

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Aplikovaná geologie



Bc. Karolína Kutnarová

Interpretace a využití monitoringu vodárenských vrtů

Interpretation and use of monitoring data from water supply wells

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. František Pastuszek

Konzultant diplomové práce: RNDr. Josef Datel, Ph.D.

Praha 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 16.8.2019

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala především svému vedoucímu diplomové práce RNDr. Františkovi Pastuszkovi za velkou trpělivost s mými dotazy, ochotu pomoci a vstřícný přístup. Dále bych chtěla poděkovat konzultantovi mé diplomové práce RNDr. Josefu Datlovi Ph.D. za věcné připomínky, a také velké poděkování patří všem, kteří jakýmkoli způsobem přispěli k dokončení mé diplomové práce.

Abstrakt

Životnost hydrogeologického vrtu je důležitá nejen v naftové geologii, ale i ve vodárenství. V současné době, kdy poptávka po vodě stoupá, je nutné zajistit bezproblémový chod vrtů a co nejvíce pečovat o jejich stav. Cílem této práce je pokusit se aplikovat postupy produkční analýzy, které se běžně používají při těžbě ropy v naftovém průmyslu na vodárenské vrty. V práci se zaměřím na sledování produktivity vrtu s ohledem na zvyšování hydraulických ztrát způsobených kolmatací.

Abstract

The life of the hydrogeological well is not important only in petroleum geology but also in the water industry. Nowadays, when the demand of water rises, it is necessary to ensure the smooth running of the wells and care as much as possible about their condition. The aim of this thesis is try to apply the methods of production analysis commonly used in oil production in the oil industry for water supply wells. In the thesis I will focus on monitoring the productivity of the well with regard to increasing the hydraulic losses caused by clogging.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 3 |
| 1 Stávající znalosti o problematice | 4 |
| 1.1 Produkční analýza | 4 |
| 1.2 Hydraulické parametry | 5 |
| 1.3 Kolmatace | 5 |
| 1.4 Křivka vydatnosti | 7 |
| 2 Metodika | 8 |
| 3 Vlastní práce | 10 |
| 3.1 Informace o území a vrtech | 10 |
| 3.1.1 Situace vrtů | 12 |
| 3.2 Zpracování dat | 14 |
| 3.3 Vyhodnocení čerpacích zkoušek | 19 |
| 3.4 Vyhodnocení normované specifické kapacity | 25 |
| 3.5 Další poznatky | 29 |
| Diskuse a závěr | 32 |
| Seznam použité literatury | 33 |
| Seznam obrázků | 35 |
| Seznam tabulek | 37 |
| Seznam použitých zkratk | 38 |
| A Příloha 1 – Geologické profily vrtů | 40 |

| | | |
|-----|---|----|
| A.1 | Příloha 1a – geologický profil vrtu HV-1 | 40 |
| A.2 | Příloha 1b – geologický profil vrtu HV-2 | 41 |
| A.3 | Příloha 1c – geologický profil vrtu HV-19 | 42 |
| A.4 | Příloha 1d – geologický profil vrtu HV-22 | 43 |

Úvod

Cílem mé diplomové práce je ověřit, zda produkční analýza je prakticky využitelná ve vodohospodářské sféře. Ve své práci uplatňuji postupy produkční analýzy na získaná data z monitorovaných hydrogeologických objektů. Na základě vyhodnocených výsledků posuzuji stav objektů z hlediska změn vstupních hydraulických odporů a predikuji vývoj technického stavu, maximálního čerpaného objemu podzemní vody a nejzazší termín pro nezbytné provedení regenerace vrtu.

Produkční analýzou lze predikovat chování těchto objektů z hlediska kolmatačních procesů a změn vstupních hydraulických odporů (Pastuszek, 2018). Primárně se produkční analýza využívá v ropném průmyslu pro analýzu produktivity vrtu a zjišťování množství zásob ropy. Slibně se avšak začíná rozvíjet i její uplatnění ve vodárenství.

Každý provozovatel vodovodu pro veřejnou potřebu je povinen vypracovat provozní řád, jehož body jsou definovány v odst. 3 zákona 258/2000 Sb. (PSPČR, 2019). Součástí provozního řádu je kromě údajů o zdroji a místu odběru surové vody i monitorovací program, kde jsou obecně definovány požadavky kontrol vrtů. Není konkrétně specifikováno, jaké parametry musí daný provozovatel sledovat a jakým způsobem, avšak součástí běžného monitorování hydrogeologických objektů jsou zejména údaje: umístění, datum měření, vydatnost a výška hladiny podzemní vody. Z těchto údajů je možné obsáhnout mnohem více informací o stavu a výtěžnosti vrtu, než se doposud využívá.

Rešeršní část diplomové práce zahrnuje teorii o kolmatačních procesech a produkční analýze. Následuje metodika vlastní práce, kde obecně uvádím postup zpracování a vyhodnocování dat. Vlastní práce zahrnuje vypracování, interpretaci výsledků, diskusi a závěr.

1. Stávající znalosti o problematice

1.1 Produkční analýza

Produkční analýza (dále jen "PA") je soubor výpočetních a grafických postupů, jejichž cílem je sledovat hydraulický stav hydrogeologických objektů a analyzovat klesající výtěžnost vrtu. Zároveň se PA zabývá predikováním budoucího vývoje zásob, na základě změn vydatností a poklesů hladin (tlaků) v čase. Z toho lze odhadovat, jak se objekt bude vyvíjet z hlediska stárnutí a zvětšování vstupních hydraulických odporů.

Ukazuje se, že produkční analýza je vhodná pro použití ve vodohospodářském sektoru, kde ji lze efektivně využít k ekonomickému plánování nákladů na provoz a údržbu vrtů.

Produkční analýza vychází ze dvou podmínek:

- hydraulické vlastnosti exploatované zvodně jsou v čase stálé,
- ke změnám hydraulických vlastností zvodně dochází pouze na plášti vrtu a v jeho nejbližším okolí (reaktorová část, kolmatační zóna).

