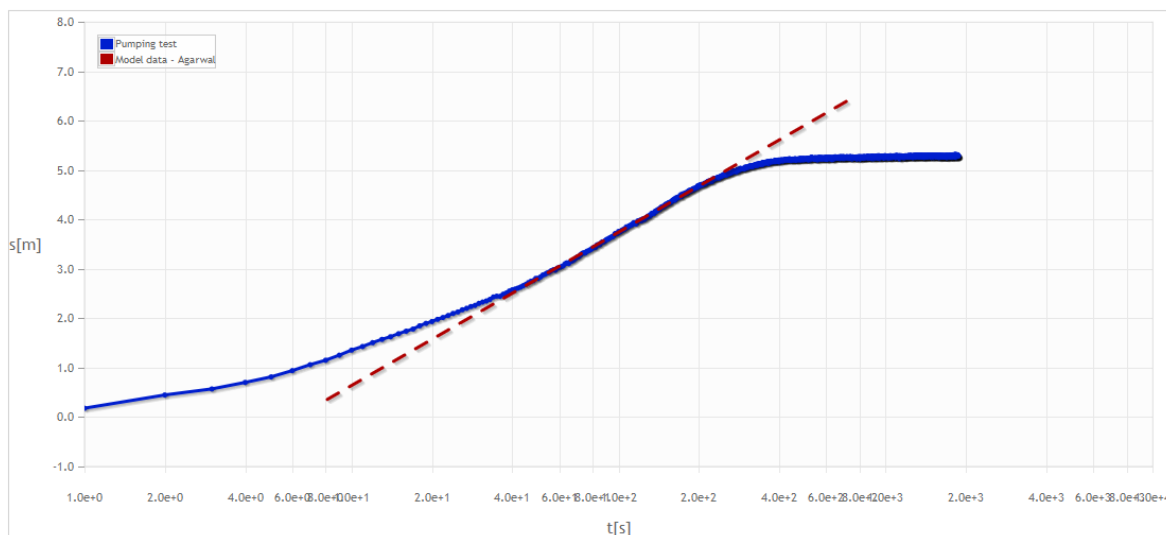
Jak je patrné na obrázku č. 27 graf snížení hladiny podzemní vody na vrtu KV-9 se vyznačuje výskytem dvou přímkových úseků, což naznačuje vliv dodatečných odporů na

průběh čerpací zkoušky. Za pomoci Jacobovy metody přímky byla stanovena hodnota transmisivity vrtu na $0.021 \text{ m}^2/\text{s}$, tato hodnota se velmi dobře shoduje s hodnotou vycházející z archivních dat čerpací zkoušky, kde byla transmisivita stanovena na $0.029 \text{ m}^2/\text{s}$. To nasvědčuje, že předpoklad relativní stálosti hydrogeologického prostředí byl správný. Obdobným způsobem byly vyhodnoceny i data z vrtu KV-2, výsledky analýz jsou dostupné v tabulce číslo 3.

Protože základním cílem krátkodobé čerpací zkoušky bylo zjištění stavu kolmatace vrtu, hlavní pozornost je věnována hodnotě dodatečných odporů, které se vyhodnocují z prvního přímkového úseku (někdy označovaný jako Agarwallovský úsek). Pro vlastní stanovení hodnoty dodatečných odporů byla použita metoda vycházející ze znalosti sklonu prvního přímkového úseku, která byla prezentována v teoretické části práce. Výsledky analýzy vrtu KV -9 v prostředí programu RadFlow si můžeme prohlédnout na obrázku číslo 28. Koeficient vlastního objemu vrtu potřebný k samotné analýze dodatečných odporů je určen dle vzorce:

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

Kde C jednotkový faktor zásobnosti vrtu [L^2].



Obr.: 28. Vyhodnocení dodatečných odporů z čerpací zkoušky na vrtu KV-9 pomocí programu RadFlow.

