

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A  
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



Disertační práce

*Aplikační software pro vyhodnocení parametrů  
reálného vrtu z dat čerpací zkoušky*

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 a popisných informací k čerpacím zkouškám. Dále děkuji všem, co se podíleli na vzniku této práce, za spolupráci na publikační činnosti, konzultace a cenné rady v průběhu celého doktorského studia.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: Aplikační software pro vyhodnocení parametrů reálného vrtu z dat čerpací zkoušky 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 hydraulické parametry zvodně řadíme transmisivitu a storativitu zvodně, kdy tyto dva hydraulické parametry charakterizují vlastnosti zvodnělého prostředí. Pro jejich vyhodnocení se používají metody odvozené z klasického Theisova modelu proudění. 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

Čerpací 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. 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 the 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
Úvod.....	10
1. Literární rešerše .....	12
1.1. Základní popis horninového prostředí a jeho fyzikální charakteristiky ve vztahu k podzemním vodám .....	12
1.1.1. Podzemní voda .....	12
1.1.2. Klasifikace zvodně .....	12
1.1.3. Pórovitost.....	13
1.1.4. Propustnost .....	13
1.1.5. Hydraulická vodivost.....	14
1.1.6. Transmisivita .....	14
1.1.7. Storativita .....	15
1.1.8. Homogenita a anizotropie horninového prostředí .....	16
1.2. Základní fyzikální popis pohybu vody v horninovém prostředí .....	16
1.2.1. Darcyho zákon.....	16
1.2.2. Omezení platnosti Darcyho zákona.....	18
1.2.3. Ustálené (stacionární) proudění podzemní vody .....	20
1.2.4. Dupuitovy postuláty .....	22

1.2.5. Neustálené proudění podzemní vody .....	22
1.3. Proudění podzemní vody k vrtu .....	24
1.3.1. Hydrodynamické zkoušky .....	24
1.3.2. Neustálené rotačně symetrické proudění .....	26
1.3.3. Neustálené proudění k ideálnímu vrtu.....	27
1.4. Proudění podzemní vody v kontextu reálného vrtu .....	30
1.4.1. Storativita vrtu .....	30
1.4.2. Dodatečné odpory.....	36
1.4.3. Rovnice popisující proudění ke skutečnému vrtu .....	43
1.4.4. Stehfestův algoritmus .....	44
1.5 Dostupný software pro modelování .....	45
2. Cíle práce .....	47
3. Metodika .....	49
3.1 Data z čerpacích zkoušek .....	49
3.1.1 Specifikace terénních dat.....	49
3.2 Metodika vývoje aplikačního softwaru .....	50
3.2.1 Programovací jazyk .....	50
3.2.2 Vývojové prostředí .....	51
3.2.2 Databázová vrstva .....	51
3.2.3 Grafické rozhraní.....	51
3.3 Metodika stanovení hydraulických parametrů vrtu.....	52
3.3.1 Základní parametry vrtu .....	52
3.3.2 Parametr storativity vrtu .....	52
3.3.3 Parametr dodatečných odporů .....	53
3.3.4 Metodika validace provedených vyhodnocení .....	53
3.4 Využití datové sady a užitý software.....	54

4. Výsledky .....	55
4.1 Aplikační software .....	55
4.1.1 Systémové požadavky aplikace ze strany klienta.....	56
4.1.2 Parametry webového hostingu .....	57
4.1.3 Struktura aplikace .....	58
4.1.4 Datový model aplikace .....	58
4.1.5 Základní popis aplikace .....	59
4.1.6 Výpočetní moduly .....	61
4.2 Stanovení hydraulických parametrů vrtu pomocí aplikace RadFlow .....	62
4.2.1 Čerpací zkoušky, lokalita Bela Crkva .....	62
4.2.2 Regenerace jímacích objektů, lokalita Bela Crkva.....	65
4.2.3 Vyhodnocení základních parametrů na vrtu B1 a B6.....	66
4.2.4 Zhodnocení výsledků základních hydraulických parametrů vrtů B1 a B6.....	71
4.2.5 Vyhodnocení parametrů reálného vrtu .....	72
4.2.6 Validace parametrů skutečného vrtu .....	75
4.2.7 Vyhodnocení čerpací zkoušky na vrtech před provedením regenerace .....	80
4.2.8 Čerpací zkoušky, lokalita Veletov .....	83
4.2.9 Základní popis lokality Veletov .....	84
4.2.10 Vyhodnocení základních hydraulických parametrů na vrtech KV-2 a KV-9 ...	88
4.2.11 Vyhodnocení parametrů skutečného vrtu na vrtech KV-2 a KV-9 .....	90
4.2.12 Zhodnocení parametrů skutečného vrtu, lokalita Veletov .....	93
5. Diskuze .....	95
6. Závěr .....	97
7. Seznam literatury .....	99
8. Souhrny .....	105
8.1 Seznam vzorců .....	105



8.2 Seznam obrázků .....	108
8.3 Seznam tabulek .....	111
8.4 Seznam použitých symbolů.....	112
9. Přílohy.....	115
10. Granty a publikované práce .....	140
10.1 Granty.....	140
10.2 Autorské vědecké výstupy .....	140

# 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. Relevantní popis horninového prostředí je také zásadní v návaznosti na řešení řady klíčových témat týkajících se ochrany vodních zdrojů a s tím související zajištění dlouhodobé udržitelnosti využívání. Zásadní význam má také popis horninového prostředí při realizaci stavebních projektů a k jejich ochraně, dále bych zde uvedl činnosti související s touto problematikou a to například těžbu nerostných surovin a využívání geotermálních zdrojů. 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 nižším 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. Čerpací zkouška patří mezi základní v praxi využívané metody pro stanovení hydraulických charakteristik zvodně. Mezi hlavní vyhodnocované parametry zvodně 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 v nejvyšší možné míře 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 vyhodnocení parametrů reálného vrtu z dat čerpací zkoušky. Předmětem modelování je stanovení dodatečných hydraulických parametrů reálného vrtu, tedy dodatečných odporů a vlivu vlastního objemu vrtu z dat čerpací zkoušky. K tomuto účelu autor práce sestavil aplikační program, který je jedním z hlavních výstupů práce. Výsledné výpočetní moduly aplikace jsou založeny na grafo-analytických metodách pro odhad parametrů skutečného vrtu a analytickém řešení proudění podzemní vody k vrtu s vlivem dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu. V úvodní části disertační práce se autor věnuje přehledu 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. Další kapitoly disertační práce jsou věnovány určení cílů práce, metodice zpracování a dosaženým výsledkům, 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.

# 1. Literární rešerše

## 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 zvodně

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*).

Zvodně 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 zvodně na tyto kategorie:

#### a) Zvodně 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) Zvodně 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) Zvodně 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 zvodně 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 (zeminy) 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  $K$  patří mezi základní hydraulické charakteristiky zvodně. 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 [ $L^2$ ],  $\rho$  hustota kapaliny [ $M.L^{-3}$ ],  $g$  představuje gravitační zrychlení [ $L.T^{-2}$ ] a  $\mu$  dynamická viskozita, kterou můžeme vyjádřit jako součin hustoty a kinematické viskozity [ $M.L^{-1}.T^{-1}$ ] (*Valentová, 2007*).

### 1.1.6. Transmisivita

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

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

kde  $K$  je hydraulická vodivost [ $L.T^{-1}$ ],  $b$  výška zvodnělé vrstvy [ $L$ ] a  $T$  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  $\alpha$  stlačitelnost zvodnělé vrstvy,  $\rho$  [ $M.L^{-3}$ ] hustota kapaliny a  $g$  představuje gravitační zrychlení [ $L.T^{-2}$ ]

a druhý člen:

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

kde  $\beta_v$  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 [ $L^{-1}$ ]

Storativita  $S$  je definována vztahem:

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

kde  $b$  výška kolektoru [L], storativita je definována jako objem vody uvolněný z objemu výšky  $b$  s plochou postavy rovné  $1 \text{ m}^2$  při jednotkovém poklesu piezometrické výšky (*Freeze at Cherry, 1979*).

### **1.1.8. Homogenita a anizotropie horninového prostředí**

Jestliže hodnota hydraulické vodivosti  $K$  je pro celý kolektor konstantní, můžeme dané prostředí 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 izotropním 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 publikoval francouzský inženýr Henry Darcy v roce 1856, stanovil závislost mezi proteklým množstvím vody  $Q$  [ $\text{L}^3\text{T}^{-1}$ ], které se přímo úměrně zvětšuje s rozdílem hydraulických výšek, plochou průtočného průřezu, hydraulickou vodivostí a nepřímo úměrně s délkou  $L$ , kde byly měřeny hodnoty hydraulické výšky. Tento vztah vyjádřil rovnicí:



$$Q = K S_a \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (2.1)$$

Nasyčená hydraulická vodivost  $K$  je základní charakteristika porézního prostředí, má rozměr rychlosti  $[L.T^{-1}]$  a  $S_a$  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  $S_a$ , po vydělení těchto hodnot obdržíme hustotu toku  $v$ . Hustota toku je označována jako Darcyho rychlost a má rozměr rychlosti  $[L.T^{-1}]$  (*Valentová, 2007*).

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

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 efektivních pórů  $S_n = n_e S_a$ . Skutečnou rychlost  $v_{sk}$   $[L.T^{-1}]$  vyjádříme ze vztahu:

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

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 skutečně pohybuje 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 trojrozměrného heterogenního anizotropního proudění rychlost  $v$  [ $L \cdot T^{-1}$ ] rozepisujeme po složkách, kde  $xyz$  reprezentují osy souřadného systému.

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

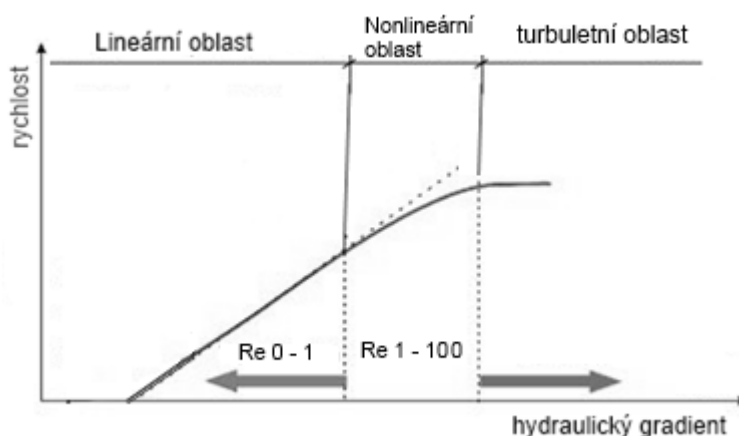
kde  $K$  pro jednotlivé složky tvoří tenzor hydraulické vodivosti (*Freeze, Cherry, 1979*).

### 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

Reynoldsovým 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 hrubozrnné 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 [ $L.T^{-1}$ ],  $\nu$  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.

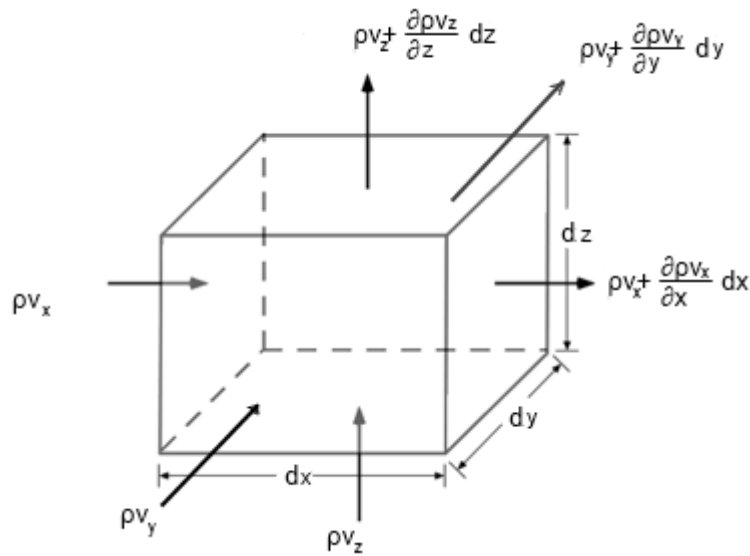
### 1.2.3. Ustálené (stacionární) proudění podzemní vody

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 dle zákona zachování hmoty (kontinuity) při tomto režimu proudění je množství přitékající vody do elementárního objemu rovno hmotě vody, která 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  $\rho$  je hustota kapaliny. Pokud označíme danou kapalinu za nestlačitelnou, pak platí, že funkce  $\rho(x,y,z)$  je konstantní. Výše uvedenou rovnicí 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 rovnici 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 změna rychlosti a hustoty proudící kapaliny v elementárním

objemu se rovná časové změně objemu kapaliny uvnitř elementu. Pomocí rovnice kontinuity můžete tuto skutečnost vyjádřit vztahem:

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

kde  $n$  je pórovitost materiálu. Víme, že změna hustoty  $\rho$  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  $\rho$  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 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 vyjádřením 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:  $K$ ,  $\alpha$ , a  $n$ , dále parametrů kapaliny  $\rho$  a  $\beta_v$ . 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  $T = K b$  [ $L^2 \cdot T^{-1}$ ]. 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 (vrtu) odebírá konstantní množství vody nebo se udržuje konstantní snížení a zaznamenává se reakce zvodně ve smyslu poklesu hladiny podzemní vody nebo tlaku na pozorovaném objektu. Čerpací zkoušku můžeme rozdělit dle režimu proudění podzemní vody:

1a) Čerpací zkouška za ustáleného režimu proudění, kdy se jedná o nejjednodušší způsob vyhodnocení hydraulických parametrů. Při konstantním čerpaném množství vody je dosaženo ustáleného režimu proudění v okolí vrtu. Při samotném vyhodnocení se vychází z Dupuitových předpokladů a rovnice 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:



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

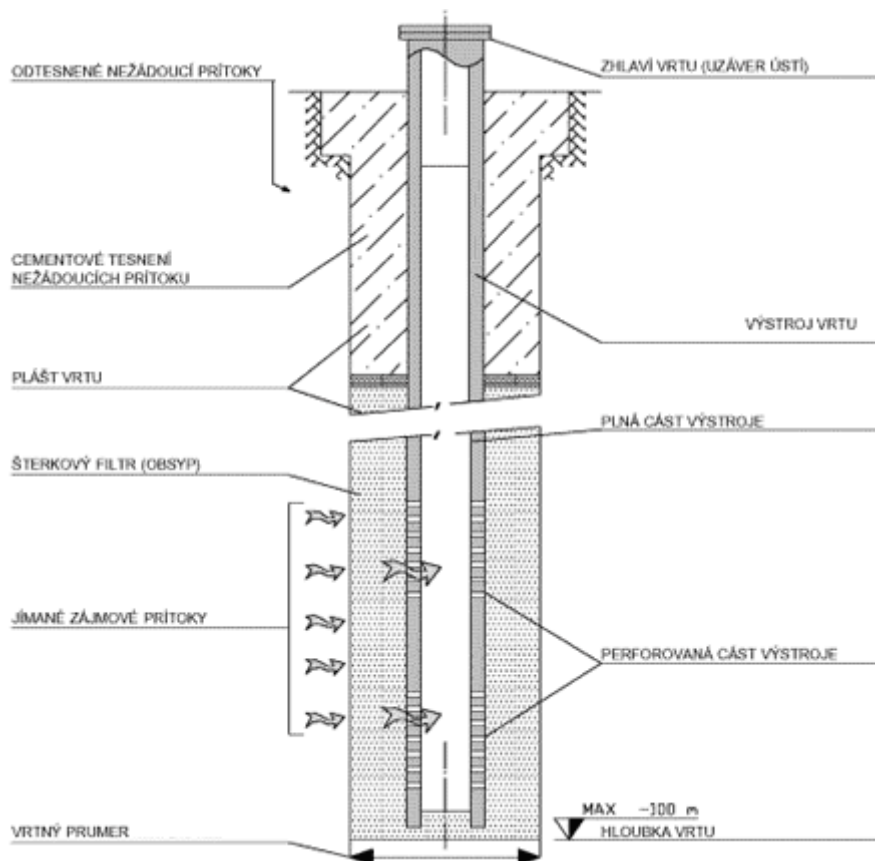
kde  $Q$  [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ] čerpané množství,  $r_d$  [L] je dosah deprese (depresního kuželu) vyvolané odběrem ze zvodně a  $r_v$  [L] je poloměr hydraulicky dokonalého vrtu,  $s_v$  je snížení ve vrtu [L].

1b) Čerpací zkouška za neustáleného režimu proudění. Z vrtu je čerpáno konstantní množství podzemní vody nebo se udržuje konstantní snížení a ve stanovených časových intervalech je měřen pokles hladiny vody v čerpaném objektu. V případě potřeby stanovení storativity zvodně je nutné zaznamenat snížení hladiny pozemní vody, které je vyvoláno odběrem vody z čerpaného vrtu na pozorovacím objektu. Základní fyzikální popis neustáleného režimu proudění ke studni formulovat Theis (1935) a 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  $u = r^2 S / T (t_p + t)$ ,  $u_s = (r^2 S / T t)$ , 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 (Technika a technologie hlubinného vrtání, [online]).

### 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. Poloha bodu v prostoru je definována průvodičem  $r$  (vzdálenost od osy symetrie), souřadnicí  $z$  určující vertikální osu a úhlem průmětu průvodiče  $\theta$  (Valentová, 2007). Diferenciální rovnice popisující radiálně

symetrické proudění ve zvodnělé vrstvě s napjatou hladinou ve tvaru pro snížení hladiny je (*Theis, 1935*):

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

kde  $S$  je storativita zvodně,  $T$  je transmisivita zvodnělého prostředí [ $L^2.T^{-1}$ ],  $r$  je radiální vzdálenost [L],  $t$  je čas [T] a  $s$  snížení [L].

Tento tvar rovnice nejčastěji používáme při řešení proudění podzemních vod, kde jako hlavní kritérium výpočtu vystupuje snížení hladiny v průběhu hydrodynamické zkoušky (*Theis, 1935; Schwartz and Zhang, 2003*). 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 vody ze studny považujeme proudění za nestacionární, za předpokladu nekonečného kolektoru a stále se zvětšujícího dosahu depresního kužele. Dosah  $r_d$  [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 proudění 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. Níže uvedené řešení bylo odvozeno na základě těchto předpokladů:

- a) Zvodeň je považována za homogenní a izotropní s neomezenou hranicí (v průběhu čerpání není dosaženo nepropustné ani napájecí hranice).
- b) Výška zvodně 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 zvodněná 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  $Q$  [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ] 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:

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

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

Pro hodnoty  $1/u > 100$  s chybou menší než 0.25% lze Theisovu studňovou funkci ve tvaru (3.7) zjednodušit pomocí Jacobovy (Jacob, 1946) aproximace zanedbáním třetího a vyššího členu ve funkci (3.7). Předpis studňové funkce můžeme poté vyjádřit jako:

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

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

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

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

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

Snížení hladiny podzemní vody ve vrtu samotném můžeme vyjádřit jako:

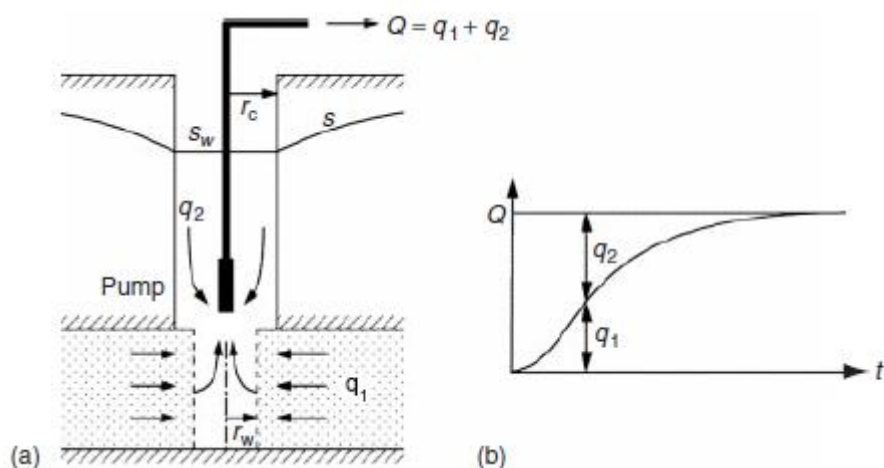
$$s_v = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.246Tt}{r_v^2 S} \quad (3.11)$$

## 1.4. Proudění podzemní vody v kontextu reálného vrtu

Za reálný vrt označujeme objekt, kde dodatečné odpory ve vrtu a jeho okolí 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 odčerpávaných 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 (*Papadopulos and Cooper, 1967; Moench, 1985, Chapuis and Chenaf, 2005*), 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; Streltsova, 1988; Shapiro et al, 1998*), přesto jeho zanedbáním dojde k nadhodnocení hodnoty storativity, přestože vlastní objem vrtu ovlivňuje hodnoty snížení jen na počátku čerpací zkoušky (*Black and Kipp, 1977; Narasimhan and Zhu, 1993*).



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 porézního prostředí (Renard, 2006). b) Časový průběh jednotlivých složek čerpaného množství  $Q$  (Renard, 2006).

Odpovídající řešení vlivu vlastní zásoby vody ve 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  $s$  byl popsán Papadopoulos and Cooper (1967), definujeme ve tvaru:

$$s(t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u, \alpha) \quad (4.1)$$

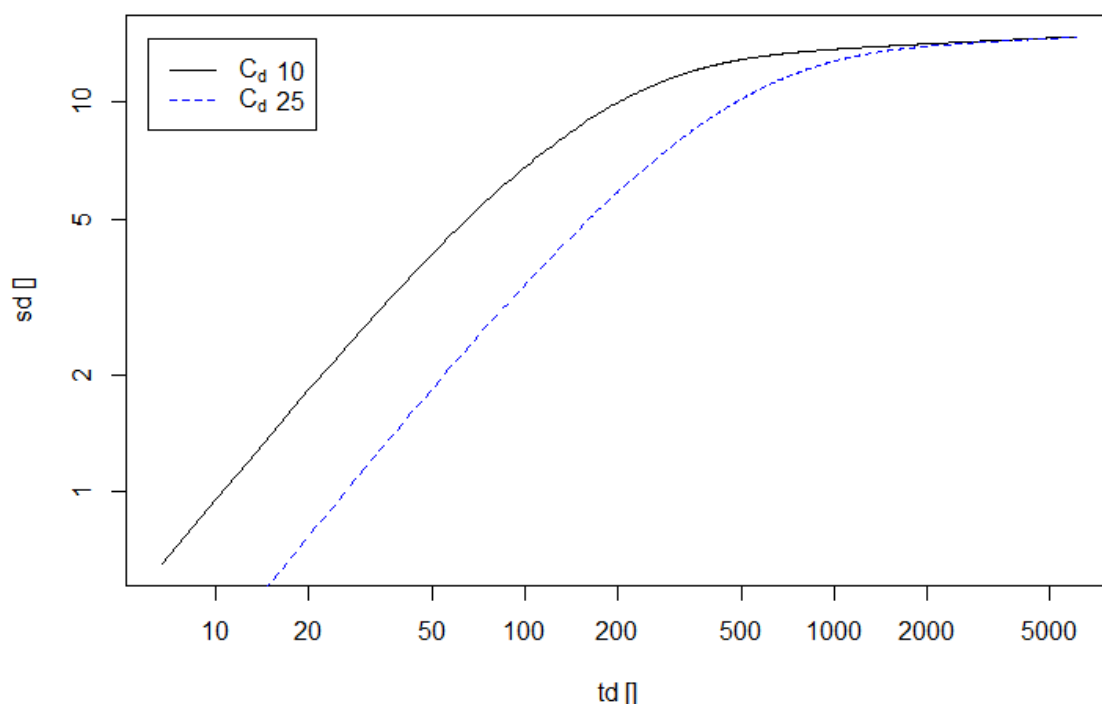
$$W(u, \alpha) = 32 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 \int_0^\infty \frac{1}{\beta^3 \Delta(\beta)} \exp\left(-\frac{\beta^2}{4u}\right) d\beta$$

kde

$$\Delta\beta = [\beta J_0(\beta) - 2\alpha J_1(\beta)]^2 + [\beta K_0(\beta) - 2\alpha K_1(\beta)]^2$$

$$\alpha = \left(\frac{r_p}{r_c}\right)^2 S$$

kde  $u$  je argument Theisovy studňové funkce,  $\alpha$  druhý bezrozměrný argument studňové funkce,  $r_c$  je poloměr neperforované části vrtu [L], tato část je umístěna nad jímací částí vrtu,  $r_p$  je poloměr výstroje vrtu [L] a  $\beta$  integrační proměnná.  $J_0$  and  $J_1$  jsou modifikované Besselovy funkce prvního druhu a nultého respektive prvního řádu,  $K_0$  and  $K_1$  jsou modifikované Besselovy funkce druhého druhu a nultého respektive prvního řádu.



Obr.: 5. Graf ukazující vliv storativity vrtu na průběh snížení v bezrozměrných jednotkách a logaritmickém měřítku při zanedbání vlivu dodatečných odporů ( $C_a$  je bezrozměrná storativita vrtu).

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 (Papadopulos and Cooper, 1967):



$$t_s = 250 (r_c^2 - r_p^2) / T \quad (4.2)$$

a pro pozorovací vrt:

$$t_s = 2500 (r_c^2 - r_p^2) / T \quad (4.3)$$

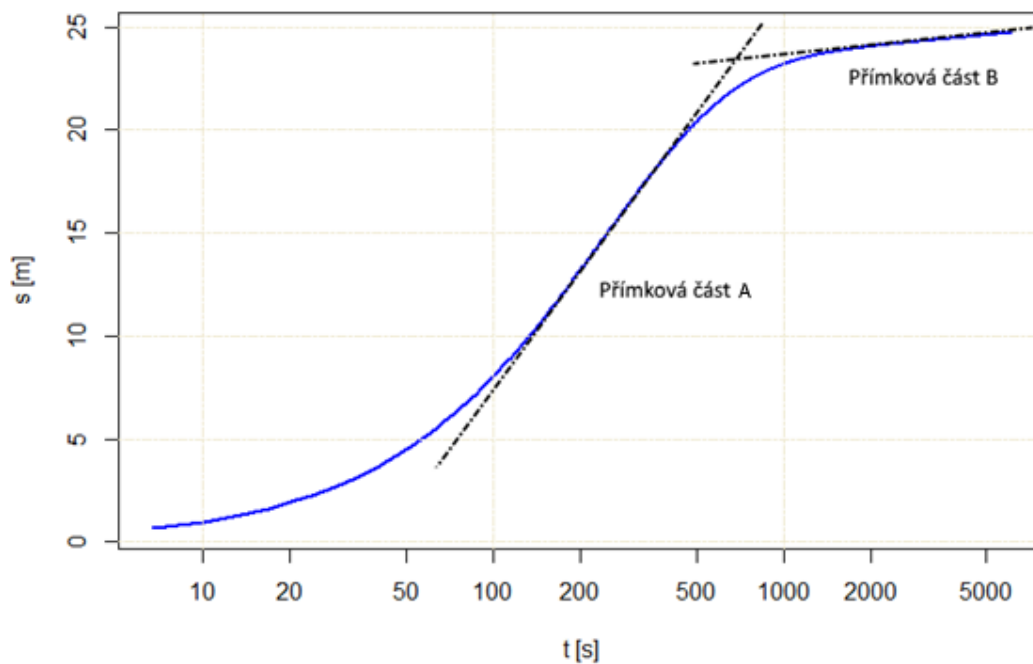
kde  $r_c$  je poloměr neperforované části vrtu [L], tato část je umístěna nad jímací částí vrtu a  $r_p$  je poloměr výstroje vrtu [L].

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

$$C_d = \frac{C}{2\pi r_v^2 S} \quad (4.4)$$

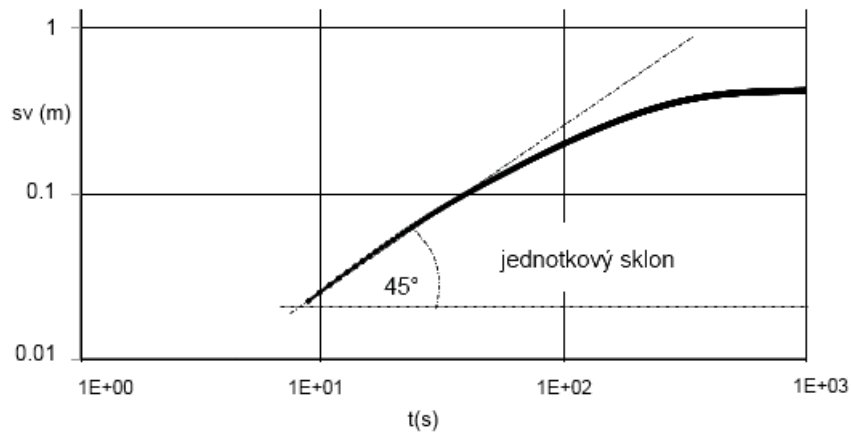
kde  $r_v$  je poloměr vrtu,  $S$  storativita zvodně a  $C$  jednotkový faktor storativity vrtu.

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. 6) čerpací zkoušky ovlivňují hodnoty vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů (*Garcia-Rivera and Raghavan, 1979; Tiab, 1995; Park et al., 2002; Pech, 2003; Chen and Lan, 2009*). Validní vyhodnocení zkoušky pomocí metod založených na Theisově modelu (Jacobova metoda přímky) se provádí na druhé přímkové části *B* (obrázek č. 6) semilogaritmického grafu snížení hladiny podzemní vody, která již není zatížena vlivem čerpání vody z 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. 7.



Obr.: 6. Ilustrativní tvar křivky reprezentující průběh snížení na vrtu s vlivem vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů. První přímková část A definuje úsek s vlivem vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů, druhá přímková část označená B slouží k vyhodnocení základní parametrů dle Jacobovy semilogaritmické metody přímky.

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



Obr.: 7. Jednotkový sklon na počátku čerpací zkoušky po vynesení do grafu  $\log sv$  vs.  $\log t$ , kde  $sv$  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 (Ramey, 1970):

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta h} \quad (4.5)$$

kde  $\Delta V$  je objemová změna a  $\Delta h$  je změna výšky hladiny ve vrtu.

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

$$Q_p = Q - C \frac{ds_v}{dt} \quad (4.6)$$

kde  $Q$  [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ] je celkové čerpané množství a  $Q_p$  [ $L^3 \cdot T^{-1}$ ] přítékající množství podzemní vody za jednotku času ze zvodně

Pro samotný začátek čerpací zkoušky, který je charakterizován jednotkovým sklonem, kdy čerpaný objem pochází z vlastního objemu vrtu a nikoliv ze zvodně, můžeme uvažovat  $Q_p$  za nulové. Po aplikaci  $Q_p/Q = 0$  do rovnice (4.6) dostaneme vztah:

$$1 - C_d \frac{ds_d}{dt_d} = 0 \quad (4.7)$$

Po následné úpravě rovnice (4.7) lze jednotkový faktor storativity vrtu definovat jako:

$$C = Q \frac{t_j}{s_j} \quad (4.8)$$

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

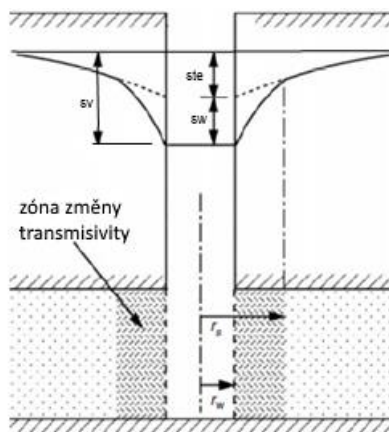
### 1.4.2. Dodatečné odpory

Zaznamenané snížení na vrtu v průběhu čerpací zkoušky může být ovlivněno dodatečnými odpory. Oblast výskytu těchto dodatečných odporů je lokalizována v okolí stěny vrtu, kde způsobuje změnu v propustnosti porézního materiálu. Tato oblast může vykazovat nižší, ale také vyšší propustnost než samotná zvodeň. 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 výsledné pozorované snížení hladiny podzemních vody ve vrtu způsobuje oblast v těsném okolí vrtu a na stěně vrtu. Oblast výskytu dodatečných odporů zpravidla nepřesahuje vzdálenost 6 m od osy vrtu (Van Everdingen, 1953; Rovey and Niemann, 2001; Barrash et al., 2006) a 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. 8.

Tento vztah můžeme vyjádřit jako:

$$S_v = S_{te} + S_w \quad (4.9)$$

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.: 8. Snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory (Renard, 2006).