PA se používá pro hydraulicky ustálené stavy (Pastuszek, 2018) a byla vyvinuta pro použití v ropném průmyslu. Matematický model PA poprvé použil na počátku 20. století R. Arnold a R. Anderson (Arnold a Anderson, 1908), ve dvacátých letech pokračoval v rozvíjení jejich postupu W. W. Cutler (Cutler, 1924) vykreslováním hyperbolických křivek na log-log papír (tzn. semiempirické hodnocení produktivity ropných vrtů). V roce 1945 přišel J. J. Arps (Arps, 1945) s postupy, které umožňovaly kvantifikaci a časovou predikci použitím specifické analýzy. V sedmdesátých letech minulého století přišel M. J. Fetkovich (Fetkovich, 1980) s logaritmickými křivkami konstantního tlaku v čase. Tyto postupy vždy byly využity pouze pro těžbu ropy.

Teprve počátkem 21. století se PA začala aplikovat i ve vodohospodářském sektoru. Jako první s tímto začal F. Pastuszek v roce 2017 (Pastuszek, 2017), který prezentoval první výsledky kvantitativního sledování vlivu regenerace na změnu hydraulických odporů hydrogeologických vrtů. Principy produkční analýzy použil na úvodních částech čerpacích zkoušek.

1.2 Hydraulické parametry

Hydraulické parametry kolektoru a zvodně představují vstupní údaje pro veškeré hydrogeologické výpočty. Vlastnosti horninového prostředí rozhodují o pohybu a akumulaci podzemních vod. K základním hydraulickým vlastnostem horninového prostředí patří propustnost a pórovitost. Hydraulické parametry hornin popisují v hydrogeologii kvantitativní charakteristiky hydraulických vlastností horninového prostředí. Hydraulické parametry dělíme na vodivostně-odporové, objemově-kapacitní a kapacitně-odporové (Pastuszek, 2014).

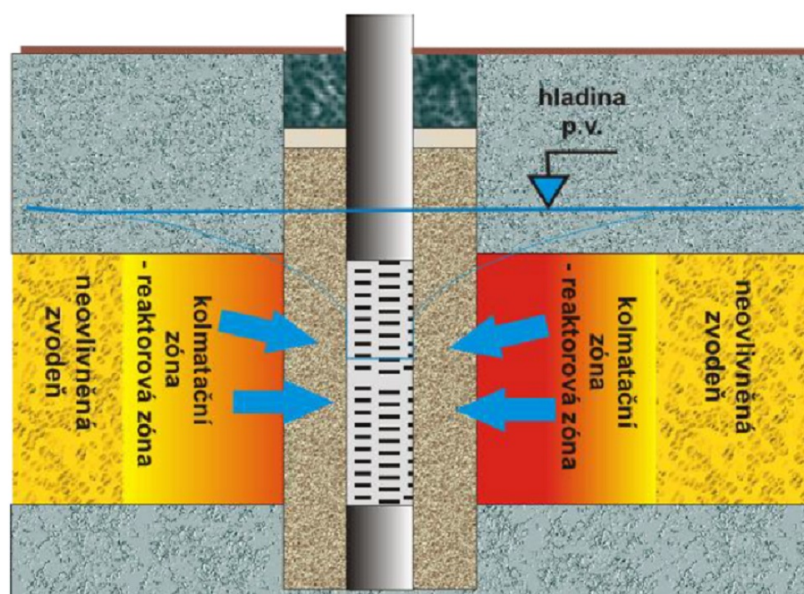
V této práci se zabývám vodivostně-odporovými parametry, které charakterizují schopnost horninového prostředí propouštět tekutiny, tzn. vynakládat odpor proudící tekutině. Mezi tyto parametry mimo jiné patří:

- nasycená hydraulická vodivost (k , [m/s]), která se číselně rovná filtrační rychlosti (v , [m/s]) při jednotkovém gradientu (I , [m])

$$v = k * I \quad (1.1)$$

1.3 Kolmatace

Kolmatace, označovaná také jako stárnutí vrtu, je proces postupného utěšňování kolektoru v blízkém okolí vrtu. Ke kolmataci dochází při filtraci vody zachytáváním a hromaděním mechanických suspenzí nebo látek vysrážených z vody, které vznikají v důsledku fyzikálních, chemických nebo biologických procesů při interakci vody s horninovým prostředím nebo vsakované vody s vodou podzemní.



Obrázek 1.1: Schéma blízkého okolí vrtu (Pastuszek, 2014)

Lze říci, že kolmatace je souborem celé řady jevů, např. sedimentace, filtrace, zachycování suspendovaných částic v pórech horninového prostředí, chemické změny při kontaktu vody s horninovým prostředím, průběhu biologických a mikrobiologických procesů společně s výsledkem jejich metabolických aktivit. To však přináší mnoho obtíží, jelikož jednotlivé části není možné od sebe oddělit a studovat samostatně. Procesy působí provázaně a navzájem se ovlivňují (Pastuszek, 2014).

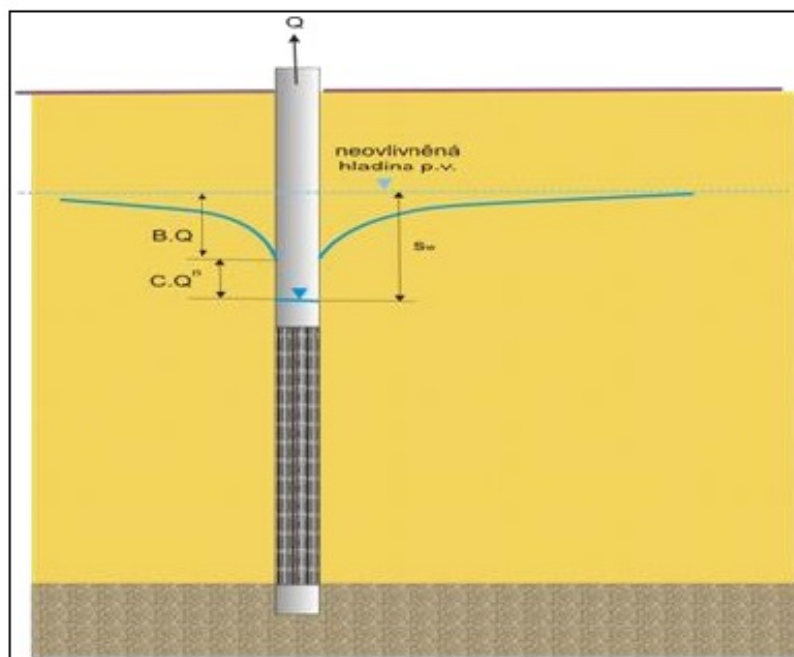
Během působení kolmatačních procesů dochází k nárůstu velikosti hydraulických odporů na plášti vrtu a v nejbližším okolí v čase, který je způsoben snižováním porozity v důsledku vysrážení sedimentů (Bogdan a kolektiv, 2015). Při těchto procesech klesá specifická vydatnost a dochází ke snižování hladiny podzemní vody ve vrtu.