Tabulka č. 3. *Hydraulické parametry čerpacích zkoušek provedených na vrtu VK-2 a VK-9.*

Parametry	vrt – KV-2	vrt – KV-9
Čerpaná vydatnost [m^3/s]	0.0022	0.00416
Mocnost zvodně b [m]	11	11
Transmisivita zvodně T [m^2/s]	0.025	0.021
Hydraulická vodivost K [m/s]	0.0022	0.0019
Storativita zvodně S [-]	0.076	0.076
Poloměr odčerpávaného vrtu r_w [m]	0.17	0.1125
Dodatečné odpory W [-]	405.2	120.1
Storativita vrtu C_d [-]	16.1	6.88
Snížení způsobené dodateč. odpory s_w [m]	5.67	3.78

Zhodnocení provedené čerpací zkoušky

Výsledky čerpacích zkoušek v podobě parametrů hydrogeologického prostředí ukázali, že vliv parametrů skutečného vrtu na průběh zkoušky byl zásadní. Hodnota snížení způsobení dodatečnými odpory na plášti a v obsypu vrtu dosáhla hodnoty 5.76 m pro vrt KV-2 a pro vrt KV-9 3.78 m, což představuje vzhledem k celkové hloubce vrtů dominantní část celkového snížení. Takto vysoký vliv dodatečných odporů na celkové snížení hladiny podzemní vody naznačuje, že na vrtu došlo k velmi silné kolmataci. Z výsledků provedených pomocí programu RadFlow vyplývá, že na obou vrtech probíhají silné kolmatační procesy a vzhledem k tomu je vhodné na těchto objektech provést regenerační zásah nebo vrty vybudovat nové.

3. Diskuze a závěr

Výsledkem doktorské disertační práce se stal aplikační software RadFlow dostupný na adrese <http://radflow.cz>, pro vyhodnocování dat z čerpacích zkoušek. Ve vlastní práci byla popsána základní struktura aplikace a uveden odkaz na kód aplikace, kde si každý zájemce může program vyzkoušet, případně pomocí nástroje GitHub dále rozvíjet. Aplikace si neklade žádné licenční omezení a je možné sní nakládat jako ze svobodným softwarem. Dále pak byly představeny základní přístupy zpracování dat pomocí aplikace RadFlow včetně popisu postupu práce jednotlivých analytických metod pro vyhodnocení dat čerpacích zkoušek. Nedílnou součástí práce se také staly případové studie, které představují vyhodnocení skutečných terénních dat a poukazující na možnosti využití nástroje v praxi. Konkrétně se jednalo o dvě lokality, na první z nich Bela Crkva v Srbské Republice kde byly vyhodnoceny dva vrty, následně pak došlo k vyhodnocení regenerace provedené na vrtu B6. Výsledek opětovného vyhodnocení čerpací zkoušky společně s kamerovými zkouškami potvrdili předpoklad, že po provedení regenerace vrtu dojde ke snížení hodnoty dodatečných odporů. Ukázalo se, že hodnoty koeficientů mohou posloužit jako hodnotící parametr provedeného zásahu, nebo posloužit jako relevantní ukazatel pro plánování budoucích regeneračních zásahů. Druhá lokalita se nacházela poblíž okolí obce Veletov v okrese Kolín, kde bylo provedeno vyhodnocení krátkodobých čerpacích zkoušek s ohledem na posouzení stavu kolmatace na vrtech. Stanovením dodatečných odporů byl zjištěn zásadní vliv tohoto parametru na průběh čerpací zkoušky, tato skutečnost může být zásadní pro rozhodnutí jak z vrtem dále naložit s ohledem na účel a potřeby vrtu.