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

$$s_w = \frac{Q}{2\pi T} W \quad (4.10)$$

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

koeficient dodatečných odporů lze vyjádřit:

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

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 (4.11) upravit na tvar:

$$W = \ln\left(\frac{r_s}{r_w}\right) \quad (4.12)$$

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

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} \quad (4.13)$$

Hodnotu dodatečných odporů lze také stanovit pomocí grafických metod z dat čerpací zkoušky (*Streltsova, 1988*). Vyhodnocení se provádí pomocí sklonu druhého přímkového úseku snížení hladiny podzemní vody, funkce  $s(t)$ . V případě krátkodobé čerpací zkoušky, během níž není dosaženo druhého přímkového úseku tento postup nelze aplikovat (*Chen and Lan, 2009; Ni et al., 2011*).

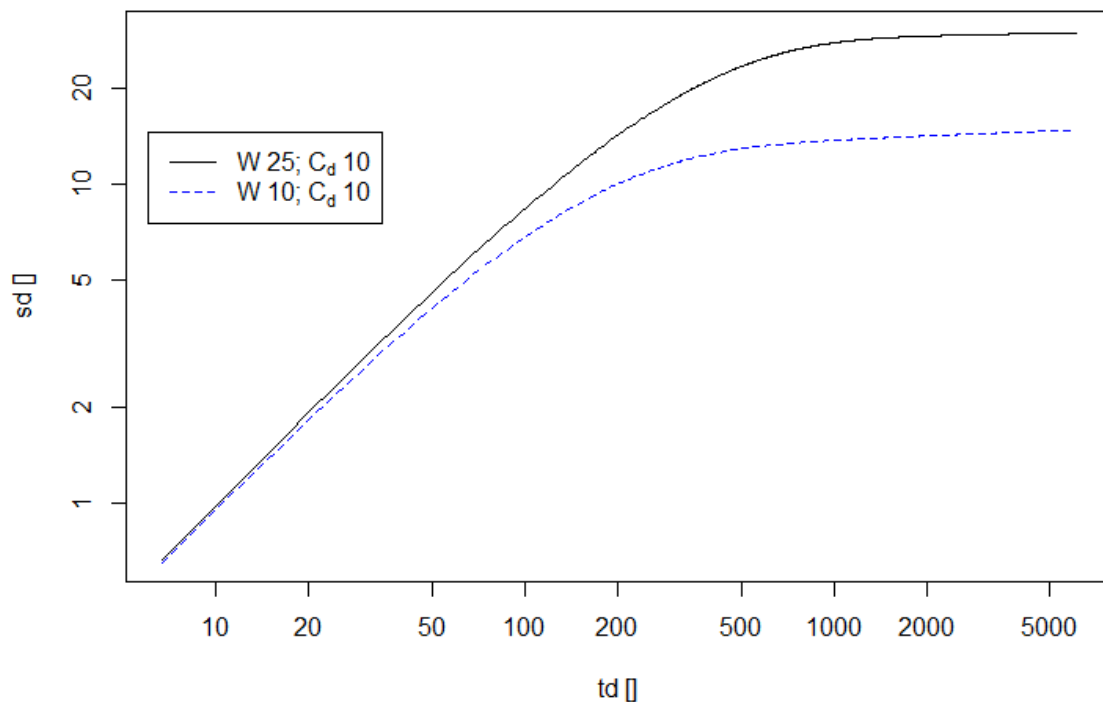
$$W = 1.1513 \left[ \frac{s(1)}{\Delta s} - \log \frac{2.246T}{Sr_w^2} \right] \quad (4.14)$$

kde  $s(1)$  je hodnota snížení hladiny v jedné minutě,  $\Delta s$  je sklon druhé přímkové části grafu snížení  $s(t)$ .

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 (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 a ve 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

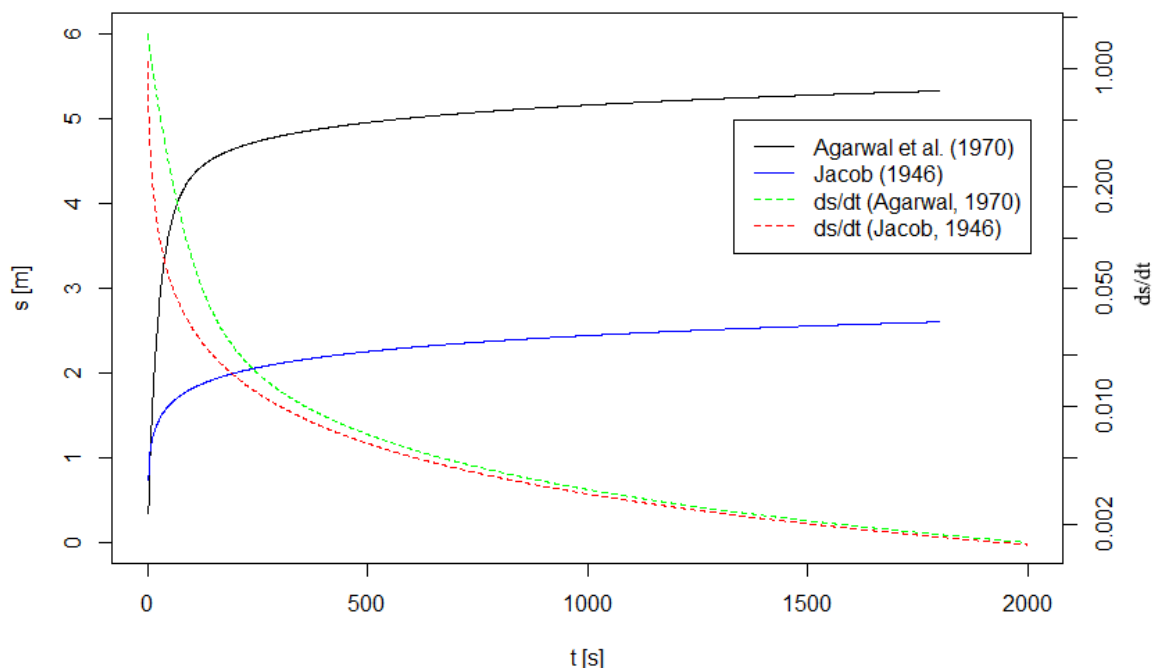
Díky velkému množství faktorů, které definují výslednou hodnotu dodatečných odporů, je obtížné jejich přesné dílčí určení, z toho důvodu se často zavádí sumární vyjádření celkového snížení všech dodatečných odporů  $s_w$ , které reprezentuje část snížení přímo ovlivněnou výskytem dodatečných odporů.



Obr.: 9. Graf ukazující vliv dodatečných odporů na průběh snížení v bezrozměrných jednotkách a logaritmickém měřítku při uvažování vlivu storativity vrtu ( $C_d = 10$ ).

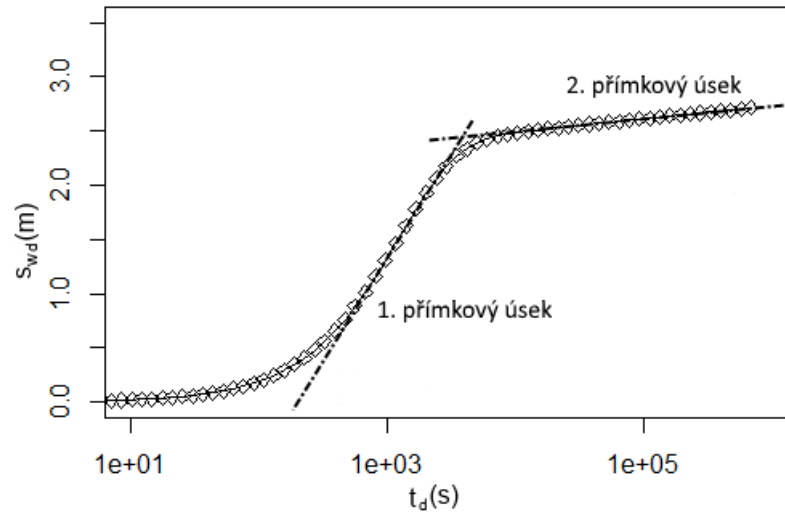
Při vyhodnocování hydrodynamických zkoušek pomocí Jacobovy aproximace bylo prokázáno, že výskyt dodatečných odporů nemá na vyhodnocené hodnoty transmisivity  $T$  vliv. V počáteční fázi se řešení publikované v Agarwal et al. (1970) shoduje s řešením Papadopulos and Cooper (1967), kde bylo uvažováno pouze 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 (obrázek č. 10) pro vyhodnocení pomocí Jacobovy semilogaritnické metody.





Obr.: 10. Průběh snížení hladiny podzemní vody vycházející z modelu Agarwal et al. (1970), který zahrnuje vliv parametrů skutečného vrtu a snížení za podmínek ideálního vrtu (Jacob, 1946).

Po vynesení závislosti bezrozměrného snížení hladiny vs. bezrozměrný čas můžeme v semilogaritmickém grafu rozlišit dva přímkové úseky, jak ukazuje obrázek č. 11. Na tuto skutečnost již upozornili Rivera a Raghavan (1979) při vyhodnocování zkoušek na naftových vrtech. První přímkovou část na počátku čerpací zkoušky ovlivňuje čerpání vlastního objemu vrtu a také dodatečné odpory. Jak bylo prokázáno, vlivem těchto faktorů dochází ke změně měřených hodnot snížení hladiny podzemní vody oproti hodnotám, které vycházejí z teoretického snížení hladiny podzemní vody (Theisův model). Tudíž je tato přímková část nevhodná pro vyhodnocení pomocí metod, které byly odvozeny z předpokladů ideálního vrtu (např. Jacobova semilogaritmická metoda přímky). Pro tento účel je nutné využít až druhý přímkový úsek, který už není těmito jevy zatížen.



Obr.: 11. Bezrozměrné snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory a vlastním objemem vrtu

Bezrozměrný sklon první přímkové části v semilogaritmickém grafu čerpací zkoušky můžeme označit jako (Pech, 2010):

$$i_{zd} = \frac{2\pi T i_z}{Q} \quad (4.15)$$

kde  $i_z$  je sklon prvního přímkového úseku.

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

$$i_{zd} = 0.86W + 1.0127(\log C_d) + 1.0237 \quad (4.16)$$

kde  $C_d$  je bezrozměrný koeficient storativity vrtu a  $W$  je bezrozměrný koeficient dodatečných odporů

Po dosazení za  $i_{zd}$  pak dostáváme vztah pro dodatečné odpory v podobě:

$$W = \frac{1}{0.86} \left( \frac{2\pi T i_z}{Q} - 1.027 (\log C_D - 1.0237) \right) \quad (4.17)$$

### 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 naměřené snížení na vyhodnocovaném vrtu, které vzniká jako odezva na čerpání podzemní vody z 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, s uvažovaným vlastním objemem vrtu a dodatečnými odpory můžeme vyjádřit ve tvaru (Agarwal *et al.*, 1970; Kabala, 2001):

$$s_{wd}(t_d) = L^{-1} \left\langle \frac{K_0(\sqrt{p}) + W\sqrt{p} K_1(\sqrt{p})}{p(\sqrt{p} K_1(\sqrt{p}) + C_d(K_0(\sqrt{p}) + W\sqrt{p} K_1(\sqrt{p})))} \right\rangle \quad (4.18)$$

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  $C_p$  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 storativity vrtu - wellbore storage a dodatečné odpory - skin effect):

$$C_d = \frac{c}{2\pi r_w^2 S} \quad (4.19)$$

$$W = \frac{2\pi T s_w}{Q} \quad (4.20)$$

Vliv dodatečných odporů na průběh snížení hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu, není zásadní z důvodu velmi nízké rychlosti proudění podzemní vody v okolí vrtu. V řadě aplikací je tedy vliv dodatečných odporů na průběh snížení v pozorovacím vrtu zcela zanedbán. Snížení hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu, homogenním a izotropním kolektoru s najatou hladinou a vlastním objemem vrtu můžeme vyjádřit ve tvaru (Moench, 1997):

$$s_{wd}(\rho, t_d) = L^{-1} \left\langle \frac{K_0(\rho\sqrt{p})/(1+W_{dp}p)}{p(\sqrt{p} K_1(\sqrt{p}) + C_d(K_0(\sqrt{p}) + W\sqrt{p} K_1(\sqrt{p})))} \right\rangle \quad (4.21)$$

$$W_{dp} = \frac{\pi b r_{wo}^2}{r_w^2 C_d F_d}$$

kde  $\rho = r/r_w$  je bezrozměrná radiální vzdálenost ( $r$  v tomto případě odpovídá vzdálenosti pozorovacího vrtu),  $W_{dp}$  je koeficient reflektující vlivu storativity vrtu,  $r_{wo}$  poloměr pozorovacího vrtu a  $F_d = 2\pi b / \ln(R_{ew}/r_{wo})$  je bezrozměrný faktor definovaný (Hvorslev, 1951), kde  $R_{ew}$  efektivní dosah, který je definován vlivem storativity vrtu na pozorovacím vrtu, obvykle nabývá hodnoty 200 (Butler, 1998).

#### 1.4.4. Stehfestův algoritmus

Stehfestův algoritmus je 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, Chen et al., 2012). Stehfestův algoritmus je definován pro  $t > 0$ , pro nalezení Laplaceova obrazu  $F(p)$  lze použít tento aproximativní vzorec:

$$f(t) \approx \left[ \frac{\ln 2}{t} \right] \sum_{i=1}^N V_i F[i(\ln 2)/t] \quad (4.22)$$

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 Laplaceovy transformace  $p$  a  $N$  Stehfestova podmínka, optimální hodnota parametru  $N$  pro modelování čerpací zkoušky je 8 (Walton W. C., 2006), výsledné hodnoty ukazuje tabulka č. 1.

Tabulka č. 1. Hodnoty parametru  $V$  pro  $N = 8$ .

Parametr	Hodnota
V(1)	-0.3333333333D + 00
V(2)	0.4833333333D + 02
V(3)	-0.9060000000D + 03
V(4)	0.5464666667D + 04
V(5)	-0.1437666667D + 05
V(6)	0.1873000000D + 05
V(7)	-0.1194666667D + 05
V(8)	0.2986666667D + 04

## 1.5 Dostupný software pro modelování

Vyhodnocením hydrodynamických zkoušek se zabývá řada aplikačních softwarů, zde bych uvedl jejich základní výčet, stručný popis a možnosti využívání. Hlavním kritériem při výběru nástrojů byla možnost vyhodnocení hydrodynamických zkoušek s vlivem parametrů skutečného vrtu.

Tabulka č. 2. Výchet hlavních dostupných nástroj (softwarů) pro vyhodnocení čerpací zkoušky.

<b>Název aplikace</b>	<b>Základní popis funkcionality</b>	<b>Možnosti využívání</b>
AQTESOLV <i>www.aqtesolv.com</i>	Nástroj umožňuje vyhodnocení čerpacích zkoušek včetně vlivu dodatečných odporů a vlivu vlastního objemu vrtu. Jedná se o pokročilý program s dlouholetou kontinuální podporou a vývojem.	Aplikaci je možné vyzkoušet v demoverzi. Pro další používání je nutné přejít na zpoplatněnou verzi “Standard” nebo “Pro”. Více na stránkách aplikace.
AquiferWin32 <i>www.groundwatersoftware.com/aquiferwin32.htm</i>	Aplikace umožňuje zpracování dat z čerpací zkoušky, včetně vlivu vlastního objemu vrtu.	Opět možnost vyzkoušet aplikaci v demoverzi, následné využívání jen za úplaty.
AquiferTest <i>https://www.waterloohydrogeologic.com/aquifertest/</i>	Od verze 4. možnost vyhodnocení skutečných parametrů vrtu dle (Agarwal et al., 1970).	Komerčně licencovaný software.

## 2. Cíle práce

Před zahájením vlastní práce došlo k syntéze vědeckých výsledků, které se zabývají problematikou proudění podzemních vod v podobě literární rešerše. Tento prvotní cíl práce autorovi poskytl základní vhled do řešené problematiky. Dalším cílem práce bude ověření možnosti vyhodnocení parametrů skutečného vrtu z počáteční části čerpací zkoušky, kde je dominantní vliv parametru storativity vrtu na měřené snížení hladiny podzemní vody ve vrtu a jeho nejbližším okolí a ověření možnosti využití metody při vyhodnocování krátkodobých čerpacích zkoušek v praxi. Tato problematika se také stala součástí výsledků řešeného projektu TAČR s názvem: Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR (projekt byl řešen v období 01/2012 - 12/2015). Projekt v obecnosti řešil problematiku hydrodynamických zkoušek, avšak v průběhu řešení disertační práce se ukázalo, že implementace postupů pro vyhodnocování hydrodynamických zkoušek je příliš obsáhlá. Z toho důvodu se při stanovování cílů zaměřím pouze na jednu skupinu hydrodynamických zkoušek, konkrétně na zkoušku čerpací. Po vyhodnocení parametrů skutečného vrtu bude následovat validace dosažených výsledků. Jako způsob validace, jejichž cílem bude posouzení možnosti využití metody založené na analýze počáteční fáze čerpací zkoušky, byla zvolena parametrizace analytické funkce (*Agarwal et al., 1970*), která popisuje průběh snížení hladiny podzemní vody s vlivem parametrů skutečného vrtu a odečet z dodatečného snížení hladiny podzemní vody oproti hodnotám vycházející z Theisova modelu proudění. Pro účely vyhodnocení parametrů vrtu bude autorem práce sestaven aplikační software, který se zabývá vyhodnocením dodatečných odporů a storativity vrtu z dat čerpacích zkoušek.

Hlavním přínosem práce je představení možnosti vyhodnocení parametrů skutečného vrtu z počáteční fáze čerpací zkoušky na reálných terénních datech, validace a zhodnocení výsledků této techniky v kontextu ostatních metod pro určení parametrů skutečného vrtu. Dalším přínosem práce je vytvoření aplikačního nástroje, který bude umožňovat stanovení parametrů skutečného vrtu a nabídne zde prezentované metody běžným uživatelům, kteří budou moci analytické postupy využívat bez hlubších znalostí dané problematiky. Samotná aplikace by se měla skládat z řady modulů, které budou odvozeny z analytického řešení

snížení hladiny podzemní vody, včetně vlivu parametrů skutečného vrtu. Moduly aplikace by měly zahrnovat metody vyhodnocení základních parametrů pomocí graficko-analytických technik s důrazem na stanovení parametrů skutečného vrtu. Cíle práce jsou následující:

- 1) Zpracování podrobné literární rešerše zabývající se problematikou neustáleného proudění podzemní vody se zaměřením na radiálně symetrické proudění k reálným vrtům.
- 2) Využít klasické metody určení transmisivity a storativity zvodně ve zpracovávaném softwaru.
- 3) Sestavit model počátečního úseku čerpací zkoušky (tj. před dosažením Jacobova semilogaritmického úseku).
- 4) Řešit počáteční část čerpací zkoušky tak, aby jí bylo možné použít k vyhodnocení storativity vrtu a koeficientu dodatečných odporů i bez znalosti Jacobovy semilogaritmické části.
- 5) Sestavit aplikační software, odladit a provést vyhodnocení parametrů skutečného vrtu z počátečního úseku čerpací zkoušky před a po regeneračním zásahu tam, kde je k dispozici i Jacobův semilogaritmický přímkový úsek a provést porovnání výsledků.
- 6) Zpracovat grafické uživatelské prostředí (GUI) pro aplikační software.



## 3. Metodika

### 3.1 Data z čerpacích zkoušek

Hydrodynamická zkouška patří mezi nejběžnější metody průzkumu hydrogeologických vrstev, hlavním účelem je poskytnutí relevantních informací o fyzikálních parametrech prostředí na zkoumaném území (*Kříž, 1983*). Výsledkem čerpací zkoušky je odezva zvodně v podobě snížení hladiny podzemní vody na množství čerpané vody. Pro možnost vyhodnocení základních hydraulických parametrů pomocí Jacobovy semilogaritmické metody přímky je nutné zajistit dodržení všech předpokladů, za kterých byla metoda odvozena, například dodržení konstantního čerpaného množství po celou dobu průběhu zkoušky, jde o základní předpoklad neustáleného modelu proudění podzemní vody k vrtu (*Theis, 1935*). 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.

#### 3.1.1 Specifikace terénních dat

Pro stanovení parametrů skutečného vrtu pomocí vyhodnocení první přímkového úseku (někdy označovaný jako Agarwalovský úsek) 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 zvodně. Využitelnost terénních dat je dále limitována volbou délky časového kroku, kdy je potřebné zvolit dostatečně krátký časový krok (sekundový interval) na počátku zkoušky, aby bylo možné určit parametr storativity vrtu, kdy tento jev má dominantní vliv právě na začátku zkoušky (*Papadopoulos and Cooper, 1967*). 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 hladiny podzemní vody při čerpací zkoušce s funkcí vycházející z Thiesova modelu proudění. Pro stanovení hodnoty storativity zvodně je nezbytné také provést měření snížení hladiny podzemní vody na pozorovacím vrtu v závislosti na čase.

## **3.2 Metodika vývoje aplikačního softwaru**

Na základě autorovy 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 je nezbytné zajistit webový hosting a doménu, pod kterou bude aplikace provozována a také přístupná prostřednictvím webového prohlížeče.

Pro vývoj webové aplikace nazvané RadFlow (odvozený z anglické definice pro rotační proudění “Radial flow”) se zdá být nevhodnější metodika vývoje označovaná jako agilní přístup. Tato metodika sestávající s iterativních kroků plnění požadavků na aplikační logiku zajišťuje udržitelný způsob vývoje, který dokáže efektivně reagovat na změny.

### **3.2.1 Programovací jazyk**

Vývoj webových aplikací sebou přináší nutnost volby programovacího jazyka a s tím související platformy. Pro tento účel byl zvolen programovací jazyk PHP (název původně vznikl ze slov “Personal Home Page”). Jedná se o velmi rozšířený programovací jazyk pro tvorbu webových aplikací. Tato skutečnost také usnadňuje výběr webového hostingu. Pro klientské programování je nutné využít jazyk JavaScript, jedná se o interpretovaný programovací jazyk, který je primárně určen pro ovládání a interaktivitu uživatelského rozhraní.

### 3.2.2 Vývojové prostředí

Správná volba vývojového prostředí (někdy označujeme jako IDE z anglického Integrated Development Environment) poskytuje značné zefektivnění vývoje softwaru a usnadňuje práci při vytváření kódu aplikace. Jedná se často o jednoduchou podporu kontroly syntaktických chyb, ale i automatické generování částí kódu s možností ladění aplikace. Všechny zde uvedené požadavky splňuje open source aplikace Visual Studio Code (<https://code.visualstudio.com>) od společnosti Microsoft. Samotný vývoj tedy proběh v této aplikaci, díky řadě zásuvných modulů je možné prostředí optimalizovat pro aktuální potřeby vývoje. Pro úplnost bych zde uvedl, že část aplikace byla také vytvořena pomocí NetBeans IDE verze 8 (<https://netbeans.org>).

### 3.2.2 Databázová vrstva

Jako databázový systém pro uložení uživatelských a systémových dat byl zvolen open source objektově relační databázový systém PostgreSQL, který je volně dostupný na: <https://www.postgresql.org>. Pro administraci databázového serveru byl využíván pgAdmin verze 3 (<https://www.pgadmin.org>), umožňující správu databázového stroje.

### 3.2.3 Grafické rozhraní

Z důvodu výběru webové platformy je nutné použít při tvorbě grafických komponent aplikace značkovací jazyk HTML a CSS pro stylování. Pro usnadnění práce lze využít řadu dostupných knihoven, které celkový vývoj značně zefektivňují. Pro tento účel byla zvolena knihovna Bootstrap (<https://getbootstrap.com>), nabízející celou škálu grafických komponent.

## 3.3 Metodika stanovení hydraulických parametrů vrtu

### 3.3.1 Základní parametry vrtu

Mezi základní parametry zvodně můžeme zařadit storativitu a transmisivitu. Pro jejich stanovení se v praxi běžně používá grafoanalytická Jacobova metoda, jejíž omezení a matematické vztahy můžeme nalézt v teoretické části práce. Tato metoda byla využita ke stanovení výše uvedených základní parametrů v prostředí programu RadFlow. Principem metody je určení sklonu druhého přímkového úseku semilogaritmického grafu snížení hladiny podzemní vody, kde snížení již není ovlivněno vlastní zásobou vody v čerpaném vrtu. K minimalizaci subjektivního proložení přímky bude sloužit statistický ukazatel, který bude možné využít k optimalizaci zvoleného sklonu. Pro určení storativity je nutné změřit snížení hladiny podzemní vody alespoň na jednom pozorovacím vrtu. Z toho důvodu je nezbytné provádět čerpací zkoušky dostatečně dlouho, aby došlo k vytvoření depresního kuželu s patřičným dosahem.

### 3.3.2 Parametr storativity vrtu

Na samotném počátku zkoušky je čerpaný objem vody odebírán převážně z objemu vrtu, tento vliv se s průběhem čerpání snižuje až do stavu, kdy je zcela zanedbatelný. Dle Ramey (1970) byl faktor storativity vrtu definován ve tvaru:

$$C = Q \frac{t_j}{S_j}$$

Pro určení hodnoty faktoru  $C$  je nutné odečíst hodnoty snížení z počáteční fáze zkoušky, která se vyznačuje jednotkovým sklonem na grafu snížení vs. čas (obr. č. 7). Doba trvání jednotkového sklonu se může lišit, obecně se jedná o prvních několik desítek vteřin. V tomto smyslu je vhodné zde zdůraznit potřebu správného nastavení časového intervalu měření a dodržení konstantního odebíraného množství od úplného počátku čerpací zkoušky. Jen dodržení těchto předpokladů může vést k relevantnímu určení hodnoty storativity vrtu. Následně je možné při znalosti storativity určit bezrozměrný koeficient storativity vrtu  $C_d$ ,

který vstupuje do analytického předpisu pro určení bezrozměrného snížení hladiny podzemní dle Agarwal et al., 1970.

### 3.3.3 Parametr dodatečných odporů

Vynesením hodnot snížení hladiny podzemní vody z čerpací zkoušky si můžeme všimnout charakteristických dvou přímkových úseků (obr. č. 11). Průběh první přímkové části semilogaritmického grafu je určen vlivem dodatečných odporů a storativity vrtu. Vzájemný vztah těchto parametrů je rozebrán v Pech (2005). V případě znalosti hodnoty storativity vrtu, která může být například učena z jednotkového sklonu lze hodnotu dodatečných odporů vyjádřit ve tvaru:

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

Tento postup vyhodnocení se přímo nabízí pro vyhodnocení krátkodobých čerpacích zkoušek, kde není dosaženo druhého přímkového úseku a účelem vyhodnocení je například jen ověření provedeného regeneračního zásahu.

### 3.3.4 Metodika validace provedených vyhodnocení

Metodiku vyhodnocení parametrů skutečného vrtu, která je založená na stanovení storativity vrtu z jednotkového sklonu a dodatečných odporů ze sklonu prvního přímkového úseku lze ověřit pomocí analytické funkce, která popisuje průběh snížení s vlivem těchto parametrů. Tento vztah byl publikován v Agarwal et al. (1970). Vzájemným porovnáním terénních dat a analytického tvaru funkce za použití statistických ukazatelů lze ověřit vyhodnocené parametry. Dále také prostým určením dodatečného snížení hladiny podzemní vody při čerpací zkoušce oproti hodnotám, které vycházejí z Theisova modelu proudění HPV. Obě tyto validační techniky se stanou součástí zde prezentovaných metod vyhodnocení parametrů skutečného vrtu.

### 3.4 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.

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.

## 4. Výsledky

Autor si klade zde za cíl popsat výsledky implementace 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, některá měření byla provedena opakovaně za účelem zhodnocení provedených technických zásahů na pozorovaném vrtném objektu. Metody a teoretický základ vyhodnocování datových sad jsou popsány v předchozích částech práce, zde již budou jen popsány samotné výsledky 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.

Avšak práce si neklade za cíl uvést 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 (dostupný na adrese: <https://github.com/jHolub/radflow>), kde je možné si aplikaci stáhnout a dále s ní svobodně nakládat, také je možné prostřednictvím podnětů od uživatelů aplikaci dále rozvíjet.

### 4.1 Aplikační software

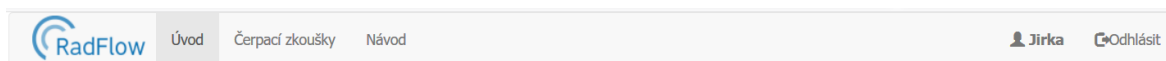
Jedním z hlavních výstupů práce se stal nástroj pro vyhodnocení čerpacích zkoušek, který nabídne možnost stanovení parametrů zvodnělého prostředí. Další neméně důležitou funkcí se možnost archivace jednotlivých provedených čerpacích zkoušek a snadné správy prostřednictvím webového rozhraní aplikace. Již před započítím 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,

kýžený software je dostupný na adrese *www.radflow.cz*. Jak vidíme na obrázku č. 12, pro aplikaci bylo také navrženo logo.



*Obr.: 12. Logo aplikace RadFlow.*

Navigace aplikace je rozdělena na textovou část (příloha A ukazuje úvod do aplikace), kde se může uživatel informovat o možnostech nástroje a také prostudovat příložený návod. Dále z výpočetní části aplikace, která je přístupná po přihlášení uživatele a poskytuje analytické nástroje pro vyhodnocení dat z čerpacích zkoušek a jejich správu.



*Obr.: 13. Navigace aplikace RadFlow.*

#### **4.1.1 Systémové požadavky aplikace ze strany klienta**

Webová aplikace RadFlow si neklade žádné nadstandardní 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.

#### 4.1.2 Parametry webového hostingu

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, není uveden jejich celkový výčet, ale pouze základní hodnoty zajišťující běh a bezpečnost aplikace:

Tabulka č. 3. Specifikace webového hostingu pro aplikaci RadFlow

Parametry	Status
Diskový prostor pro web *	Neomezeně
Množství přenesených dat (traffic)	Neomezeně
Databáze (celkový limit 1 GB)**	Neomezeně
PHP 5.X, PHP 7 (vysoké parametry s možností změn)	Ano
FTP účet, FTPS, zamykání FTP, WebFTP	Ano
Počet dalších FTP účtů (do podadresářů)	Neomezeně
Nastavení chybových stránek a hlášek (htaccess)	Ano
Omezování přístupů podle IP adres (htaccess)	Ano
Zaheslování adresáře (htaccess)	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

Vedení DNS s možností plné editace zákazníkem	Ano
Umístění serverů na páteřní síti	Ano
NONSTOP zákaznická podpora a technický dohled	Ano
Ochrana firewallem	Ano
Roční frekvence plateb	Ano
Možnost platby - 12 způsobů	Ano
Týdenní zálohování **	Ano
Garance dostupnosti	99,99%

### 4.1.3 Struktura aplikace

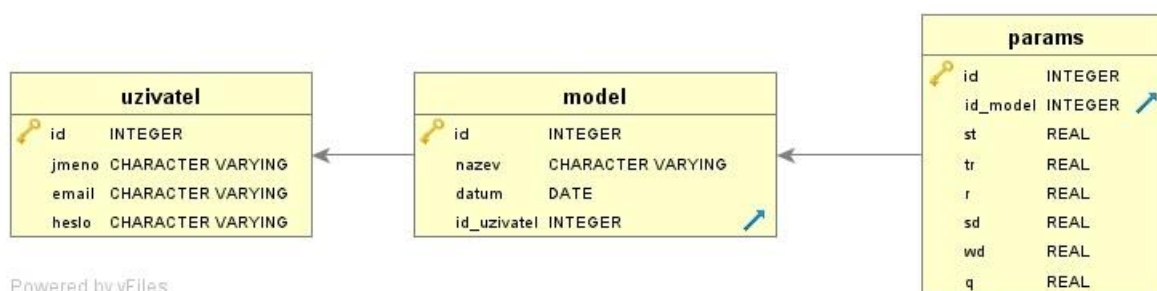
Již na počátku vývoje byla aplikace RadFlow koncipována jako systém umožňující snadnou rozšiřitelnost v podobě přidání dalších výpočetních modulů. Na jednotlivé moduly lze nahlížet jako na samostatné analytické metody s přesně definovanými vstupními a výstupními parametry (rozhraní). Jako základní moduly aplikace můžeme označit tyto:

- a) Uživatelský modul – obsluha uživatelských účtů, autentizace a autorizace uživatele
- b) Modul správy datových sad – nahrávání a správa dat k analýze
- c) Výpočetní moduly – jednotlivé moduly pro vyhodnocení vstupních dat pomocí požadované logiky
- d) Uživatelské rozhraní – GUI aplikace pro obsluhu a zadávání parametrů do aplikace
- e) Jádro aplikace – jedná o systémový modul, který zpracovává základní logiku aplikace

### 4.1.4 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.

Výsledná datová struktura se skládá z jednotlivých objektů (někdy označujeme jako entity). Samotné objekty k popsání jednotlivých vazem samozřejmě nestačí, k tomu účel bylo nutné použít logické vazby mezi objekty. Pro účely aplikace byly navrženy tři entity: uživatel, model a parametry modelu. Každý objekt obsahuje výčet jednotlivých atributů a logickou referenci na jinou entitu, tímto je zajištěna konzistence dat.