Celkové snížení hladiny podzemní vody ve vrtu (s_w) se skládá z odporů charakterizujících vlastní kolektor (BQ) a z odporů vrtu (CQ^n), kde Q vyjadřuje čerpané množství podzemní vody (Pastuszek, 2014). Vzorec v původním znění definoval C. E. Jacob (Jacob, 1947):

$$s_w = BQ * CQ^2 \quad (1.2)$$

W. H. Rorabaugh (Rorabaugh, 1953) v roce 1953 vzorec upravil do nynější obecněji využívané podoby, kde exponent n většinou nabývá hodnot od 1,5 do 3:

$$s_w = BQ * CQ^n \quad (1.3)$$



Obrázek 1.2: Hydraulický skok na plášti vrtu (Pastuszek, 2014)

1.4 Křivka vydatnosti

Křivka vydatnosti vyjadřuje závislost přítoku podzemní vody do vrtu na snížení hladiny při podmínkách ustáleného proudění a využívá se pro stanovení maximální využitelné kapacity hydrogeologického vrtu. K výpočtu křivky vydatnosti je potřeba znát nasycenou hydraulickou vodivost. Tato vodivost se vypočítá z dat čerpacích zkoušek po dokončení zbudování vrtu, ve kterém je dosažen hydraulický stacionární (ustálený) stav. Tento stav je při čerpací zkoušce dosažen v okamžiku, kdy se odběr podzemní vody z vrtu rovná velikosti přítoku do vytvořeného depresního kužele přes válcovou plochu tvořenou okrajem depresního kužele, tj. za situace $Q = \text{konst.}$, $s_w = \text{konst.}$ (Pastuszek, 2011).

V této práci pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti vycházím ze základní rovnice ustáleného proudění podzemních vod v kolektoru s napjatou hladinou, kterou odvodil A. J. Dupuit (Grmela, 2004), a to:

$$Q = \frac{2\pi * k * m * (H - h)}{\ln R - \ln r} \quad (1.4)$$

kde:

- $H-h$ vyjadřuje snížení [m]
- R je poloměr depresního kužele [m]
- r je poloměr vrtu [m]
- k je nasycená hydraulická vodivost [m/s]
- Q je čerpaný objem [m]
- m je mocnost zvodně [m]

Pro stanovení dosahu deprese používám empirický vzorec Sichardta:

$$R = 3000 * s * \sqrt{k} \quad (1.5)$$

kde s je snížení [m] a k je nasycená hydraulická vodivost [m/s].

Grafickým znázorněním křivky vydatnosti pro napjatou hladinu je křivka blíží se přímce. Maximální jímací kapacitu vrtu zjistíme z grafického vyjádření křivky vydatnosti v místě průsečíku hodnot čerpaného množství, snížení a funkce jímací schopnosti studny $f(r,t)$ (Sichardt, 1928).

Vzhledem k tomu, že veškerá data prezentují měřené hodnoty v hydraulicky ustáleném stavu při napjaté hladině podzemní vody, používám pro výpočty nasycené hydraulické vodivosti Dupuitova vzorce ve tvaru pro napjatou hladinu.

2. Metodika

Pro správné pochopení problematiky a nalezení odpovědí se řídím procesem datové analýzy, která sestává z následujících kroků (Cuesta, 2015):

- 1) vyřčení otázky
- 2) získání dat
- 3) převedení a zpracování dat
- 4) průzkumná vizualizace dat
- 5) průzkumná statistika a prediktivní modelování
- 6) vizualizace a interpretace výsledků

Ad. 1) Mým cílem je zjistit, jak se v čase mění vstupní hydraulické odpory v hydrogeologickém objektu a v jeho nejbližším okolí.

Ad. 2) Pro stanovení hydraulických odporů potřebuji znát čerpaný objem z kontinuálního čerpání, výšku a snížení hladiny podzemní vody, záznam čerpací zkoušky z doby konstrukce vrtu a jeho technické parametry. Tyto údaje jsou dostupné z monitorovacích měření, která probíhají ve vodárensky využívaných vrtech. Vstupní data pro zpracování produkční analýzy poskytla firma SVAS a.s. Kladno z vrtů HV-1, HV-2, Hv-19 a HV-22 a firma Progeo s.r.o. z vrtu Li-1. Záznamy čerpacích zkoušek z vrtů HV-19 a HV-22 z roku 1969 jsem získala v Geofondu (Šula, 1969b).

Ad. 3) Monitorovaná data obsahují údaje o čase záznamu, čerpaném množství, výšce hladiny podzemní vody nad čidlem a hloubce čidla, a obdržela jsem je bez jakékoli úpravy. Aby se tato data dala použít a dále prezentovat, musela jsem je upravit a optimalizovat. Tyto úpravy spočívají zejména v přepočtení výšky hladiny podzemní vody nad čidlem na absolutní výšku, výpočtu snížení a stanovení specifické kapacity vrtu.

Ad. 4) Z optimalizovaných dat sestrojím prvotní grafy pro optickou představu.

Ad. 5) Problematiku vyhodnocování rozdělují do dvou částí, a to:

- grafické znázornění časového vývoje hladiny a čerpaného množství ve vrtu,
- porovnání křivek vydatnosti konstruovaných z průměrných ročních hodnot ustálených stavů a původních hodnot z čerpací zkoušky z roku 1969 a výpočtů normované specifické kapacity

Z hodnot specifické vydatnosti jsem vyhodnotila normovanou specifickou kapacitu v čase, pro kterou jsem spočetla parametry Arpsovy poklesové křivky. Poklesové křivky se stanovují nelineární regresí s využitím Levenberg-Marquardtovy procedury pro výpočet příslušných konstant.

Ad. 6) Výslednou vizualizací normované specifické kapacity s implementací Arpsovy harmonické křivky získám komplexní představu o změnách hydraulických odporů a kapacitních možnostech vrtu. Současně s tím porovnám zjištěné hodnoty s hodnotami závislosti čerpaného množství (Q , m³/s) na hodnotách snížení hladiny podzemní vody (s , m) - viz křivky vydatnosti.