Transmisivita a storativita zvodně jsou hlavními hydraulickými parametry charakterizující prostředí kolektoru, jsou zde však i parametry skutečného vrtu v podobě dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu, které také definují vlastnosti zkoumaného prostředí. A jak bylo zde ukázáno, jejich zanedbáním můžeme způsobit desinterpretace výsledků čerpacích zkoušek při vyhodnocování základních parametrů vrtů pomocí například tradičních metody aproximace Jacobovy přímky. Což může způsobit znehodnocení prací, které navazují na provedený průzkum a kam vstupují hydrogeologické parametry jako vstupní charakteristika prostředí. Zde bych uvedl jen některé z nich, posouzení dostupnosti pitné vody ze zásob podzemní vody nebo řešení sanace podzemní vody a horninového

prostředí kontaminovanými látkami. Jak bylo prokázáno v praktické části práce parametry skutečného vrtu, v podobě dodatečných odporů mohou posloužit i jako hodnoticí parametr pro stanovení správného načasování nebo posouzení výsledků regenerace vrtu. Například za využití krátkodobé čerpací zkoušky, která neklade takové časové potažmo finanční nároky na její vyhotovení jako tradiční čerpací zkouška, obvyklá doba čerpání u krátkodobé čerpací zkoušky se pohybuje v rozmezí 2 - 8 hodin.

Modulární struktura aplikace RadFlow sebou přináší výhody snadného rozšíření o další analytické metody a dává tak možnost vývojářům pracovat na jejím následném zdokonalování. V běžné praxi zatím není pravidlem zahrnovat vliv parametrů skutečného vrtu do vyhodnocení čerpacích zkoušek a tento nástroj by mohl díky své dostupnosti a nenáročnosti na obsluhu tento přístup změnit. Také samotné parametry skutečného vrtu ve vztahu ke snížení podzemní vody při hydrodynamických zkouškách přinášejí ještě řadu výzev a možností na další posun daného tématu.

Seznam literatury

- 1) Agarwal, R. G., R. Al-Hussainy, and H. J. Ramey Jr., 1970: An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. Trans. Soc. Pet. Eng. AIME, 249, 279-290.
- 2) Bear, Jacob, Cheng, Alexander H.-D., 2010: Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Springer Netherlands, ISBN 978-1-4020-6681-8
- 3) Black, J. H. and K. L. Kipp, 1977: Observation well response time and its effect upon aquifer test results. J. Hydrol., 34, 297-306, doi: 10.1016/0022-1694(77)90137-8.
- 4) Cooper, H. H., Jr. and C. E. Jacob, 1946: Generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. AGU, 27, 526-534.
- 5) Domenico P. A., Schwartz F. W., 1998: Physical and chemical hydrogeology. Wiley: 60-63, ISBN-10: 0471597627
- 6) Fenske, P. R., 1977: Radial flow with discharging-well and observation-well storage. J. Hydrol., 32, 87-96, doi: 10.1016/0022-1694(77)90120-2.
- 7) Freeze A, Cherry J., 1979: Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- 8) Garcia-Rivera, J. - Raghavan, R., 1979: Analysis of short-time pressure data dominated by wellbore storage and skin. J. Petrol. Technol., 623-631
- 9) Heath C. Ralph, 1983: Basic Ground-Water hydrology. Geological survey Dallas.
- 10) Hawkins, M. F. Jr., 1956: A note on the skin effect, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 207, 356-357.
- 11) Hund-Der Yeh, Ya-Chi Chang, Recent advances in modeling of well hydraulics, Advances in Water Resources, 2013, 51, 27