Obr.: 14. UML diagram datového modelu aplikace RadFlow

#### 4.1.5 Základní popis aplikace

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:**

Obr.: 15. 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 prvním kroku je nutné vytvořit samotnou datovou sadu (nový model) pomocí vyplnění formuláře s požadovaným názvem datové sady. 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-numeric znaky):

---

**Čerpací zkoušky**

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

Obr.: 16. 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 sníženým hladiny podzemní vody. Dalšími parametry modelu jsou: storativita, transmissivita zvodně, čerpané množství, vzdálenost vrtu pozorovacího, poloměr čerpaného vrtu, storativita vrtu a dodatečné odpory. Některé zde uvedené parametry jsou výstupy analýz aplikačního softwaru a je možná jejich editace v průběhu práce s programem.

#### 4.1.6 Výpočetní moduly

Jedná se o grafoanalytické metody vyhodnocení dat, které jsou přístupné v programu RadFlow. Před jejich volbou je nejprve nutné zvolit datovou sadu. Metody lze poté 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 je uveden výčet všech implementovaných metod vyhodnocení (podrobný návod jednotlivých metod je součástí přílohy práce).

Tabulka č. 4. Analytické metody vyhodnocení dat čerpacích zkoušek

Vyhodnocené parametry	Metoda
Základní parametry	Theisova metoda typové křivky
	Jacobova semilogaritmická metoda přímkový
Parametry reálného vrtu	Model založený na sklonu první přímkové části snížení HPV (Pech, 2005)
	Analytický model bezrozměrného snížení (Agarwal et al., 1970)

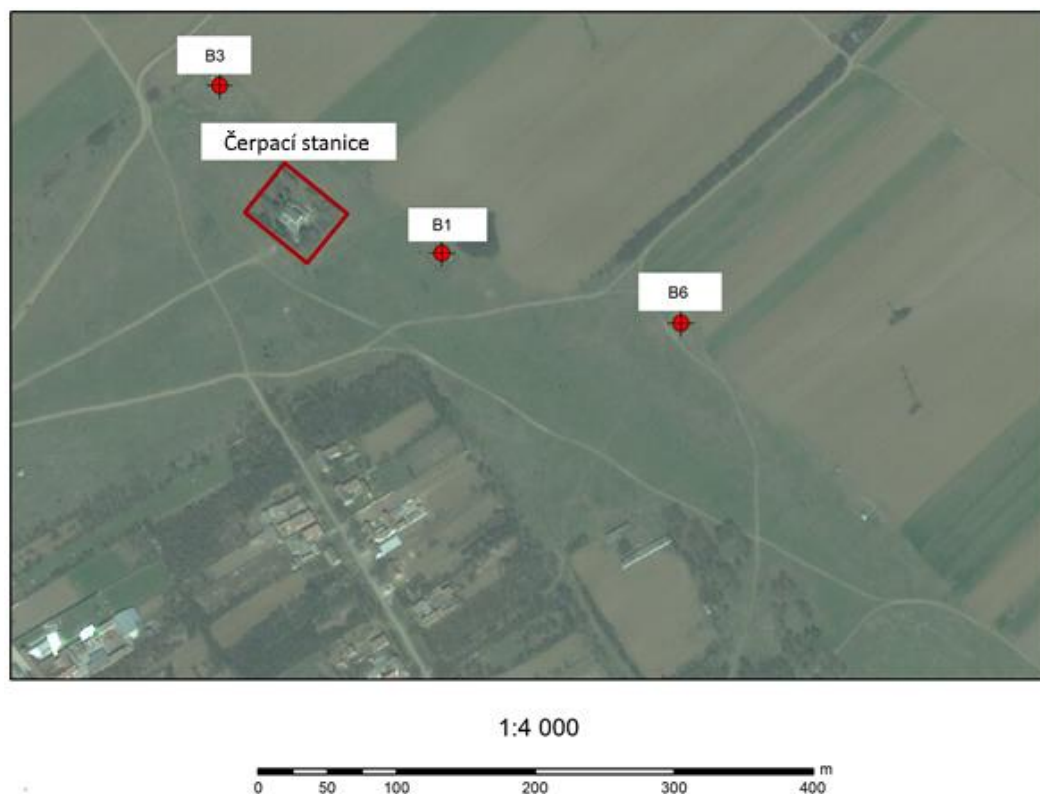
## **4.2 Stanovení hydraulických parametrů vrtu pomocí aplikace RadFlow**

V této části práce se budeme věnovat vyhodnocení reálných dat čerpacích zkoušek s využitím aplikačního programu RadFlow. Tento text může také posloužit jako ukázka práce s výpočetními moduly pro zájemce o praktické využití programu. Jedním z cílů analýz 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 na čerpaném vrtu 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. Dále bude následovat stanovení parametrů reálného vrtu pomocí metody vycházející z jednotkového sklonu na úplném počátku zkoušky (vzorec 4.8) a sklonu prvního přímkového úseku na grafu snížení hladiny podzemní vody (vzorec 4.17). Nedílnou součástí zde prezentovaného vyhodnocení dat bude také validace stanovených hodnot, pomocí 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).

### **4.2.1 Čerpací zkoušky, lokalita Bela Crkva**

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 a přesnou lokalizaci objektů zájmového území ukazuje obrázek č. 17. Celkem se v oblasti nacházejí tři vrty označené B1, B3 a B6. Na vrtech B1 a B6 byly v roce 2015 provedeny čerpací zkoušky za účelem zhodnocení vykonaného regeneračního zásahu. Zkoušky proběhly včetně záznamu

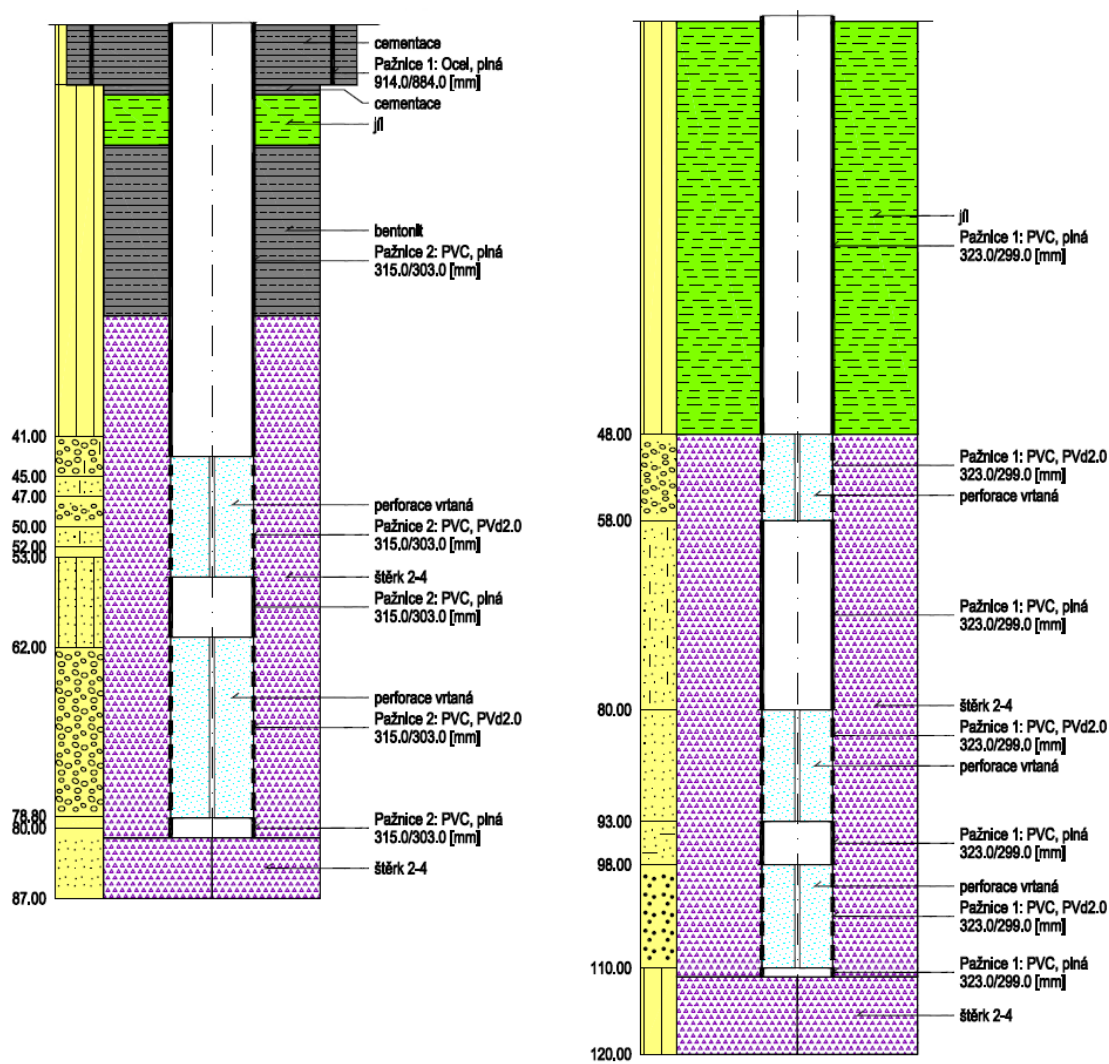
snížení na pozorovacím vrtu. Na vrtu B3 nedošlo k odečtu snížení hladiny podzemní vody v pozorovacím vrtu, tudíž nemůžeme tento vrt zahrnout do výsledné analýzy, z důvodu nemožnosti určení hodnoty storativity.



Obr.: 17. Mapa lokalizace vrtů s čerpací stanicí oblasti Bela Crkva, Republika srbská (zdroj: ESRI Base maps 2015)

Hloubka vrtu činí 110 metrů v případě B6 a 87 metrů v případě vrtu B1. Vrtky jsou vrtány průměrem 32 cm a čerpaná vydatnost činila  $11.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  a  $10.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  pro vrt B6, respektive B1. Snížení hladiny podzemní vody vlivem čerpání bylo zaznamenáváno s velmi krátkým intervalem hned od počátku čerpání, což naplňuje předpoklad vyhodnocení parametrů reálného vrtu z prvního přímkového úseku snížení. Hydrogeologické poměry vrt B1 a B6 jsou znázorněny na obrázku č. 18, detailní popis je přiložen v příloze práce (Formánek and Dvořák, 2016). K porovnání změny hydraulických vlastností (hlavně parametrů skutečného vrtu) budou do analýzy přidána data z čerpací zkoušky na vrtu B6

před provedením regenerace. U této zkoušky dosahovalo množství odebírané vody  $14 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ . Výsledné vyhodnocení by mělo poskytnout relevantní informace o výsledcích regenerace a představit možnost využití výpočetních modulů aplikace RadFlow v běžné praxi.

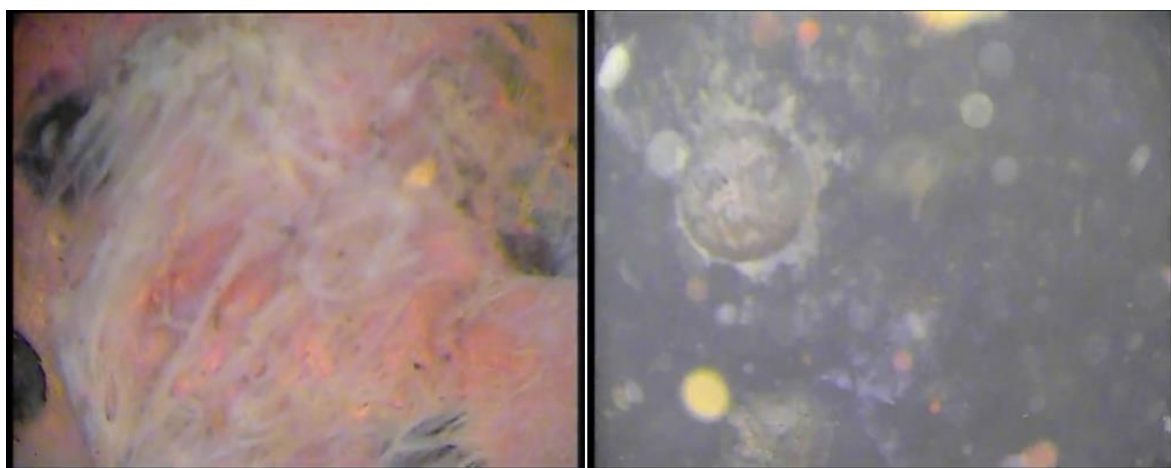


Obr.: 18. Geologický popis hornin a zemin vrtů B1 a B6 (Formánek and Dvořák, 2016)

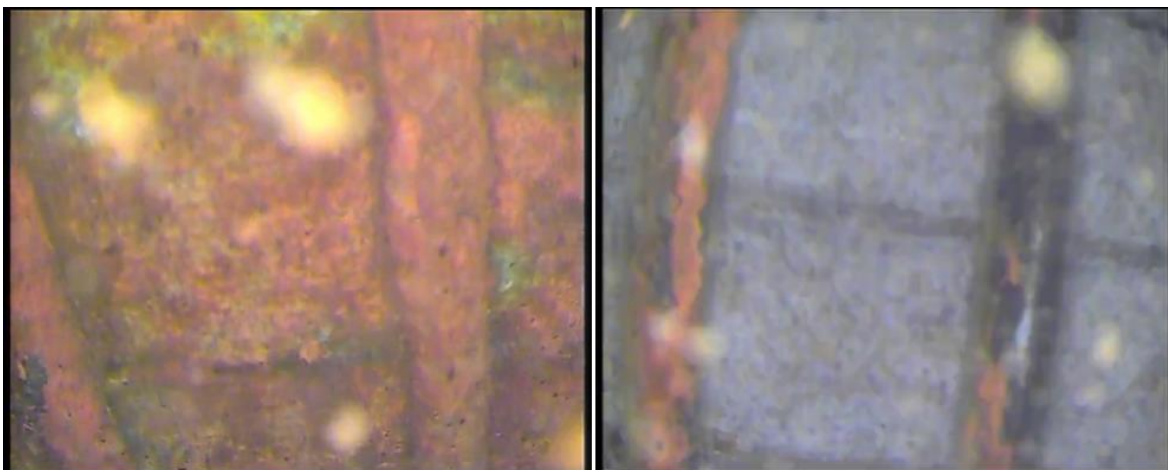


#### 4.2.2 Regenerace jímacích objektů, lokalita Bela Crkva

V následujícím textu budou popsány regenerace vrtů B1 a B6 z oblasti Bela Crkva. Mechanicko-chemické regenerace vodárenských jímacích vrtů 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 Synttron 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 části výstroje vrtu. Výsledky regeneračního procesu jsou znázorněny pomocí kamerové zkoušky na obrázcích číslo 19. a 20. Na snímcích je patrná značná kolmatace vrtu B1, která je z větší části bakteriálního původu. Na vrtu označeném B6 před provedením regenerace je patrná také přítomnost kolmatace, v tomto případě se jedná převážně o kombinaci 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 (Formánek and Dvořák, 2016).



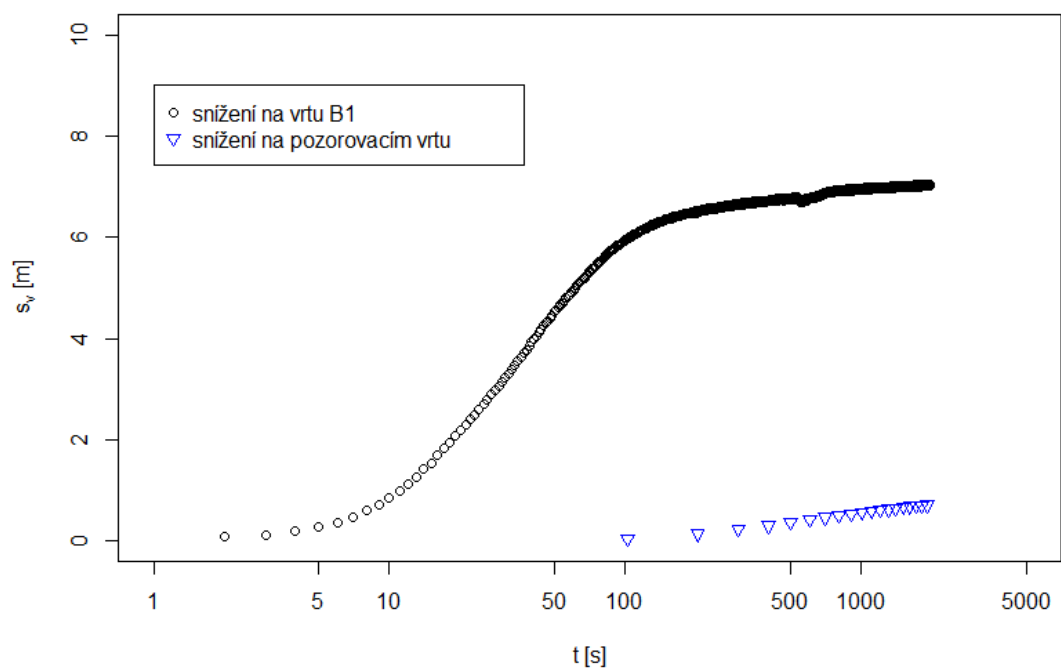
Obr.: 19. Snímek perforovaného úseku vrtu B1 před a po regeneraci (Formánek and Dvořák, 2016).



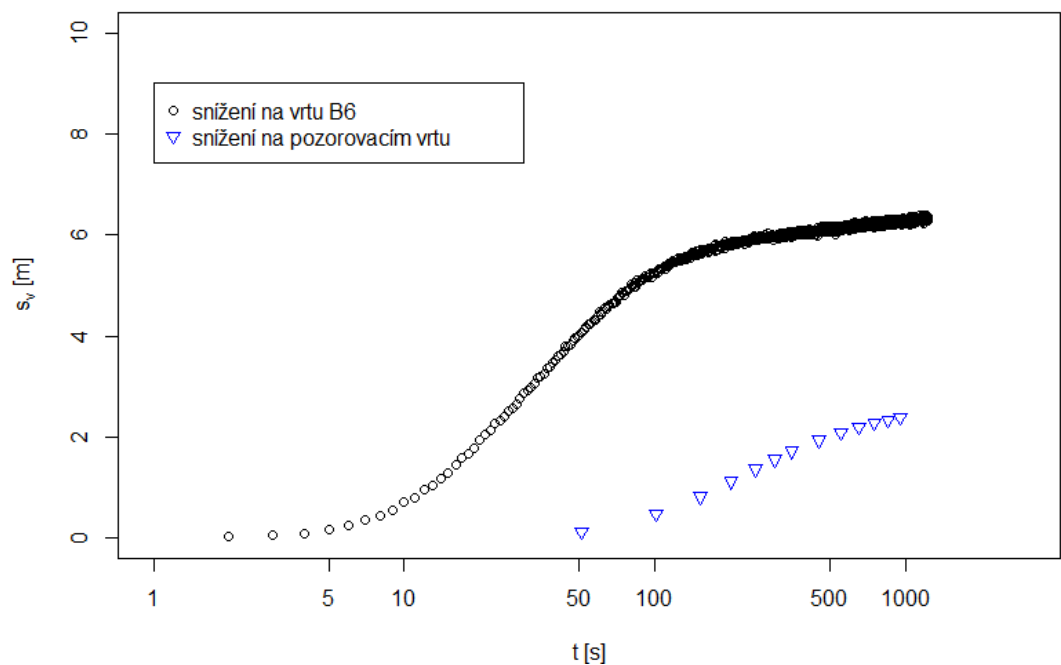
*Obr.: 20. Snímek perforovaného úseku vrtu B6 před a po regeneraci (Formánek and Dvořák, 2016).*

#### **4.2.3 Vyhodnocení základních parametrů na vrtu B1 a B6**

Stanovení základních parametrů na vrtech 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, kdy dochází k ovlivnění čerpací zkoušky skrze hraniční propustné vrstvy, není možné data vyhodnotit pomocí zde popsaných metod vyhodnocení. Jak si můžeme všimnout na obrázcích č. 21 a 22, které reprezentují závislost snížení hladiny podzemní vody na pozorovaných objektech, graf  $s_v(t)$  charakterizují dva přímkové úseky. Jejich výskyt indikuje vliv dodatečných odporů a storativity vrtu na průběh hydrodynamické zkoušky, první přímková část vykazující větší sklon snížení, daný větším snížení hladiny podzemní vody na odběrném vrtu než výpočtové snížení v dokonalém vrtu, kde je vliv dodatečných odporů zanedbán.



Obr.: 21. Snížení hladiny podzemní vody ve vrtu B1 s hodnotami snížení na pozorovacím objektu.



Obr.: 22. Snížení hladiny podzemní vody ve vrtu B6 s hodnotami snížení na pozorovacím objektu.

Parametr transmisivity byl stanoven pomocí Jacobovy semilogaritmické metody přímkou pro neustálené proudění podzemní vody z druhé přímkové části grafu snížení hladiny pomocí programu RadFlow. Výběr sklonu druhého přímkového úseku grafu  $s_v(t)$  může být do jisté míry značně subjektivní, z toho důvodu je možné se při volbě sklonu řídit ukazatelem, který je definován jako absolutní hodnota rozdílu zvoleného sklonu přímkou a průměrného sklonu hodnocených data (tabulka č. 5). Minimalizace této hodnoty poskytuje relevantní informace o správnosti volby sklonu a zároveň odstraňuje subjektivní vliv při jeho výběru. Součástí procesu volby sklonu je také definice počátku přímkového úseku, pro který se má ukazatel určit (odečteme z časové osy počátek 2. přímkového úseku).

*Tabulka č. 5. Optimalizace sklonu přímkového úseku pro určení parametru transmisivity zvodně (počáteční hodnota přímkového úseku na časové ose byla stanovena na 280 sekund pro vrt B6 a 830 sekund pro vrt B1).*

Vrt	$\Delta s$ [m]	Hodnotící ukazatel	T [m <sup>2</sup> /s]
B6	0.41723	0.54908	0.005176
	0.50046	0.30957	0.004315
	0.5837	0.07006	0.0037
	<b>0.60867</b>	<b>0.00178</b>	<b>0.003548</b>
	0.66693	0.16944	0.003238
	0.75016	0.40894	0.002879
B1	0.21949	0.31427	0.008504
	0.27031	0.15076	0.006905
	<b>0.31731</b>	<b>0.00048</b>	<b>0.005883</b>
	0.32112	0.01275	0.005813

V grafu snížení hladiny podzemní vody u vrtu B1 (obr. 21) si můžeme všimnout drobné odchylky druhého přímkového trendu funkce, tato skutečnost mohla být způsobena například dočasným poklesem čerpaného množství nebo jinou blíže nespecifikovanou skutečností. Z toho důvodu byl přímkový úsek Jacobovy aproximace zvolen až pro delší časový úsek (od 830 s). Sklon na grafu  $s_v(t)$  druhého přímkového úseku byl stanoven na  $\Delta s$

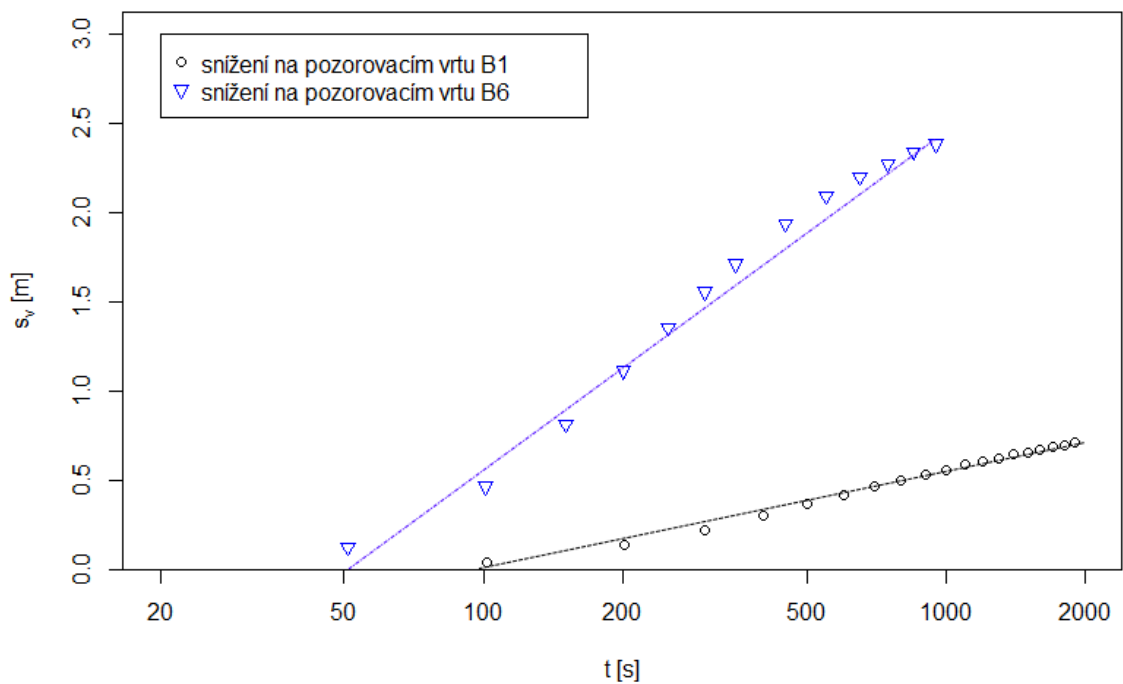
= 0.60867 m pro vrt B6, respektive 0.31731 m pro vrt B1 a odebírané množství činilo  $Q = 118 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  pro vrt B6 a  $Q = 102 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  v případě vrtu B1. Poté hodnotu transmisivity horninového prostředí můžeme určit z předpisu:

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

Hodnota transmisivity zvodně byla stanovena na 0.003548 m<sup>2</sup>/s pro vrt B6 a 0.005883 m<sup>2</sup>/s pro vrt B1. Hydraulická vodivost definovaná jako poměr transmisivity a mocnosti zvodnělé vrstvy je obsažena v tabulce č. 6. 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  $r$ . Vzdálenost pozorovacího objektu činila 5 m u vrtu B6 a 9 m u vrtu s označením B1. Koeficient storativity je pak určen předpisem:

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



Obr.: 23. Průběh snížení hladiny podzemní vody a pozorovacích objektech

Tabulka č. 6. Výsledné hydraulické parametry vrtu B1 a vrtu B6 z čerpací zkoušky u Bela Crkva, Republika Srpská.

Parametry	vrt – B1	Vrt – B6
Mocnost zvodně $b$ [m]	37	35
Čerpaná vydatnost $Q$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$102 \times 10^{-4}$	$118 \times 10^{-4}$
Poloměr odčerpávaného vrtu $r_w$ [m]	0.149	0.1615
Transmisivita zvodně $T$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	0.005883	0.003548
Hydraulická vodivost $K$ [m/s]	$1.59 \times 10^{-4}$	$1.014 \times 10^{-4}$
Vzdálenost pozorovacího vrtu $r$ [m]	9	5
$t_0$ [sec]	95	55
Storativita zvodně $S$	0.0155	0.0176

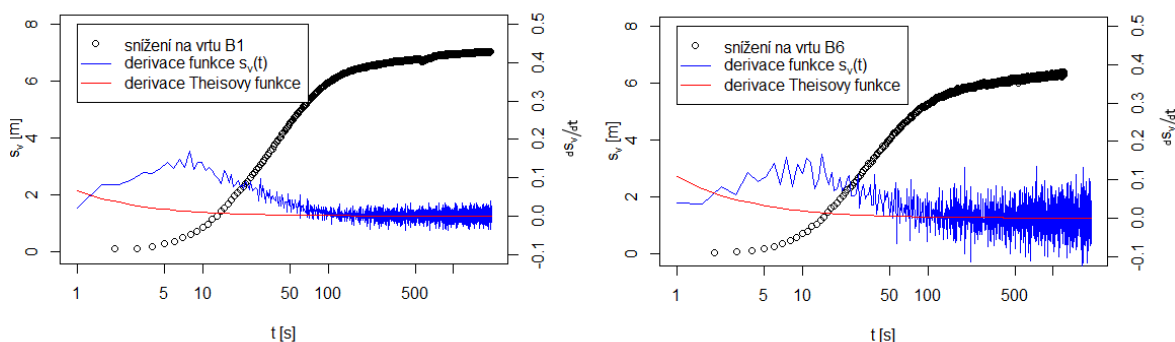
Jak bylo uvedeno výše všechny zde prezentované výsledky byly vyhodnoceny pomocí programu RadFlow. Přesný postup práce s aplikací včetně návodu jak přesně postupovat při práci s výpočetními moduly je značně obsáhlý a proto se stal součástí přílohy

práce, zde byly popsány pouze výsledky analýz a nastíněny možnosti jeho využití pro zpracování dat z čerpacích zkoušek.

#### 4.2.4 Zhodnocení výsledků základních hydraulických parametrů vrtů B1 a B6

Zde budou rozebrány možnosti ověření výstupů základních hydraulických parametrů, které je možno stanovit v programu RadFlow. Ačkoliv nejsou validační nástroje přímo implementovány do aplikace, výsledky by měly poukázat na kvalitu výstupů a potenciál využití nástroje, ale také upozornit na jeho případné limity.

Jak již bylo uvedeno, přítomnost dvou přímkových úseků dat snížení na semilogaritmickém grafu indikuje vliv parametrů skutečného vrtu na měřené hodnoty. Sklon první přímkové části (Agarwallovský úsek) dosahuje vyšších hodnot, jak potvrzuje obrázek č. 24. Pro delší časový horizont hodnota sklonu přímky postupně přechází do stavu odpovídajícímu Theisově modelu proudění. Právě tato část je vhodná pro vyhodnocení dle Jacobovy metody přímky. Určení počátku sklonu přímky při vyhodnocení dat z čerpacích zkoušek bylo v případě vrtu B1 při času 830 s, respektive 280 s pro vrt B6.



Obr.: 24. Měřené snížení hladiny podzemní vody na vrtech B1 a B6 a porovnání derivací funkce snížení s Theisovým modelem proudění.

Hodnota sklonu Theisovy funkce pro parametry z vyhodnocení čerpacích zkoušek na vrtech dosahuje  $\Delta s = 0.3177$  m pro vrt B1 a  $\Delta s = 0.6094$  m pro vrt B6. Obě hodnoty byly stanoveny pro stejný časový interval jako v případě analýzy vrtů. V tabulce č. 7 je uvedeno porovnání směrnice, na základě které došlo ke stanovení hodnoty transmisivity vrty s hodnotou sklonu Theisova modelu. Dále jsou uvedeny hodnoty  $1/u$  ( $u$  je Theisova studňová funkce) jak bylo uvedeno v literárním rozboru pro hodnoty  $1/u$  větší než 100 dosahuje Jacobova aproximace chyby menší než 0.25%.