3. Vlastní práce

3.1 Informace o území a vrtech

Vrty řešené v této práci jsou situované v obcích Liběchov, Želízy a Tupadly ve Středočeském kraji v okrese Mělník na pravé straně řeky Labe při toku Liběchovka a Želízská svodnice. Oblast zahrnuje jižní část geomorfologického celku Ralská pahorkatina. Jeho plocha je 335,2 km². Celé území rajonu je charakterizováno mírnými tektonickými úklony (cca 1°) k JJZ (Adamovič a kolektiv, 2016).

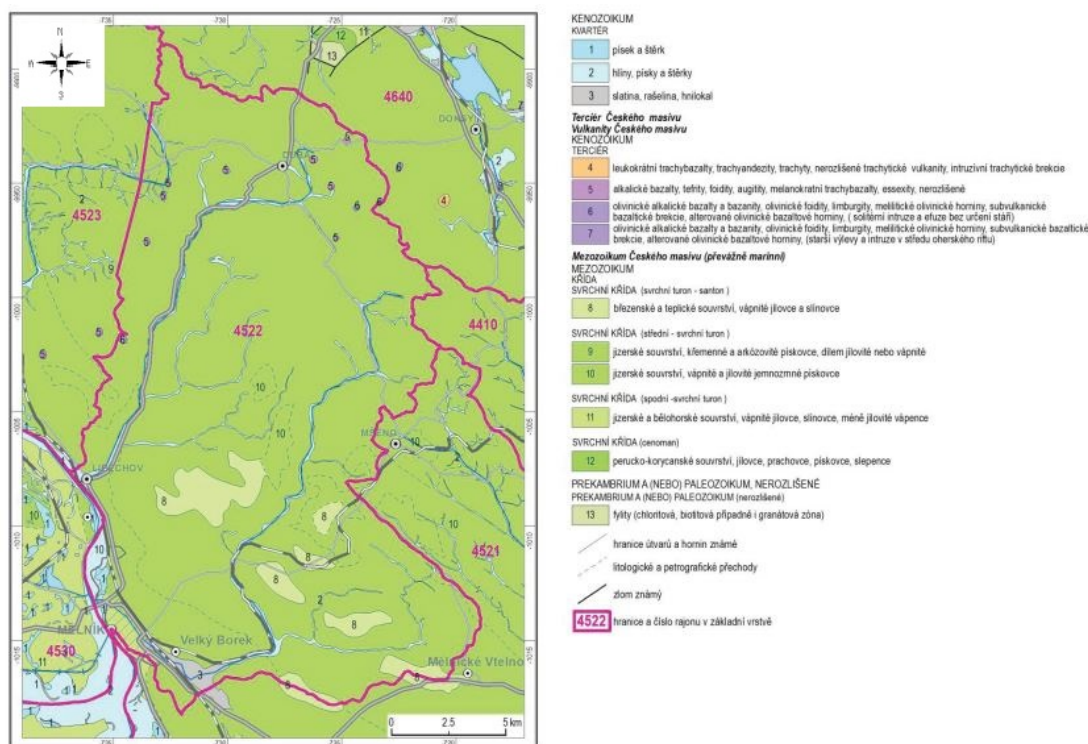
Hydrogeologické vrty jsou v největší míře soustředěny v okolí toků Liběchovky a Pšovky. V centrálním území rajonu mezi Dražejevem, Novými Osinalicemi, Sitným a Tuboží se kromě vrtu HJ-41 v Dolní Vidimi další vrty nenachází (Adamovič a kolektiv, 2016).

Morfologicky lze území zařadit do dvou typů, podmíněných geologickou stavbou:

1. Kaňonovitá údolí s místními postranními důly a skalními městy menšího rozsahu.
2. Mírně zvlněný terén rozvinutého typu nad horní hranou svahů.

V území vlastního orografického povodí Liběchovky je rozdíl nejvyššího a nejnižšího bodu 256 m. Dna údolí jsou ve výškách 200 až 300 m, zvlněná rovina mezi nimi kolísá od 300 do 350 m. Orograficky patří území k Polomeným horám (Šula, 1970).

Povodí Liběchovky spadá spolu se sousedními povodími Obrtky, Pšovky a Úštěckého potoka do oblasti pravobřežních přítoků dolního toku Labe. Tato povodí jsou hydrologicky a klimaticky značně podobná. Náleží do mírně teplé oblasti a vyznačuje se dlouhým teplým, mírně suchým létem a krátkou zimou s krátkým trváním sněhové pokrývky (Quitt, 1971). Dlouhodobý roční úhrn srážek na povodí vypočtený polygonovou metodou je 588 mm. Průměrná denní teplota podle nejbližší klimatické stanice Doksy dosahuje 7,23 °C. Plocha rajonu je drénovaná hlavními toky – Labe a vedlejšími toky – Liběchovka, Pšovka a jejich přítoky. Průtoky v tocích jsou měřeny na průtokoměrných stanicích ČHMÚ, VÚV a dalších účelových sítích. V obci Želízy na toku Liběchovka se nachází průtokoměrná stanice č. 900026 (Adamovič a kolektiv, 2016). Všechny toky mají vlivem silné dotace podzemními vodami vysoké a vyrovnané odtoky. Povodí náleží do západní části české křídové pánve. Podloží křídly je vzhledem ke křídovému komplexu považováno za izolátor. Jsou zde rozlišovány dva zvodnělé kolektory, kolektor A v perucko-korycanském souvrství a kolektor C v jizerském souvrství. Kolektory jsou odděleny izolátorem A/C náležícím bělohorskému souvrství (Vlnas, 1998). Přírodní režim je ovlivňován pozicí struktury v sestupujícím křídle křídové pánve v blízkosti hlavní erozivní báze, kterou je řeka Labe. Největší význam zde mají



