# KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

# Teze disertační práce

# Téma:

# *Hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu*

# Autor: Ing. Jiří Holub

# Školitel: prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

# Obsah

[KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ 1](#_Toc517614964)

[Teze disertační práce 1](#_Toc517614965)

[Téma: 1](#_Toc517614966)

[*Hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu* 1](#_Toc517614967)

[Autor: Ing. Jiří Holub 1](#_Toc517614968)

[Školitel: prof. Ing. Pavel Pech, CSc. 1](#_Toc517614969)

[Obsah 2](#_Toc517614970)

[Prohlášení 5](#_Toc517614971)

[Úvod 1](#_Toc517614972)

[Klíčová slova 2](#_Toc517614973)

[Summary 3](#_Toc517614974)

[Keywords 4](#_Toc517614975)

[Cíl a metodika práce 5](#_Toc517614976)

[Cíle práce 5](#_Toc517614977)

[Metodika 6](#_Toc517614978)

[Základní kroky metodického postupu 6](#_Toc517614979)

[Terénní měření 7](#_Toc517614980)

[Specifikace terénních dat 7](#_Toc517614981)

[Vyhodnocení základních hydraulických parametrů 8](#_Toc517614982)

[Sestavení modelu 8](#_Toc517614983)

[Granty 9](#_Toc517614984)

[Vědecké metody disertační práce 9](#_Toc517614985)

[Datové sady pro vyhodnocení experimentů, užitý software 10](#_Toc517614986)

[Literární rešerše 11](#_Toc517614987)

[1. Základní popis horninového prostředí a jeho fyzikální charakteristiky ve vztahu k podzemním vodám 11](#_Toc517614988)

[Podzemní voda 11](#_Toc517614989)

[Klasifikace zvodnělých vrstev 11](#_Toc517614990)

[Pórovitost 12](#_Toc517614991)

[Propustnost 12](#_Toc517614992)

[Hydraulická vodivost 13](#_Toc517614993)

[Transmisivita 13](#_Toc517614994)

[Storativita 13](#_Toc517614995)

[Homogenita a anizotropie půdního prostředí 14](#_Toc517614996)

[2. Základní fyzikální popis pohybu vody v horninovém prostředí 16](#_Toc517614997)

[Darcyho zákon 16](#_Toc517614998)

[Omezení platnosti Darcyho zákona 17](#_Toc517614999)

[Ustálené (stacionární) proudění podzemní vody 19](#_Toc517615000)

[Dupuitovy postuláty 20](#_Toc517615001)

[Neustálené proudění podzemní vody 21](#_Toc517615002)

[3. Proudění podzemní vody k vrtu 22](#_Toc517615003)

[Hydrodynamické zkoušky 22](#_Toc517615004)

[Neustálené rotačně symetrické proudění 24](#_Toc517615005)

[Neustálené proudění k ideálnímu vrtu 25](#_Toc517615006)

[4. Proudění podzemní vody v kontextu reálného vrtu 28](#_Toc517615007)

[Vlastní objem vrtu 28](#_Toc517615008)

[Dodatečné odpory 31](#_Toc517615009)

[Rovnice popisující proudění ke skutečnému vrtu 34](#_Toc517615010)

[Stehfest algoritmus 35](#_Toc517615011)

[Stanovení dodatečných odporů na základě znalosti hodnoty bezrozměrného zásobnosti vrtu 35](#_Toc517615012)

[Vlastní práce 37](#_Toc517615013)

[Základní popis aplikace 37](#_Toc517615014)

[Systémová požadavky aplikace ze strany klienta 40](#_Toc517615015)

[Struktura aplikace 40](#_Toc517615016)

[Popis aplikace a uživatelské rozhraní 41](#_Toc517615017)

[Výpočetní modul 42](#_Toc517615018)

[Datový model aplikace 46](#_Toc517615019)

[Seznam literatury 48](#_Toc517615020)

# Prohlášení

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

V ………….. dne ………………………..

Podpis autora

# Úvod

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

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

Tématem disertační práce je modelování hydrodynamické zkoušky na reálném vrtu. Předmětem modelování bude stanovení hydraulických parametrů reálného vrtu, tedy dodatečných odporů a vlivu vlastního objemu vrtu z dat hydrodynamické zkoušky. K tomuto účelu bude autorem sestaven aplikační program, který bude jedním z hlavních výstupů práce. Výsledný model bude založen na analytickém řešení proudění podzemní vody k vrtu s vlivem dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu. Následující část překládané práce obsahuje stručných přehled dané problematiky v podobě literární rešerše. V první části je uveden základní popis a charakteristika hydrogeologického prostředí, následuje fyzikální popis proudění v horninovém prostředí a jeho limity. V poslední části této kapitoly se autor věnuje popisu hydrodynamické zkoušky v podobě proudění podzemní vody v okolí vrtu, včetně charakterizace parametrů dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu. Závěrečná část je věnována metodě práce a překládaným cílům disertační práce.

# Klíčová slova

Hydrodynamická zkouška, dodatečné odpory, vlastní objem vrtu, skutečný vrt

# Summary

In connection with the climate change discussed, groundwater sources are often cited as one of the domain where undesirable changes can occur, so it is important to address this issue, seek new solutions and refine existing ones. For the Czech Republic, groundwater resources are one of the primary sources of drinking water, and are also used to a considerable extent in agricultural and industrial production. At present, we can occur the problems with this commodity in many places in the Czech Republic, such as the arise and long-lasting decline in storage in areas with a lower rainfall aggregate.

Hydrogeological environments are very heterogeneous, however, a description of the current state of groundwater resources and the associated physical characterization of the environment in the context of long-term use of groundwater resources is necessary. The pumping test is one of the basic methods used to determine the hydraulic characteristics of aquifers. The main evaluated parameters of the aquifer include transmissivity and storativity. These two main parameters define the basic physical properties of the aquifer, for which the methods derived from the analytical solution of the groundwater flow equation, derived from the ideal well, are used. However, there are other parameters defining the actual state of the well and its closest environment during the pumping test, which are not included in the solution of the ideal well, such as the skin effect and the wellbore storage. These two parameters are not involved in commonly used methods for evaluating pumping tests, although their neglect can lead to an incorrect analysis of the actual state of the hydrogeological environment and well condition. Due to further associate activities, but also to the time and energy demands of data acquisition from pumping testing, it is desirable to prevent or minimize their impact on these erroneous analyzes. The value of skin effect is essential in determining the permeability in conditions of steady flow and can be conducted as basic evaluative criteria of regeneration pumping well with respect to changes in the hydraulic parameters before and after the regeneration process.

The topic of the dissertation thesis is modeling hydrodynamic test on a real well. The subject of modeling will be the determination of the hydraulic parameters of the real well, such as the skin effect and the impact of the wellbore storage from the hydrodynamic test data. For this purpose, the author will draw up an application program, which will be one of the main outputs of the work. The resulting model will be based on an analytical solution of the groundwater flow to the well with the effect of skin effect and the actual wellbore storage. The following part of the work contains a brief overview of the issue in the literary research. In the first part of work the basic description and characterization of the hydrogeological environment is given, followed by the physical description of the groundwater flow with limits. In the last part of this chapter, the author describes the pumping test in the form of groundwater flow around the well, including characterization of parameters of skin effect and wellbore storage. The final part is devoted to the method of work and to the objectives of the dissertation.

# Keywords

Pumping test, skin effect, wellbore storage, real well

# Cíl a metodika práce

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

# Cíle práce

1. Vyhodnocení dodatečných odporů a storativity vrtu (wellbore storage) z dat hydrodynamické zkoušky
2. Sestavení aplikačního programu pro vyhodnocení hydrodynamických zkoušek s vlivem dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu na základě analytického popisu snížení hladiny podzemní vody na skutečném vrtu.
3. Stanovení charakteristik skutečného vrtu v podobě dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu z první přímkové části semilogaritmického grafu s(t) (funkce reprezentuje pozorované snížení **s** na vrtu v průběhu čerpání), při znalosti transmisivity a storativity porézního prostředí.
4. Validace metody pro určení charakteristik skutečného vrtu

Hlavním cílem práce je sestavení modelu pro vyhodnocení dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu z dat hydrodynamických zkoušek. Samotný model bude založen na analytickém řešení snížení hladiny podzemní vody s vlivem těchto faktorů. Dodatečné odpory a vlastní objem vrtu jsou faktory, které ovlivňují průběh hydrodynamické zkoušky a způsobují rozdíl ve skutečně měřených hodnotách snížení hladiny oproti teoretickému snížení, které je založeno na Theis modelu snížení hladiny podzemní vody. Jak bylo uvedeno v literárním rozboru Theis model byl odvozen pro ideální vrt, kde přítomnost dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu byla zanedbána. Zanedbání vlivu těchto faktorů může způsobit chybnou intepretaci dat z hydrodynamické zkoušky a zapříčinit znehodnocení provedené terénní zkoušky. Pro účel vyhodnocení parametrů skutečného vrtu bude autorem sestaven aplikační program, umožňující zpracování terénních dat z čerpacích zkoušek, kde je předpokládán výskyt dodatečných odporů a vliv vlastního objemu vrtu. Následná validace výsledných hodnot faktorů bude předmětem práce. Dalším cílem je upravení softwarového modelu pro vyhodnocení parametrů z počáteční části čerpací zkoušky, kde je dominantní vliv vlastního objemu vrtu na měřené snížení hladiny podzemní vody. Hlavním přínosem práce je vytvoření aplikačního nástroje, který bude umožňovat stanovení parametrů skutečného vrtu. Znalost těchto parametrů je důležitá při stanovení propustnosti a průtočnosti z dat snížení hladiny podzemní vody v podmínkách ustáleného proudění a dále může sloužit jako základní kritérium pro stanovení potřeb regenerace daného vrtu nebo pro její zhodnocení.