- 12) Chen, C. S. and C. G. Lan, 2009: A simple data analysis method for a pumping test with skin and wellbore storage effects. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 20, 557-562, doi: 10.3319/TAO.2008.05.16.01(Hy)
- 13) Chen, C.-S., and C.-C. Chang, 2002: Use of cumulative volume of constant-head injection test to estimate aquifer parameters with skin effects: Field experiment and data analysis, *Water Resour. Res.*, 38(5), doi:10.1029/2001WR000300.
- 14) Chen C.-S., C.-C. Chang, 2006: Theoretical evaluation of non-uniform skin effect on aquifer response under constant rate pumping, *Journal of Hydrology*, Volume 317, Issues 3-4, Pages 190-201, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.017>.
- 15) Jargon, J. R., 1976: Effect of wellbore storage and wellbore damage at the active well on interference test analysis. *J. Pet. Tech.*, 28, 851-858, doi: 10.2118/5795-PA.
- 16) Jetel J., 1982: Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech, ÚÚG Praha.
- 17) Kazda I., 1997: Podzemní hydraulika v ekologických a inženýrských aplikacích. Academia, Praha.
- 18) Moench, A. and Ogata, A., 1984: Analysis of Constant Discharge Wells by Numerical Inversion of Laplace Transform Solutions, in *Groundwater Hydraulics* (eds J. S. Rosenshein and G. D. Bennett), American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/WM009p0146
- 19) Moench A.F., 1985: Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, *Water Resour. Res.*, 21(8), 1121-1131
- 20) Papadopoulos, I. S. and H. H. Cooper, 1967: Drawdown in a well of large diameter well. *Water Resour. Res.*, 3, 241-244, doi: 10.1029/WR003i001p00241.
- 21) M. Pasandi, N. Samani, D.A. Barry, 2008: Effect of wellbore storage and finite thickness skin on flow to a partially penetrating well in a phreatic aquifer, *Advances in Water Resources*, Volume 31, Issue 2, Pages 383-398, ISSN 0309-1708, <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.09.001>.

- 22) Pech, P. 2010. Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Česká zemědělská univerzita v Praze ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v.v.i., 49, ISBN-978-80-87402-04-7
- 23) 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
- 24) Ramey, H. J. Jr.: 1976, Practical Use of Modern Well Test Analysis, paper SPE, 5878 presented at the SPE-AIME 46th Annual California Regional Meeting, Long Beach, CA, April 8-9,
- 25) Garcia-Rivera J. and Raghavan R. 1979, Analysis of Short-Time Pressure Data Dominated by Wellbore Storage and Skin. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/6546-PA
- 26) Stehfest, H., 1970. Algorithm 368 numerical inversion of Laplace transforms D-5. Comm. of the ACM No 1.
- 27) Streltsova, T. D., 1988: Well Testing in Heterogeneous Formations, Wiley, New York, 413 pp.
- 28) Taib D., 1995. Analysis of pressure und pressure derivative without type-curve matching – Skin and wellbore storage. Journal of Petroleum Science and Engineering.: 170-181.
- 29) Theis, C. V., 1935: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using Ground-Water Storage. Trans. AGU, 16, 519-524.
- 30) Valentová J., 2007: Hydraulika podzemní vody. ČVUT, Praha.
- 31) van Everdingen A.F., W. Hurst. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. Trans, pages 305–324, 1949.
- 32) van Everdingen, A.F., Hurst, W., 1953. The skin effect and its influence on the productive capacity of the well. Transactions of the American Institute Mineralogical Metallurgical and Petrological Engineering. 198, 171–176.

- 33) Walton W. C., 2006. Aquifer Test Modeling. CRC Press. Hardcover: 240 pages, ISBN-10: 1420042920
- 34) Wang C. T., Yeh H., Tsai C., 2012. Transient drawdown solution for a constant pumping test in finite two-zone confined aquifers. Hydrology and Earth System Sciences

Seznam příloh

A - Aplikace RadFlow, úvodní stránka

B - Detailní popis hydrogeologického prostředí vrtu B3, lokalita Bela Crkva (poskytli Vodní zdroje a.s., vytvořeno pomocí programu GeProDo)

C - Detailní popis hydrogeologického prostředí vrtu B6, lokalita Bela Crkva (poskytli Vodní zdroje a.s., vytvořeno pomocí programu GeProDo)

D - Detailní popis hydrogeologického prostředí vrtu KV-2, lokalita Veletov (poskytli Vodní zdroje a.s., vytvořeno pomocí programu GeProDo)

E - Detailní popis hydrogeologického prostředí vrtu KV-9, lokalita Veletov (poskytli Vodní zdroje a.s., vytvořeno pomocí programu GeProDo)

F – Průběh snížení hladiny podzemní vody na vrtu B6 před provedenou regenerací, lokalita Bela Crkva (vizualizace v programu RadFlow)


G – Průběh snížení hladiny podzemní vody na vrtu B6 po provedené regeneraci, lokalita Bela Crkva (vizualizace v programu RadFlow)