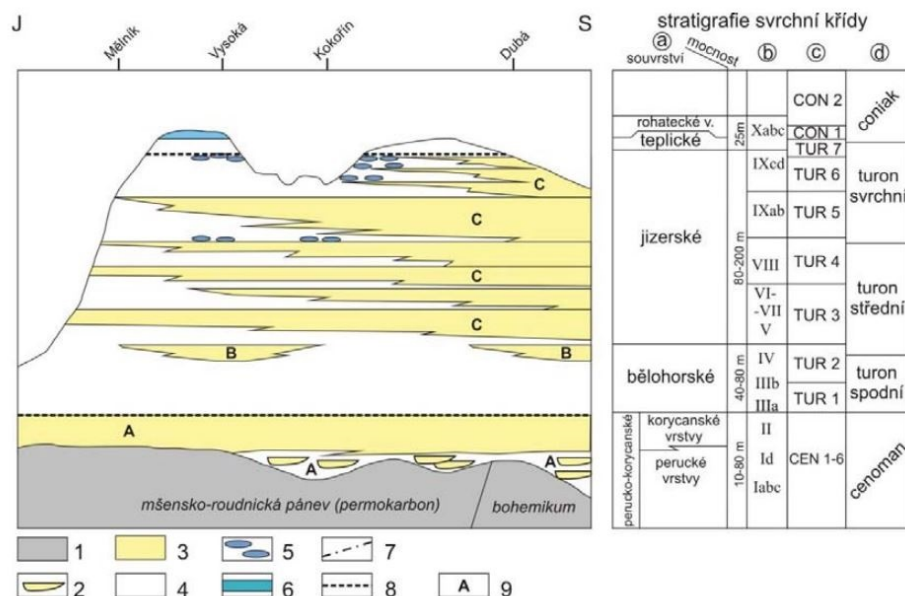
Obrázek 3.1: Geologická mapa hydrogeologického rajonu 4522 (Adamovič a kolektiv, 2016)

kolektory podzemní vody vázané na souvrství pískovců středního turonu a cenomanu, nepodstatná jsou zvodnění vázaná na ostatní vrstevní série. Prakticky nepropustná část souvrství spodní střední turon, v dolní části povodí spodní turon, odděluje svrchní vodní obzor ve středním turonu většinou s volnou hladinou, od hlubšího kolektoru v cenomanu, s hladinou napjatou. Infiltrační plocha prvního obzoru ve středním turonu je prakticky shodná, na rozdíl od vodního obzoru v cenomanu s jeho akumulací a oběhovou plochou (Šula, 1970).

Zájmová oblast patří k hydrogeologickému rajónu 4522 – křída Liběchovky a Pšovky. Podloží tvoří zejména sedimenty permokarbonu. Dochází ke střídání pískovců, jílovců, arkóz a drob. Vytváří se systém puklinových kolektorů a izolátorů se zpomaleným a stagnujícím režimem podzemních vod. Permokarbonské sedimenty jsou vodohospodářsky zcela nevýznamné (Adamovič a kolektiv, 2016).

Bazální kolektor A podzemní vody tvoří cenomanské pískovce s průlinovo-puklinovou propustností. Hladina kolektoru je napjatá. Kolektor nikde nevychází na povrch. Z hlediska jeho mocnosti a hloubky uložení se jedná o využitelné zásoby podzemní vody (Vlnas, 1998). Kolektor je překryt vápnitými jílovcy, prachovci a slínovci bělohorského souvrství (spodní turon) a spodní část jizerského souvrství, reprezentovanou prachovci a jemnozrnými pískovci s polohami jílovitých vápenců, které funguje jako regionální izolátor C/A (Adamovič a kolektiv, 2016).

Kolektor C podzemní vody je vyvinut téměř na celém území rajonu s výjimkou úzkého pruhu podél toku Labe, kde vychází jeho báze na povrch. Kolektor je vá-



1– horniny podloží křídý; 2 – pískovce ve výplni fluvialních koryt; 3 – pískovce; 4 – prachovce, jílovce, slínovce; 5 – polohy vápenců; 6 – silicifikované slínovce („inoceramové opuky“); 7 – významné tektonické zóny; 8 – glaukoniticko-fosfátový horizont na erozivní ploše; 9 – označení kolektoru podzemních vod; a – litostratigrafie (Čech et al. 1980); b – neformální stratigrafie (Č. Zahálka 1897, 1916, Klein 1963); c – genetická stratigrafie (Uličný et al. 2009a); d – chronostratigrafie

Obrázek 3.2: Stratigrafie umístění kolektorů (Adamovič a kolektiv, 2016)

zán na hrubozrnné, střednozrnné a jemnozrnné křemenné pískovce (Šula, 1970). Hladina podzemní vody v kolektoru C je volná s výjimkou míst, kde je kolektor C kryt izolátorem teplicko-březenského souvrství. Mocnost kolektoru C klesá s přibývajícím prachovitou složkou v pískovcích směrem k Z a v místech výchozů jeho báze v údolí Labe je 0 m. Redukce mocnosti kolektoru C má za následek velký nárůst průtoku v dolních částech toků Liběchovky. Zbývající proud podzemní vody odtékající po bázi kolektoru C se infiltruje do kvartérních teras Labe. Hydrogeologický význam této oblasti dokládají i mimořádně vydatné vývěry podzemních vod u Mělnické Vrutice a v údolí nedalekého Košáteckého potoka. Z hlediska kvantitativního a kvalitativního se dosud jedná o nevyužitelné zásoby podzemní vody (Adamovič a kolektiv, 2016).

3.1.1 Situace vrtů

Vrt HV-1 se nachází v severní části obce Želízy při pravém břehu toku Liběchovka. V katastrálním území Želízy na parcele číslo 320/2. Pozemek je ve vlastnictví vodárenské společnosti Středočeské vodárny, a.s. (Český úřad zeměměřický a katastrální, 2019). Geologický profil vrtu se nachází v příloze 1a.