# Metodika

Disertační práce obsahuje hlavní dvě části, literární rešerše a výzkumná část disertační práce, kterou označujeme jako vlastní práci. Literární rešerše představuje teoretický přehled stavu poznání v oblasti hydrauliky podzemních vod v kontextu vyhodnocování základních parametrů. Výzkumná část se skládá z několika oblasti řešení, které byly zpracovány v průběhu plnění cílů práce. V první oblasti výzkumné části práce je popsán aplikační program RadFlow pro vyhodnocování dat čerpacích zkoušek, který je jedním z hlavních výstupů práce. V další oblasti výzkumné práce dochází k vyhodnocení parametrů hydrologického prostředí na reálných datech, popisu lokality a stanovení parametrů skutečného vrtu. Závěrem je pak posouzen vliv parametrů skutečného vrtu na horninové prostředí z hlediska regenerace vrtu a představeny příležitosti pro navazující budoucí výzkum.

## Základní kroky metodického postupu

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

### Terénní měření

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

### Specifikace terénních dat

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

### Vyhodnocení základních hydraulických parametrů

Základní charakterizací zvodnělého prostředí je tramsmisivita a storativita zvodně. Tyto hydraulické charakterizace slouží jako vstupní parametry pro popis rotačního proudění s vlivem vlastního objemu vrtu a dodatečných odporů, které publikovat Agarwal, 1970. Pro vyhodnocení tramsmisivity a storativity zvodně byla zvolena Jacobova semilogaritmická metoda přímky. Po vynesení hodnot snížení hladiny podzemní vody do semilogaritmického grafu může být patrný výskyt dvou přímkových částí grafu, tento tvar křivky signalizuje ovlivnění čerpací zkoušky vlastním objemem vrtu a dodatečnými odpory. Druhá přímková část semilogaritmického grafu, kde snížení není již ovlivněno vlastní zásobou vody v čerpaném vrtu slouží~~cí~~ k určení hodnoty transmisivity.

### Sestavení modelu

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

## Granty

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

* Modelování hydrodynamické zkoušky na reálných vrtech, poskytovatel GA FZP, doba řešení 2013 - 2013
* Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR, poskytovatel TA0, doba řešení 2012 – 2015
* Matematické a fyzikální modelování proudění dešťové vody ve sněhové pokrývce, poskytovatel GA FZP, doba řešení 2014 - 2014

## Vědecké metody disertační práce

V disertační práci jsou užity kombinace několika vědeckých metod. V rámci všeobecných vědních metod jsou v disertační práci použity empirické a obecně teoretické metody. Z empirických metod je využit převážně experiment a měření. Z obecně teoretických metod pak analýza, syntéza, indukce, dedukce, generalizace, abstrakce, komparace a analogie. Kromě uvedených empirických a obecně teoretických metod jsou v práci užity i specifické vědecké metody, mezi nimiž mají zvláštní postavení metody matematické a statistické, jež slouží k přesnému exaktnímu vyjádření jevů a stavů mezi nimi.

## Datové sady pro vyhodnocení experimentů, užitý software

Zde bych chtěl poděkovat organizaci Vodní zdroje a.s. za poskytnutí datové sady pro účely vyhodnocení. Analýzy k jednotlivým experimentům jsou součástí přiloženého paměťového nosiče (CD disku). Většina provedených analýz a výpočtů byla provedena pomocí programu Radflow, který je jedním z hlavních cílů práce. Při vývoji samotného aplikačního programu jsem využíval jako vývojové prostředí NetBeans verze 8.0.

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

# Literární rešerše

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

### 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).

### Klasifikace zvodnělých vrstev

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

Zvodnělé oblasti můžeme rozdělit na kolektory s volnou a napjatou hladinou, v závislosti na tlakových podmínkách na hladině podzemní vody (*Freeze at Cherry*, 1979).

V závislosti na tlakových podmínkách na hladině podzemní vody dělíme zvodnělé vrstvy na tyto kategorie:

1. **Zvodnělé vrstvy s napjatou hladinou**

Za zvodnělý kolektor s napjatou hladinou můžeme označit takový kolektor, který je omezen shora i zdola nepropustným prostředím. V případě průniku horní vrstvou, voda vystoupí nad úroveň svrchní hraniční nepropustné vrstvy. Jestliže ze studny voda samovolně vytéká na zemský povrch, můžeme tuto studnu označit za artézskou.

1. **Zvodnělé vrstvy s volnou hladinou**

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

1. **Zvodnělé vrstvy s přetékáním**

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

### Pórovitost

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

*n = Vp / Vt* (1.1)

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

### 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).

(1.2)

kde C je koeficient, jehož hodnota je určená druhem porézního materiálu (45 pro jílový písek a 140 pro čistý písek) a d je efektivní průměr zrna, za který je často brán průměr d10.

### Hydraulická vodivost

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

Mezi veličiny ovlivňující hydraulickou vodivost řadíme hustotu kapaliny a její viskositu. 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 = (1. 3)

kde kp se nazývá propustnost porézního prostředí [L2], ρ hustota kapaliny [ML-3],  
g představuje gravitační zrychlení [LT-2] a dynamická viskosita, kterou můžeme vyjádřit jako součin hustoty a kinematické viskosity (Valentová, 2007).

### Transmisivita

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

*T = b K* (1.4)

kde K je hydraulická vodivost [LT-1] a b výška zvodnělé vrstvy [L].

### Storativita

Storativita je parametr určující schopnost nasyceného zvodnělého prostředí přijímat nebo uvolňovat určité množství vody. Specifická storativita *Ss* 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 Ss [L-1] je definována součtem dvou členů. První člen je určen:

*dVv = α ρ g* (1.5)

kde α stlačitelnost zvodnělé vrstvy, ρ [ML-3] hustota kapaliny a g představuje gravitační zrychlení [LT-2]

a druhý člen:

*dVv = βv n ρ g* (1.6)

kde βv je koeficient stlačitelností kapaliny a n poróvitost.

Po součtu těchto členů můžeme specifickou storativitu vyjádřit vztahem:

*Ss = ρ g (α + nβv) (1.7)*

kde Ss je specifická storativita [L-1]

Bezrozměrný parametr storativity zvodně S je definován vztahem:

*S = Ss b (1.8)*

kde b výška kolektoru [L], bezrozměrný koeficient storativity je definován jako objem vody uvolněný z objemu výšky b s plochou postavy rovné 1m2 při jednotkovém poklesu piezometrické výšky (*Freeze at Cherry*, 1979).

### Homogenita a anizotropie půdního prostředí

Jestliže hodnota hydraulické vodivosti K je pro celý kolektor konstantní, můžeme dané prostřední označit za homogenní. V opačném případě se jedná o heterogenní formaci, v případě definice souřadného systému *xyz* lze vyjádřit hodnotu hydraulické vodivosti jako funkci těchto prostorových proměnných *K(x,y,z)*. Výsledné hodnoty funkce pro heterogenní kolektor nejsou konstantní. (*Freeze, Cherry*, 1979). V geologickém prostředí se můžeme setkat s celou řadou druhů heterogenity hydraulické vodivosti, například: heterogenita s náhlou změnou heterogenity, nebo heterogenita s postupnou změnou hydraulické vodivosti.

Pokud hodnota hydraulické vodivosti nezávisí na směru, jedná se o 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 *Kx ≠ Ky ≠ Kz* (*Pech*, 2010).