*Tabulka č. 7. Porovnání směrnice pro určení transmisivity dle Jacobovy aproximativní metody přímkou s Theisovým model proudění*

Vrt	Sklon přímkového úseku $\Delta s$ [m]	Sklon Theisovy funkce $\Delta s$ [m]	Rozsah hodnot $1/u$	% rozdíl sklonu
B1	0.31731	0.3177	[50 - 118]	0.12
B6	0.60867	0.6094	[10 - 40]	0.11

#### 4.2.5 Vyhodnocení parametrů reálného vrtu

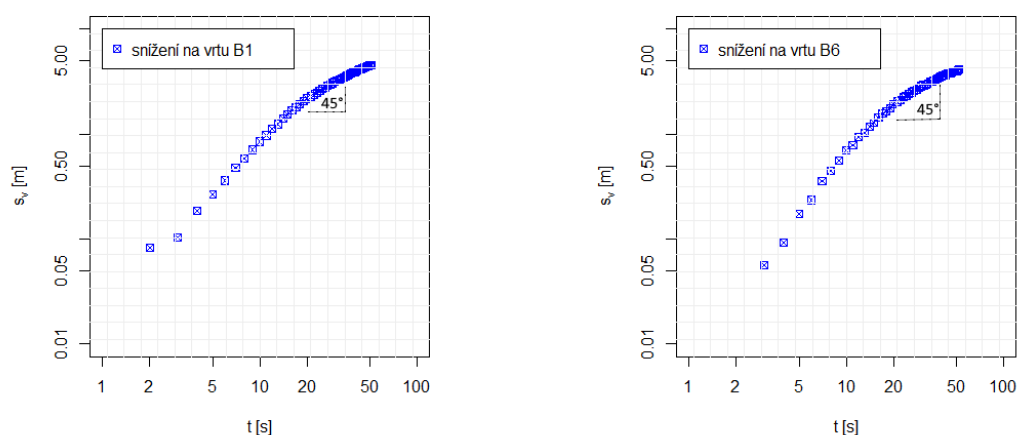
Výše provedená vyhodnocení základní hydraulických charakteristik vrtu slouží jako vstupní data pro stanovení parametrů reálného vrtu. V této části práce si ukážeme možnosti určení těchto parametrů pomocí grafoanalytických metod vycházejících z postupů, které byly publikovány v Pech (2005). Jedná se o způsob určení dodatečných odporů na základě vztahu koeficientu storativity vrtu a sklonu prvního přímkového úseku (Agarwallovský úsek). Nejprve si představíme způsob stanovení koeficientu storativity vrtu, které předchází samotnému vyhodnocení dodatečných odporů. V grafu  $\log s$  vs.  $\log t$  na počátku čerpací zkoušky si můžeme všimnout jednotkového sklonu (úhel  $45^\circ$ ), tato skutečnost se stala základem pro určení bezrozměrného koeficientu storativity vrtu (Ramey, 1970). Na obrázcích č. 25 a 26 je znázorněn výskyt jednotkového sklonu v grafu čerpací zkoušky. Pro oba vrty byl jednotkový sklon definován na časovém úseku 20 – 40 s od počátku zkoušky. Zde bych ještě uvedl, že pro přesnější stanovení jednotkového sklonu funkce je žádoucí



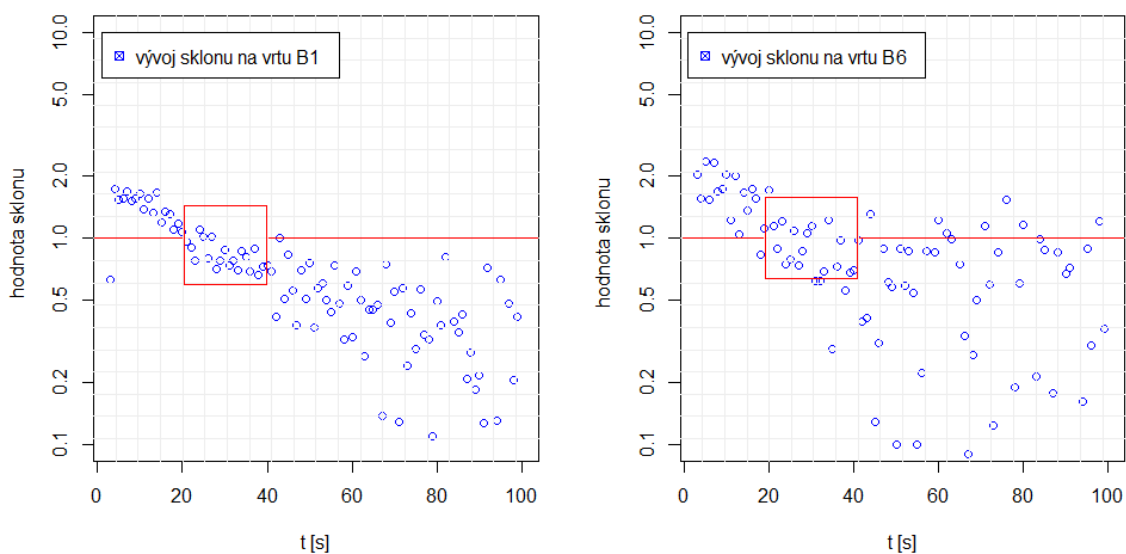
zkoumaná data vyhladit, avšak pro účely stanovení koeficientu storativity vrtu je kvalita dat dostatečná. Faktor storativity vrtu je pak stanoven dle předpisu:

$$C = Q \frac{t_j}{s_j}$$

kde  $t_j$  a  $s_j$  reprezentuje dvojici odpovídajících si hodnot na jednotkovém přímkovém úseku.



Obr.: 25. Jednotkový sklon v grafu  $\log s$  vs.  $\log t$  pro čerpací zkoušky na vrtech B1 a B6



Obr.: 26. Vývoj sklonu funkce  $s_v(t)$  vyjádřený v grafu  $\log s$  vs.  $\log t$

Čerpané množství činilo  $Q = 118 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  pro vrt B6 a  $Q = 102 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  v případě vrtu B1. Pro vyjádření bezrozměrného koeficientu storativity vrtu je nutné dále znát hodnotu storativity, jejíž určení již proběhlo v předchozí kapitole pomocí Jacobovy metody přímky. Tabulka č. 8 ukazuje výsledky vyhodnocení koeficientu storativity vrtu na základě jednotkového sklonu.

Tabulka č. 8. Hodnoty storativity vrtu odvozené z jednotkového sklonu.

Vrt	Hodnota $t_j$	Hodnota $s_j$	C	$C_d$
B1	20	2.1877	0.09325	43
B6	30	2.8706	0.12332	42

V následující části práce bude představen postup stanovení hodnoty dodatečných odporů z dat čerpací zkoušky na základě vztahu sklonu první přímkové části grafu a hodnoty storativity vrtu v semilogaritmickém grafu. Vztah těchto veličin byl odvozen ve tvaru:

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

Můžeme také vyjádřit jako:

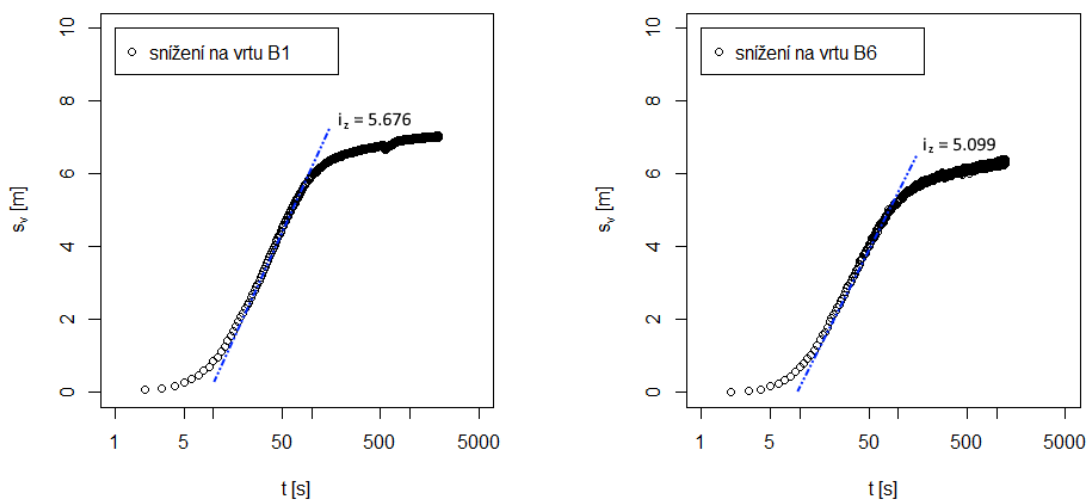
$$i_{zd} = \frac{2\pi T i_z}{Q}$$

Následně dostaneme předpis pro určení hodnoty dodatečných odporů ve tvaru:

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

Tabulka č. 9. Dodatečné odpory určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku.

Vrt	Čas $t$ [s]	Snížení $s_v$ [m]	$i_z$	Dodatečné odpory $W$
B1	[17.272, 62.722]	[1.844, 5.023]	5.676	20.89
B6	[13.127, 65.059]	[1.028, 4.572]	5.099	8.1



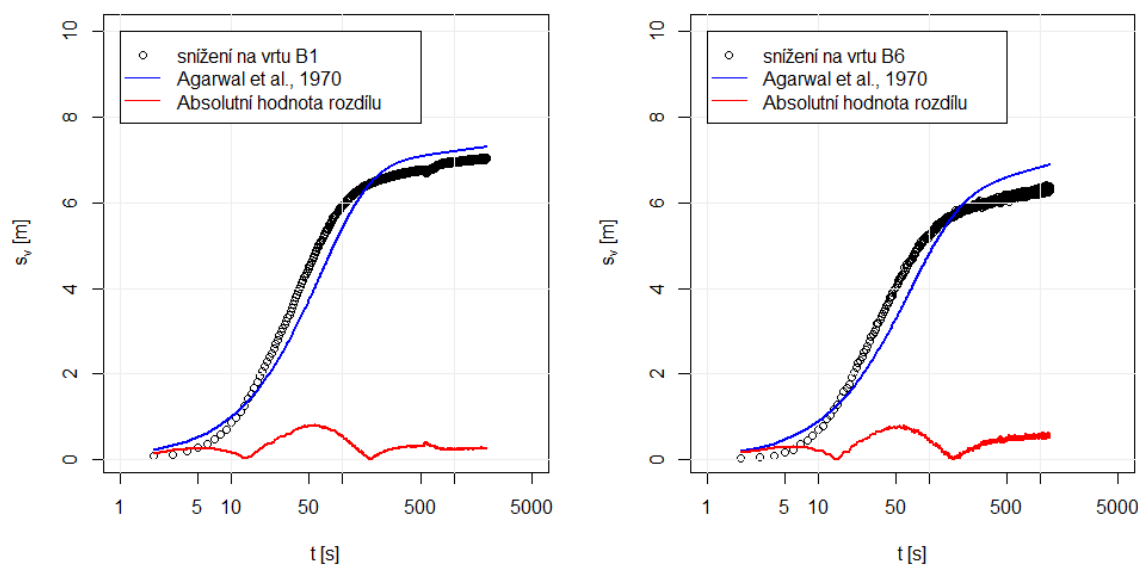
Obr.: 27. Sklon prvního přímkového úseku pro určení dodatečných odporů

Určené hodnoty dodatečných odporů a souřadnice bodů pro určení sklonu první přímkové části grafu snížení, jsou obsaženy v tabulce č. 9. Vrt B1 vykazuje vyšší hodnotu dodatečných odporů konkrétně 20.89 a vrt B6 8.1. Dále bude následovat zhodnocení dosažených výsledků a jejich validace pomocí analytických funkcí pro popis proudění podzemní vody.

#### 4.2.6 Validace parametrů skutečného vrtu

Představené metody vyhodnocení parametrů skutečného vrtu jsou založené na jednoduchých grafoanalytických technikách, které byly odvozeny pro data s výskytem dvou přímkových úseků s velmi krátkým časovým krokem automatického sběru dat. Zde se budeme zabývat ověřením těchto hodnot pomocí parametrizace analytické

funkce (Agarwal *et al.*, 1970), která popisuje průběh snížení hladiny podzemní vody s vlivem parametrů skutečného vrtu. Jako vstupní parametry funkce použijeme stanovené hodnoty z předchozí kapitoly a určíme míru shody funkce s terénními daty. Také se pokusíme optimalizovat parametry skutečného vrtu a výsledné hodnoty porovnat. Jako ukazatel míry shody použijeme Nash–Sutcliffe koeficient (dále NSE), který pro ideální shodu nabývá hodnoty blížíící se k 1. Dalším způsobem validace hodnot dodatečných odporů bude vyčíslení celkového dodatečného snížení, které je definováno jako rozdíl naměřené hodnoty poklesu hladiny oproti snížení, které vychází z Theisova modelu proudění.



Obr.: 28. Porovnání terénních dat s funkcí definující snížení HPV s vlivem parametrů reálného vrtu (dosazené parametry odpovídají vyhodnocení dle výše uvedené metodiky)

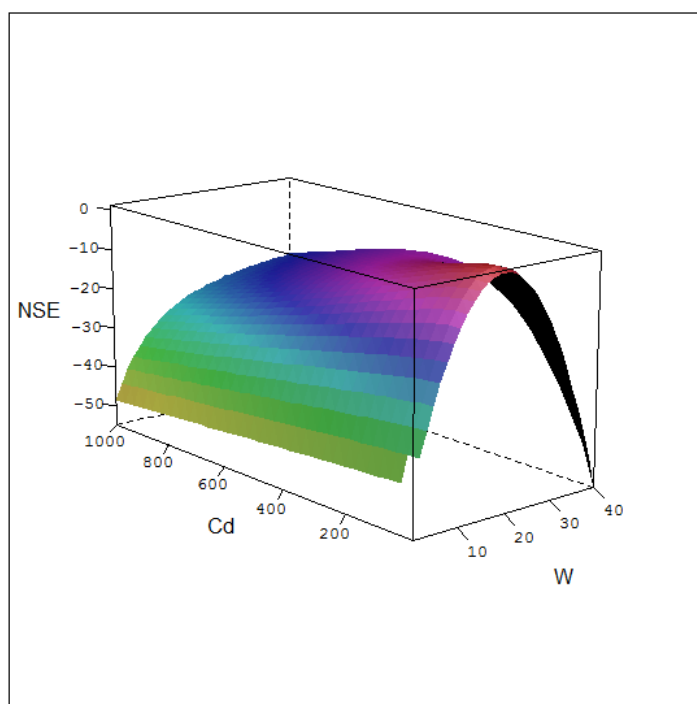
Obrázek č. 28 ukazuje výsledek porovnání hodnocených dat a průběhem analytické funkce s vlivem parametrů reálného vrtu. Můžeme si všimnout, že v obou případech došlo k nadhodnocení hodnoty koeficientu storativity vrtu. NSE dosahoval v případě vrtu B1 hodnoty 0.853 a 0.68 pro vrt B6. Obě hodnoty poukazují na uspokojivou shodu dat s modelem. Následuje ukázka (Obr. 29 a 30) průběhu parametrizace funkce – Agarwal, 1970 s cílem dosažení co nejlepší shody s terénními daty pomocí iterativních metod. Parametrizace byla provedena v prostoru ohraničeném hodnotami [1, 40] a [1, 15] pro

dodatečné odpory  $W$  a  $[1, 1000]$  pro storativitu vrtu  $C_d$ . Konečné hodnoty parametrizace jsou obsaženy v tabulce č. 10 včetně porovnání s původními výsledky z grafoanalytické metody.

Tabulka č. 10. Porovnání parametrů skutečného vrtu určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku s výsledky parametrizace funkce: Agarwal et al., 1970.

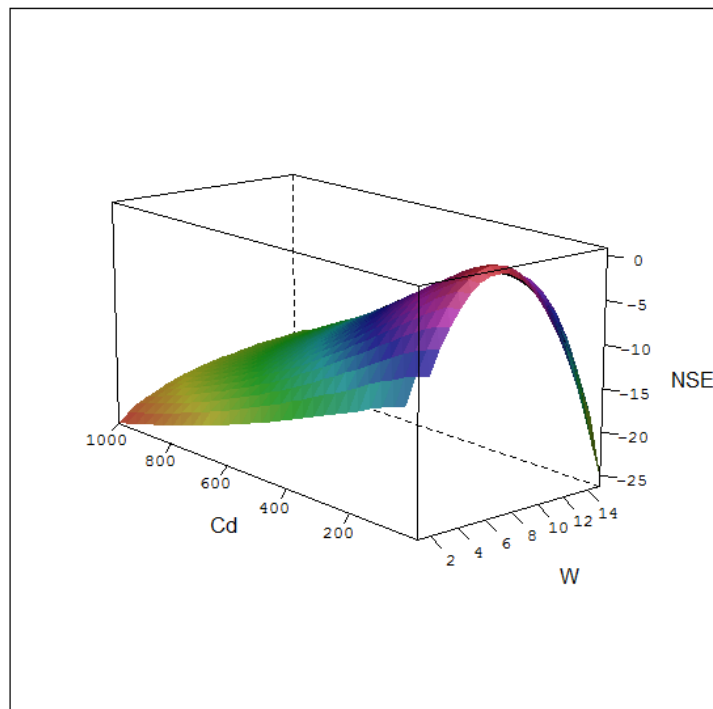
	Metoda	$C_d$ [-]	$W$ [-]	NSE
Vrt B1	Grafoanalytické techniky (kap. 4.2.3)	43	20.89	0.853
Vrt B1	Agarwal et al., 1970	31	19.83	0.994
Rozdíl		27.9 %	5.07 %	
Vrt B6	Grafoanalytické techniky (kap. 4.2.3)	42	8.1	0.68
Vrt B6	Agarwal et al., 1970	30	8.3	0.967
Rozdíl		28.58 %	2.47 %	

Parametrizace vrtu B1



Obr.: 29. Průběh parametrizačního procesu vrtu B1

### Parametrizace vrtu B6



Obr.: 30. Průběh parametrizačního procesu vrtu B6

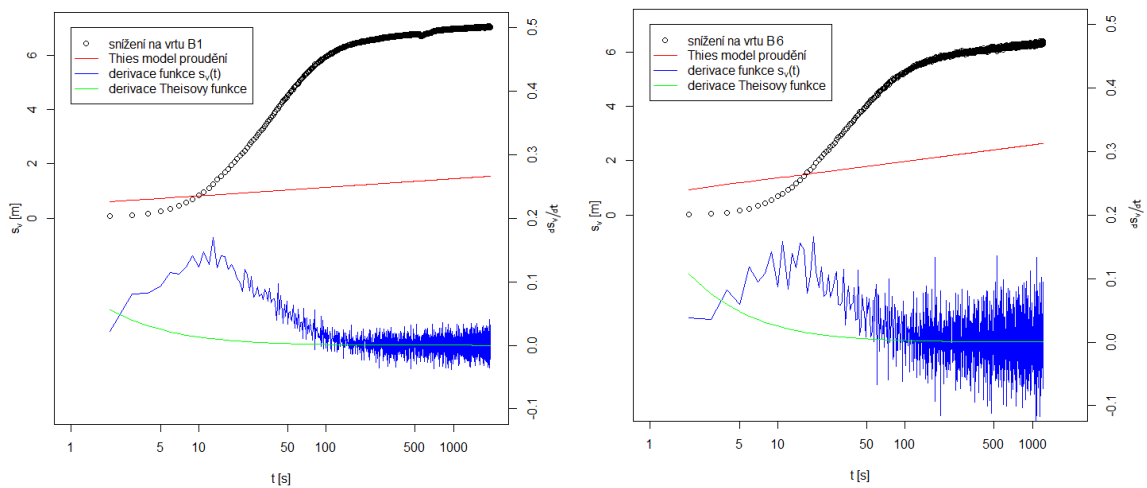
Parametrizace koeficientů  $W$  a  $C_d$  ukázala dominantní vliv dodatečných odporů na průběh optimalizované funkce, kdy už při jednotkové změně hodnoty dodatečných odporů dochází k významnému poklesu hodnoty optimalizačního kritéria NSE. Tato skutečnost reflektuje i obvyklý rozsah bezrozměrné storativity vrtu  $C_d$ , který se pohybuje v rozmezí  $10^2$  až  $10^7$  v závislosti na hydraulických podmínkách prostředí, což představuje řádově větší rozsah oproti běžným hodnotám dodatečných odporů. Vzhledem k těmto skutečnostem se přesnost vyhodnocení parametrů skutečného vrtu pomocí grafoanalytických metod jeví jako uspokojivá a pro praxi zcela dostatečná. Procentuální rozdíl hodnot dodatečných odporů činil 5.07 % v případě vrtu B1 a 2.47 % pro vrt B6. Hodnoty bezrozměrné storativity vrtu se lišily více - 27.9 % v případě vrtu B1 a 28.58 % pro vrt B6, ale vzhledem k velké variabilitě koeficientu také shledávám výsledek za přijatelný.

Následuje další ověření hodnot reálného vrtu pomocí odečtu z dodatečného snížení oproti hodnotám vycházející z Theisova modelu proudění. Výsledky jsou obsaženy v tabulce č. 11. Snížení způsobené dodatečnými odpory je definováno jako:

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

Tabulka č. 11. Stanovení hodnoty dodatečných odporů z odečtu rozdílu Theisova modelu proudění HPV vs. terénní data.

	Metoda	Hodnoty odečtu [s, m]	W
Vrt B1	Grafoanalytické techniky (kap. 4.2.5)	-	20.89
Vrt B1	Odečet z Theisova modelu	[1000, 1.457]	19.94
Rozdíl			4.55 %
Vrt B6	Grafoanalytické techniky (kap. 4.2.5)	-	8.1
Vrt B6	Odečet z Theisova modelu	[1000, 2.584]	6.98
Rozdíl			13.83 %



Obr.: 31. Srovnání terénních dat čerpací zkoušky na vrtech B1 a B6 s Theisovým model proudění HPV.

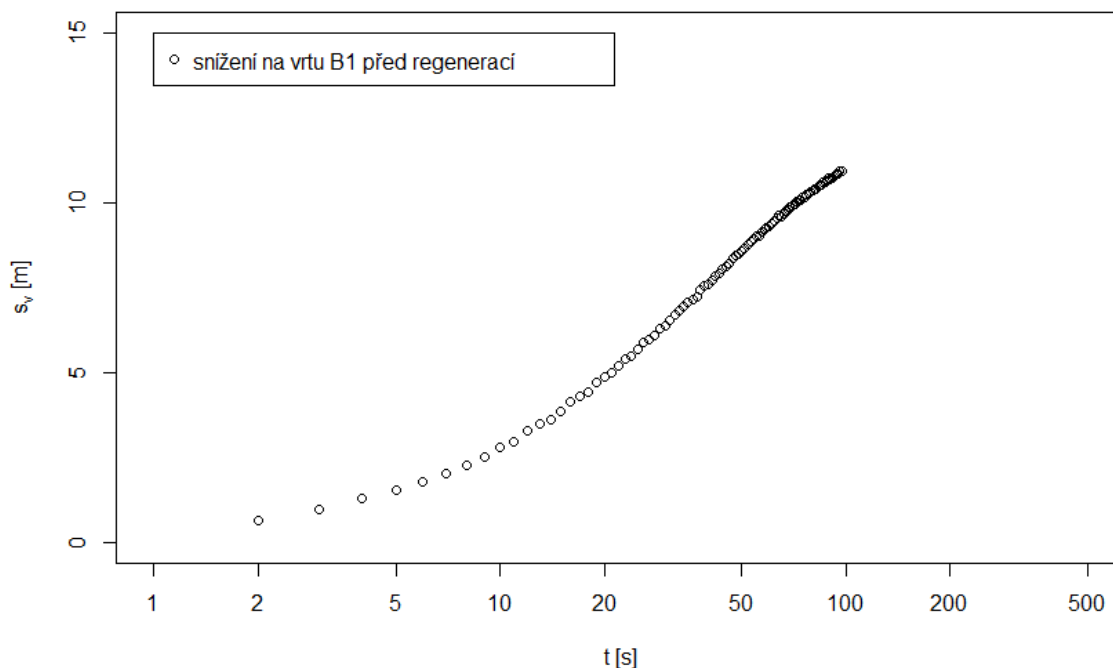
Také druhý způsob ověření výsledků analýzy potvrdil validitu vyhodnocení parametrů skutečného vrtu pomocí grafoanalytických technik z první přímkové části grafu snížení HPV. Kdy hodnota snížení vlivem dodatečných odporů  $s_w$  pro čas = 1000 s se rovnala 5.501 m (rozdíl hodnot celkové snížení na vrtu a snížení vycházející z Theisova modelu) v případě vrtu B1 a 3.695 m pro vrt B6 a výsledné rozdíly hodnoty dodatečných odporů činily 4.55 % a 13.83 % pro vrt B1, respektive B6.

#### **4.2.7 Vyhodnocení čerpací zkoušky na vrtech před provedením regenerace**

V této části práce bych rád demonstroval praktické využití programu RadFlow k vyhodnocení výsledků regeneračního zásahu, který byl proveden v oblasti Bela Crkva. Výše uvedené analýzy stanovení hydraulických parametrů byly provedeny na datech, které byly pořízeny po regeneraci vrtů, nyní dojde k vyhodnocení čerpací zkoušky před regeneračním zásahem. Výsledky regenerace v podobě snímků perforovaného úseku vrtů se staly součástí přílohy práce a je na nich možné identifikovat značné rozdíly v podobě úbytku rzi a biologického nárůstu. Pro jednoduchost nebudu uvádět celkový postup vyhodnocení, který odpovídal technikám pro určení hydraulických parametrů po regeneraci vrtů (kap. 4.2.3 a 4.2.5), ale jen konkrétní finální hodnoty parametrů. Výsledné hodnoty dodatečných odporů by měly zhodnotit provedený regenerační zásah a poukázat na velmi jednoduchý způsob stanovení koeficientu dodatečných odporů díky aplikaci RadFlow, který lze v tomto kontextu chápat jako hodnotící kritérium provedeného regeneračního zásahu.

Vzhledem k tomu, že čerpací zkouška provedená na vrtu B1 před regenerací neumožňuje vyhodnocení základních hydraulických parametrů. Z důvodu předčasného ukončení čerpací zkoušky jak ukazuje obrázek č. 32 (snížení nedosáhlo druhého přímkového úseku pro vyhodnocení pomocí Jacobovy metody) budou základní hydraulické parametry převzaty z vyhodnocení, které bylo provedeno na datech po regeneraci vrtu. Zde vyjdeme z předpokladu, že základní hydraulické parametry se v průběhu krátkého časového intervalu zásadně nemění (vlastnosti prostředí zůstávají konstantní). A zaměříme pozornost na stanovení parametrů reálného vrtu pomocí metody vycházející ze sklonu prvního přímkového úseku a určíme změnu hodnoty dodatečných odporů způsobenou regeneračním zásahem na vrtu. Výsledné hodnoty ukazuje tabulka č. 12.





Obr.: 32. Snížení HPV na vrtu B1 před provedenou generací.

Tabulka č. 12. Parametry reálného vrtu B1 před regenerací.

Parametry	Před regenerací	Po regeneraci
Dodatečné odpory $W$ [-]	26.1	20.89
Bezrozměrný parametr storativity vrtu $C_d$ [-]	19	43
Snížení způsobené dodatečnými odpory [m]	9.89	5.76

Porovnání hodnot dodatečných odporů na vrtu B1 poukázalo na výsledky regeneračního procesu. Celkově byla hodnota dodatečných odporů snížena o 20 %. Dále je provedeno kompletní vyhodnocení dat čerpací zkoušky před regenerací na vrtu B6. Nejprve došlo ke stanovení základních hydraulických parametrů a následně i reálných parametrů vrtu.

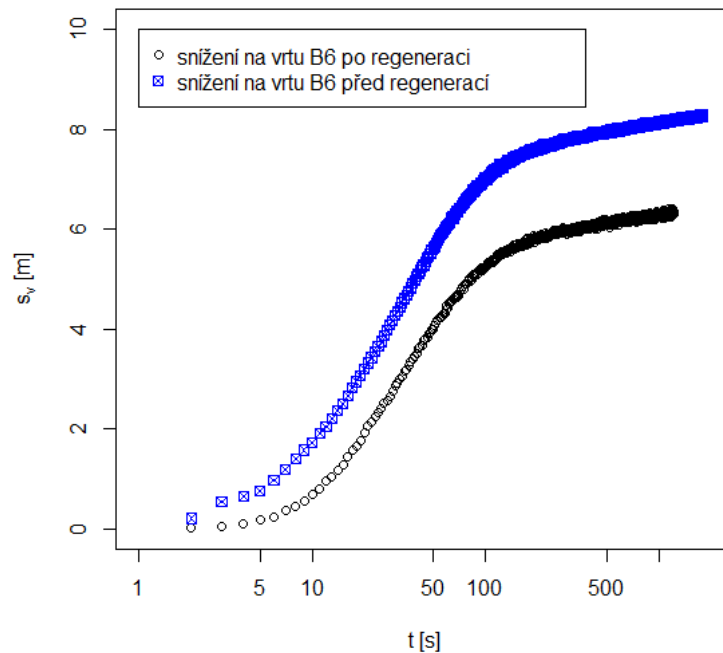
Tabulka č. 13. Základní hydraulické parametry vrtu B6 před a po regeneraci.

<b>Parametry</b>	<b>Před regenerací</b>	<b>Po regeneraci</b>
Mocnost zvodně $b$ [m]	35	35
Čerpaná vydatnost $Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$14 \times 10^{-3}$	$118 \times 10^{-4}$
Poloměr odčerpávaného vrtu $r_w$ [m]	0.1575	0.1615
Transmisivita zvodně $T$ [m <sup>2</sup> /s]	0.00422448	0.003548
Hydraulická vodivost $K$ [m/s]	$1.207 \times 10^{-4}$	$1.014 \times 10^{-4}$
Vzdálenost pozorovacího vrtu $r$ [m]	5	5
$t_0$ [sec]	110	55
Storativita zvodně $S$	0.0417	0.0176

Základní hydraulické parametry uvedené v tabulce č. 13 vykazují jen mírné odlišnosti oproti výsledkům analýzy, která byla provedena na datech po regeneraci vrtu B6. Změna se odehrála také v množství odebírané vody ze studně, což mělo za následek společně s vyšší hodnotou dodatečných odporů, znatelný nárůst maximální hodnoty snížení hladiny podzemní vody na konci čerpací zkoušky, jak ukazují výsledky parametrů reálného vrtu (tabulka č. 14) a obrázek č. 33.

Tabulka č. 14. Parametry reálného vrtu B6 před regenerací.

<b>Parametry</b>	<b>Před regenerací</b>	<b>Po regeneraci</b>
Dodatečné odpory $W$ [-]	10.9	8.1
Bezrozměrný parametr storativity vrtu $C_d$ [-]	10	42
Snížení způsobené dodatečnými odpory [m]	5.75	4.29



Obr.: 33. Čerpací zkouška na vrtu B6 před a po regeneračním zásahu.

Z uvedených výsledků parametrů skutečného vrtu můžeme odvodit, že provedený regenerační zásah byl úspěšný a vedl ke zkapacitnění vrtu. Původní hodnota dodatečných odporů činila 10.9, následně bylo působení tohoto faktoru vlivem regenerace vrtu sníženo na konečnou hodnotu 8.1, což představuje 25.7 % snížení hodnoty. Vlivem regenerace vrtu se také snížil maximální pokles hladiny podzemní vody při jejím odebírání.

#### 4.2.8 Čerpací zkoušky, lokalita Veletov

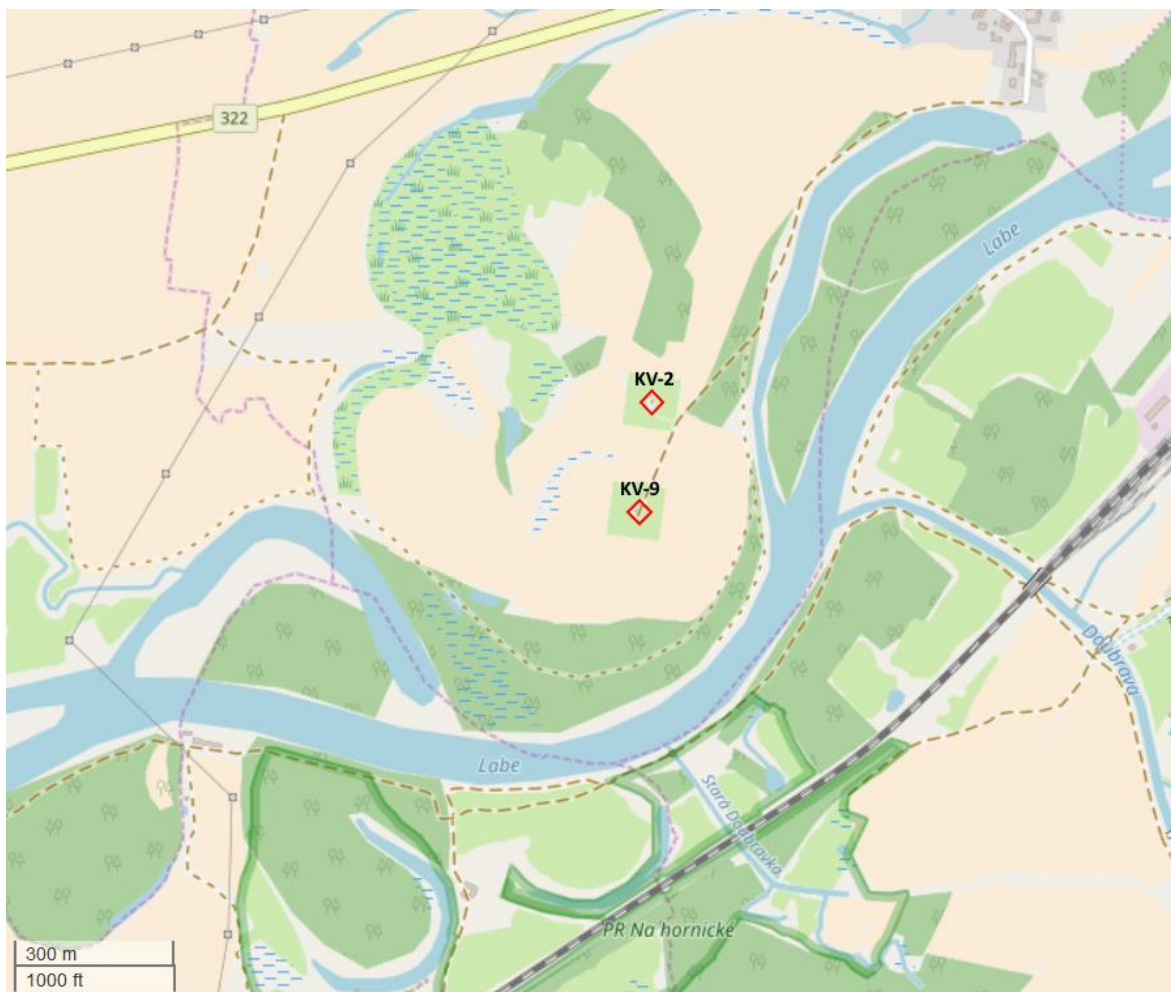
Cílem zde prezentovaného postupu vyhodnocení čerpacích zkoušek z oblasti Veletov je určení koeficientů skutečného vrtu pro následné zhodnocení stavu kolmatace vrtů. Tento zde zdokumentovaný příklad lze označit jako možný přístup využití nástroje RadFlow pro vyhodnocení krátkodobých čerpacích zkoušek v kontextu přípravy a správného načasování regenerace vrtu. Všechny zde provedené analýzy byly opět provedeny pomocí aplikačního programu RadFlow.