H – Průběh snížení hladiny podzemní vody na vrtu B3, lokalita Bela Crkva (vizualizace v programu RadFlow)



CH – Průběh snížení hladiny podzemní vody na vrtu KV-9, lokalita Veletov (vizualizace v programu RadFlow)

I – Průběh snížení hladiny podzemní vody na vrtu KV-2, lokalita Veletov (vizualizace v programu RadFlow)

Příloha A



ÚvodNávod

Uživatel: Host  Registrovat  Přihlásit

O programu

Aplikace RadFlow je webová aplikace umožňující komplexní analýzu dat z hydrodynamických zkoušek. **Pro přístup k jednotlivým analýzám je nutné vytvořit uživatelský účet.** Mezi základní datové analýzy pro vyhodnocení hydrodynamických čerpacích zkoušek patří:

- Jacobova semilogaritmická metoda přímkou
- Theisova metoda typové křivky
- vyhodnocení parametrů skutečného vrtu v podobě vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů

Dále aplikace nabízí možnost archivace jednotlivých datových sad, kdy je předpokládáno, že každý uživatel při práci s informačním systémem se bude moci k předchozím analýzám vracet a dle potřeby upravovat. Přístup do aplikace v prostředí internet zajišťuje širokou dostupnost a snižuje kladené požadavky na hardwarové vybavení uživatele. Aplikaci spustí jakýkoli z nejpopulárnějších webových prohlížečů (Internet Explorer 9+, Google Chrome 10+, Mozilla Firefox 4+, Opera 10,5+ a další). Plnou funkčnost webové aplikace v jiných prohlížečích nelze stoprocentně zaručit.

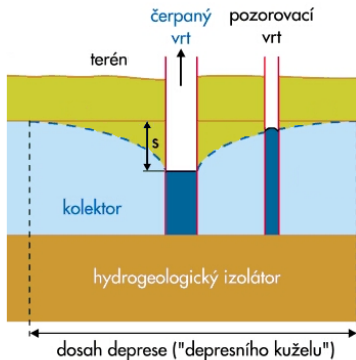
Čerpací zkouška

Hydrodynamické zkoušky patří mezi základní metody stanovení hydraulických charakteristik zvodněných vrstev. Mezi hlavní vyhodnocované parametry patří transmisivita a storativita vrtu, tyto hlavní dva ukazatele definují základní fyzikální vlastnosti kolektoru, pro jejich stanovení se často používají metody odvozené z analytického řešení rovnice pro proudění podzemní vody, které byly odvozené za předpokladů ideálního vrtu.

Čerpací zkouška, která patří do skupiny hydrodynamických zkoušek, při níž se ze zkušebního objektu odebírá konstantní množství vody a zaznamenává se reakce zvodnělé vrstvy ve smyslu poklesu hladiny podzemní vody nebo tlaku na pozorovaném objektu. Čerpací zkoušku můžeme rozdělit dle režimu proudění podzemní vody k pozorovanému objektu:

- Čerpací zkouška za ustáleného režimu proudění
- Čerpací zkouška za neustáleného režimu proudění

Kromě transmisivity a storativity vrtu jsou zde však další parametry definující skutečný stav horninového prostředí v průběhu hydrodynamické zkoušky, které však často nejsou do vyhodnocení zahrnuty, mezi ně patří parametry skutečného vrtu.



Parametry skutečného vrtu

Vlastní objem vrtu

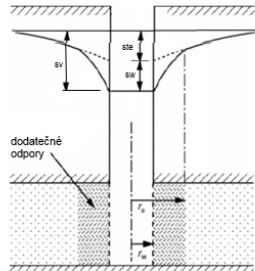
Na samotném začátku čerpací zkoušky odebírané množství vody pochází z vlastního objemu vrtu a nikoliv z okolního porézního prostředí (Papadopolos and Cooper 1967). Vliv vlastního objemu vrtu na průběh čerpací zkoušky trvá jen několik minut a česem se snižuje (Fenske, 1977), přesto jeho zanedbáním dojde k nadhodnocení hodnoty storativity vrtu, přestože vlastní objem vrtu ovlivňuje hodnoty snížení jen na počátku čerpací zkoušky (Black and Kipp, 1977).