## **2. Základní fyzikální popis pohybu vody v horninovém prostředí**

### Darcyho zákon

Darcyho zákon objevil francouzský inženýr Henry Darcy v roce 1856, stanovil závislost mezi proteklým množstvím vody Q [L3T-1], které se přímo úměrně zvětšuje s rozdílem hydraulických výšek a nepřímo úměrně s délkou L, kde byli měřeny hodnoty hydraulické výšky. Tento vztah se vyjadřuje pomocí rovnice:

Nasycená hydraulická vodivost *K* je základní charakteristika porézního prostředí, má rozměr rychlosti [LT-1] a S je plocha průtočného průřezu [L2]. Hodnoty H1[L] a H2[L] představují hydraulickou výšku na vstupu a výstupu aparatury, vzdálenost mezi nimi je reprezentována hodnotou L. Směr proudu je určen gradientem potenciálu hydraulické výšky (*Freeze, Cherry*, 1979).

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

(2.2)

Ve skutečnosti se voda pohybuje jen propustnými póry a nevyplňuje celou plochu vzorku. Pro získání skutečné hodnoty rychlosti je potřeba Darcyho rychlosti upravit. Je-li efektivní pórovitost *ne* pak skutečná plocha pórů *Sn = neS*. Skutečnou rychlost *vsk* [LT-1] vyjádříme ze vztahu:

Efektivní pórovitost je definována vztahem:

(2.4)

kde Vpe je součet objemu pórů, kterými se voda může skutečně pohybovat a Vt je celkový objem vzorku [L3].

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:

(2.5)

nebo v diferenciální formě:

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

V případě třírozměrného heterogenního anizotropního proudění rychlost v [LT-1] rozepisujeme po složkách, kde *xyz* reprezentují osy souřadného systému.

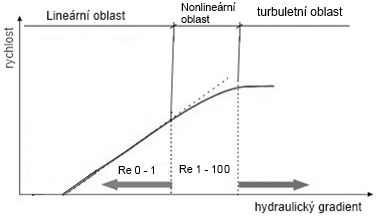
(2.7)

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

### Omezení platnosti Darcyho zákona

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

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



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

V případě jemnozrnných materiálů, kde je voda vázána silnými molekulárními silami, Darcyho vztah začíná platit až po překročení určité hodnoty hydraulického gradientu (Pech, 2010). Pro velmi hrubozrné materiály, kde převládají setrvačné síly nad viskózními, dochází k porušení lineární závislosti mezi rychlostí toku a hydraulickým gradientem, kdy určujícím parametrem se stává bezrozměrné Reynoldsovo číslo *Re* *(Valentová,* 2007*)*.

Re = (2.8)

kde *vs* je střední hodnota rychlosti proudění kapaliny [L/T], \nu kinematická viskozita [L2/T] a *d* reprezentuje průměr efektivního zrna [L].

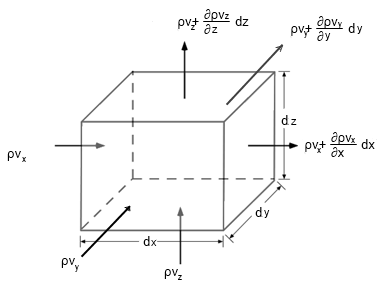
### Ustálené (stacionární) proudění podzemní vody

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

(2.9)

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

(2.10)



*Obr.: 2. Elementární objem.*

Substitucí Darcyho zákona pro *vx, vy a vz* získáme rovnice popisující ustálené anizotropní proudění porézním materiálem.

(2.11)

kde *h* hydraulická výška a Kx, Ky a Kz představují hydraulickou vodivost v jednotlivých směrech souřadného systému. Pro izotropní medium platí Kx = Ky = Kz 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:

(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).

### 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 [LT-1] pro homogenní izotropní prostředí jako:

(2.13)

Průtok vztažený na jeden metr šířky zvodně je definován vztahem:

(2.14)

kde K je hydraulická vodivost, h(x) je hladina podzemní vody a dh/dx je hydraulický gradient.

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

### Neustálené proudění podzemní vody

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

(2.15)

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

(2.16)

Za předpokladu, že ρ je mnohonásobně větší než můžeme hustotu ρ zanedbat na obou stranách rovnice a po dosazení za vx, vy a vz z předpisu pro Darcyho rychlost získáme vztah pro popis neustáleného anizotropního proudění nasyceným porézním materiálem:

(2.17)

Pro homogenní izotropní proudění rovnici redukujeme rovnici (2.17) na tvar:

(2.18)

Nebo vyjádření pomocí předpisu pro specifickou storativitu Ss:

(2.19)

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

(2.20)

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

## 3. Proudění podzemní vody k vrtu

### 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 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:

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

(3.1)

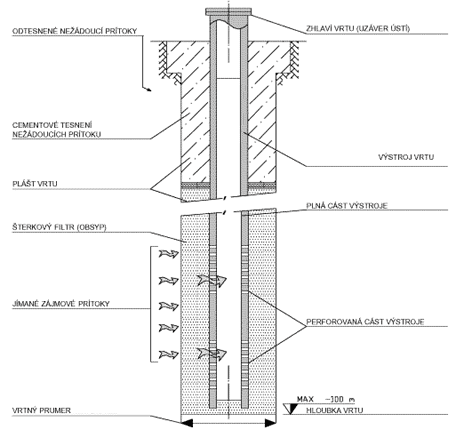
kde Q [L3T-1] čerpané množství, rd [L] je dosah deprese vyvolané odběrem ze zvodně a rv [L] je poloměr hydrologicky dokonalého vrtu, sv je snížení ve vrtu [L] .

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

1. Stoupací zkouška, při nichž 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 metody 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:

(3.2)

kde W(u) a W(us) jsou studňové funkce pro u = r2S/T (tp + t), us = (r2S/Tt), kde tp 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*

### Neustálené rotačně symetrické proudění

Rotačně symetrické proudění při použití cylindrických souřadnic 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 cylindrických souřadnic, které jsou definovány souřadnicí *r* (vzdálenost od osy symetrie), souřadnicí *z* určující vertikální osu a úhlem průmětu průvodiče *θ* (*Valentová*, 2007). Diferenciální rovnice popisující radiálně symetrické proudění ve zvodnělé vrstvě s napjatou hladinou ve tvaru pro snížení hladiny definujeme jako:

(3.1)

kde je S  storativita vrtu a T transmisivita zvodnělého prostředí.

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

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

R = 3000 \* s \* K ½ (3.2)

kde s je snížení hladiny ve studni [L] a K hydraulická vodivost [L/T].

### Neustálené proudění k ideálnímu vrtu

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

1. Zvodnělá vrstva je považována za homogenní a izotropní s neomezenou hranicí zvodně (v průběhu čerpání není dosaženo nepropustné ani napájecí hranice).
2. Výška zvodnělé vrstvy je konstantní v celé oblasti řešení.
3. Jedná se o nestlačitelnou kapaliny a hodnoty storativity a transmisivity jsou považovány za konstantní v čase i prostoru.
4. Čerpané množství vody z kolektoru je konstantní.
5. Na počátku je uvažování s konstantní piezometrickou výškou hladiny podzemní vody.
6. V průběhu čerpaní platí Darcyho vztah.
7. Objem vlastního objemu vrtu a vliv dodatečných odporů na průběh snížení je zanedbán.

Při jeho řešení byly uvažovány tyto počáteční podmínky:

h(r, 0) = h0 pro r > 0

kde h0 je počáteční piezometrická výška hladiny podzemní vody.

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

h(∞,t) =h0 pro t > 0

a konstantní čerpané množství Q[L3/T] ve studni: 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: h0 – h(r,t).

Výsledné řešení můžeme vyjádřit ve tvaru:

(3.3)

kde *u* je argument Theisovy studňové funkce:

Integrál v rovnici (3.3) označujeme jako exponenciální integrál, pro speciální definici hodnoty *u*, dostaneme rovnici snížení podzemní vody ve tvaru:

(3.4)

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

*pro n = 1,2,3…* (3.5)

Pro hodnoty 1/u > 100 s chybou menší než 0.25% lze Theisovu studňovou funkci ve tvaru (3.4) zjednodušit pomocí Jacobovy (Jacob, 1946) aproximace zanedbáním třetího a vyššího členu ve funkci (3.5). Předpis studňové funkce můžeme poté vyjádřit jako:

W(u) ≈ -0.577216 – ln(u) (3.6)

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

(3.7)

Dosazením rovnice (3.6) do rovnice (3.4) dostáváme tvar pro snížení:

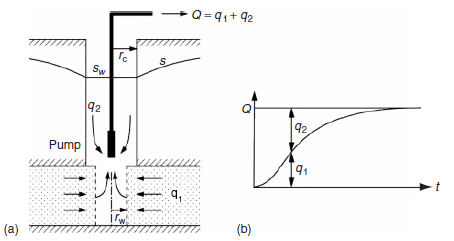
(3.8)

## 4. Proudění podzemní vody v kontextu reálného vrtu

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

### Vlastní objem 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*), na úplném počátku hydrodynamické zkoušky můžeme množství čerpané z vlastního objemu vrtu označit za dominantní, jak ukazuje obrázek č. 4a. Vliv vlastního objemu vrtu na průběh čerpací zkoušky trvá jen několik minut a časem se snižuje viz. obrázek č. 4b (*Fenske, 1977*), přesto jeho zanedbáním dojde k nadhodnocení hodnoty statorativity vrtu, přestože vlastní objem vrtu ovlivňuje hodnoty snížení jen na počátku čerpací zkoušky (*Black and Kipp, 1977*).