#### 4.2.9 Základní popis lokality Veletov

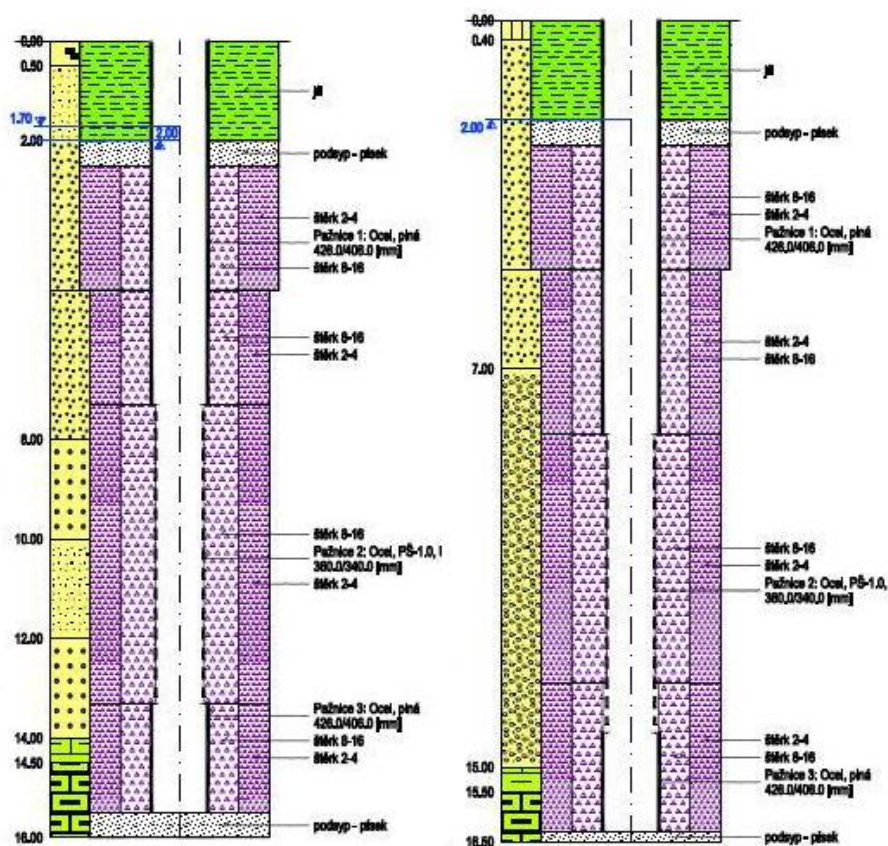
V rámci možného využití pro budoucí potřeby zásobování pitnou vodou byly dne 22. 2. 2016 provedeny poblíž obce Veletov v okrese Kolín čerpací zkoušky včetně kamerových zkoušek. Zájmová lokalita se nachází v mírně teplé klimatické oblasti s charakteristickým dlouhým, suchým létem a krátkou zimou s velmi krátkým trváním sněhové pokrývky. Průměrná roční teplota se pohybuje mezi 8-9 °C a dlouhodobý roční úhrn srážek je okolo 600 mm. Oblast se nachází v Českém masivu, podloží zkoumané lokality je tvořeno turonskými a písčitymi slínovci s překryvem kvartérními říčními sedimenty s mocností 14 -15 m. Zvodeň kvartérního kolektoru má volnou hladinu, kdy přirozená hladiny podzemní vody se pohybuje v rozmezí 1.3 m až 2.6 m. Mocnost zvodně činí 11 – 13 metrů (*Dvořák and Pastuszek, 2016*).

Vrty KV-2 a KV-9 jsou umístěny u řeky Labe (viz obrázek č. 34). Oba vrty jsou umístěny uvnitř vlastní oplocenky, nad vrty je vytvořen násep s manipulační šachtou a betonovou budkou se zavedeným elektrickým proudem. U každého vrtu je navíc přítomen další jeden vrt, který byl využit jako pozorovací vrt při čerpací zkoušce. Pozorovací objekt k vrtu KV-2 je vzdálen 7 m, pozorovací objekt k vrtu KV-9 je vzdálen 46.7 m.

Detailní hydrogeologická dokumentace vrtu KV-2 a KV-9 jsou znázorněny na obrázku číslo 35 a také v příloze práce. 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 225 mm (*Dvořák and Pastuszek, 2016*).



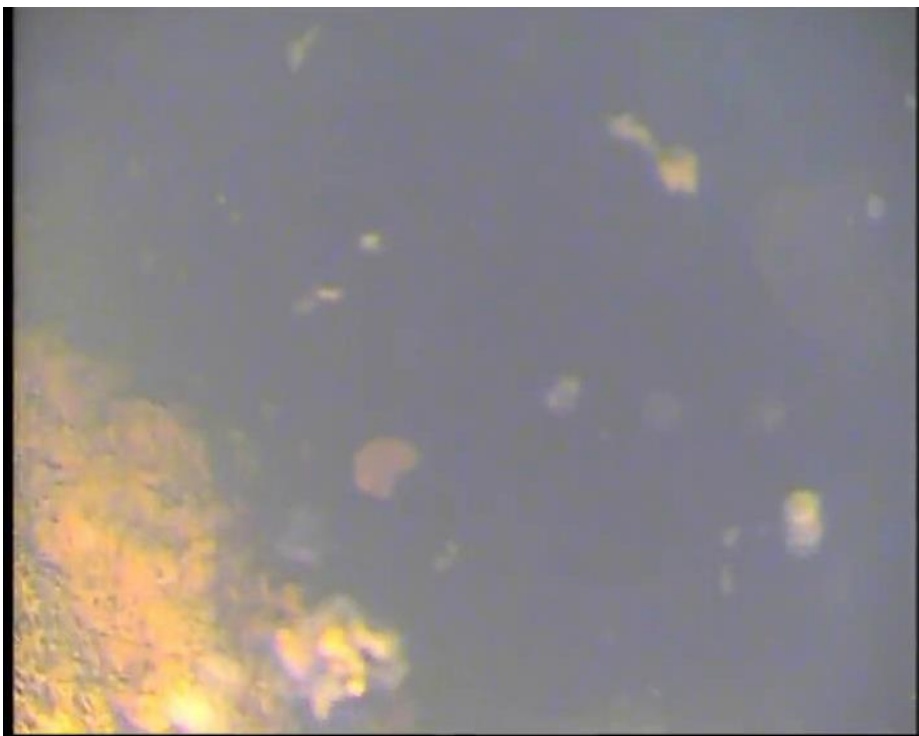
Obr.: 34. Zkoumaná lokalita Veletov, vrt KV-2 a KV-9 ( zdroj: <https://www.openstreetmap.org> ).



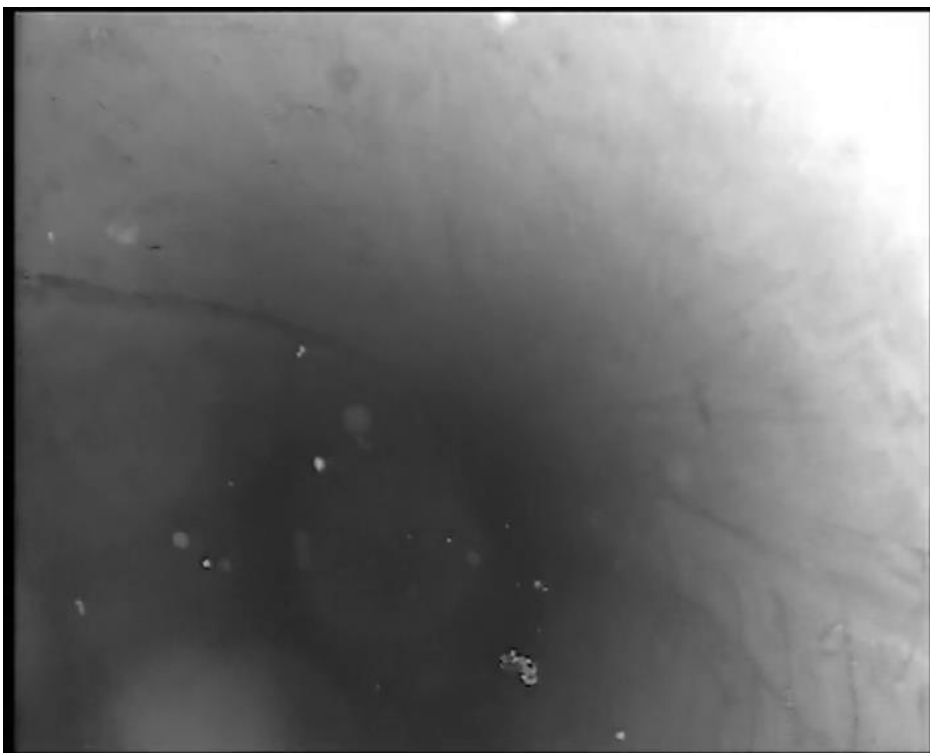
Obr.: 35. Geologický popis hornin a zemin vrtů KV-2 a KV-9 (Dvořák and Pastuszek, 2016).

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

Dále byla na vrtech provedena kamerová zkouška za použití speciální kamery, která je určena 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 ukazují obrázky číslo 36. a 37 (Dvořák and Pastuszek, 2016).



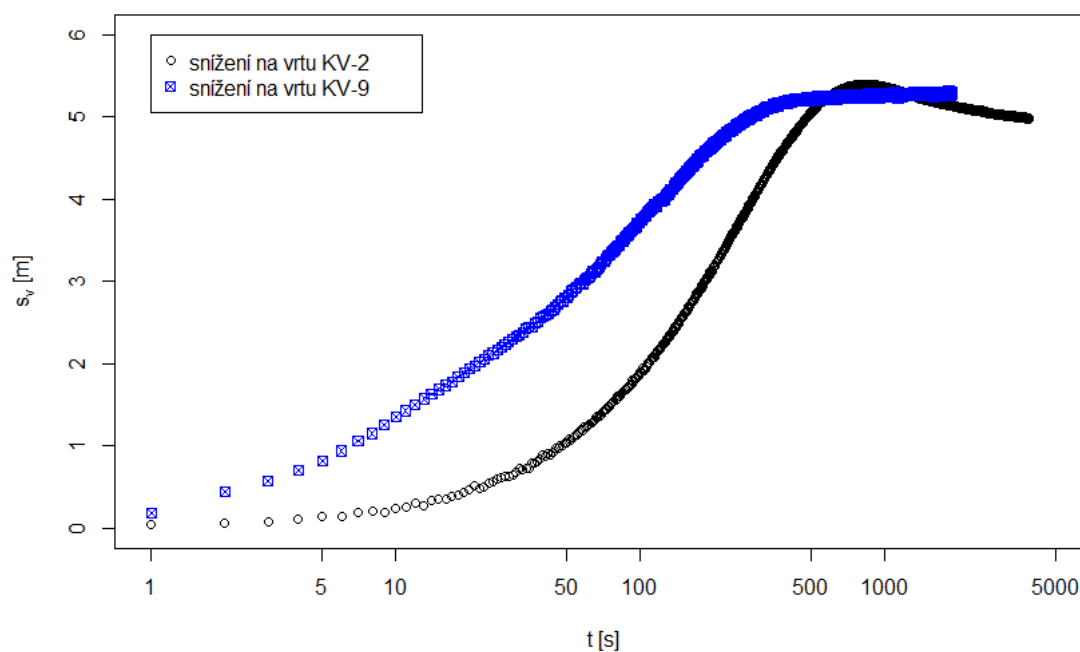
*Obr.: 36. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu KV-2 (Dvořák and Pastuszek, 2016).*



*Obr.: 37. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu KV-9 (Dvořák and Pastuszek, 2016).*

#### 4.2.10 Vyhodnocení základních hydraulických parametrů na vrtech KV-2 a KV-9

Hlavním cílem zde prezentovaných hydrodynamických zkoušek je posouzení stavu kolmatace vrtů KV-2 a KV-9 pomocí parametru dodatečných odporů. K tomuto účelu byly na sledovaných vrtech provedeny čerpací zkoušky. Celková doba trvání čerpání na vrtu KV-2 činila 64.6 min. a na vrtu KV-9 31.23 min. Vzhledem k takto krátké době čerpání nedošlo k pozorování snížení hladiny podzemní vody na pozorovacích vrtech, z toho důvodu nemohla být z výsledků určena hodnota storativity zvodně s využitím metody Jacobovy semilogaritmické aproximace. S ohledem na historické hydrogeologické průzkumy byla hodnota storativity zvodně pro vrty KV-2 a KV-9 převzata z dříve provedených čerpacích zkoušek, kde byl tento parametr stanoven. Při určování koeficientů skutečného vrtu zde budeme 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.: 38. Snížení hladiny podzemní vody na vrtech KV-2 a KV-9.



Na vrtu KV-2 nebylo dosaženo druhého přímkového úseku, jak ukazuje obrázek číslo 38, z toho důvodu byla hodnota transmisivity také převzata z historického průzkumu. Maximálnímu snížení na vrtu KV-2 bylo již dosaženo ve 14. minutě a následně pak pravděpodobně došlo k protržení kolmatační zóny, které mohlo být způsobeno vysokou vtokovou rychlostí, čímž došlo k uvolnění drobných částic z okolí vrtu. Tato změna následně způsobila zvýšení hladiny podzemní vody a znehodnotila další výsledky čerpací zkoušky (obr. 38).

*Tabulka č. 15. Optimalizace sklonu přímkového úseku vrtu KV-9 pro určení parametru transmisivity zvodně (počáteční hodnota přímkového úseku na časové ose byla stanovena na 500 sekund).*

Vrt	$\Delta s$ [m]	Hodnotící ukazatel	T [m <sup>2</sup> /s]
KV-9	0.036	0.17893	0.02115
	0.0539	0.10212	0.01412
	0.0662	0.04957	0.0115
	<b>0.0782</b>	<b>0.00167</b>	<b>0.00984</b>
	0.1321	0.23244	0.00576
	0.186	0.46321	0.00409

Jelikož základní rovnice popisující přítok vody do vrtu byly odvozeny za předpokladu napjaté hladiny v kolektoru a čerpací zkouška na vrtu KV-9 byla provedena na zvodni s volnou hladinou, kde na rozdíl od kolektoru s napjatou hladinou dochází ke změně mocnosti porézního materiálu v průběhu čerpání, potažmo pak transmisivity nasycené vrstvy je nutné naměřené hodnoty snížení hladiny vody ve vrtu upravit. Předpis pro korekci snížení podzemní vody na kolektoru s volnou hladinou je následující:

$$s_c = s_v - \frac{s_v^2}{2b}$$

Kde  $b$  je mocnost zvodně a  $s_c$  je upravená hodnota snížení hladiny podzemní vody pro určení hodnoty transmisivity pomocí Jacobovy metody přímky.

Hodnota transmisivity pro vrt KV-9 byla stanovena na  $0.00984 \text{ m}^2/\text{s}$ , tato hodnota se velmi dobře shoduje s archivními daty (Kokošková *et al.*, 1984), kde byla hodnota transmisivity vypočtena na  $0.016 \text{ m}^2/\text{s}$ . Shoda hodnoty transmisivity s historickými záznamy poukazuje na možnost využití historických dat vrtu KV-2 a KV-9 pro následnou analýzu parametrů skutečného vrtu. Bez těchto archivních záznamů by nebylo možné v následných analýzách parametrů skutečného vrtu dále pokračovat a provedené čerpací zkoušky by byly z důvodu nemožnosti určení základních hydraulických parametrů prostředí znehodnoceny.

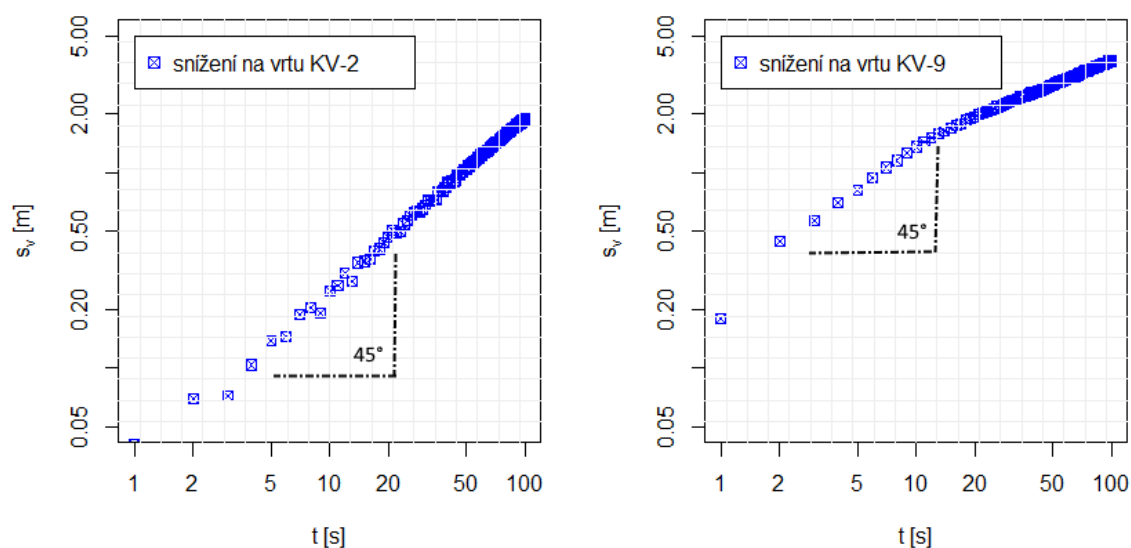
Tabulka č. 16. Základní hydraulické parametry vrtu KV-2 a vrtu KV-9 z archivních záznamů a z vyhodnocení čerpací zkoušky.

Parametry	KV-2	KV-9
Mocnost zvodně $b$ [m]	11	12
Čerpaná vydatnost $Q$ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]	$2.2 \times 10^{-3}$	$4.16 \times 10^{-3}$
Poloměr odčerpávaného vrtu $r_w$ [m]	0.17	0.1125
Transmisivita zvodně $T$ [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	0.016 ( <i>archiv</i> )	0.00984
Hydraulická vodivost $K$ [m/s]	0.001455	$8.2 \times 10^{-4}$
Vzdálenost pozorovacího vrtu $r$ [m]	-	-
$t_0$ [sec]	-	-
Storativita zvodně $S$	0.076 ( <i>archiv</i> )	0.076 ( <i>archiv</i> )

#### 4.2.11 Vyhodnocení parametrů skutečného vrtu na vrtech KV-2 a KV-9

V této části práce dojde k vyhodnocení parametrů storativity vrtu a dodatečných odporů na základně předešlého stanovení základních hydraulických parametrů. Jelikož parametry budou určeny za pomoci analýzy sklonu první přímkové části grafu, ani skutečnost částečného znehodnocení výsledků čerpací zkoušky na vrtu KV-2 nebrání

ve stanovení dodatečných odporů pomocí zde prezentované techniky. Hodnota dodatečných odporů bude stanovena obdobně jako v případě čerpacích zkoušek z oblasti Bela Crkva (kapitola 4.2.5.) na základě faktoru storativity vrtu. Podstatou určení bezrozměrného koeficientu storativity vrtu je identifikace jednotkového sklonu v počáteční fázi čerpací zkoušky jak ukazuje obrázek č. 39.



Obr.: 39. Jednotkový sklon v grafu  $\log s$  vs.  $\log t$  pro čerpací zkoušky na vrtech KV-2 a KV-9.

Čerpané množství vody v případě vrtu KV-2 bylo  $0.0022 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $0.00416 \text{ m}^3/\text{s}$  u vrtu KV-9. Pro výpočet bezrozměrného koeficientu storativity vrtu je nutné dále znát hodnotu storativity, jejichž hodnoty jsou uvedené v předešlé části práce a poloměr odčerpávaného vrtu. Tabulka č. 17 ukazuje výsledné hodnoty koeficientu storativity vrtu na základě jednotkového sklonu. Hodnoty  $t_j$  a  $s_j$  představují odečet z časové osy respektive osy snížení hladiny podzemní vody z grafu čerpací zkoušky.

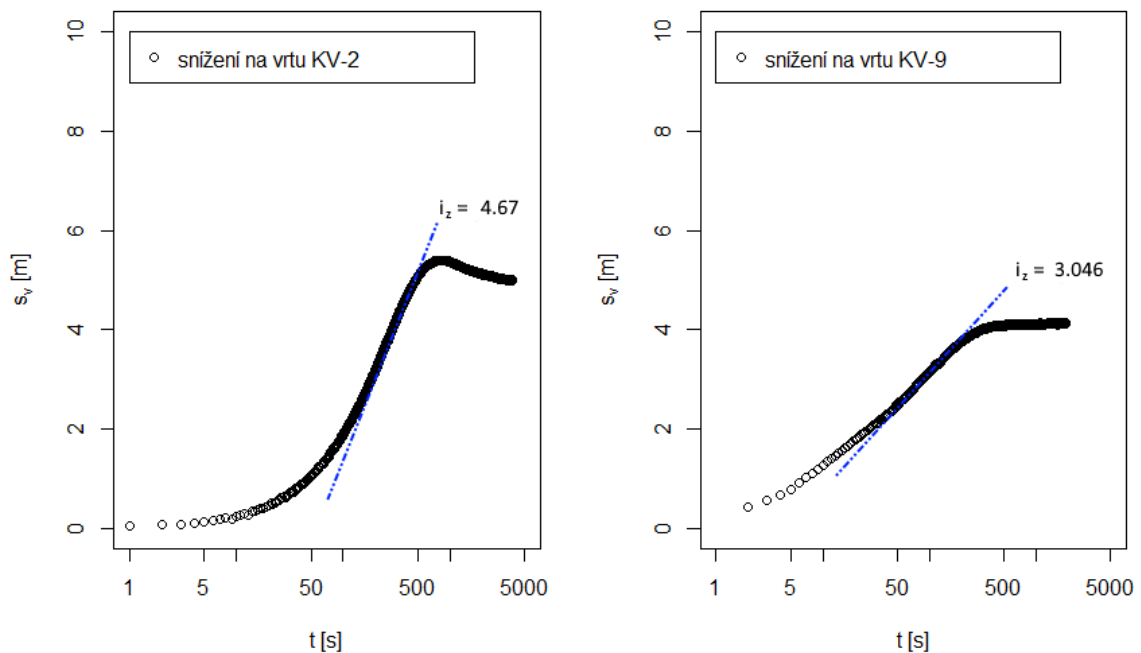
Tabulka č. 17. Hodnoty storativity vrtu odvozené z jednotkového sklonu.

Vrt	Hodnota $t_j$	Hodnota $s_j$	C	$C_d$
KV-2	5	0.1378	0.07983	12.94
KV-9	6	0.9409	0.02653	6.5

Na základě hodnoty storativity vrtu můžeme určit pomocí sklonu první přímkové části grafu snížení hladiny podzemní vody hodnotu dodatečných odporů. Výsledky vyhodnocení ukazuje tabulka č. 18.

Tabulka č. 18. Dodatečné odpory určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku.

Vrt	Čas $t$ [s]	Snížení $s_v$ [m]	$i_z$	Dodatečné odpory $W$
KV-2	[206.40, 361.57]	[3.27, 4.39]	4.67	241.55
KV-9	[39.61, 151.26]	[2.52, 4.29]	3.046	50.17

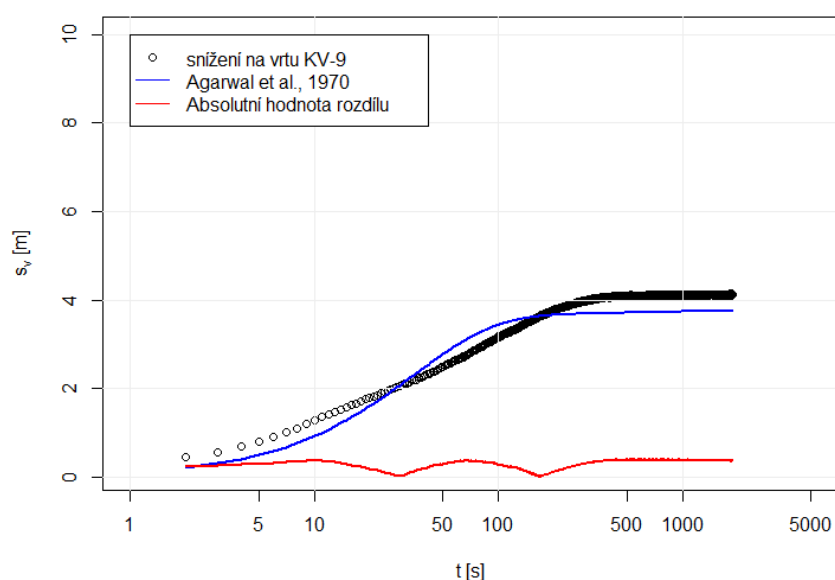


Obr.: 40. Sklon prvního přímkového úseku pro určení dodatečných odporů.

Výsledky dodatečných odporů vykazují značnou variabilitu vyhodnocených hodnot. Dodatečné odpory na vrtu KV-2 dosahují významně vyšších hodnot než je tomu v případě vrtu KV-9. Tato skutečnost může poukazovat na zásadní vliv faktoru dodatečných odporů na průběh čerpací zkoušky, který mohl v konečném důsledku způsobit i její celkové znehodnocení ve formě protržení kolmatační zóny. V další části se budeme zabývat zhodnocením dosažených výsledků a jejich validace pomocí analytických funkcí pro popis proudění podzemní vody.

#### 4.2.12 Zhodnocení parametrů skutečného vrtu, lokalita Veletov

K validaci výsledků parametrů skutečného vrtu došlo obdobně jako v případě vrtů z oblasti Bela Crkva pomocí parametrizace analytické funkce (Agarwal et al., 1970). Abychom se zde neopakovali s popisem provedení zmíněných technik, odkáží čtenáře na kapitolu 4.2.6, kde je tento postup již důkladně popsán a zde budou uvedeny jen konečné výsledky validace. Z důvodu znehodnocení čerpací zkoušky na vrtu KV-2 zde budou validovány jen výsledky vyhodnocení vrtu KV-9 (na vrtu KV-2 nebylo dosaženo druhého přímkového úseku, který je pro parametrizaci nezbytný).



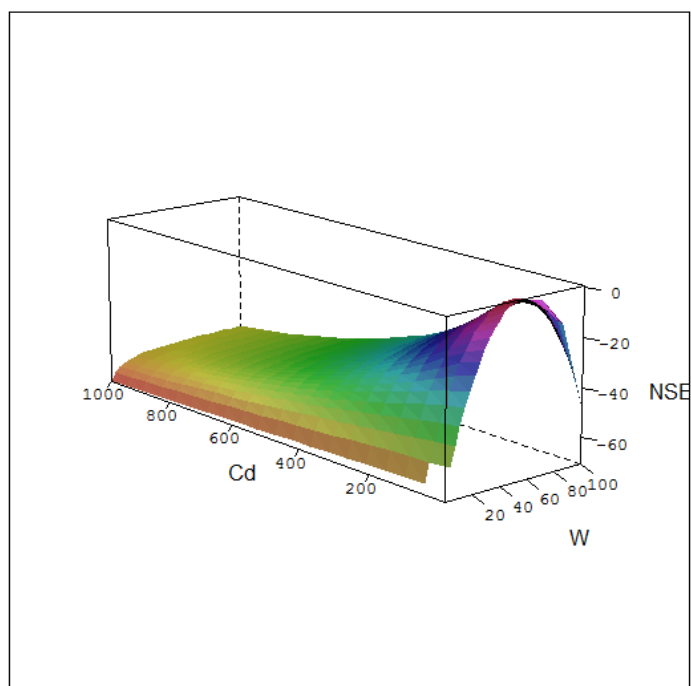
Obr.: 41. Porovnání terénních dat s funkcí definující snížení HPV s vlivem parametrů reálného vrtu – Agarwal, 1970 ( $W=50.17$ ,  $Cd = 6.5$ ).

Obrázek č. 41 zobrazuje výsledek porovnání hodnocených dat s průběhem analytické funkce s vlivem parametrů reálného vrtu. Po dosazení hodnot parametrů skutečného vrtu dosahovalo kritérium NSE hodnoty 0.43, následná parametrizace těchto parametrů dosáhla výsledků NSE 0.96. Obě hodnoty poukazují na uspokojivou shodu dat s modelem. Prostor parametrizace byl ohraničen hodnotami [1, 100] pro dodatečné odpory  $W$  a [1, 1000] pro storativitu vrtu  $C_d$ . Konečné výsledky parametrizace jsou obsaženy v tabulce č. 19 včetně porovnání s původními výsledky z grafoanalytické techniky.

Tabulka č. 19. Porovnání parametrů skutečného vrtu určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku s výsledky parametrizace funkce: Agarwal et al., 1970.

	Metoda	$C_d$ [-]	$W$ [-]	NSE
Vrt KV-9	Grafoanalytické techniky (kap. 4.2.9)	6.5	50.17	0.43
Vrt KV-9	Agarwal et al., 1970	9.2	55.1	0.96
Rozdíl		41.5 %	9.86 %	

Parametrizace vrtu KV-9



Obr.: 42. Průběh parametrizace faktorů skutečného vrtu.

## 5. Diskuze

Zde prezentované výsledky práce ukázaly možnosti využití nástroje RadFlow k vyhodnocení hydraulických parametrů z dat snížení hladiny podzemní vody při čerpací zkoušce. Hlavní důraz byl kladen na parametry reálného vrtu a také na validaci jednotlivých výsledných hodnot pomocí odlišných technik vyhodnocení. Práce potvrdila, že představené grafoanalytické metody dosahují akceptovatelné přesnosti s porovnáním s technikami, které jsou založené na analytickém řešení proudění podzemní vody. A také připomenula jak důležité je správné určení základních parametrů zvodně v podobě transmisivity a storativity, oba tyto faktory jsou zásadní a mohou způsobit značné odlišnosti výsledných hodnot parametrů skutečného vrtu. Také bych zde rád poukázal na jednoznačnou výhodu představené grafoanalytické techniky pro stanovení dodatečných odporů na základě znalosti hodnoty storativity vrtu. Metoda je založená na určení sklonu pouze prvního přímkového úseku čerpací zkoušky. A to značně snižuje časové požadavky na provádění čerpací zkoušky, protože není nutné pro stanovení parametrů reálného vrtu dosáhnout druhého přímkového úseku. Pro úplnost doplním, že v případě zkoušek na lokalitě Bela Crkva prováděných po regeneraci, byl na vrtu B6 druhý přímkový úsek dosažen po cca 2 minutách a následovalo dalších 80 minut čerpání. Metoda se tedy jeví jako velmi vhodná v kontextu vyhodnocování krátkodobých čerpacích zkoušek. A dále, že v případě vrtu KV-2 na lokalitě Veletov by nemohlo ani dojít z důvodu předčasného ukončení čerpací zkoušky ke stanovení parametrů skutečného vrtu jiným způsobem, protože nebylo dosaženo druhého přímkového úseku.

Aplikace RadFlow nabízí jen základní postupy vyhodnocení čerpacích zkoušek a neposkytuje další možnosti, jako například vyhodnocení stoupací zkoušky a jiné. V porovnání s jinými nástroji, které jsou určeny pro vyhodnocení dat z hydrodynamických zkoušek a mají za sebou v některých případech i více jak 20 letý kontinuální vývoj, poskytuje dle mého názoru velmi jednoduchý a pokročilý přístup k vyhodnocení čerpacích zkoušek a to hlavně těch krátkodobých. S podobnou možností jsem se během svého krátkého seznámení s jinými nástroji neseťkal. Dalším zajímavým řešením při tvorbě aplikace je využití webové platformy, která zajišťuje velmi snadnou dostupnost a umožňuje práci s

nástrojem v celé řadě zařízení, které mají připojení k internetu. Tento přístup shledávám jako inovativní a reflektující dnešní trendy ve vývoji aplikací, avšak sebou také přináší jistou nevýhodu v podobě náročnosti vývoje aplikace.