Dodatečné odpory

Dodatečné odpory jsou způsobeny řadou jevů, které vznikají během samotného zhotovení vrtu, ale také v průběhu čerpání podzemní vody z vrtu. Při vrtání horninovým prostředím dochází ke kolmataci okolí vrtu, což sebou přináší změnu hydraulických vlastností porézního prostředí a následný vliv na dataci podzemní vody do vrtu. Mezi další dodatečné odpory může zařadit zmenšení aktivní plochy vrtu, turbulentní režim proudění v blízkosti vrtu, hloubka vrtu neodpovídá mocnosti kolektoru a další. Díky velkému množství faktorů, které definují výslednou hodnotu dodatečných odporů, je obtížné jejich přesné určení, z toho důvodu se oblast jejich výskytu často zanedbává. Hodnota dodatečných odporů je definována jako rozdíl hodnot skutečného snížení na vrtu a snížení vycházejícího z Theis modelu, pro delší časový úsek lze definovat vztahem (Van Everdingen 1953).

$$sv = sw + ste$$

kde **sv** je snížení na vrtu vlivem čerpání, **sw** je snížení způsobené dodatečnými odpory a **ste** snížení vycházející z Theis modelu.



Vliv dodatečných odporů na průběh snížení hladiny podzemní vody během čerpací zkoušky.

© 2018 RadFlow, Aplikace je výsledkem projektu: Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR, TA02021249
Autorem aplikace je řešitelský tým projektu: Jiri Holub - jholub(at)fzp.czu.cz, prof. Ing. Pavel Pech, CSc. - pech(at)fzp.czu.cz a další
Financováno: TAČR - Technologická agentura ČR

VODNÍ ZDROJE, a.s.

150 00 Praha 5, Jindřicha Plachty 536/16

HYDROGEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VRTU

B3

Okres: Vojvodina Katastr.území: Mapa 1:25000:

Vrtmistr: Neznámý

Datum provedení - od: ?

- do: ?

Typ soupravy: ?

Technologie: ?

Materiál vnitřní pažnice: Pažnice není

Hladina podz. vody: ustálená Z/hl.[m]:

Zjištěná kontaminace:

Y: 4 982 832.97

X: 7 523 981.01

Z terén [m]: 98,60

Odměrný Bod [m]: terén

Hloubka vrtu [m]: 120,00

Souř.systémy: Gauss / Jadran

Vrtání: hloubky[m]průměr[mm]	Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.	Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.	Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf.
0.00 - 120.00 1100	1 0.00 - 42.32 PVC 323 plná	1 110.00 - 111.00 PVC 323 plná	
	1 42.32 - 53.52 PVC 323 Pvd2.0 30%		
	1 53.52 - 78.52 PVC 323 plná		
	1 78.52 - 91.72 PVC 323 Pvd2.0 30%		
	1 91.72 - 96.80 PVC 323 plná		
	1 96.80 - 110.00 PVC 323 Pvd2.0 30%		

HLBOUKY [m]

STRATIGRAFIE

VZORKY

HLBOUKY [m]

GEOLOGIE

0

7

14

21

28

35

42

49

56

63

70

77

84

91

98

105

112

119

0.00

40.00

57.50

60.50

79.00

110.50

120.00

1

1

98.60

Zhlaví:

O.B.

jíl

Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]

Pažnice 1: PVC, Pvd2.0 323.0/299.0 [mm]

perforace vrtaná

Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]

štěrk 2-4

Pažnice 1: PVC, Pvd2.0 323.0/299.0 [mm]

perforace vrtaná

Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]

perforace vrtaná

Pažnice 1: PVC, Pvd2.0 323.0/299.0 [mm]

Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm]

štěrk 2-4

do

GEOLOGICKÝ POPIS HORNIN A ZEMIN

40.00 36: Hlína,

53.00 44: Písek hlinitý,

57.50 44: Písek hlinitý, s příměsí štěrku

60.50 54: Písek jemně zrnitý,

79.00 45: Písek jílovitý,

110.50 41: Písek dobře zrnitý,

120.00 36: Hlína,

Legenda:

Perforace: PŠ100x štěrbinová, podélná PŠ-xxx štěrbinová, příčná

PVdxxx vrtaná, průměr xxx je velikost štěrbin/otvoru v mm

Poznámka:

.