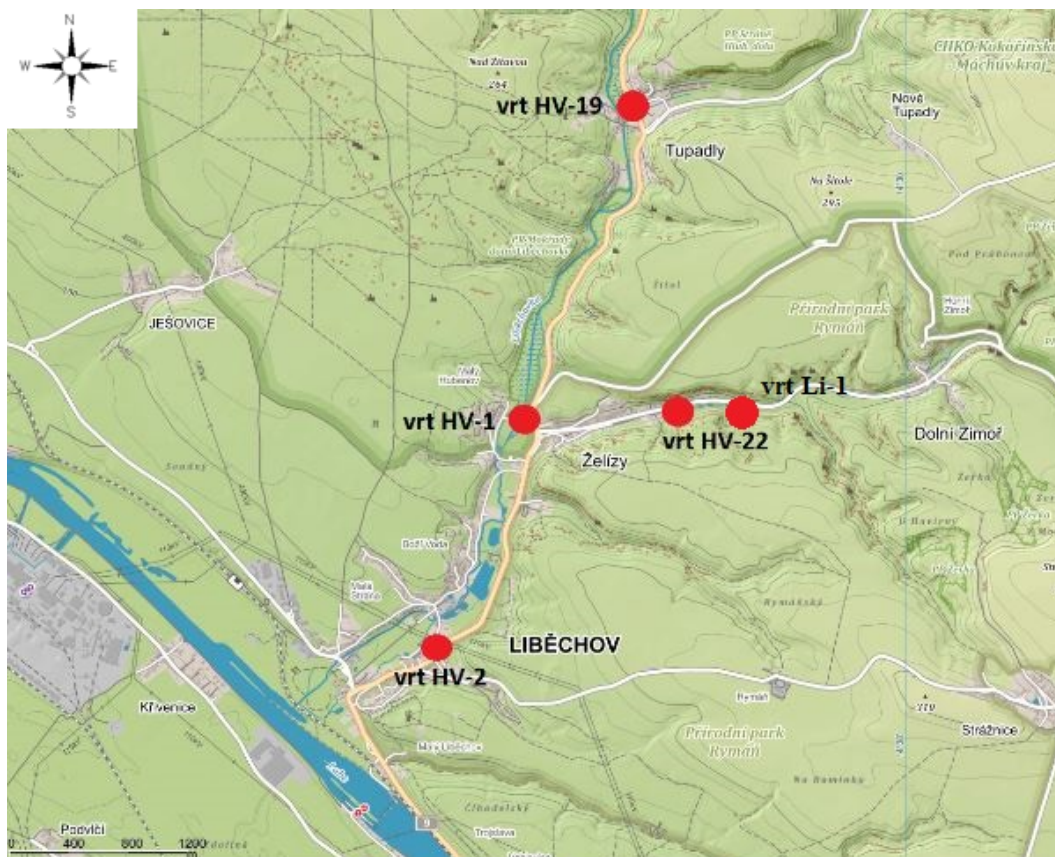
Vrt HV-2 se nachází v severní části obce Liběchov při ulici Rumburská, v katastrálním území Liběchov na parcele číslo 654/2. Pozemek je ve vlastnictví společnosti Středočeské vodárny, a.s. (Český úřad zeměměřický a katastrální, 2019). Geologický profil vrtu se nachází v příloze 1b.

Jelikož se mi nepodařilo dohledat technické údaje o vrtech HV-1 a HV-2, ani záznam původní čerpací zkoušky z doby vybudování vrtu, vycházela jsem při analýze pouze z dat monitoringu.

Vrt HV-19 se nachází ve středu obce Tupadly, při levém břehu toku Liběchovka. V katastrálním území Tupadly, na parcele číslo st. 195. Pozemek je ve vlastnictví obce Tupadly (Český úřad zeměměřický a katastrální, 2019). Vrt byl hlouben za účelem využití podzemní vody pro zásobování obyvatel pitnou vodou. Byl odvrtán technologií rotačně jádrového vrtání s řezným průměrem 475–630 mm. Hloubka vrtu je 50,0 m a zasahuje do kvartéru a turonu. Zárubnice je ve zvodnělém úseku (18,0–45,6 m) perforovaná. Mezikruží je v perforovaném úseku vysypáno kačírkiem. Horní část mezikruží je v plném úseku zacementováno (0,0–15,0 m) (Šula, 1969a). Geologický profil vrtu se nachází v příloze 1c. Jedná se o přetokový vrt s napjatou hladinou. Počáteční naražená hladina odpovídá přetoku 0,70 m nad terén.

Vrt HV-22 se nachází ve východní části obce Želízy, při pravém břehu toku Želízská svodnice. V katastrálním území Želízy, na parcele číslo st. 321. Pozemek je ve vlastnictví obce Želízy (Český úřad zeměměřický a katastrální, 2019). Vrt byl hlouben za účelem využití podzemní vody pro zásobování obyvatel pitnou vodou. Byl odvrtán technologií rotačně jádrového vrtání s řezným průměrem 475–630 mm. Hloubka vrtu je 50,0 m a zasahuje do kvartéru a turonu. Zárubnice je ve zvodnělém úseku (20,0–50,0 m) perforovaná. Mezikruží je v perforovaném úseku vysypáno kačírkiem. Horní část mezikruží je v plném úseku zacementováno (0,0–20,0 m) (Šula, 1969a). Geologický profil vrtu se nachází v příloze 1d. Počáteční naražená hladina dosahovala 4,2 m pod terénem, hladina se ustálila na 3,6 m pod terénem. Tento vrt lze opět považovat za vrt s napjatou hladinou podzemní vody.

Vrt Li-1 je pozorovací vrt umístěný cca 340 m východně od monitorovacího vrtu HV-22 proti proudu toku Želízská svodnice. V tomto vrtu dochází pouze k měření hladin podzemní vody, a to jednou za 24 hodin. Měření začalo na konci roku 2013 a pokračuje do současnosti. Vrt Li-1 jsem zahrnula do této práce, abych mohla v případě vrtu HV-22 prokazatelně říci, zda pokles hladiny podzemní vody má, či nemá vliv na zásoby podzemní vody.



Obrázek 3.3: Situační mapa vrtů (Mapy.cz, 2018)

3.2 Zpracování dat

V této části diplomové práce se věnuji vlastnímu zpracování dat, výpočtům a grafickým výstupům. Data z monitoringu vrtů HV-1, HV-2, HV-19 a HV-22 obsahovala měsíční údaje o hloubce umístění hladinového čidla ve vrtu, datu a času monitoringu, hladině nad hladinovým čidlem a objemu čerpaného množství. Vzhledem k nepřerušovanému čerpání lze považovat jednotlivé údaje z monitoringu za data z tzv. ustáleného proudění. Údaje jsou získávány pomocí hladinových čidel umístěných v každém vrtu pod hladinou podzemní vody. Ve vrtech HV-1 a HV-2 byla čidla umístěna 12 m pod terénem. Hladina podzemní vody jak ve vrtu HV-1, tak ve vrtu HV-2 se pohybovala v rozmezí 6–9 m nad čidlem, tj. 3–6 m pod terénem. Ve vrtech HV-19 a HV-22 byla čidla v hloubce 16 m pod terénem. Hladina podzemní vody ve vrtu HV-19 se pohybovala v rozmezí 7–10 m nad čidlem, tj. 6–9 m pod terénem. Hladina podzemní vody ve vrtu HV-22 byla po celou dobu měření v rozsahu 9–9,5 m nad čidlem, tj. 6,5–7 m pod terénem. Monitoring se provádí od roku 2013 (vrt HV-1), 2014 (vrt HV-19 a HV-22) a 2015 (vrt HV-2) do současnosti s frekvencí jednoho měsíce.