## 6. 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 s ní nakládat jako se 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 lokalitu Bela Crkva v Srbské Republice, kde byly vyhodnoceny dva vrty B1 a B6. Následně pak došlo k hodnocení regeneračního zásahu provedeného na vrtu B1 a B6 pomocí porovnání výsledků čerpacích zkoušek před a po regeneraci. Výsledek opětovného vyhodnocení čerpací zkoušky společně s kamerovými zkouškami, potvrdily předpoklad, že po provedení regenerace vrtu dojde ke snížení hodnoty dodatečných odporů. Ukázalo se, že hodnoty koeficientů mohou sloužit jako hodnotící parametr provedeného zásahu, nebo posloužit jako relevantní ukazatel pro plánování budoucích regeneračních zásahů. Dalším příkladem využití nástroje RadFlow se stala lokalita Veletov, kde došlo k vyhodnocení čerpacích zkoušek na vrtech KV-2 a KV-9. Účelem provedených zkoušek bylo zjištění možnosti budoucího zásobování pitnou vodou ze zdrojů podzemních vod. Na výsledcích vyhodnocení je patrné, že i částečné znehodnocení prováděné čerpací zkoušky (konkrétně na vrtu KV-2) nemusí nutně zamezit stanovení parametrů skutečného vrtu. Díky zde prezentovaným metodám vyhodnocení z prvního přímkového úseku grafu snížení hladiny podzemní vody je možné, i takto částečně znehodnocená data relevantně zpracovat.

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 zde bylo 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. Uvedl bych 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 hodnotící 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 může pohybovat v desítkách minut. V této souvislosti se nabízí možnost jednoduché predikce vývoje dodatečných odporů na základě řady čerpacích krátkodobých zkoušek, kdy lze díky zde prezentované technice vyhodnocení dosáhnout značné časové, ale i finanční úspory.

Zde prezentované výsledky práce pracují s poznatky, které jsou uvedeny také v certifikované metodice s názvem: Provádění a vyhodnocení krátkodobých hydrodynamických zkoušek na reálných vrtech, která byla zveřejněna v roce 2015. Stala se jedním z hlavních výstupů projektu TAČR: Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR (projekt byl řešen v období 01/2012 - 12/2015) společně se zde popsaným nástrojem RadFlow.

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 reálného 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.

## 7. Seznam literatury

- 1) Agarwal, R. G., Al-Hussainy, R., & Ramey, H. J. (1970, September 1). An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: I. Analytical Treatment. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/2466-PA
- 2) Barrash, Warren & Clemo, Tom & J. Fox, Jessica & Johnson, Timothy. (2006). Field, laboratory, and modeling investigation of the skin effect at wells with slotted casing, Boise Hydrogeophysical Research Site. *Journal of Hydrology*. 326. 181-198. 10.1016/j.jhydrol.2005.10.029.
- 3) Bear, J., Cheng, A. H.-D., (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*, Springer Netherlands, ISBN 978-1-4020-6681-8
- 4) Black, J. H. and Kipp, K. L. (1977), The Significance and Prediction of Observation Well Response Delay in Semiconfined Aquifer-Test Analysis. *Groundwater*, 15: 446-451. doi:10.1111/j.1745-6584.1977.tb03193.x
- 5) Butler, Jr., J. (1998). *The Design, Performance, and Analysis of Slug Tests*. Boca Raton: CRC Press.
- 6) Chapuis, R. P., Bélanger, C. and Chenaf, D. (2006), Pumping Test in a Confined Aquifer Under Tidal Influence. *Groundwater*, 44: 300-305. doi:10.1111/j.1745-6584.2005.00139.x
- 7) Cooper HH., Jacob CE (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history, *Eos Trans. AGU*, 27(4), 526–534, doi:10.1029/TR027i004p00526..
- 8) Domenico P. A., Schwartz F. W., (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley: 60-63, ISBN-10: 0471597627

- 9) Dvořák, V., Pastuszek, F., (2016). Závěrečná zpráva projektu: Zhodnocení technického stavu vrtaných studní KV-2 a KV-9 a návrh opatření pro efektivní využití lokality.
- 10) Fenske, P. R., 1977: Radial flow with discharging-well and observation-wellstorage. *J. Hydrol.*, 32, 87-96, doi: 10.1016/0022-1694(77)90120-2.
- 11) Formánek, Z., Dvořák, V., (2016). Závěrečná zpráva projektu: Zavedení udržitelného systému zásobování pitnou vodou Bela Crkva.
- 12) Freeze, A. and Cherry, J. (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 604 p.
- 13) Garcia-Rivera, J. - Raghavan, R., 1979: Analysis of short-time pressure data dominated by wellbore storage and skin. *J. Petrol. Technol.*, 623-631
- 14) Heath C. Ralph, 1983: *Basic Ground-Water hydrology*. Geological survey Dallas.
- 15) Hawkins, M. F.Jr., 1956: A note on the skin effect, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 207, 356–357.
- 16) Hvorslev, M. (1951) *Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations*, *Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg*.
- 17) Hund-Der Yeh, Ya-Chi Chang (2013). Recent advances in modeling of well hydraulics, *Advances in Water Resources*, Volume 51, Pages 27-51
- 18) 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)
- 19) 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.

- 20) 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>.
- 21) Chen, Yen-Ju & Yeh, Hund-Der & Chang, Kai-Ju. (2012). A mathematical solution and analysis of contaminant transport in a radial two-zone confined aquifer. *Journal of contaminant hydrology*. 138-139. 75-82. 10.1016/j.jconhyd.2012.06.006.
- 22) 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.
- 23) Jetel J., 1982: Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech, ÚÚG Praha.
- 24) Kabala, Z., (2001). Sensitivity analysis of a pumping test on a well with wellbore storage and skin. *Advances in Water Resources - ADV WATER RESOUR.* 24. 483-504. 10.1016/S0309-1708(00)00051-8.
- 25) Kazda I., 1997: Podzemní hydraulika v ekologických a inženýrských aplikacích. Academia, Praha.
- 26) Kokošková, Kupková, Zelinka, 1984: KOLIN -VELETOV. VYSLEDKY II. A III. ETAPY HYDROGEOLOGICKEHO PRUZKUMU -ETAPOVA ZPRAVA, Vodní zdroje, Praha.
- 27) Kříž, H. (1983): Hydrologie podzemních vod – AKADEMIA, 208-213, Praha.
- 28) 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
- 29) 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

- 30) Moench A.F., (1997). Flow to A Well of Finite Diameter in A Homogeneous, Anisotropic Water Table Aquifer. *Water Resources Research - WATER RESOUR RES.* 33. 1397-1407. 10.1029/97WR00651.
- 31) Ni, James & Cheng, Jason Wen-chieh & Ge, Louis. (2011). A case history of field pumping tests in a deep gravel formation in the Taipei Basin, Taiwan. *Engineering Geology.* 117. 17-28. 10.1016/j.enggeo.2010.10.001.
- 32) Narasimhan, T. N., and M. Zhu (1993), Transient flow of water to a well in an unconfined aquifer: Applicability of some conceptual models, *Water Resour. Res.*, 29(1), 179–191, doi: 10.1029/92WR01959.
- 33) 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.
- 34) Park, Eungyu & Zhan, HB. (2002). Hydraulic of a finite-diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect. *Advances in Water Resources.* 25. 389-400. 10.1016/S0309-1708(02)00011-8.
- 35) Pasandi M., Samani N., Barry D.A., 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>.
- 36) Pech P. (2003), Determination of the skin factor in the early portion of an aquifer test. *Journal of Environmental Hydrology.* Vol. 11, pp. 1-11
- 37) Pech P., Novotny R. (2005), Analytical solutions for well drawdown with well losses 1. Multiple well system near a boundary. *Journal of Environmental Hydrology*, Vol.13, pp. 1-10.
- 38) 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

- 39) 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
- 40) 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,
- 41) Renard, P. (2006). Hydraulics of Wells and Well Testing. In Encyclopedia of Hydrological Sciences (eds M. G. Anderson and J. J. McDonnell). doi:10.1002/0470848944.hsa154a
- 42) Rovey, C.W. & Niemann, W.L.. (2001). Wellskins and slug tests: Where's the bias?. Journal of Hydrology. 243. 120-132. 10.1016/S0022-1694(00)00408-X.
- 43) 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
- 44) Schwartz, F.W. and Zhang, H. (2003), Fundamentals of Groundwater. John Wiley & Sons, New York. 583 pp.
- 45) Shapiro, A.M., Oki, D.S., Greene, E.A.: 1998, Estimating formation properties from early-time recovery in wells subject to turbulent head losses, DO - 10.1016/S0022-1694(98)00170-X
- 46) Stehfest, H., 1970. Algorithm 368 numerical inversion of Laplace transforms D-5. Comm. of the ACM No 1.
- 47) Streltsova, T. D., 1988: Well Testing in Heterogeneous Formations, Wiley, New York, 413 pp.
- 48) 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.

- 49) Technika a technologie hlubinného vrtání [online]. [cit. 16.8.2018]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/TECHHLDOB/hlubinneVrtani/vrtani/vrtyHydrogeologicke.html>
- 50) 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.
- 51) Valentová J., 2007: *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT, Praha.
- 52) van Everdingen, A.F., Hurst, W., 1949. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Trans*, pages 305–324.
- 53) 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.
- 54) Walton W. C., 2006. *Aquifer Test Modeling*. CRC Press. Hardcover: 240 pages, ISBN-10: 1420042920
- 55) 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*



# 8. Souhrny

## 8.1 Seznam vzorců

Vzorec (1.1) .....	13
Vzorec (1.2) .....	14
Vzorec (1.3) .....	14
Vzorec (1.4) .....	14
Vzorec (1.5) .....	15
Vzorec (1.6) .....	15
Vzorec (1.7) .....	15
Vzorec (1.8) .....	15
Vzorec (2.1) .....	17
Vzorec (2.2) .....	17
Vzorec (2.3) .....	17
Vzorec (2.4) .....	17
Vzorec (2.5) .....	18
Vzorec (2.6) .....	18
Vzorec (2.7) .....	18
Vzorec (2.8) .....	19
Vzorec (2.9) .....	20
Vzorec (2.10) .....	20
Vzorec (2.11) .....	21
Vzorec (2.12) .....	21
Vzorec (2.13) .....	22
Vzorec (2.14) .....	22
Vzorec (2.15) .....	23
Vzorec (2.16) .....	23
Vzorec (2.17) .....	23
Vzorec (2.18) .....	23

Vzorec (2.19) .....	23
Vzorec (2.20) .....	24
Vzorec (3.1) .....	25
Vzorec (3.2) .....	25
Vzorec (3.3) .....	27
Vzorec (3.4) .....	27
Vzorec (3.5) .....	29
Vzorec (3.6) .....	29
Vzorec (3.7) .....	29
Vzorec (3.8) .....	29
Vzorec (3.9) .....	29
Vzorec (3.10) .....	30
Vzorec (3.11) .....	30
Vzorec (4.1) .....	31
Vzorec (4.2) .....	33
Vzorec (4.3) .....	33
Vzorec (4.4) .....	33
Vzorec (4.5) .....	35
Vzorec (4.6) .....	35
Vzorec (4.7) .....	36
Vzorec (4.8) .....	36
Vzorec (4.9) .....	36
Vzorec (4.10) .....	37
Vzorec (4.11) .....	37
Vzorec (4.12) .....	38
Vzorec (4.13) .....	38
Vzorec (4.14) .....	38
Vzorec (4.15) .....	42
Vzorec (4.16) .....	42
Vzorec (4.17) .....	42
Vzorec (4.18) .....	43
Vzorec (4.19) .....	43

Vzorec (4.20) .....	43
Vzorec (4.21) .....	44
Vzorec (4.22) .....	44

## 8.2 Seznam obrázků

<i>Obr.: 1. Meze platnosti Darcyho zákona, kde <math>Re</math> označuje hodnoty Reynoldsova čísla. ...</i>	19
<i>Obr.: 2. Elementární objem. ....</i>	21
<i>Obr.: 3. Schéma standardního vrtu pro jímání podzemí vody (Technika a technologie hlubinného vrtání, [online]). ....</i>	26
<i>Obr.: 4. a) Ukazuje vliv vlastního objemu vrtu na průběh čerpací zkoušky, <math>q_2</math> představuje množství vody odebrané z vlastního objemu vrtu a <math>q_1</math> reprezentuje objem vody z porézního prostředí (Renard, 2006). b) Časový průběh jednotlivých složek čerpaného množství <math>Q</math> (Renard, 2006). ....</i>	31
<i>Obr.: 5. Graf ukazující vliv storativity vrtu na průběh snížení v bezrozměrných jednotkách a logaritmickém měřítku při zanedbání vlivu dodatečných odporů (<math>C_d</math> je bezrozměrná storativita vrtu). ....</i>	32
<i>Obr.: 6. Ilustrativní tvar křivky reprezentující průběh snížení na vrtu s vlivem vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů. První přímková část <math>A</math> definuje úsek s vlivem vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů, druhá přímková část označená <math>B</math> slouží k vyhodnocení základní parametrů dle Jacobovy semilogaritmické metody přímky. ....</i>	34
<i>Obr.: 7. Jednotkový sklon na počátku čerpací zkoušky po vynesení do grafu <math>\log s_v</math> vs. <math>\log t</math>, kde <math>s_v</math> je naměřené snížení na vrtu. ....</i>	35
<i>Obr.: 8. Snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory (Renard, 2006). ....</i>	37
<i>Obr.: 9. Graf ukazující vliv dodatečných odporů na průběh snížení v bezrozměrných jednotkách a logaritmickém měřítku při uvažování vlivu storativity vrtu (<math>C_d = 10</math>). ....</i>	40
<i>Obr.: 10. Průběh snížení hladiny podzemní vody vycházející z modelu Agarwal et al. (1970), který zahrnuje vliv parametrů skutečného vrtu a snížení za podmínek ideálního vrtu (Jacob, 1946). ....</i>	41
<i>Obr.: 11. Bezrozměrné snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory a vlastním objemem vrtu ....</i>	42
<i>Obr.: 12. Logo aplikace RadFlow. ....</i>	56
<i>Obr.: 13. Navigace aplikace RadFlow. ....</i>	56
<i>Obr.: 14. UML diagram datového modelu aplikace RadFlow ....</i>	59
<i>Obr.: 15. Registrační formulář aplikace ....</i>	60
<i>Obr.: 16. Formulář pro vytvoření nového modelu a tabulky pro správu ....</i>	60

Obr.: 17. Mapa lokalizace vrtů s čerpací stanicí oblasti Bela Crkva, Republika srbská (zdroj: ESRI Base maps 2015).....	63
Obr.: 18. Geologický popis hornin a zemin vrtů B1 a B6 (Formánek and Dvořák, 2016) ..	64
Obr.: 19. Snímek perforovaného úseku vrtu B1 před a po regeneraci (Formánek and Dvořák, 2016). .....	65
Obr.: 20. Snímek perforovaného úseku vrtu B6 před a po regeneraci (Formánek and Dvořák, 2016). .....	66
Obr.: 21. Snížení hladiny podzemní vody ve vrtu B1 s hodnotami snížení na pozorovacím objektu.....	67
Obr.: 22. Snížení hladiny podzemní vody ve vrtu B6 s hodnotami snížení na pozorovacím objektu.....	67
Obr.: 23. Průběh snížení hladiny podzemní vody a pozorovacích objektech .....	70
Obr.: 24. Měřené snížení hladiny podzemní vody na vrtech B1 a B6 a porovnání derivací funkce snížení s Theisovým modelem proudění. ....	71
Obr.: 25. Jednotkový sklon v grafu $\log s$ vs. $\log t$ pro čerpací zkoušky na vrtech B1 a B6.	73
Obr.: 26. Vývoj sklonu funkce $s_v(t)$ vyjádřený v grafu $\log s$ vs. $\log t$ .....	73
Obr.: 27. Sklon prvního přímkového úseku pro určení dodatečných odporů.....	75
Obr.: 28. Porovnání terénních dat s funkcí definující snížení HPV s vlivem parametrů reálného vrtu (dosazení parametry odpovídají vyhodnocení dle výše uvedené metodiky) ..	76
Obr.: 29. Průběh parametrizačního procesu vrtu B1 .....	77
Obr.: 30. Průběh parametrizačního procesu vrtu B6.....	78
Obr.: 31. Srovnání terénních dat čerpací zkoušky na vrtech B1 a B6 s Theisovým model proudění HPV. ....	79
Obr.: 32. Snížení HPV na vrtu B1 před provedenou generací. ....	81
Obr.: 33. Čerpací zkouška na vrtu B6 před a po regeneračním zásahu. ....	83
Obr.: 34. Zkoumaná lokalita Veletov, vrt KV-2 a KV-9 ( zdroj: <a href="https://www.openstreetmap.org">https://www.openstreetmap.org</a> )......	85
Obr.: 35. Geologický popis hornin a zemin vrtů KV-2 a KV-9 (Dvořák and Pastuszek, 2016). .....	86
Obr.: 36. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu KV-2 (Dvořák and Pastuszek, 2016). .....	87
Obr.: 37. Snímek z kamerové prohlídky na vrtu KV-9 (Dvořák and Pastuszek, 2016). .....	87
Obr.: 38. Snížení hladiny podzemní vody na vrtech KV-2 a KV-9. ....	88

<i>Obr.: 39. Jednotkový sklon v grafu <math>\log s</math> vs. <math>\log t</math> pro čerpací zkoušky na vrtech KV-2 a KV-9. ....</i>	91
<i>Obr.: 40. Sklon prvního přímkového úseku pro určení dodatečných odporů. ....</i>	92
<i>Obr.: 41. Porovnání terénních dat s funkcí definující snížení HPV s vlivem parametrů reálného vrtu – Agarwal, 1970 (<math>W = 50.17</math>, <math>Cd = 6.5</math>). ....</i>	93
<i>Obr.: 42. Průběh parametrizace faktorů skutečného vrtu. ....</i>	94

## 8.3 Seznam tabulek

<i>Tabulka č. 1. Hodnoty parametru <math>V</math> pro <math>N = 8</math>.</i>	45
<i>Tabulka č. 2. Výčet hlavních dostupných nástroj (softwarů) pro vyhodnocení čerpací zkoušky.</i>	46
<i>Tabulka č. 3. Specifikace webového hostingu pro aplikaci RadFlow</i>	57
<i>Tabulka č. 4. Analytické metody vyhodnocení dat čerpacích zkoušek.</i>	61
<i>Tabulka č. 5. Optimalizace sklonu přímkového úseku pro určení parametru transmisivity zvodně (počáteční hodnota přímkového úseku na časové ose byla stanovena na 280 sekund pro vrt B6 a 830 sekund pro vrt B1).</i>	68
<i>Tabulka č. 6. Výsledné hydraulické parametry vrtu B1 a vrtu B6 z čerpací zkoušky u Bela Crkva, Republika Srpská.</i>	70
<i>Tabulka č. 7. Porovnání směrnice pro určení transmisivity dle Jacobovy aproximativní metody přímkou s Theisovým model proudění</i>	72
<i>Tabulka č. 8. Hodnoty storativity vrtu odvozené z jednotkového sklonu.</i>	74
<i>Tabulka č. 9. Dodatečné odpory určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku.</i>	75
<i>Tabulka č. 10. Porovnání parametrů skutečného vrtu určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku s výsledky parametrizace funkce: Agarwal et al., 1970.</i>	77
<i>Tabulka č. 11. Stanovení hodnoty dodatečných odporů z odečtu rozdílu Theisova modelu proudění HPV vs. terénní data.</i>	79
<i>Tabulka č. 12. Parametry reálného vrtu B1 před regenerací.</i>	81
<i>Tabulka č. 13. Základní hydraulické parametry vrtu B6 před a po regeneraci.</i>	82
<i>Tabulka č. 14. Parametry reálného vrtu B6 před regenerací.</i>	82
<i>Tabulka č. 15. Optimalizace sklonu přímkového úseku vrtu KV-9 pro určení parametru transmisivity zvodně (počáteční hodnota přímkového úseku na časové ose byla stanovena na 500 sekund).</i>	89
<i>Tabulka č. 16. Základní hydraulické parametry vrtu KV-2 a vrtu KV-9 z archivních záznamů a z vyhodnocení čerpací zkoušky.</i>	90
<i>Tabulka č. 17. Hodnoty storativity vrtu odvozené z jednotkového sklonu.</i>	92
<i>Tabulka č. 18. Dodatečné odpory určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku.</i>	92
<i>Tabulka č. 19. Porovnání parametrů skutečného vrtu určené pomocí sklonu prvního přímkového úseku s výsledky parametrizace funkce: Agarwal et al., 1970.</i>	94

## 8.4 Seznam použitých symbolů

$b$  - výška zvodnělé vrstvy [L]

$C$  - jednotkový faktor storativity vrtu [L<sup>2</sup>]

$C_d$  - bezrozměrný parametr storativity vrtu

$d$  - průměr efektivního zrna [L]

$g$  - gravitační zrychlení [L.T<sup>-2</sup>]

$h$  - piezometrická výška [L]

$h_0$  - počáteční piezometrická výška hladiny podzemní vod [L]

$i_z$  - sklon prvního přímkového úseku

$i_{zd}$  – bezrozměrný sklon prvního přímkového úseku

$J_0$  - modifikované Besselovy funkce prvního druhu a nultého řádu

$J_1$  - modifikované Besselovy funkce prvního druhu a prvního řádu

$K$  - hydraulické vodivost [L.T<sup>-1</sup>]

$K_0$  - modifikovaná Besselova funkce druhého druhu nultého řádu

$K_1$  - Besselova funkce druhého druhu prvního řádu

$k_p$  – koeficient propustnosti [L<sup>2</sup>]

$n$  - pórovitost

$n_e$  - efektivní pórovitost

$p$  - Laplaceův transformační parametr

$Q$  - objemový průtok [L<sup>3</sup>.T<sup>-1</sup>]

$q$  - specifický průtok [L<sup>2</sup>.T<sup>-1</sup>].



$r$  – radiální vzdálenost [L]

$r_c$  - poloměr neperforované části vrtu [L]

$r_d$  - je dosah depresního kužele [L]

$Re$  - bezrozměrné Reynoldsovo číslo [-]

$Re_w$  - efektivní dosah vlivu storativity vrtu na pozorovacím vrtu

$r_p$  - poloměr výstroje vrtu [L]

$r_v$  - poloměr hydraulicky dokonalého vrtu [L]

$r_w$  - poloměr vrtu [L]

$r_{wo}$  – poloměr pozorovacího vrtu [L]

$s$  - snížení hladiny ve studni [L]

$S$  - storativita zvodně [-]

$S_a$  - plocha průtočného průřezu [L<sup>2</sup>]

$s_d$  – bezrozměrné snížení

$S_s$  – specifická storativita [L<sup>-1</sup>]

$s_{te}$  - 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<sup>2</sup>.T<sup>-1</sup>]

$t_d$  – 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 [ $L$ ]

$\alpha$  - stlačitelnost zvodnělé vrstvy

$\beta$  - úhel

$\beta_v$  - stlačitelnost kapaliny

$\mu$  - dynamická viskozita, [ $M.L^{-1}.T^{-1}$ ]

$\rho$  - hustota kapaliny [ $M.L^{-3}$ ],

$\nu$  - kinematická viskozita [ $L^2.T^{-1}$ ]

## 9. Přílohy

A - Aplikace RadFlow, úvodní stránka

B - Detailní popis hydrogeologického prostředí vrtu B1, 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 – Průběh snížení hladiny podzemní vody na vrtu B6 před provedenou regenerací, lokalita Bela Crkva (vizualizace v programu RadFlow)

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

F – Průběh snížení hladiny podzemní vody na vrtu B1 po provedené regeneraci, lokalita Bela Crkva (vizualizace v programu RadFlow)

G - Snímky vrtu B6 před regenerací

H - Snímky vrtu B6 po regeneraci

I - Snímky vrtu B1 před regenerací

J - Snímky vrtu B1 po regeneraci

K – Vrt VK-2, násep, obslužný objekt a vodoměr se škrťícím ventilem

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

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

N – Kamerová prohlídka vrtu KV-2 v hloubce 5 a 9 metrů

O - Kamerová prohlídka vrtu KV-2 v hloubce 11 a 15 metrů

P – Žádost o využití dat z čerpacích zkoušek

Q – Popis práce s programem RadFlow (manuál)

## 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 předešlým 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 nejpoužívanějších 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.

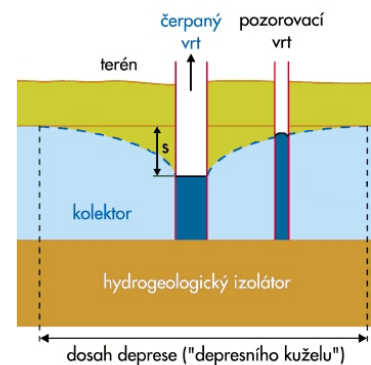
## Čerpací zkouška

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 nichž 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

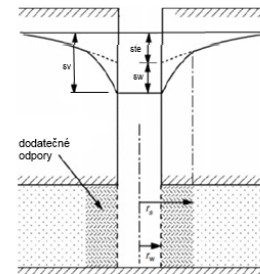
Na samotném začátku čerpací zkoušky odebrané množství vody pochází z vlastního objemu vrtu a nikoliv z okolního porézního prostředí (Papadopolos and Cooper 1967). Vliv vlastního objemu vrtu na průběh čerpací zkoušky trvá jen několik minut a česem se snižuje (Fenske, 1977), přesto jeho zanedbáním dojde 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 čerpaní 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).

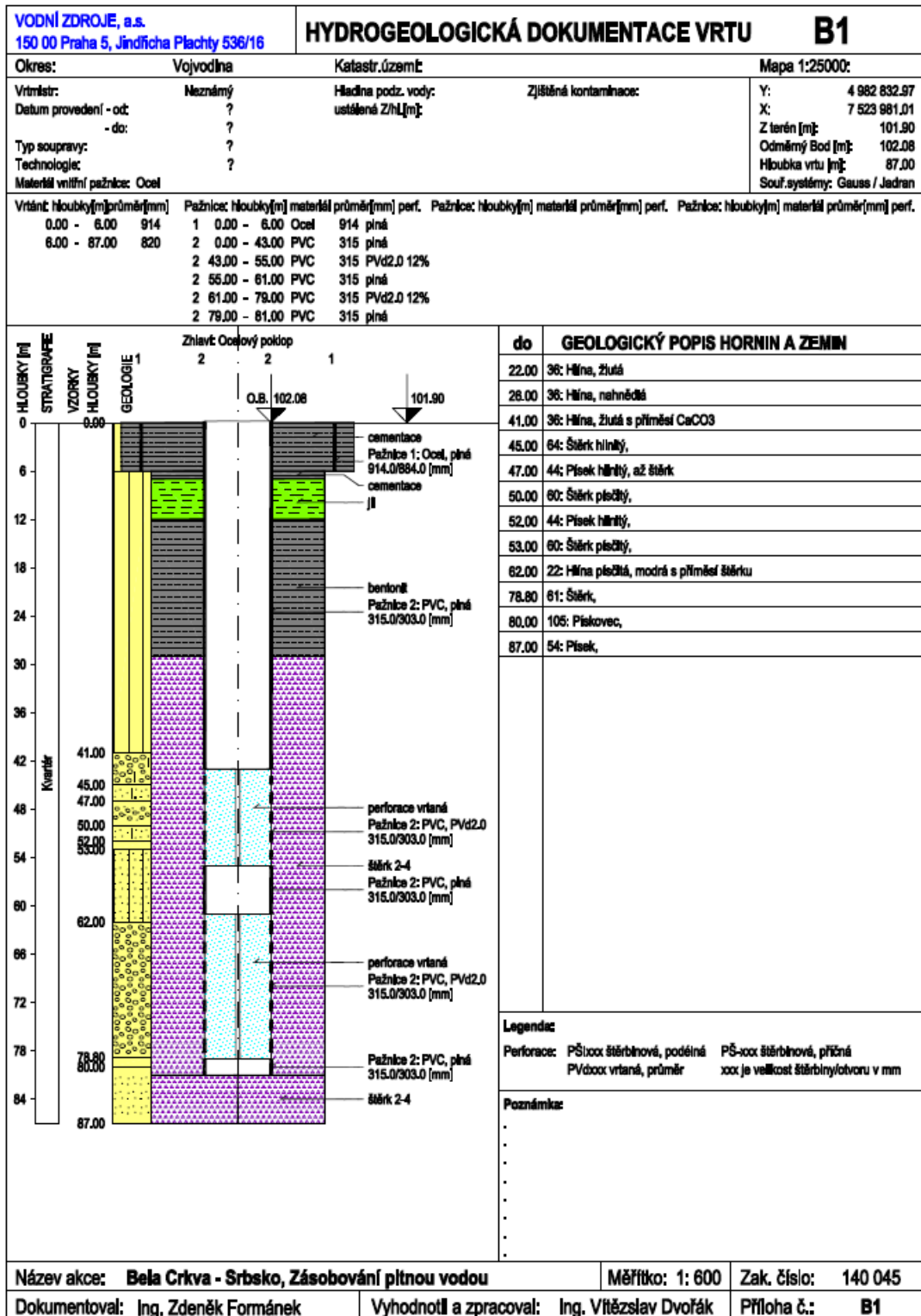
$$sv = sw + ste$$

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



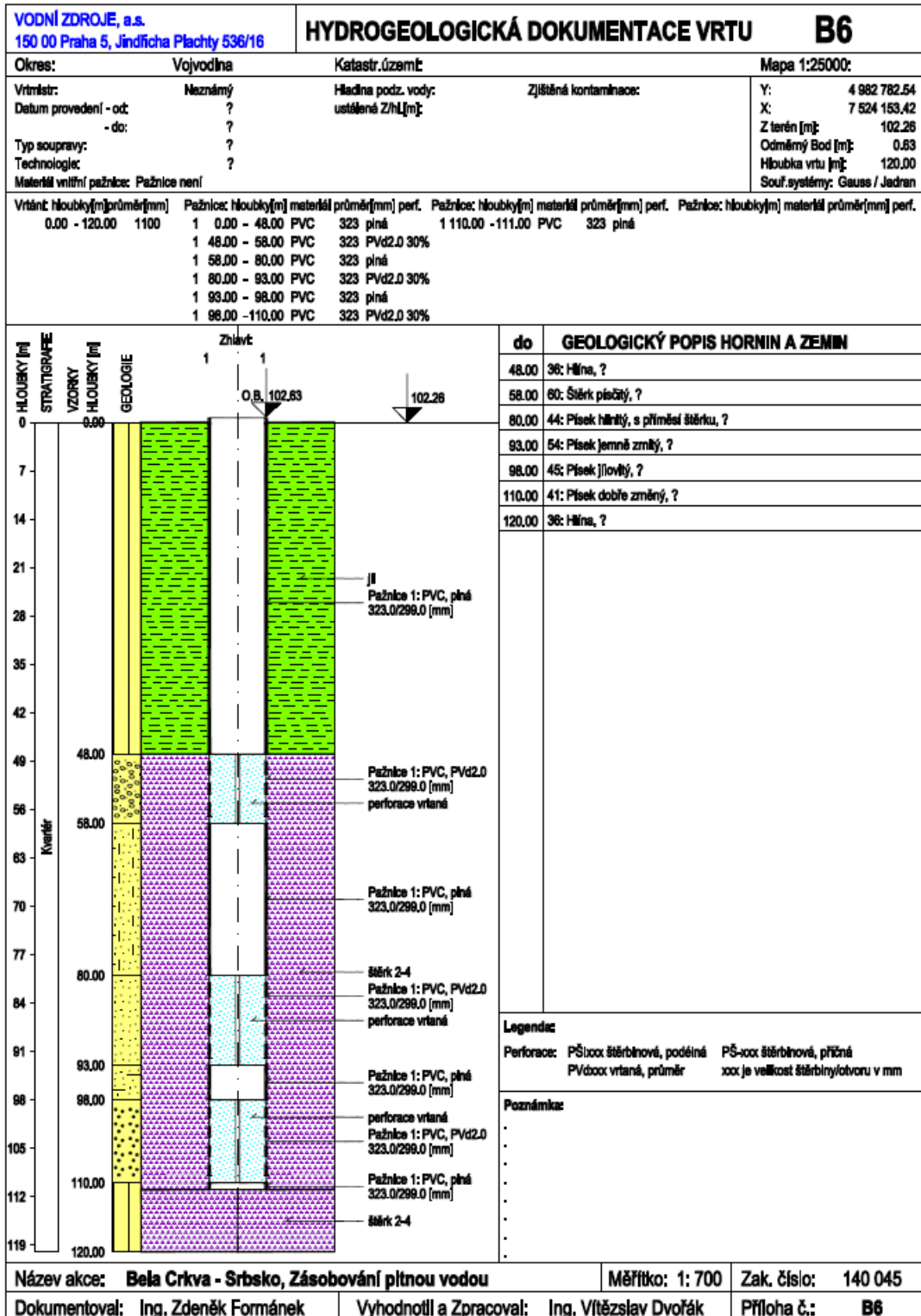
Vliv dodatečných odporů na průběh snížení hladiny podzemní vody během čerpací zkoušky.