.

.

.

.

.

.

.

.

.

Název akce: Bela Crkva - Srbsko, Zásobování pitnou vodou

Měřítko: 1: 700

Zak. číslo: 140 045

Dokumentoval: Ing. Zdeněk Formánek

Vyhodnotil a Zpracoval: Ing. Vítězslav Dvořák

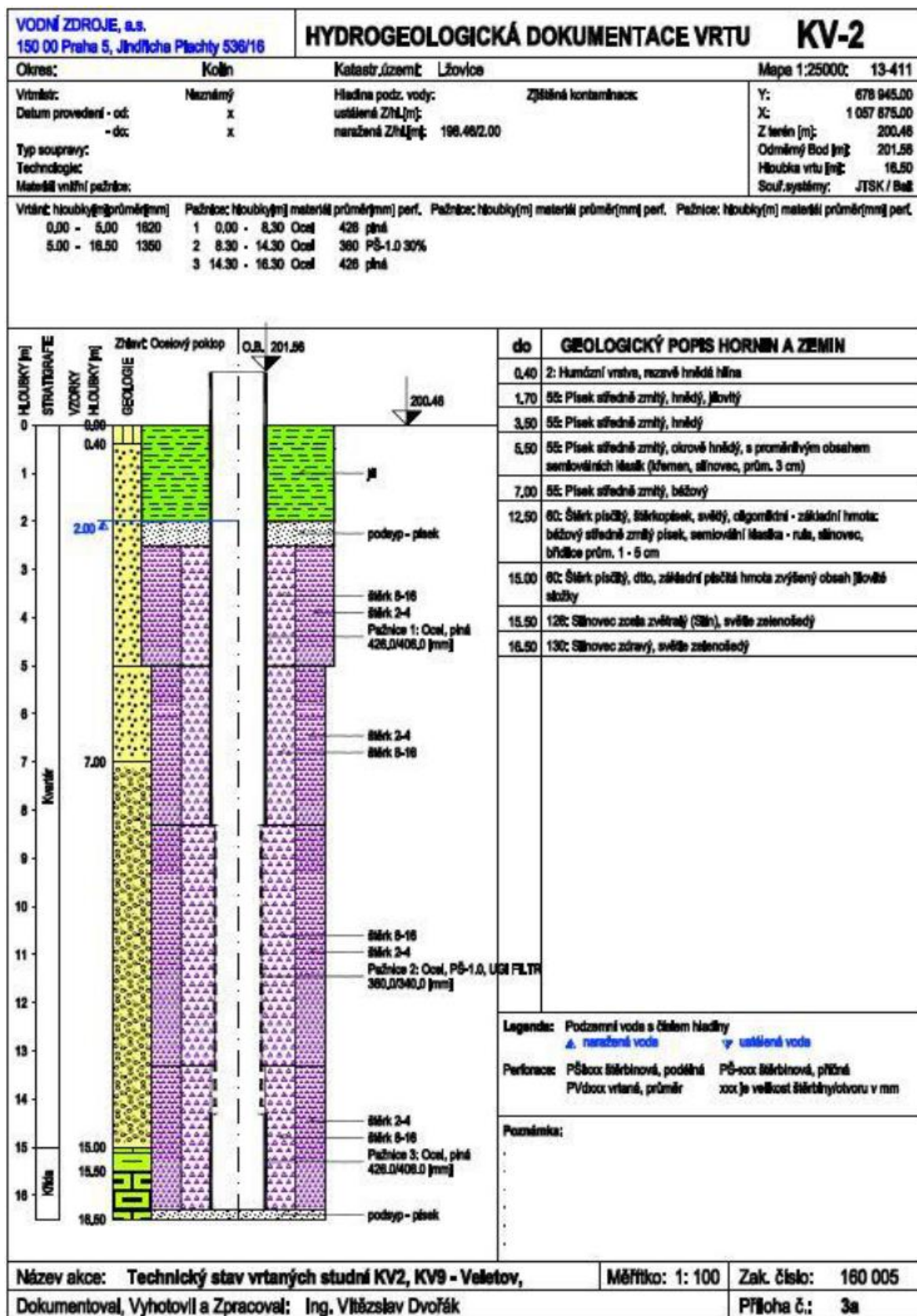
Příloha č.: B3

Příloha C

VODNÍ ZDROJE, a.s. 150 00 Praha 5, Jindřicha Plachty 536/16		HYDROGEOLOGICKÁ DOKUMENTACE VRTU		B6
Okres:	Vojvodina	Katastr.území:	Mapa 1:25000:	
Vrtmistr:	Neznámý	Hladina podz. vody:	Zjištěná kontaminace:	Y: 4 982 782.54
Datum provedení - od:	?	ustálená Z/hl.[m]:		X: 7 524 153.42
- do:	?			Z terén [m]: 102.26
Typ soupravy:	?			Odměrný Bod [m]: 0.63
Technologie:	?			Hloubka vrtu [m]: 120.00
Materiál vnitřní pažnice: Pažnice není			Souř.systémy: Gauss / Jadran	
Vrtání: hloubky[m]průměr[mm] Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf. Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf. Pažnice: hloubky[m] materiál průměr[mm] perf. 0.00 - 120.00 1100 1 0.00 - 48.00 PVC 323 plná 1 110.00 - 111.00 PVC 323 plná 1 48.00 - 58.00 PVC 323 PVd2.0 30% 1 58.00 - 80.00 PVC 323 plná 1 80.00 - 93.00 PVC 323 PVd2.0 30% 1 93.00 - 98.00 PVC 323 plná 1 98.00 - 110.00 PVC 323 PVd2.0 30%				
HLBOUKY [m] STRATIGRAFIE VZORKY HLBOUKY [m] GEOLOGIE		do GEOLOGICKÝ POPIS HORNIN A ZEMIN		