Pro posouzení, zda dochází ke změnám zásob podzemní vody, jsem využila pozorovacího vrtu Li-1, který se nachází v blízkosti vrtu HV-22. Vrt Li-1 slouží pouze jako pozorovací vrt, který není čerpaný. K dispozici jsem měla údaje o hladině podzemní vody a datu záznamu s měsíční frekvencí.

Zaznamenávaná data obsahují údaje o hloubce umístění hladinového čidla ve vrtu, datu a času monitoringu, hladině nad čidlem (h , [m]) a objemu čerpaného množství (Q , [l/s]). Jelikož se hladina podzemní vody v tomto případě určuje od hloubky umístění čidla a ne tradičně od odměrného bodu (tj. zhlaví vrtu), je nutné výšku hladiny pro další početní úkony přepočítat na výšku od odměrného bodu (h_o , [m.n.m]), pro přehlednost uvádím absolutní výšku v metrech nad mořem. Od celkové hloubky vrtu (H , [m]) jsem odečetla hloubku umístění čidla (12 m, resp. 16 m) a přičetla udávanou hladinu podzemní vody nad čidlem (h , [m]). Z rozdílů celkové hloubky vrtu (H) a hladin nad čidlem (h) jsem získala snížení ($s=H-h$, [m]). Následně jsem spočetla specifickou vydatnost ($q=Q/s$, [l/s/m]). Z takto předpřipravených hodnot jsem si vytvořila v MS Excelu tabulky s ročními průměry pro hodnoty hladiny (h_o), čerpaný objem (Q), specifickou vydatnost (q) a snížení (s).

Tabulka 3.1: Průměrné roční hodnoty vrtu HV-1

| rok | Q (l/s) | s (m) | h _o (m.n.m) | q (l/s/m) |
|------|---------|-------|------------------------|-----------|
| 2013 | 11,20 | 3,53 | 172,36 | 3,17 |
| 2014 | 11,06 | 3,91 | 171,96 | 2,86 |
| 2015 | 10,53 | 4,02 | 171,88 | 2,62 |
| 2016 | 10,01 | 5,06 | 170,77 | 2,05 |
| 2017 | 9,86 | 4,96 | 170,07 | 2,04 |
| 2018 | 10,04 | 6,31 | 169,58 | 1,63 |

Tabulka 3.2: Průměrné roční hodnoty vrtu HV-2

| rok | Q (l/s) | s (m) | h _o (m.n.m) | q (l/s/m) |
|------|---------|-------|------------------------|-----------|
| 2015 | 10,53 | 4,02 | 165,48 | 2,62 |
| 2016 | 10,01 | 5,06 | 165,39 | 2,05 |
| 2017 | 9,86 | 4,96 | 165,36 | 2,04 |
| 2018 | 10,04 | 6,31 | 165,25 | 1,63 |

Tabulka 3.3: Průměrné roční hodnoty vrtu HV-19

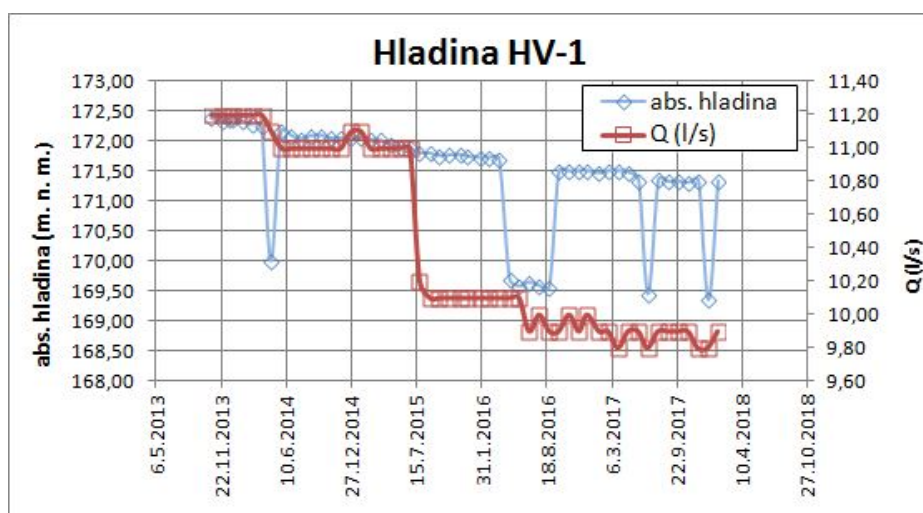
| rok | Q (l/s) | s (m) | h _o (m.n.m) | q (l/s/m) |
|------|---------|-------|------------------------|-----------|
| 2014 | 24,45 | 6,17 | 181,39 | 3,96 |
| 2015 | 25,35 | 6,39 | 180,90 | 3,81 |
| 2016 | 26,14 | 7,35 | 180,22 | 3,56 |
| 2017 | 25,91 | 7,78 | 179,77 | 3,32 |
| 2018 | 25,40 | 8,12 | 179,44 | 3,12 |

Tabulka 3.4: Průměrné roční hodnoty vrtu HV-22

| rok | Q (l/s) | s (m) | ho (m.n.m) | q (l/s/m) |
|------|---------|-------|------------|-----------|
| 2014 | 14,53 | 6,54 | 177,63 | 2,22 |
| 2015 | 14,49 | 6,59 | 177,59 | 2,19 |
| 2016 | 14,73 | 6,58 | 177,60 | 2,23 |
| 2017 | 14,36 | 6,57 | 177,61 | 2,18 |
| 2018 | 18,32 | 6,57 | 177,60 | 2,78 |

Z tabulek je patrné, že u všech vrtů dochází k postupnému poklesu hodnot specifické vydatnosti. Určitou výjimkou je vrt HV-22, ve kterém je od března 2018 nainstalováno silnější čerpadlo. Tím pádem došlo ke zvýšení odběru ze 14,36 l/s na maximální hodnotu 19,63 l/s. Pro první dva měsíce roku 2018 činila skutečná hodnota specifické vydatnosti 2,18 l/s/m, zatímco po instalaci čerpadla se zvýšila až na hodnotu 2,95 l/s/m. Prudké zvýšení čerpaného množství o cca 30 procent mělo za následek zvýšení vtokové rychlosti podzemní vody do vrtu, čímž došlo pravděpodobně k částečnému vyplavení usazenin z kolmatační zóny a poklesu hydraulických odporů.