Příloha B



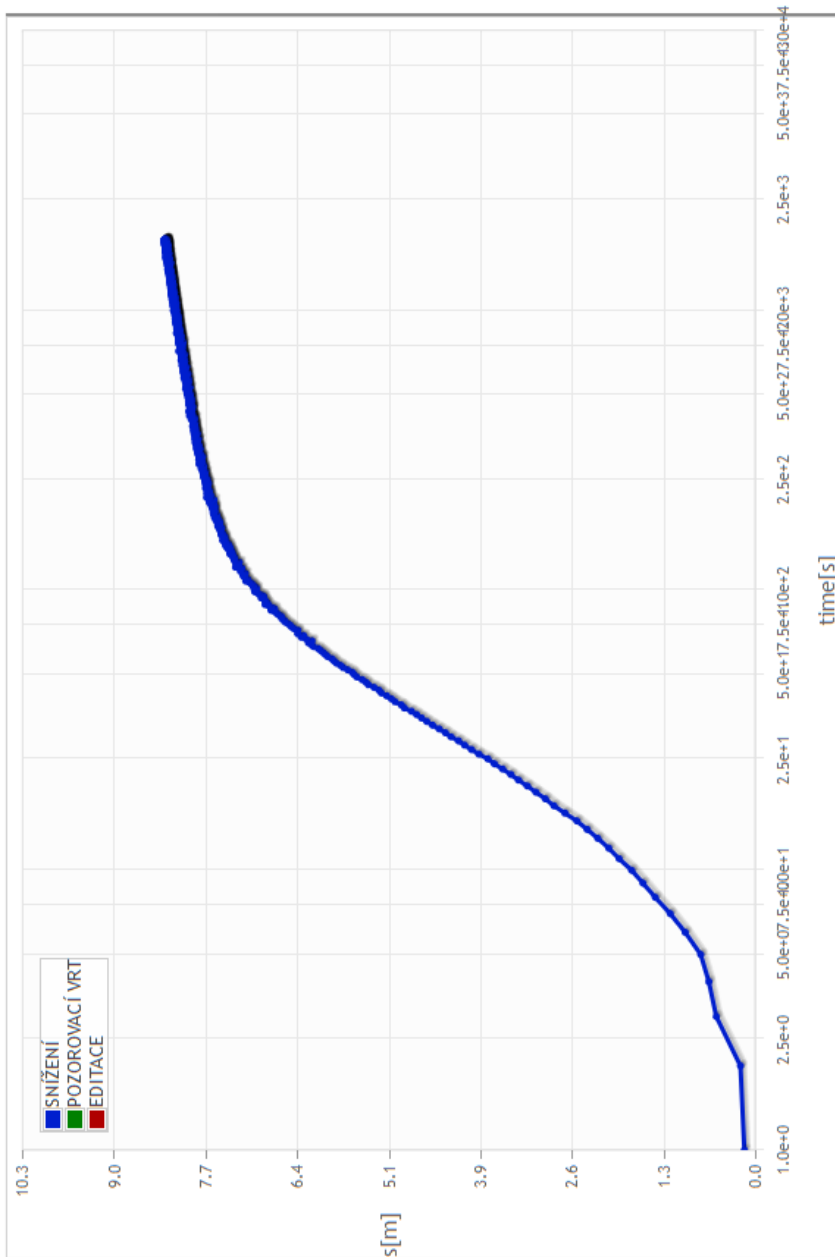
Vytvořeno systémem GeProDo, www.geprodo.wz.cz

Příloha C



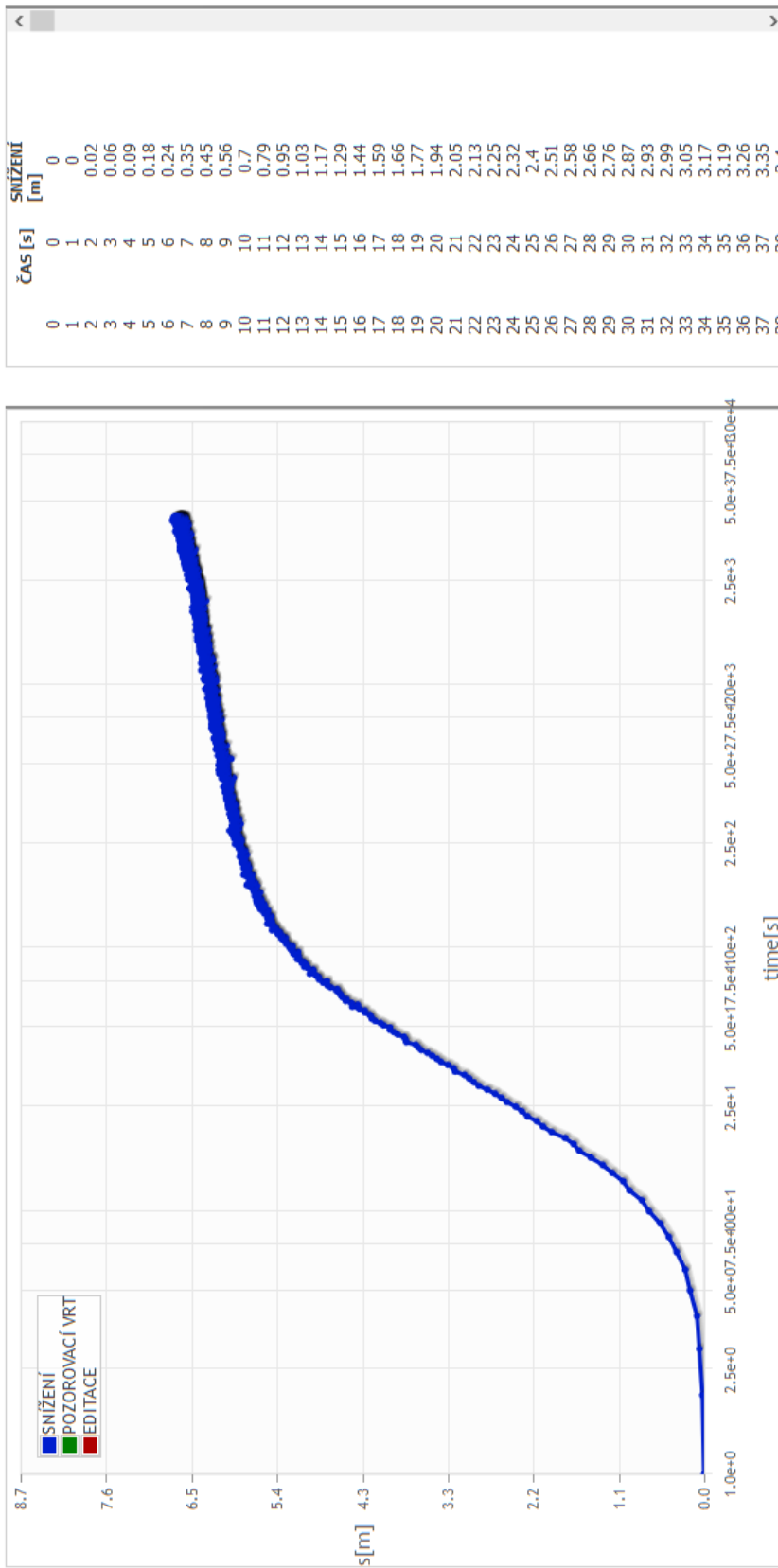
Příloha D

Čas [s]	SNÍŽENÍ [m]
0	0
1	0.1501
2	0.2049
3	0.544
4	0.6486
5	0.7626
6	0.9802
7	1.1915
8	1.4007
9	1.5741
10	1.7314
11	1.9078
12	2.0543
13	2.2069
14	2.3578
15	2.5016
16	2.6687
17	2.8229
18	2.9438
19	3.0754
20	3.1968
21	3.3209
22	3.4281
23	3.5435
24	3.6584
25	3.7502
26	3.877
27	3.9805
28	4.0778
29	4.1628
30	4.2678
31	4.3465
32	4.4344
33	4.5275
34	4.6069
35	4.6802
36	4.75
37	4.8244
38	4.9272



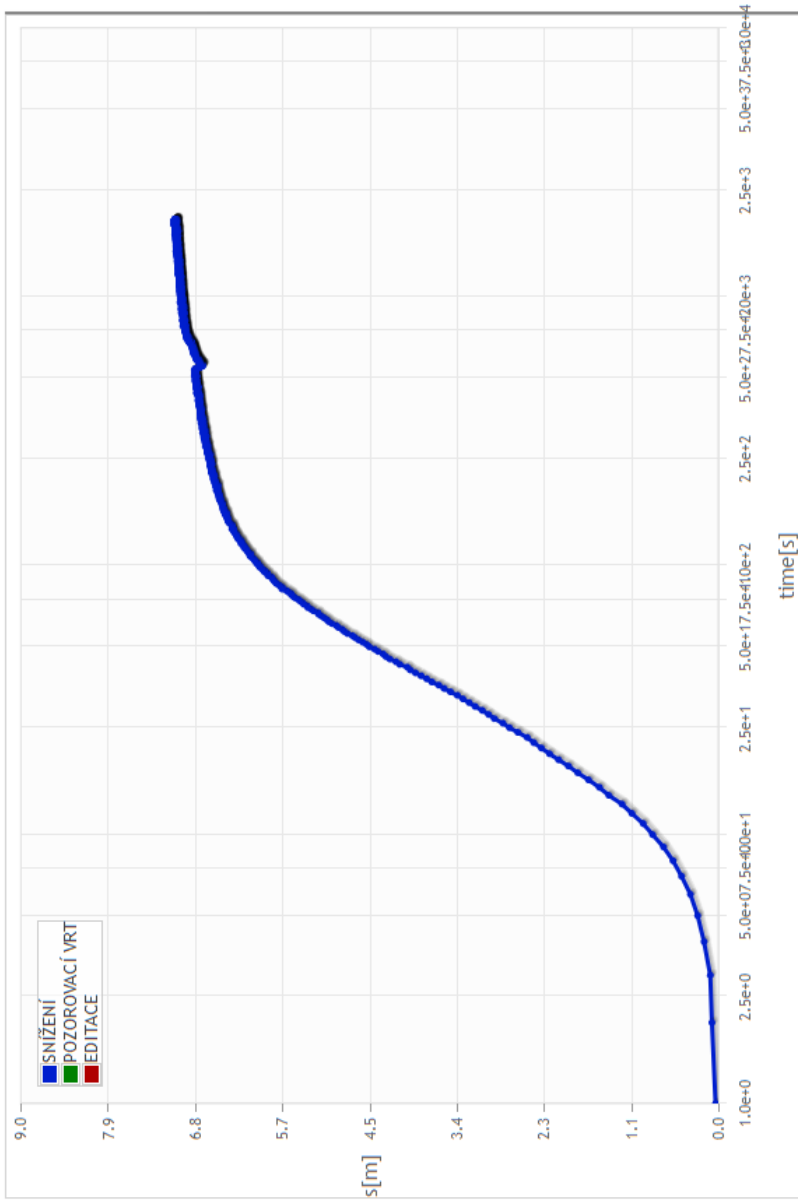


Příloha E

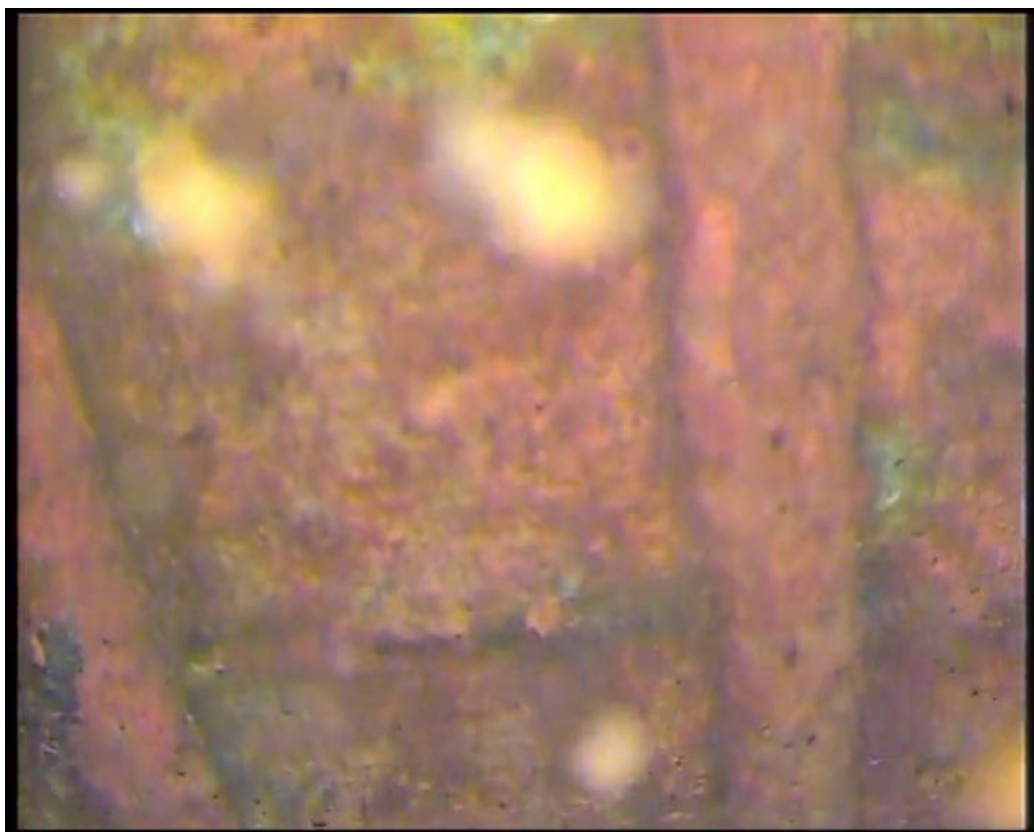
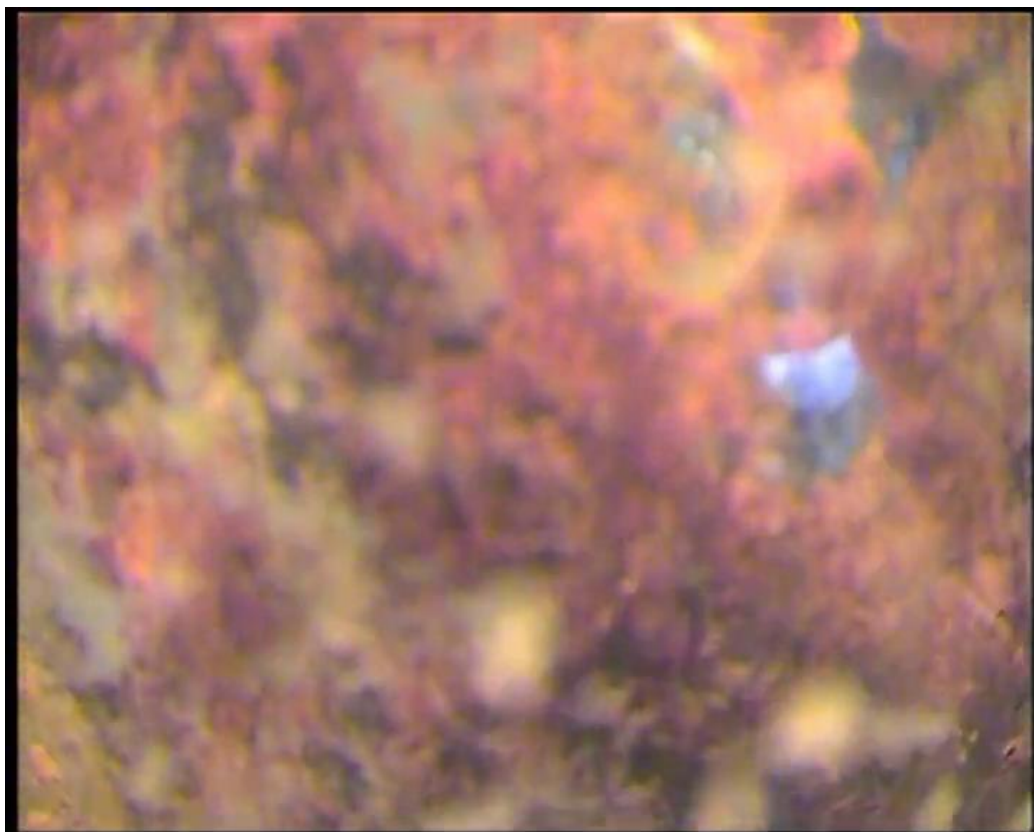


# Příloha F

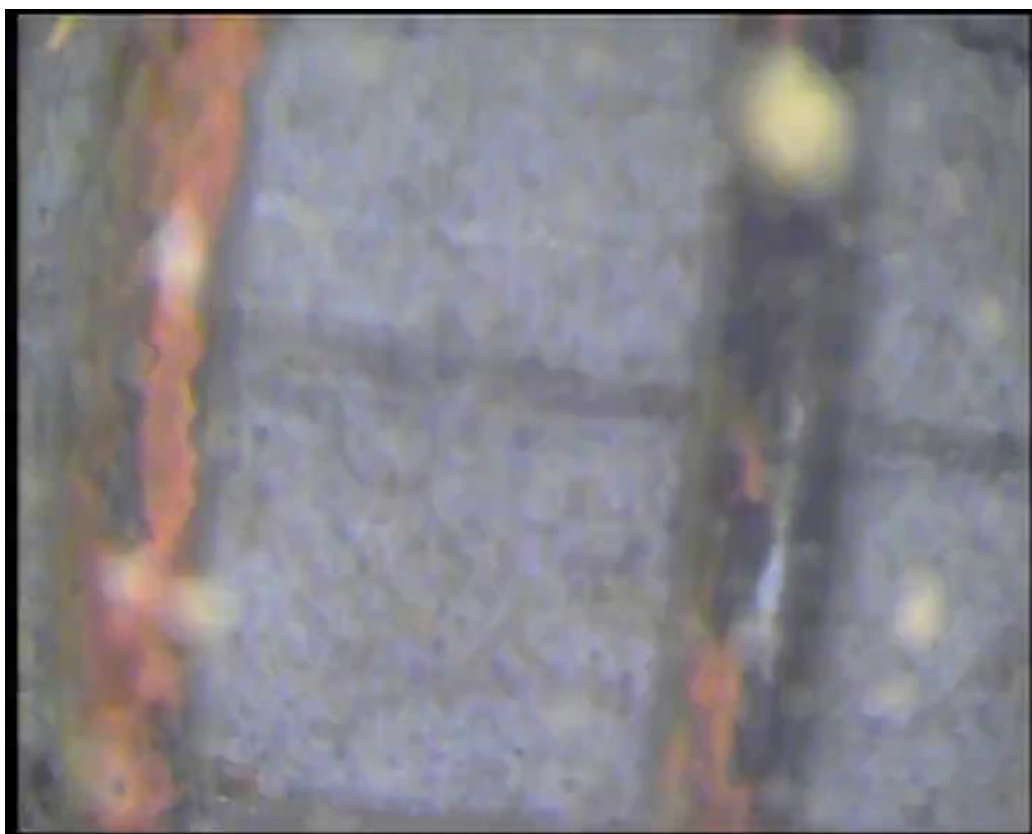
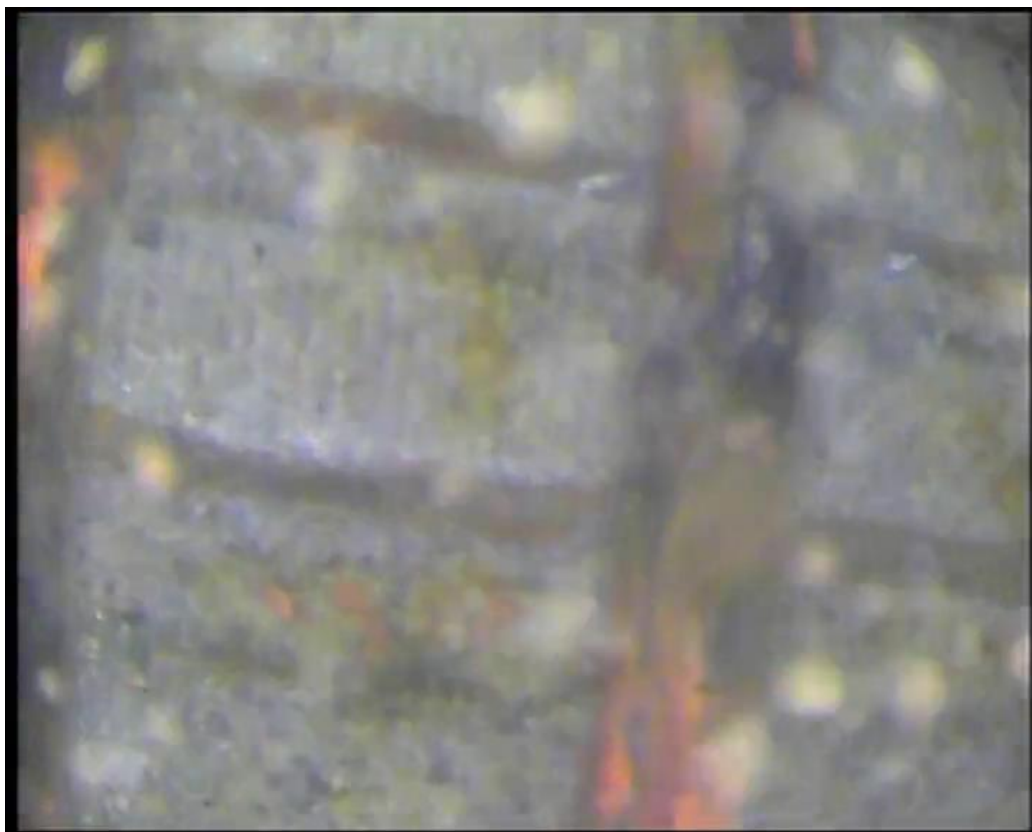
ČAS [s]	SNÍŽENÍ [m]
0	0
1	0.0354
2	0.0823
3	0.1041
4	0.185
5	0.2674
6	0.3612
7	0.4754
8	0.587
9	0.71
10	0.851
11	0.9739
12	1.1206
13	1.2484
14	1.4187
15	1.5413
16	1.6825
17	1.8224
18	1.9419
19	2.0697
20	2.1877
21	2.2931
22	2.3918
23	2.4763
24	2.5954
25	2.7059
26	2.7921
27	2.9011
28	2.9771
29	3.0595
30	3.1518
31	3.2287
32	3.3096
33	3.3817
34	3.4706
35	3.5535
36	3.6228
37	3.7127
38	3.7702



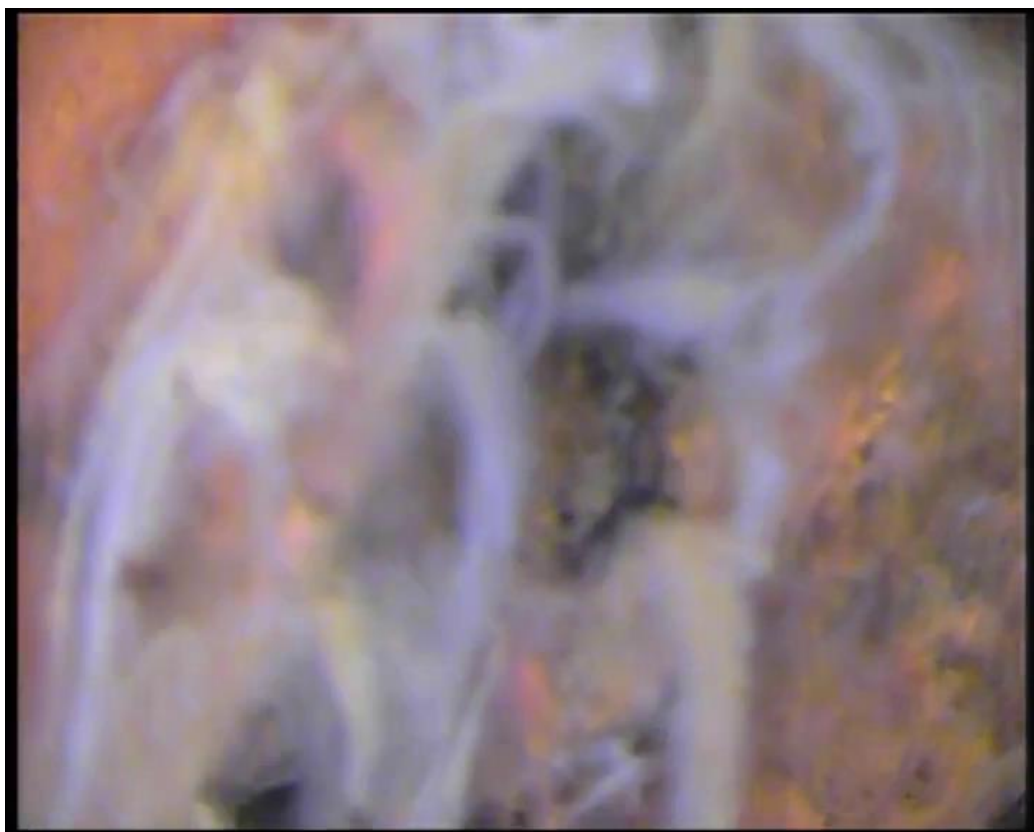
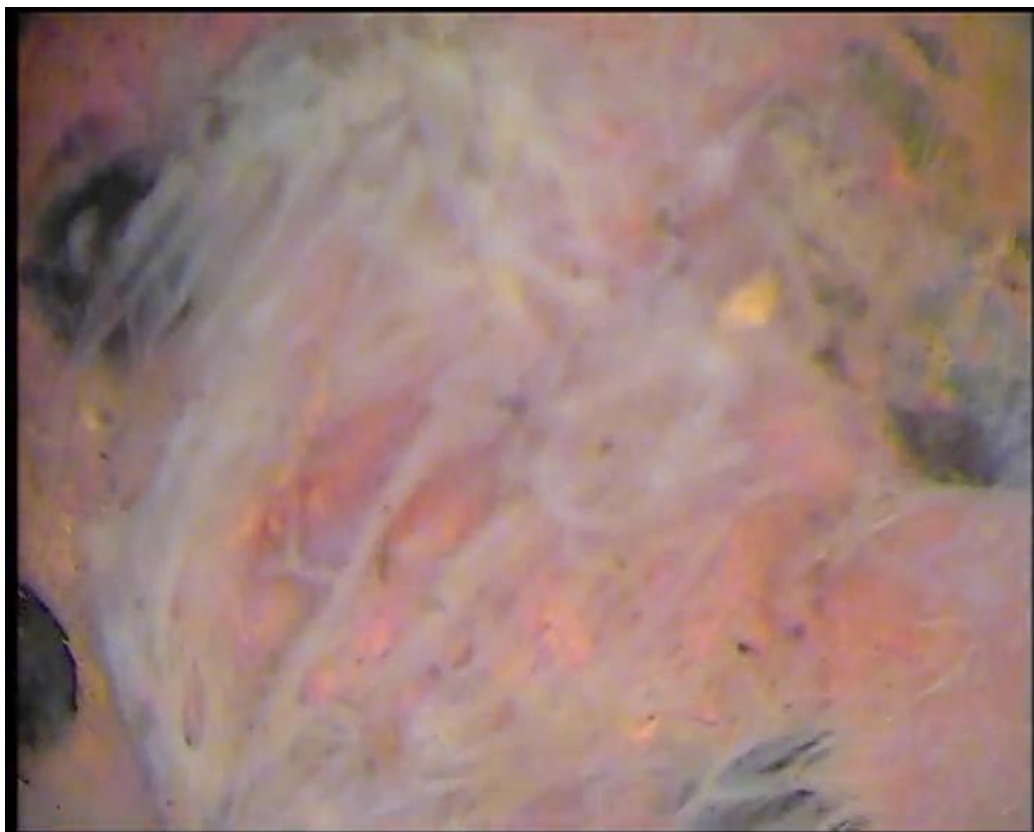
Příloha G



Příloha H

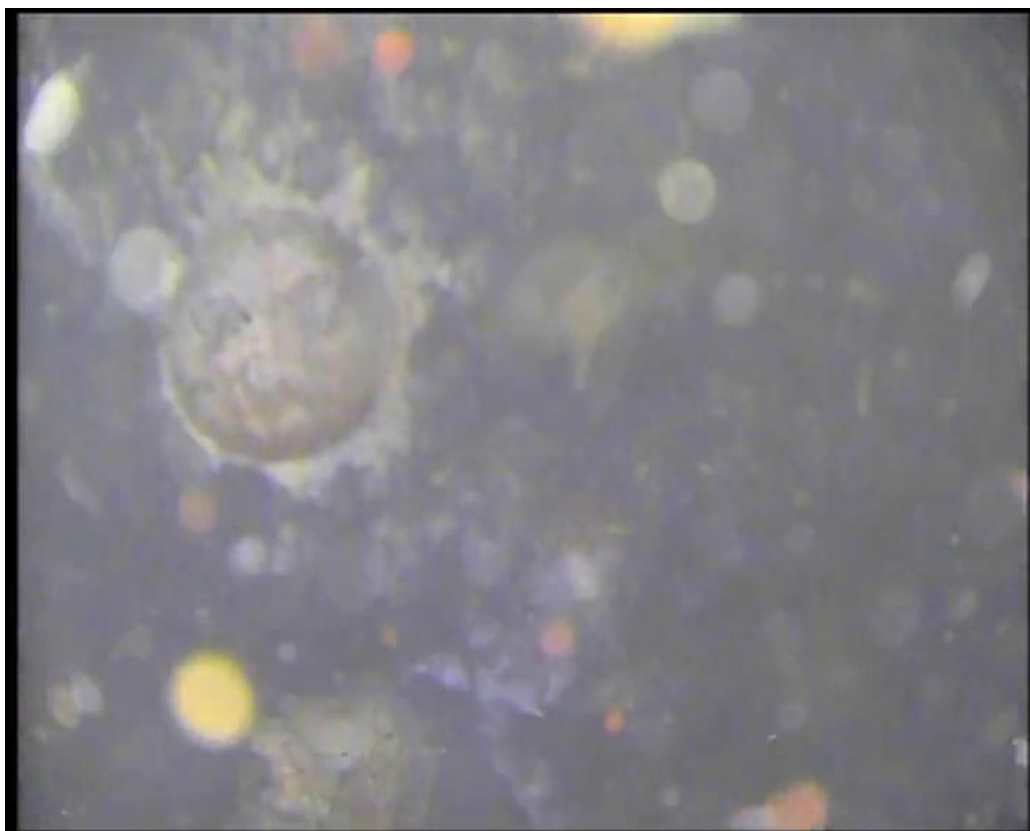
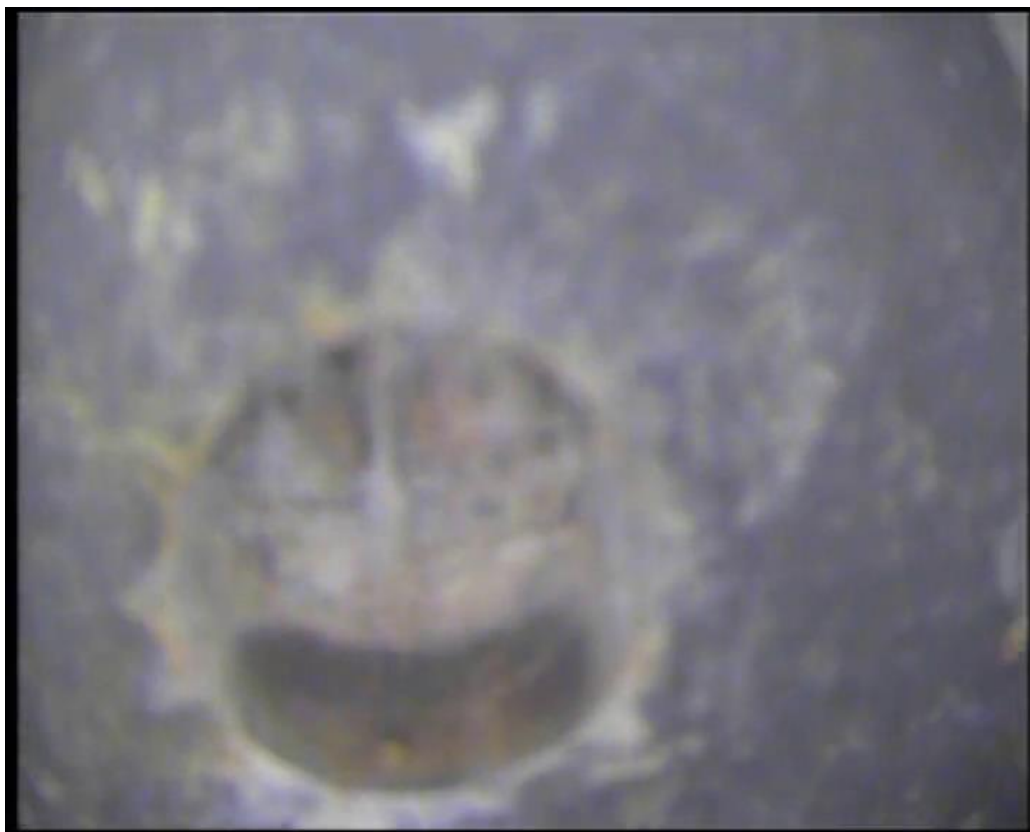