0 7 14 21 28 35 42 49 56 63 70 77 84 91 98 105 112 119		Zhlaví: 1 1 O.B. 102.63 102.26 36: Hlína, ? 60: Štěrk písčitý, ? 44: Písek hlinitý, s příměsí štěrku, ? 54: Písek jemně zrnitý, ? 45: Písek jílovitý, ? 41: Písek dobře zrnitý, ? 36: Hlína, ?		
jíl Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm] Pažnice 1: PVC, PVd2.0 323.0/299.0 [mm] perforace vrtaná Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm] štěrk 2-4 Pažnice 1: PVC, PVd2.0 323.0/299.0 [mm] perforace vrtaná Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm] perforace vrtaná Pažnice 1: PVC, PVd2.0 323.0/299.0 [mm] Pažnice 1: PVC, plná 323.0/299.0 [mm] štěrk 2-4		Legenda: Perforace: PŠxxx štěrblnová, podélná PŠ-xxx štěrblnová, příčná PVdxxx vrtaná, průměr xxx je velikost štěrbliny/otvoru v mm Poznámka: .		
Název akce: Bela Crkva - Srbsko, Zásobování pitnou vodou			Měřítka: 1: 700	Zak. číslo: 140 045
Dokumentoval: Ing. Zdeněk Formánek		Vyhodnotil a Zpracoval: Ing. Vítězslav Dvořák		Příloha č.: B6

Vytvořeno systémem GeProDo, www.geprodo.wz.cz

Příloha D



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

Měřítko: **1: 100**

Zak. číslo: **160 005**

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

Příloha č.: **3a**

Vytvořeno systémem GeProDo, www.geprodo.wz.cz

Příloha E