*Obr.: 4. A) Ukazuje vliv dodatečných odporů a průběh čerpací zkoušky, q2 představuje množství vody odebrané z vlastního objemu vrtu a q1 reprezentuje objem vody z kolektoru. B) Časový průběh jednotlivých složek čerpaného množství Q*

Odpovídající řešení vlivu vlastní zásoby vrtu na průběh čerpací zkoušky publikoval van Everdingen and Hurst již v roce 1949. Analytický model snížení zahrnující vliv objemu vrtu na průběh snížení hladiny podzemní vody byl popsán Papadopulos and Cooper (1967). Řešení bylo založeno na popisu neustáleného proudění podzemní vody dle Thies 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 *ts* vlivu vlastního objemu vrtu na průběh hydrodynamické zkoušky lze definovat pro čerpací vrt (*Papadopulos and Cooper*, 1967):

ts = 250 (rc2 – rp2) / T (4.1)

a pro pozorovací vrt:

ts = 2500 (rc2 – rp2) / T (4.2)

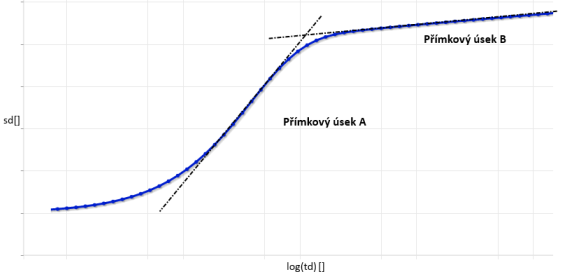
kde rc je poloměr neperforované části vrtu [L], tato část je umístěna nad jímací částí vrtu a rp je poloměr výstroje vrtu [L].

Při řešení proudění podzemních vod s vlivem vlastního objemu vrtu je často zaváděn bezrozměrný parametr vlastního objemu vrtu ve tvaru:

(4.3)

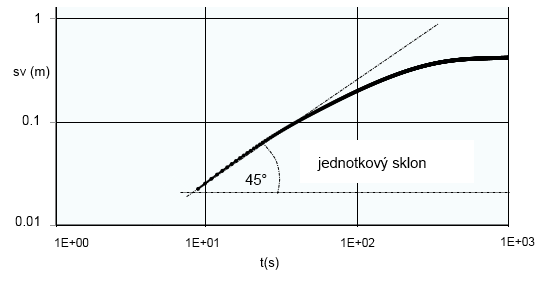
kde rv je poloměr vrtu, S storativita vrtu a C jednotkový faktor storativity vrtu.

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



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

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



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

Vlastní objem vrtu je často definován pomocí jednotkového faktoru storativity vrtu C [L2], který lze definovat ve zjednodušeném tvaru jako (*Ramey*, 1970):

(4.4)

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

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

(4.5)

kde Q[L3T-1] je celkové čerpané množství a Qp[L3T-1] objem pocházející ze zvodnělé vrstvy

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

(4.6)

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

(4.7)

kde tj a sj je dvojce odpovídajících si hodnot v přímkovém jednotkovém úseku grafu log sv vs. log t.

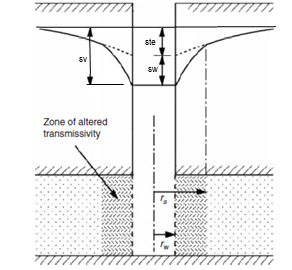
### Dodatečné odpory

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

Tento vztah můžeme vyjádřit jako:

sv = ste + sw (4.8)

kde sv [L] je pozorované snížení na vrtu vlivem čerpání, sw je snížení způsobené dodatečnými odpory [L] a ste je snižení vycházející z Theis modelu [L].



*Obr.: 6. Snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory*

Vliv dodatečných odporů na celkové snížení lze kvantifikovat, za předpokladu ustáleného proudění a zavedení rotačně symetrického proudění jako:

(4.9)

kde W [-] je bezrozměrný koeficient dodatečných odporů a Q[L3T-1] je množství čerpané vody.

koeficient dodatečných odporů lze vyjádřit:

(4.10)

kde rw je poloměr vrtu a Ts je hodnota transmisivity v oblasti s působením dodatečných odporů charakterizovaná poloměrem rs a T je hodnota transmisivity porézního materiálu bez vlivu dodatečných odporů. Z předpisu vyplývá, že v případě, pokud Ts je větší, než hodnota transmisivity 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 Ts a T, lze rovnici (4.10) upravit na tvar:

(4.11)

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

(4.12)

Dodatečné odpory jsou způsobeny řadou jevů, které vznikají během samotného zhotovení vrtu, ale také v průběhu čerpaní podzemní vody z vrtu. Při vrtání horninovým prostředím dochází ke kolmataci okolí vrtu, což sebou přináší změnu hydraulických vlastností porézního prostředí 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. Jednotlivé složky dodatečných odporů lze rozdělit na (*Jetel*, 1982):

1. 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.
2. Zmenšení aktivního průřezu stěny – omezení průtočnosti vlivem instalace filtru, perforované pažnice apod.
3. Neúplný průnik – vrt neprochází celou mocností kolektoru.
4. Ucpání filtru – zachycování částic hornin nebo obsypu v otvorech filtru. Chemická inkrustace a ucpání otvorů filtru působením mikroorganismů a bakterií.
5. Tření proudící kapaliny o stěny vrtu a jejím vnitřním třením.
6. Turbulentní režim proudění ve zvodnělé vrstvě, zejména pak v blízkosti odběrového vrtu.
7. 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 dodatečných odporů sw, které reprezentuje část snížení přímo ovlivněnou výskytem dodatečných odporů.

Při vyhodnocování hydrodynamický zkoušek pomocí Jacobovy aproximace bylo prokázáno, že výskyt dodatečných odporů nemá na vyhodnocené hodnoty transmisivity T vliv. V počáteční fázi se Agarwal et al. (1970) řešení shoduje s řešením Papadopulos and Cooper (1967), kde bylo uvažováno pouze s vlastním objemem vrtu a prokazuje počáteční dominantní vliv tohoto faktoru. Pro delší časový krok se průběh funkce Agarwal et al. (1970) paralelně shoduje s přímkovou částí funkce Jacobova aproximativního řešení. Dodatečné odpory tedy ovlivňují délku a tvar počátečního úseku, nikoliv pak směrnici přímkové části grafu pro vyhodnocení pomocí Jacobovy semilogaritmické metody.

### Rovnice popisující proudění ke skutečnému vrtu

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

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

(4.13)

kde *td = Tt / (rw2 S)* je bezrozměrný čas, *p = i (ln2 / td )* je Laplaceův transformační parametr kde *i* je aktuální hodnota Stehfestova parametru (viz. Stehfest algoritmus), K0 and K1 jsou modifikované Besselovy funkce druhého druhu a nultého respektive prvního řádu, Wje bezrozměrný parametr dodatečných odporů a Cpd bezrozměrnýparametr vlastního objemu vrtu, L-1 reprezentuje Laplaceovu inverzní tranformaci.

### Stehfest algoritmus

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

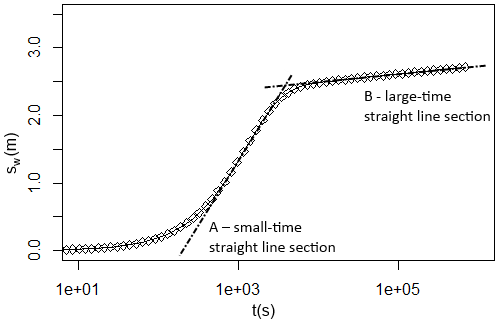
(4.14)

*kde*

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

### Stanovení dodatečných odporů na základě znalosti hodnoty bezrozměrného zásobnosti vrtu

Po vynesení závislosti bezrozměrného snížení hladiny v bezrozměrném čase můžeme v semilogaritmiském grafu vidět dva přímkové úseky, jak ukazuje obrázek č. 7. Na tuto skutečnost již upozornili Rivera a Raghava (1979) při vyhodnocování zkoušek na naftových vrtech. První přímkovou část na počátku čerpací zkoušky definuje vliv vlastního objemu vrtu a dodatečné odpory v okolí vrtu. Tudíž je nevhodný pro vyhodnocení pomocí metod, které byly odvozeny z předpokladů ideálního vtu (např. Jacobova semilogaritmická metoda přímky). Pro tento účel je nutné využit až druhý přímkový úsek, který už není těmito jevy zatížen.