Příloha I



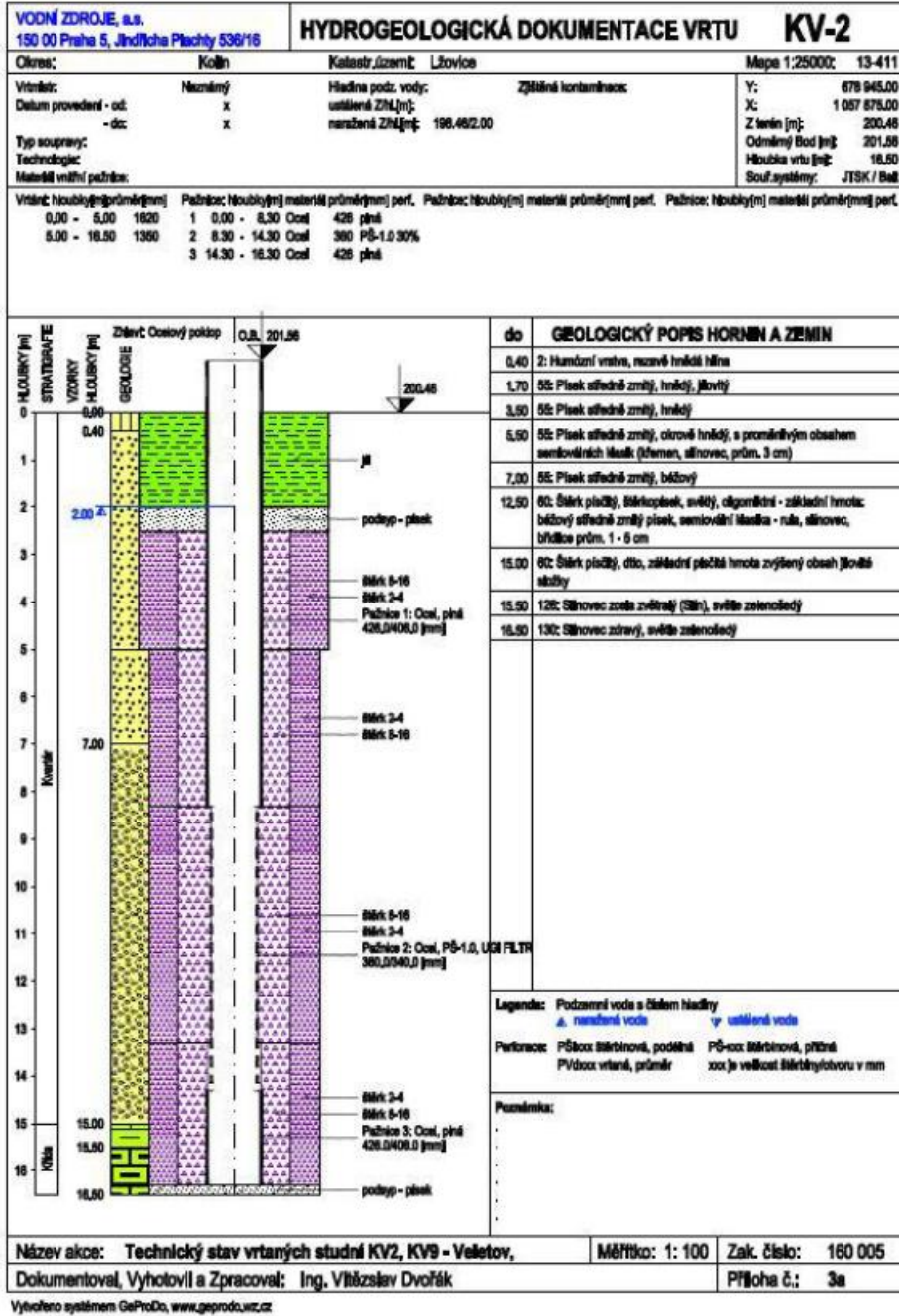


Příloha J



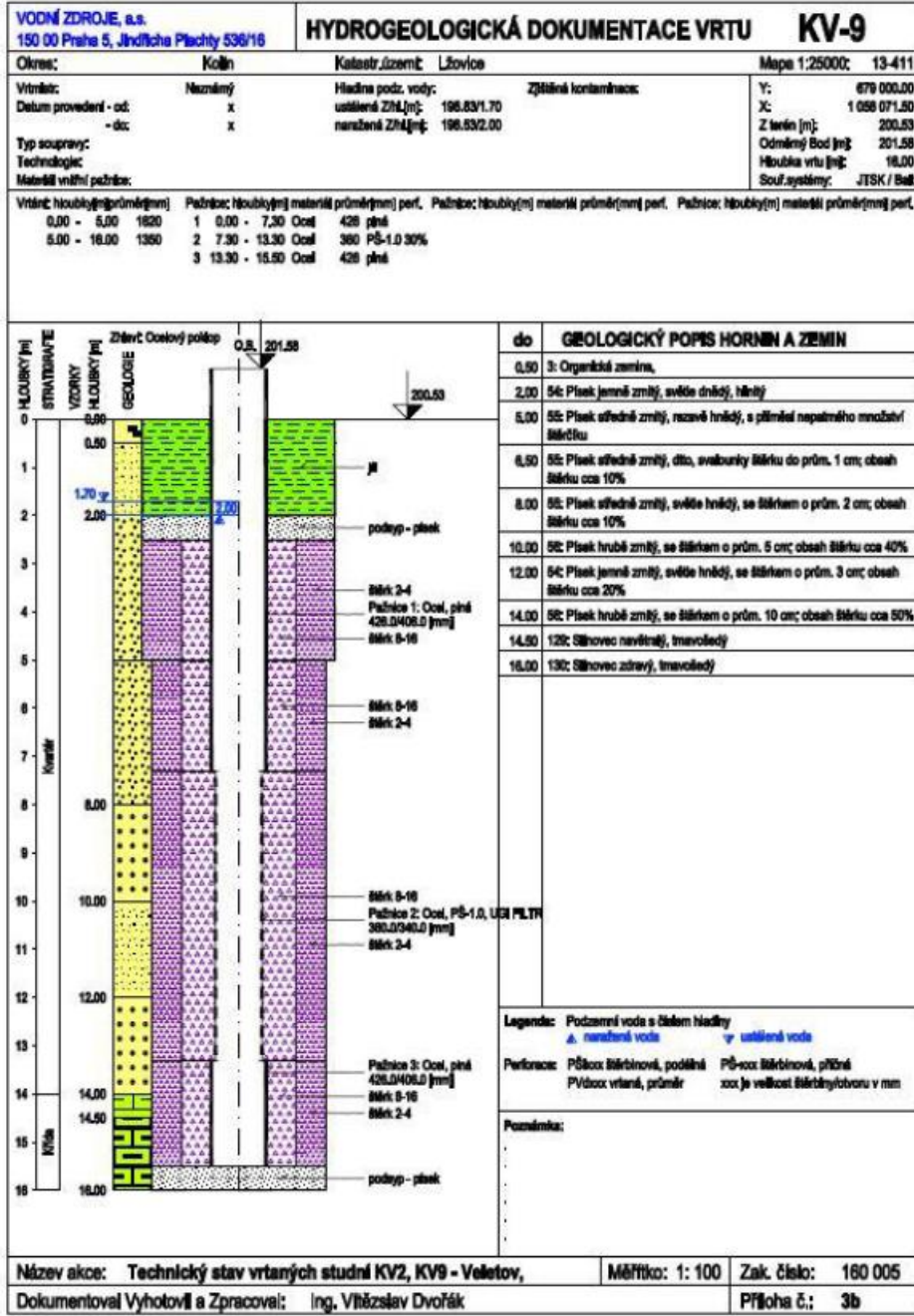
Příloha K



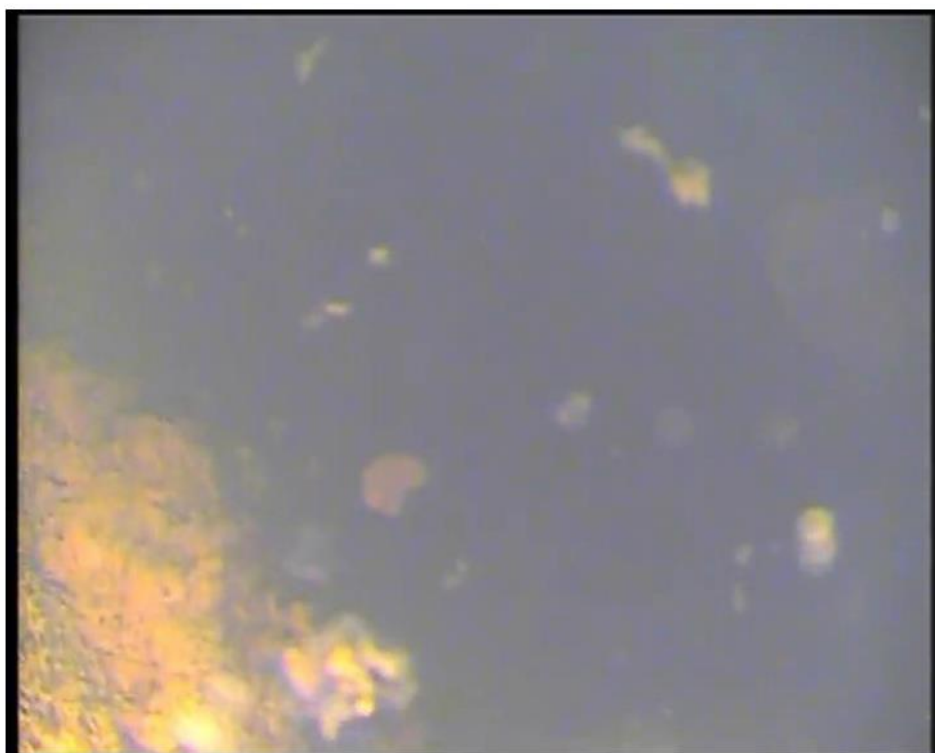




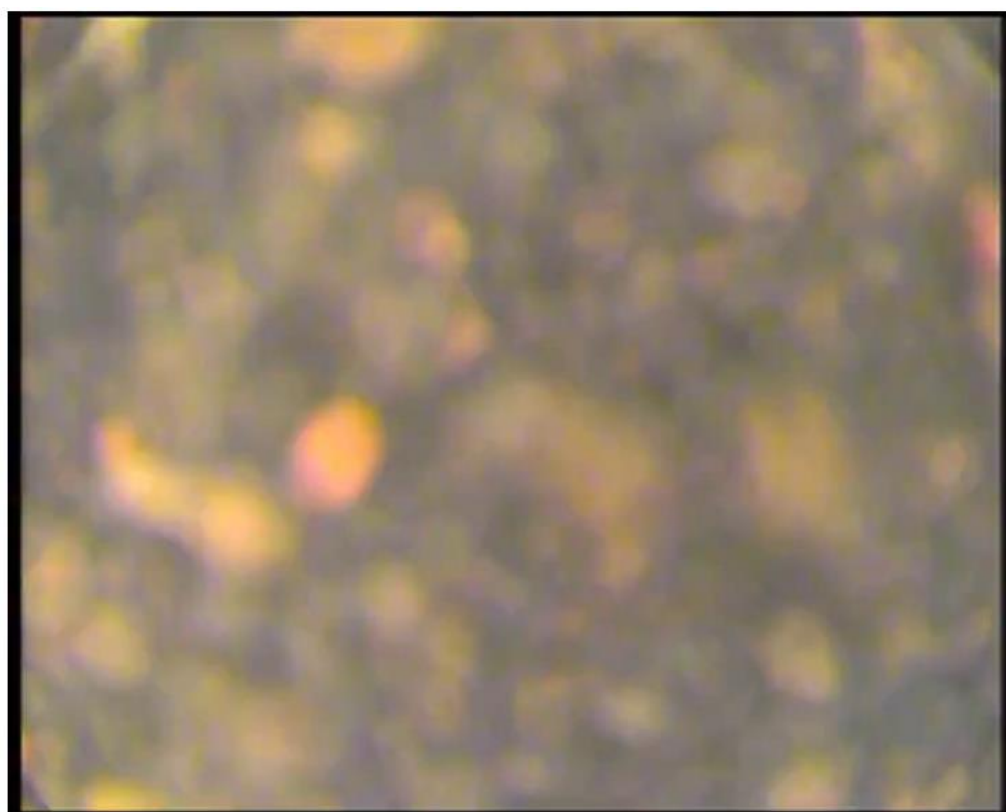
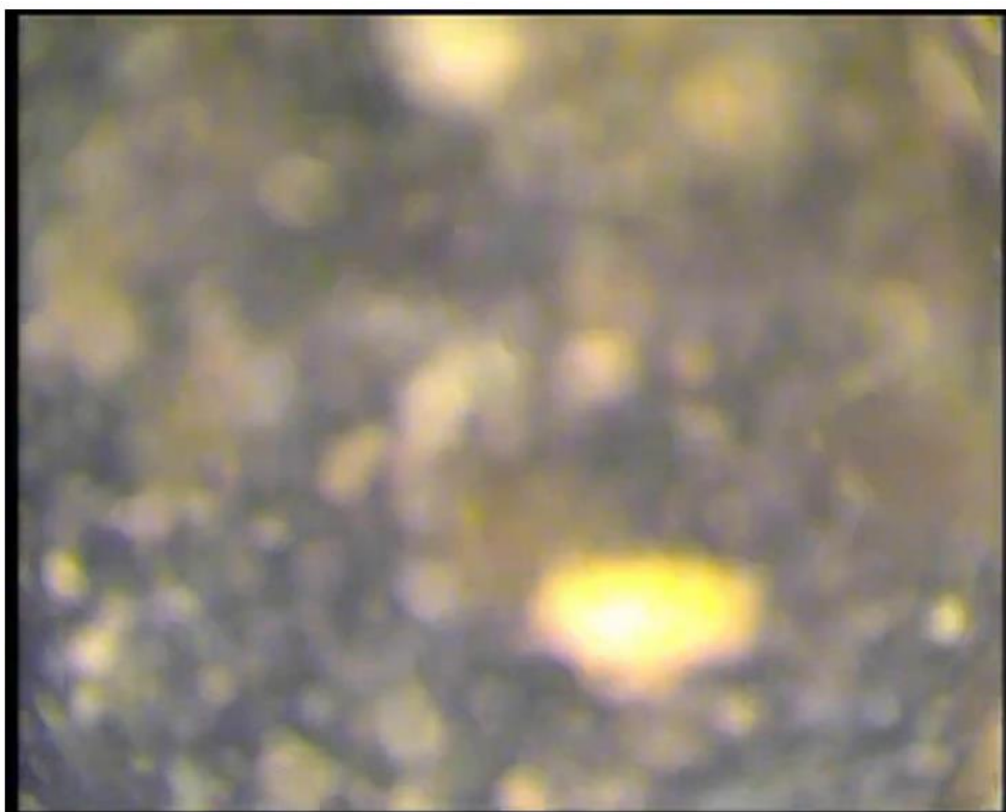
Příloha M



Příloha N



Příloha O



Příloha P

## Žádost o využití dat z čerpacích zkoušek

Věc:

Předmětem žádosti je stvrzení možnosti využití datových sad čerpacích zkoušek z oblasti Bela Crkva, Republika srbská. Data budou využita výhradně při zpracování disertační práce s názvem: Aplikací software pro vyhodnocení parametrů reálného vrtu z dat čerpací zkoušky. Terénní práce byly provedeny v roce 2015 firmou VODNÍ ZDROJE, a.s., IČ: 45274428.

VODNÍ ZDROJE, a.s.  
Jindřichův Hradec, 351 00, Praha 5  
IČ: 45274428, DIČ: CZ45274428



**Dne:**

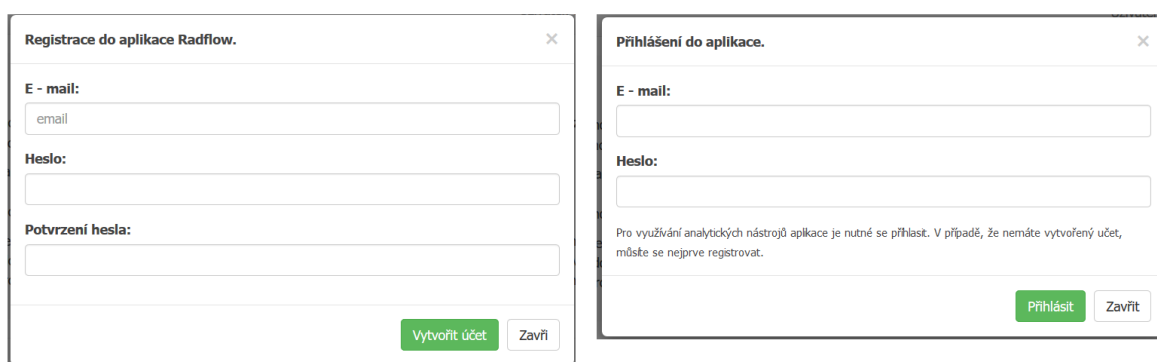
**17.12.2018**

**Podpis:**

## Příloha Q

### Uživatelský účet

Aplikace RadFlow je dostupná na adrese: <http://radflow.cz/> po načtení stránky uživatel získá základní informace o nástroji a také kontaktní údaje na řešitelský tým. Pro práci s výpočetními moduly je nezbytné si zřídit uživatelský účet. Registrace je velmi jednoduchá postačuje vyplnit uživatelský e-mail a zadat heslo pro přihlášení. Následně po přihlášení jsou zpřístupněny všechny nástroje aplikace.



The image shows two side-by-side screenshots of web forms. The left form is titled 'Registrace do aplikace Radflow.' and contains three input fields: 'E - mail:' with a placeholder 'email', 'Heslo:', and 'Potvrzení hesla:'. At the bottom right are two buttons: a green 'Vytvořit účet.' and a white 'Zavřít'.

The right form is titled 'Přihlášení do aplikace.' and contains two input fields: 'E - mail:' and 'Heslo:'. Below the fields is a small text note: 'Pro využití analytických nástrojů aplikace je nutné se přihlásit. V případě, že nemáte vytvořený účet, můžete se nejprve registrovat.' At the bottom right are two buttons: a green 'Přihlásit' and a white 'Zavřít'.

*Registrační a přihlašovací formulář do aplikace RadFlow.*

### Výběr datové sady

Grafoanalytické metody vyhodnocení dat jsou přístupné v programu RadFlow po volbě datové sady, které je možné vytvářet potažmo spravovat v záložce nazvané ‚Čerpací zkoušky‘. Datové sady lze spravovat jen v případě, že je uživatel v aplikaci přihlášen. Výpočetní metody je možné 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.

## Nový model

Název (pouze alfabeta znaky):

Vytvoř

## Čerpací zkoušky

POŘADÍ	NÁZEV	DATUM	ZVOLIT	ODSTRANIT	EDITOVAT
1.	B6	-	✓		
2.	B6po_reg	-	✓		
3.	Hv1	-	✓		
4.	Kytlice2	-	✓		
5.	MO4PRED	-	✓		
6.	b1po_reg	-	✓		<a href="#">✎ - edit</a>
7.	b3	-	✓		
8.	four	-	✓		
9.	hv4	-	✓		
10.	kv2	-	✓		
11.	kytlice	-	✓		
12.	three_hv2a	-	✓		
13.	veletov kv9	-	✓		
14.	vt1	-	✓		

*Správa a formulář na vytvoření nové datové sady.*

## Čerpací zkouška - edit

Nahrání dat

Název souboru: b1\_reg.txt SMAZAT

SNÍŽENÍ NA POZOROVACÍM VRTU

POŽADOVANÝ FORMÁT: TXT

Procházet... Soubor nevybrán.

ULOŽ

Fyzikální charakteristiky

STORATIVITA []:

0.0155

TRANSMISSIVITA [m<sup>2</sup>/s]:

0.005883

ČERPANÉ MNOŽSTVÍ [m<sup>3</sup>/s]:

0.0102

VZDÁLENOST POZOROVACÍHO VRTU [m]:

9

POLOMĚR VRTU [m]:

0.149

DODATEČNÉ ODPORY []:

20

VLASTNÍ OBJEM VRTU []:

36

ULOŽ

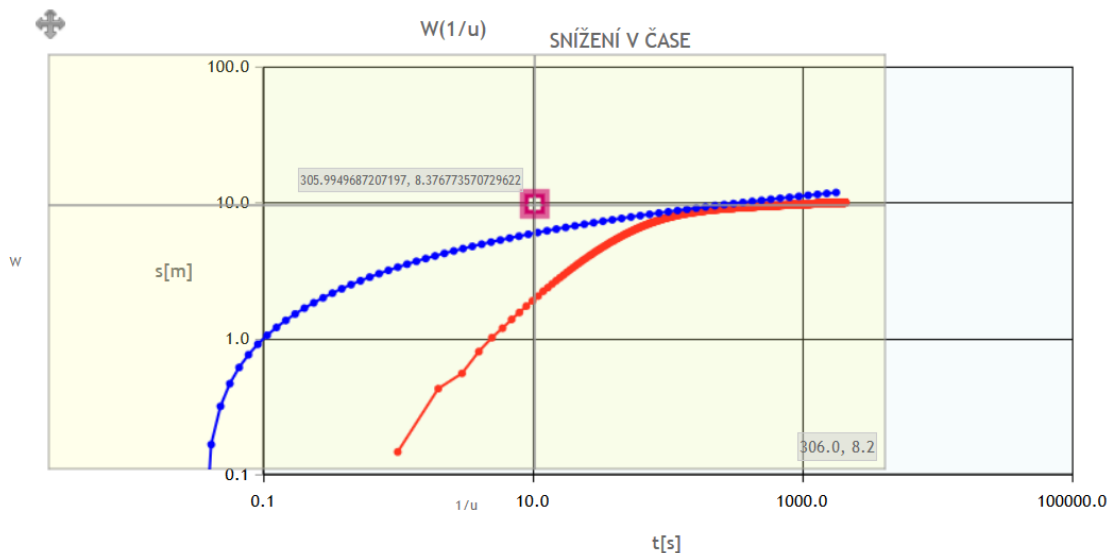
*Formulář editace parametrů datové sady.*

## Theisova metoda typové křivky

Tato metoda často slouží pro vyhodnocení čerpacích zkoušek za nestacionárního režimu proudění, v literatuře je často označovaná jako Theisova metoda typové křivky.

Metodu můžeme použít pro vyhodnocení transmisivity 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.



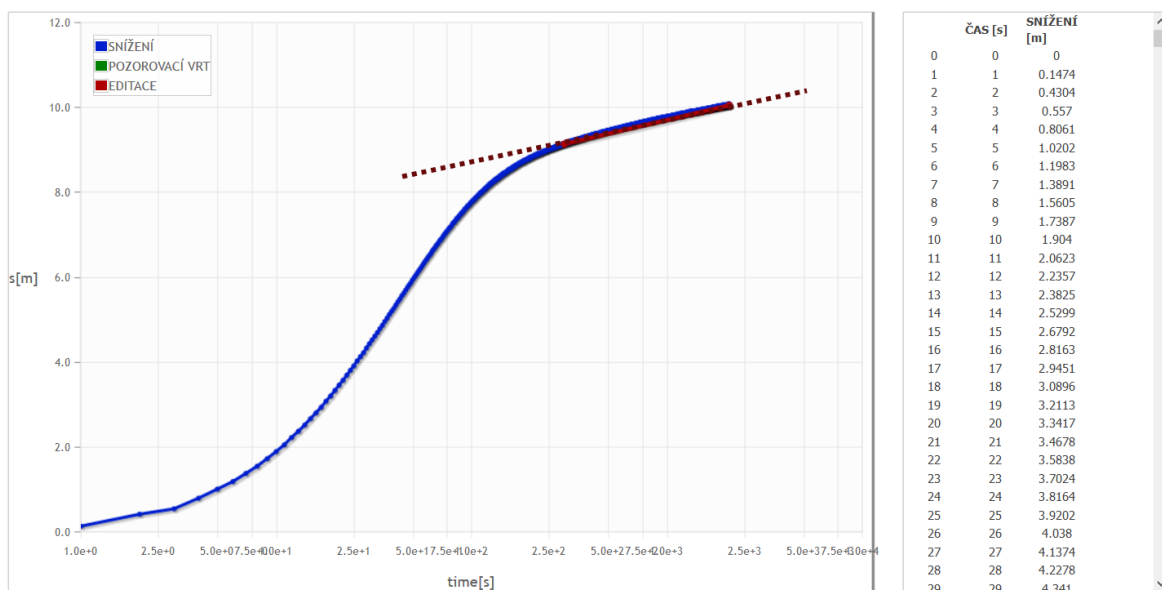
*Implementace Theisovy metody typové křivky v programu Radflow (jen pro ideální vrt).*

## Jacobova semilogaritmická metoda přímký

Jacobova semilogaritmická metoda přímký 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. Na počátku můžeme také pozorovat přímkový úsek ten je však ovlivněn parametry reálného vrtu a je zcela nevhodný pro zde popisovanou analýzu. 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 přímký snížení na pozorovacím vrtu do časové osy.
4. Dále v grafu kurzorem myši definujeme sklon přímkové části grafu  $t(s)$  je označen jako  $i$ . Pro optimalizaci zvoleného sklonu je možné využít ukazatel, jehož minimalizací odstraníme subjektivní vliv při jeho stanovení.
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.





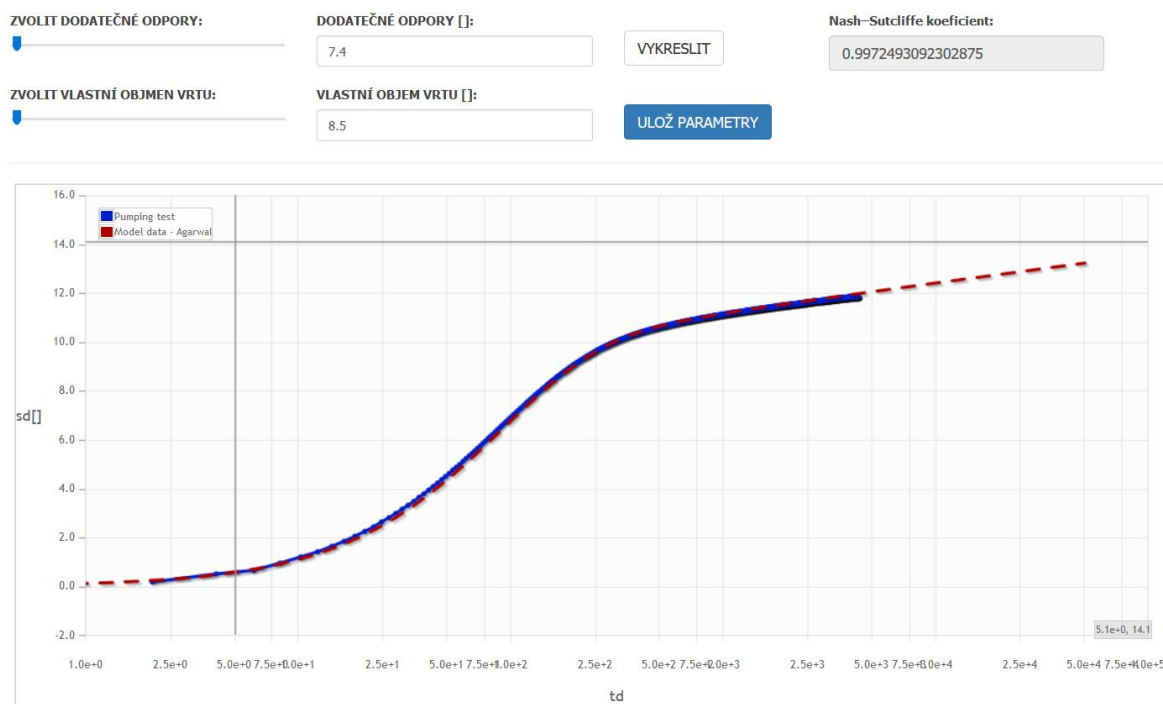
*Implementace Jacobovy semilogaritmické metoda přímky v programu Radflow pro určení základních hydraulických parametrů.*

### **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 pomocí parametrizace analytického řešení proudění podzemní vody s vlivem koeficientů skutečného vrtu. Charakteristickým rysem přítomnosti vlivu parametrů reálného vrtu je výskyt dvou přímkových úseků v grafu snížení podzemní vody. Dále je popsán postup stanovení 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 předchodí 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, pro jeho nalezení je možné parametry uložit jako parametry modelu. Pro kontrolu je také možné využít statistický ukazatel - Nash–Sutcliffe koeficient.



Obr.: 1. Analýza parametrů reálného vrtu pomocí programu RadFlow.

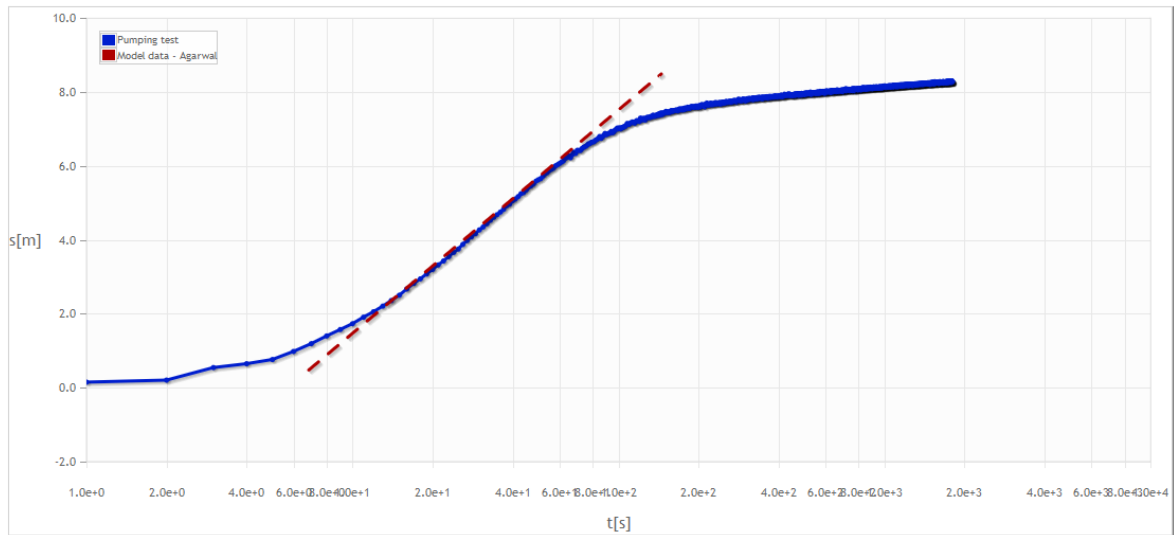
### Vyhodnocení dodatečných odporů na základě hodnoty storativity vrtu

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 z počátku čerpací zkoušky, kde průběh funkce snížení vykazuje jednotkový sklon.

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.



*Analýza dodatečných odporů pomocí programu RadFlow.*

# 10. Granty a publikované práce

## 10.1 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). Výchet 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

## 10.2 Autorské vědecké výstupy

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

- Holub, Jiri & Pech, Pavel & Kuraz, Michal & Máca, Petr & Kahuda, Daniel. (2019). Evaluation of a pumping test with skin effect and wellbore storage on a confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia. *International Journal of Water*. 13. 1. 10.1504/IJW.2019.097309.
- 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.