*Obr.: 7. Bezrozměrné snížení na vrtu ovlivněné dodatečnými odpory a vlastním objemem vrtu – upravit na bezrozmerny graf*

Bezrozměrný sklon v semilogaritmickém grafu čerpací zkoušky můžeme označit jako:

(4.15)

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

(4.16)

kde Cd je vlastní objem vrtu a W je hodnota dodatečných odporů

Po dasazení za izd dostaváme vztah pro dodatečné odpory:

(4.17)

# Vlastní práce

Za jednotlivé výsledky této práce si autor klade za cíl popsat implementaci výpočetního softwaru pro vyhodnocení parametrů hydrodynamických zkoušek. Následně demonstrovat jeho využití pro zpracování dat z terénních zkoušek. Pro případové studie byly použity reálná data pořízená při zhotovování čerpacích zkoušek na různých lokalitách, některá měření byla provedena opakovaně za účelem zhodnocení provedených technických zásahů na pozorovaném vrtném objektu. Metody a teoretický základ vyhodnocování datových sad je popsán výše, zde již budou jen popsány samotné techniky stanovení parametrů horninového prostředí pomocí výpočetního softwaru, který byl pro tento účel vytvořen. Hlavním důraz je věnován popisu parametrů reprezentující skutečný vrt. Jako jsou dodatečné odpory a vlastní objem vrtu, jejichž hodnoty jsou dále zasazeny do kontextu hodnocení regenerace vrtného objektu. Na zde uvedené postupy lze nahlížet jako na metodiku vyhodnocování parametrů skutečného vrtu. Avšak práce si neklade za cíl popsat všechny realizované naprogramované funkce potažmo algoritmy, které sami o sobě přesahují obsahově zaměření této práce. A také proto je celý kód programu veřejně dostupný na platformě GitHub ( <https://github.com/jHolub/new_drutes> ), kde je možné si aplikaci stáhnout a dále svobodně nakládat, také je možné prostřednictvím podnětů od uživatelů aplikaci dále rozvíjet.

## Základní popis aplikace

Na základě autorovi praxe při vývoje softwaru a k přihlédnutí na řešenou problematiku bylo rozhodnuto, že aplikační software bude webová aplikace. Toto řešení zajistí snadnou uživatelkou dostupnost a poskytne možnost pravidelných záloh uživatelských dat. Pro tento účel bylo nezbytné zajistit doménu, pod kterou bude aplikace provozována. Již před započetím práce na vývoji byl předložen jako název aplikace: RadFlow (odvozený z anglické definice pro rotační proudění “Radial flow”). S přihlédnutím k názvu aplikace byla zvolena doména aplikace jako: radflow.cz, kde je možné kýžený software nalézt potažmo sním pracovat.



*Obr.: 8. Logo aplikace RadFlow*

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

|  |  |
| --- | --- |
| **Parametry** | **Webhosting** |
| Diskový prostor pro web \* | Neomezeně |
| Množství přenesených dat (traffic) | Neomezeně |
| [Databází MySQL/MariaDB 10.1 (celkový limit 1 GB)\*\*](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/mysql.html?lsm=1) | Neomezeně |
| [PHP 5.X, PHP 7 (vysoké parametry s možností změn)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/php.html?lsm=1) | OK |
| [Počet e-mailových schránek (celkový limit 5 GB)\*\*](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/emaily.html?lsm=1) | Neomezeně |
| Antivir, Antispam, POP3, IMAP4, SMTP, Webrozhraní | OKOK |
| Zabezpečená komunikace SMTPS, POP3S, IMAPS |
| Autoodpovídač, přesměrování pošty, doménový koš | OK |
| [Počet subdomén](http://kb.wedos.com/a/149/webhosting-subdomeny.html?lsm=1) | Neomezeně |
| 1 alias zdarma (neomezený počet za příplatek) | OKOK |
| FTP účet, FTPS, zamykání FTP, WebFTP |
| Počet dalších FTP účtů (do podadresářů) | Neomezeně |
| [Nastavení chybových stránek a hlášek (htaccess)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/apache.html?lsm=1) | OK |
| [Podpora hezkých URL, mod\_rewrite (htaccess)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/apache.html?lsm=1) | OKOK |
| [Komprese (mod\_deflate), mod\_expires (parametry Apache)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/apache.html?lsm=1) |
| [Omezování přístupů podle IP adres (htaccess)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/apache.html?lsm=1) | OK |
| [Zaheslování adresáře (htaccess)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/apache.html?lsm=1) | OK |
| [Podpora různých OpenSource aplikací (Drupal, Joomla...)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/opensource.html?lsm=1) | OK |
| Vhodné pro náročné a navštěvované weby, vysoký výkon | OK |
| [Zkušební doba 7 dní s garancí vrácení peněz až 180 dní](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/vraceni-penez.html?lsm=1) | OK |
| [CRON (periodické spouštění skriptů)](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/cron.html) | OK |
| [Podpora HTTPS se sdíleným i vlastním certifikátem](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/https.html) | OK |
| Provoz webu s www. i bez www. | OK |
| [Podpora IPv6 \*\*\*](http://kb.wedos.com/a/241/webhosting-ipv6.html) | OK |
| [On-line správa přes zákaznické centrum](https://hosting.wedos.com/cs/zakaznicka-administrace.html) | OK |
| Statistiky návštěvnosti přes Google Analytics | OK |
| Web bez reklam, možnost umístění vlastních | OK |
| Zřízení služby ZDARMA, bez smluvních závazků | OK |
| [Vedení DNS s možností plné editace zákazníkem](https://hosting.wedos.com/cs/dns.html?lsm=1) | OK |
| Umístění serverů na páteřní síti | OK |
| [NONSTOP zákaznická podpora a technický dohled](https://hosting.wedos.com/cs/webhosting/podpora.html) | OK |
| Ochrana firewallem | OK |
| **DDoS ochrana + IDS/IPS ochrana** | OK |
| Roční frekvence plateb | OK |
| [Možnost platby - 12 způsobů](https://hosting.wedos.com/cs/platby.html?lsm=1) | OK |
| [Týdenní zálohování \*\*](https://hosting.wedos.com/cs/zalohovani.html?lsm=1) | OK |
| [Značkové servery, vlastní datacentrum a vlastní síť](https://hosting.wedos.com/cs/datacentrum.html?lsm=1) | OK |
| Profesionální řešení služby (jedno z nejlepších v ČR) | OK |
| [Certifikace dle norem ISO 9001 a ISO 14001 a ISO 27001 od TÜV SÜD](http://datacentrum.wedos.com/a/149/certifikace-iso-9001-iso-14001.html) | OK |
| Garance dostupnosti | 99,99% |

## Systémová požadavky aplikace ze strany klienta

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

a) Microsoft Internet Explorer verze 8 a vyšší,

b) Mozilla Firefox verze 4 a vyšší,

c) Opera libovolná verze,

d) Safari,

e) Chrome

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

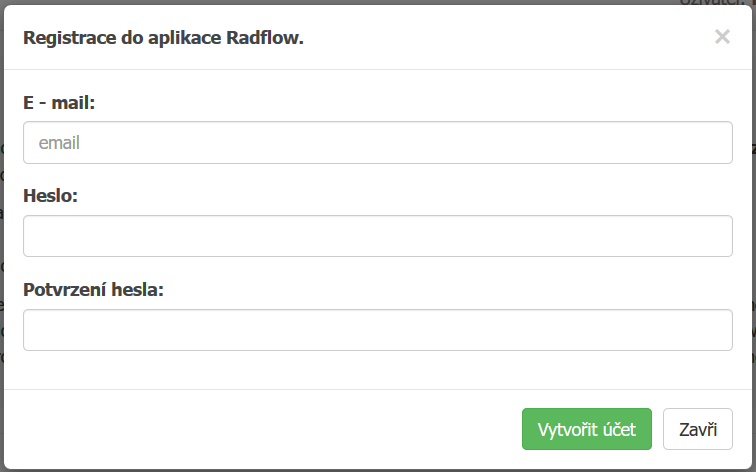
## Struktura aplikace

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

* Uživatelský modul – obsluha uživatelských účtů, autentizace a autorizace uživatele
* Modul správy datových sad – nahrávání a správa dat k analýze
* Výpočetní moduly – zpracování základních dat pomocí požadovaní logiky
* Uživatelské rozhraní – GUI aplikace pro obsluhu a zadávání parametrů do aplikace

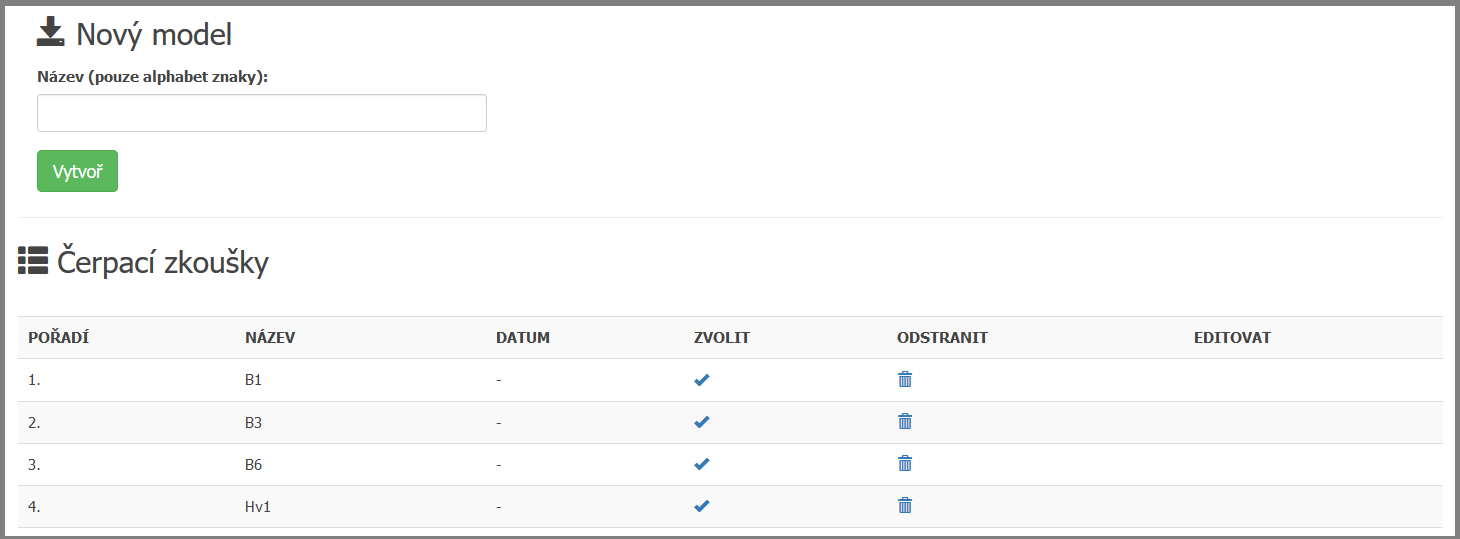
### Popis aplikace a uživatelské rozhraní

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



*Obr.: 9. Registrační formulář aplikace*

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



*Obr.: 10. 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 vrtu, transmissivita, čerpané množství, vzdálenost vrtu pozorovacího, poloměr vrtu, vlastní objem vrtu a dodatečné odpory. Některé zde uvedené parametry jsou výstupy analýz aplikačního softwaru a je možná jejich editace v průběhu práce.

### Výpočetní modul

Analytické metody vyhodnocení dat jsou přístupné po volbě datové sady ve formě modelu. Metody lze vzájemně kombinovat a zpětně upravovat. Dále budou popsány jednotlivá analytické postupy zpracování dat z čerpacích zkoušek.

**Theisova metoda typové křivky**

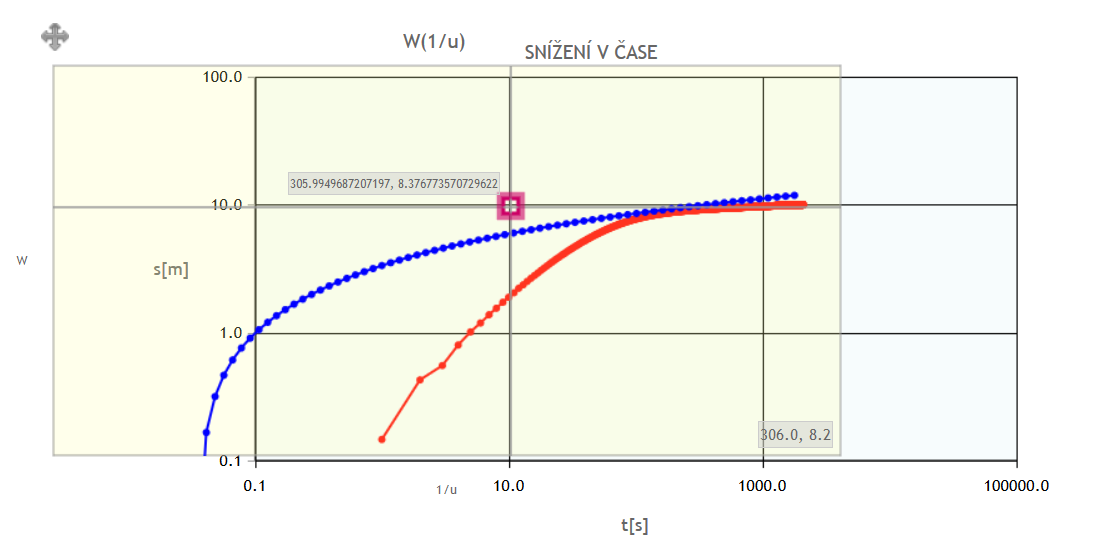
Tato metoda často slouží jako základ pro vyhodnocení čerpacích zkoušek za nestacionárního režimu proudění, v literatuře je často označovaná jako Theisova metoda typové křivky. Metodu můžeme použít pro vyhodnocení transmisivity a v případě znalosti snížení na pozorovacím vrtu i storativity vrtu z dat 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 analýzy je popsán níže:

1. Vytvoření modelu a nahraní 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 tramsmisivity a storativity vrtu. Výsledné hodnoty je možné uložit jako parametry datové sady a následné s nimi pracovat případně znovu editovat.

*Obr.: 10. Implementace Theisovy metody typové křivky v programu Radflow*

**Jacobova semilogaritmická metoda přímky**

Jacobova semilogaritmická metoda přímky je aproximací Theisovy studňové funkce, kdy uvažuje zanedbání třetího a dalsích členů v Theisovy stupňové funkci. Zde je vhodné uvést, že analýza se provádí na druhém přímkovém úseku snížení hladiny podzemní vody, jak ukazuje obrázek č. 10. Na počátku můžeme také pozorovat přímkový úsek ten je však ovlivněn vlastním objemem vrtu a je zcela nevhodný pro zde popisovanou analýzu. Aplikace umožnuje provést analýzu dat pomocí této metody. Postup analýzy transmisivity a v případě znalosti snížení na pozorovacím vrtu i storativity je popsán níže:

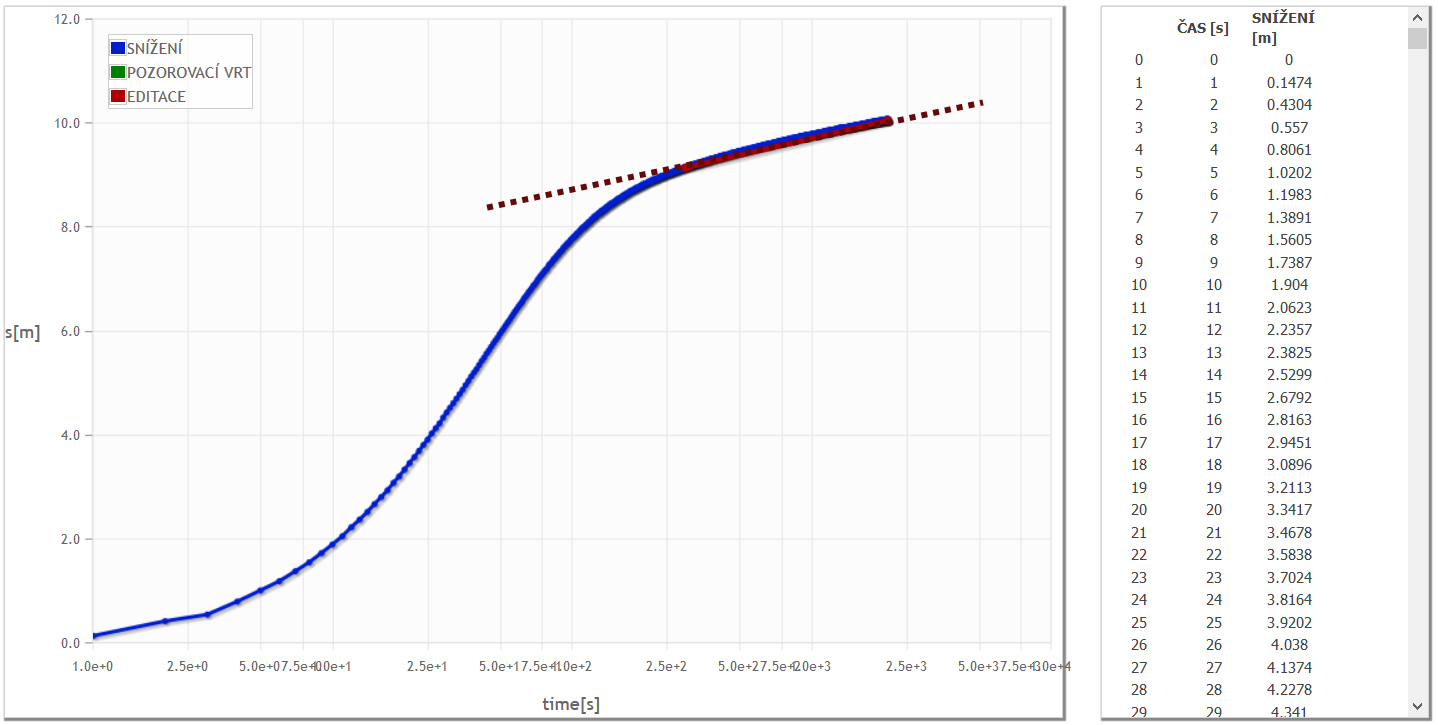
1. Vytvoříme patřičný model a datovou sadou (pro určení storativity je nutné nahrát také data z pozorovacího vrtu).

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 t0 průmět přímky snížení na pozorovacím vrtu do časové osy.

4. Dále v grafu kurzorem myši definujeme sklon přímkové části grafu t(s) je označen jako i.

5. Poté je možné přejít k samotnému výpočtu transmisivity potažmo storativity vrtu. Výsledné hodnoty je možné uložit jako parametry datové sady a následné s nimi pracovat případně znovu editovat.



*Obr.: 10. Implementace Jacobovy semilogaritmické metoda přímky v programu Radflow*

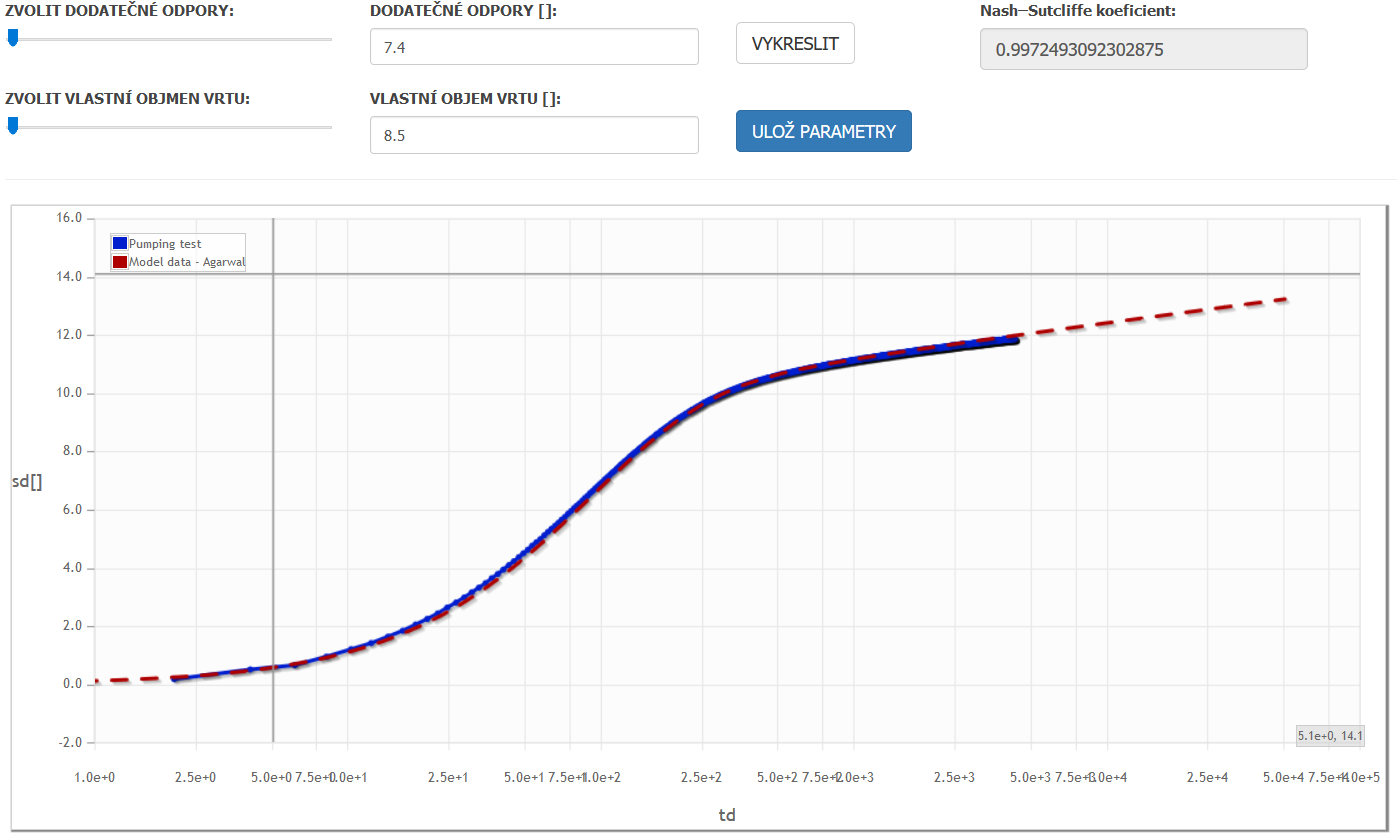
**Vyhodnocení dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu**

Zde je popsán postup stanovení parametrů skutečného vrtu v podobě dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu z dat čerpací zkoušky při nestacionárním radiálně-symetrickém proudění ze zvodně s napjatou hladinou. Charakteristickým rysem přítomnosti vlivu parametrů reálného vrtu je výskyt dvou přímkových úseků v grafu snížení podzemní vody. Samotný teoretický základ je popsán v teoretické části práce, zde je popsán postup výpočtu jednotlivých parametrů pomocí programu RadFlow.

1. Výpočtu předchází tvorba modelu s nahráním požadované datové sady, snížení hladiny v průběhu čerpaní.

2. Pro analýzu je nutné předchozí určení hodnot storativity a transmisivity vrtu. K tomuto účelu je možné využít dříve popsané analýzy v programu RadFlow (Theisova metoda typové křivky nebo Jacobova semilogaritmická metoda přímky).

3. Uživatel pomocí posuvníku stanovuje hodnoty dodatečných odporů a vlastního objemu vrtu. Výsledkem tohoto procesu je nalezení nejlepší možné shody, po jeho nalezení je možné parametry uložit. Pro kontrolu je také možné využít statický ukazatel - Nash–Sutcliffe koeficient.



*Obr.: 11. Analýza parametrů reálného vrtu pomocí programu RadFlow*

**Vyhodnocení dodatečných odporů na základě hodnoty vlastního objemu vrtu**

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

1. Pro analýzu je nutné předchozí určení hodnot storativity a transmisivity vrtu z druhého přímkového úseky čerpací zkoušky.

2. Stanovení hodnoty vlastního objemu vrtu.

3. Uživatel kurzorem myši definuje první přímkový úsek grafu sd(td).

4. Následně je programově vypočtena hodnota sklonu první přímkové časti iz a stanovena hodnota dodatečných odporů Wd. Výslednou analýzu je možné opět uložit jako parametry vrtu.

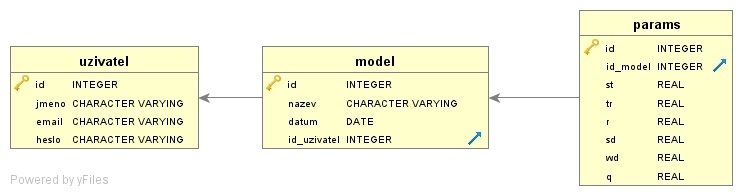
## 

*Obr.: 12. Analýza dodatečných odporů pomocí programu RadFlow*

## Datový model aplikace

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

Jako databázový systém pro uložení množin informací byl zvolen open-source objektově-relační databázový systém PostgreSQL.



*Obr.: 13. UML diagram datového modelu apliakce RadFlow*

## Případové studie vyhodnocení čerpacích zkoušek

This paper presented the evaluation method of the pumping test with an observation well.

Transmissivity and storage coefficient as the main hydraulic parameters of the aquifer

were determined as well as skin effect and wellbore storage. Time-drawdown pumping

test data characterised sigmoid shape, S-shaped drawdown-time curve typical of pumping

tests with the influence of skin effect and wellbore storage. The estimation of

transmissivity and storage coefficient was carried out through the Cooper-Jacob

semi-logarithmic method from large-time straight line section. These parameters were

input to the model used to estimate the skin effect and wellbore storage. The evaluation

parameters were conducted through matching technique. The parameters were achieved

in the value of statistical indicators Nash-Sutcliffe. The result can be regarded as entirely

relevant due to the value of statistical indicator. These parameters are not involved in the

Theis model which is commonly used to evaluate the pumping test data. However, these

parameters influence the pumping test itself and it is not desirable to ignore these

parameters. If they are neglected, it may lead to overestimation of the output pumping

testing data and subsequently devaluate the pumping test. The value of skin effect is

essential in determining the permeability in conditions of steady flow and can be

conducted as basic evaluative criteria of regeneration pumping well with respect to

changes in the hydraulic parameters before and after the regeneration process.

### Čerpací zkoušky, lokalita Veletov

### Čerpací zkoušky, lokalita Bela Crkva

A constant-rate pumping test was conducted in a confined aquifer the location Strza nearby Bela Crkva in the Republic of Serbia, is the eastern part of Vojvodina Province. Figure 1 shows the location of wells B1, B3 and B6 with the pump. The evaluation hydraulic parameters were performed, however only for B3 and B6 well.

**Vrt – B1**

The depth of the well B3 and B6 is 120 m. Both the pumping wells fully penetrate the aquifer with uniform radius 0.32 m. The pumping rate was constant 0.14×10–3 m3/s for both B3 and B6. The data of drawdown was recorded at the very beginning of the pumping test for reasons of wellbore storage influence. Moreover, another important fact is to set suitable time step of record for this part of the pumping test, for reasons analysing the early-time section of drawdown



**Vrt – B3**

The depth of the well B3 and B6 is 120 m. Both the pumping wells fully penetrate the aquifer with uniform radius 0.32 m. The pumping rate was constant 0.14×10–3 m3/s for both B3 and B6. The data of drawdown was recorded at the very beginning of the pumping test for reasons of wellbore storage influence. Moreover, another important fact is to set suitable time step of record for this part of the pumping test, for reasons analysing the early-time section of drawdown



**Vrt – B6**

The depth of the well B3 and B6 is 120 m. Both the pumping wells fully penetrate the aquifer with uniform radius 0.32 m. The pumping rate was constant 0.14×10–3 m3/s for both B3 and B6. The data of drawdown was recorded at the very beginning of the pumping test for reasons of wellbore storage influence. Moreover, another important fact is to set suitable time step of record for this part of the pumping test, for reasons analysing the early-time section of drawdown



Vyhodnocení parametrů hydrogeologického pros

tředí z data čerpacích zkoušek

Čerpací zkouška

Popis lokality a průběh získání datových sad

Vyhodnocení základních charakteristik hydrogeologického prostředí

Stanovení parametrů skutečného vrtu

Zhodnocení provedené zkoušky z hlediska regenerace vrtu

# Seznam literatury

1. Agarwal, R. G., R. Al-Hussainy, and H. J. Ramey Jr., 1970: An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow: I. Analytical treatment. Trans. Soc. Pet. Eng. AIME, 249, 279-290.
2. Bear, Jacob, Cheng, Alexander H.-D., 2010: Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport, Springer Netherlands, ISBN 978-1-4020-6681-8
3. Black, J. H. and K. L. Kipp, 1977: Observation well response time and its effect upon aquifer test results. J. Hydrol., 34, 297-306, doi: 10.1016/0022-1694(77)90137-8.
4. Cooper, H. H., Jr. and C. E. Jacob, 1946: Generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Trans. AGU, 27, 526-534.
5. Domenici P. A., Schwartz F. W., 1998: Physical and chemical hydrogeology. Wiley: 60-63, ISBN-10: 0471597627
6. Fenske, P. R., 1977: Radial flow with discharging-well and observation-wellstorage. J. Hydrol., 32, 87-96, doi: 10.1016/0022-1694(77)90120-2.
7. Freeze A, Cherry J., 1979: Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
8. Garcia-Rivera, J. - Raghavan, R., 1979: Analysis of short-time pressure data dominated by wellbore storage and skin. J. Petrol. Technol., 623-631
9. Heath C. Ralph, 1983: Basic Ground-Water hydrology. Geologigal survey Dallas.
10. Hawkins, M. F.Jr., 1956: A note on the skin effect, Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng., 207, 356–357.
11. Hund-Der Yeh, Ya-Chi Chang, Recent advances in modeling of well hydraulics, Advances in Water Resources, 2013, 51, 27
12. Chen, C. S. and C. G. Lan, 2009: A simple data analysis method for a pumping test with skin and wellbore storage effects. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 20, 557-562, doi: 10.3319/TAO.2008.05.16.01(Hy)
13. Chen, C.-S., and C.-C. Chang, 2002: Use of cumulative volume of constant-head injection test to estimate aquifer parameters with skin effects: Field experiment and data analysis, Water Resour. Res., 38(5), doi:10.1029/2001WR000300.
14. Chen C.-S., C.-C. Chang, 2006: Theoretical evaluation of non-uniform skin effect on aquifer response under constant rate pumping, Journal of Hydrology, Volume 317, Issues 3–4, Pages 190-201, ISSN 0022-1694, http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.017.
15. Jargon, J. R., 1976: Effect of wellbore storage and wellbore damage at the active well on interference test analysis. J. Pet. Tech., 28, 851-858, doi: 10.2118/5795-PA.
16. Jetel J., 1982: Určování hydraulických parametrů hornin hydrodynamickými zkouškami ve vrtech, ÚÚG Praha.
17. Kazda I., 1997: Podzemní hydraulika v ekologických a inženýrských aplikacích. Academia, Praha.
18. Moench, A. and Ogata, A., 1984: Analysis of Constant Discharge Wells by Numerical Inversion of Laplace Transform Solutions, in Groundwater Hydraulics (eds J. S. Rosenshein and G. D. Bennett), American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/WM009p0146
19. Moench A.F., 1985: Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers, Water Resour. Res., 21(8), 1121-1131
20. Papadopulos, I. S. and H. H. Cooper, 1967: Drawdown in a wellof large diameter well. Water Resour. Res., 3, 241-244, doi: 10.1029/WR003i001p00241.
21. M. Pasandi, N. Samani, D.A. Barry, 2008: Effect of wellbore storage and finite thickness skin on flow to a partially penetrating well in a phreatic aquifer, Advances in Water Resources, Volume 31, Issue 2, Pages 383-398, ISSN 0309-1708, http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.09.001.
22. Pech, P. 2010. Speciální případy hydrauliky podzemních vod. Česká zemědělská univerzita v Praze ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka v.v.i., 49, ISBN-978-80-87402-04-7
23. Ramey, H. J. Jr.: 1970, Short-time well test data interpretation in the presence of skin effect and wellbore storage , J. Pet. Tech., Jan., 97
24. Ramey, H. J. Jr.: 1976, Practical Use of Modern Well Test Analysis, paper SPE, 5878 preseted at the SPE-AIME 46th Annual California Regional Meeting, Long Beach, CA, April 8-9,
25. Garcia-Rivera J. and Raghavan R. 1979, Analysis of Short-Time Pressure Data Dominated by Wellbore Storage and Skin. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/6546-PA
26. Stehfest, H., 1970. Algorithm 368 numerical inversion of Laplace transforms D-5. Comm. of the ACM No 1.
27. Streltsova, T. D., 1988: Well Testing in Heterogeneous Formations, Wiley, New York, 413 pp.
28. Taib D., 1995. Analysis of pressure und pressure derivative without type-curve matching – Skin and wellbore storage. Journal of Petroleum Science and Enginneering.: 170-181.
29. Theis, C. V., 1935: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using Ground-Water Storage. Trans. AGU, 16, 519-524.
30. Valentová J., 2007: Hydraulika podzemní vody. ČVUT, Praha.
31. van Everdingen A.F., W. Hurst. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. Trans, pages 305–324, 1949.
32. van Everdingen, A.F., Hurst, W., 1953. The skin effect and its influence on the productive capacity of the well. Transactions of the American Institute Mineralogical Metallurgical and Petrological Engineering. 198, 171–176.
33. Walton W. C., 2006. Aquifer Test Modeling. CRC Press. Hardcover: 240 pages, ISBN-10: 1420042920
34. Wang C. T., Yeh H., Tsai C., 2012. Transient drawdown solution for a constant pumping test in finite two-zone confined aquifers. Hydrology and Earth System Sciences