Níže uvedené grafy prezentují vývoj hladiny podzemní vody (ho) a měsíčního čerpaného množství (Q) po celou dobu monitoringu.

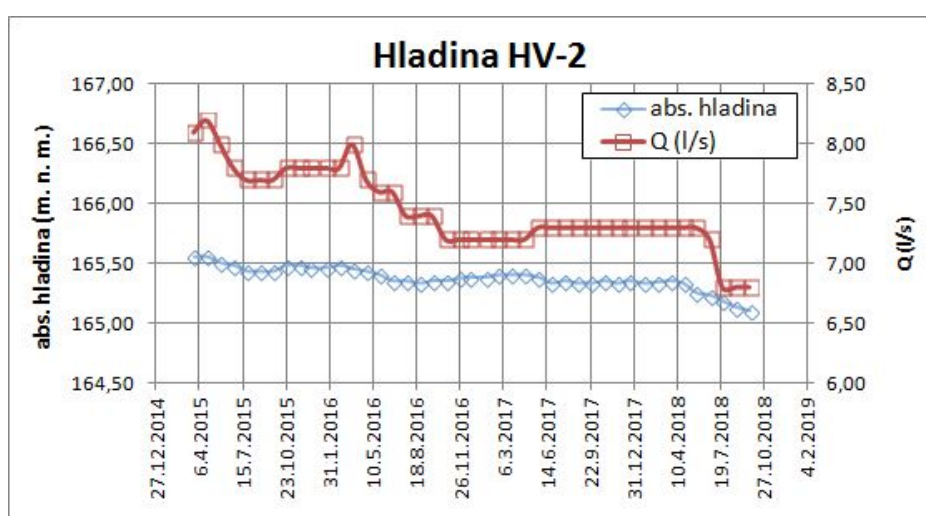


Obrázek 3.4: Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-1

Na obrázku „3.4“ je zobrazen časový vývoj hladiny podzemní vody a čerpaného množství pro vrt HV-1 od konce roku 2013 do roku 2018. Od začátku monitoringu dochází sporadicky k výrazným poklesům hladiny podzemní vody nezávisle na objemu čerpaného množství. K těmto výkyvům mohlo dojít buď chybou měření, nebo zvýšením čerpání podzemní vody v blízkém okolí. Z výsledků měření výšky hladiny v čase je až na výjimky patrný stálý pokles, který je pravděpodobně způsoben kolmatací vrtu. Ve sledovaném období 2013 – 5/2015 a 7/2015 a 2018 docházelo pouze k mírnému průběžnému poklesu čerpaného množství. V červnu 2015 došlo pravděpodobně k účelovému snížení čerpaného množství

o 1 litr z původních 11,2 l/s na 10,2 l/s, které však nemělo výrazný vliv na výšku hladiny podzemní vody. Čerpané množství se již po tomto skoku nevrátilo na předchozí hodnoty.

Obrázek „3.5“ ukazuje vývoj hladiny podzemní vody a čerpaného množství pro vrt HV-2 od roku 2015 do roku 2018. Ve vrtu se snižuje výška hladiny velmi pomalu. Za dobu průběhu monitoringu klesla o 0,5 m. Čerpané množství od začátku monitoringu do května 2017 kolísalo mezi hodnotami 8,2 l/s a 7,25 l/s. V období mezi červnem 2017 a květnem 2018 se čerpané množství ustálilo na hodnotě 7,35 l/s. V červenci roku 2018 došlo k mírnému poklesu čerpaného množství, které se následně ustálilo na hodnotě 6,7 l/s. Hladina podzemní vody na výkyv čerpaného množství o objemu 1 l/s reagovala nevýrazně, za to reagovala podstatněji na výkyv o cca 0,5 l/s na konci monitoringu.

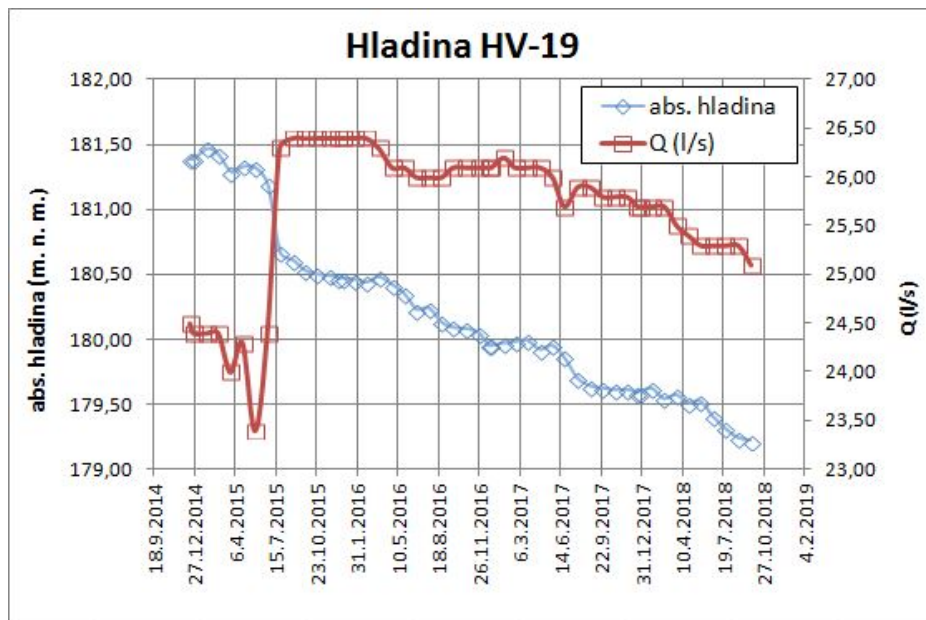


Obrázek 3.5: Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-2

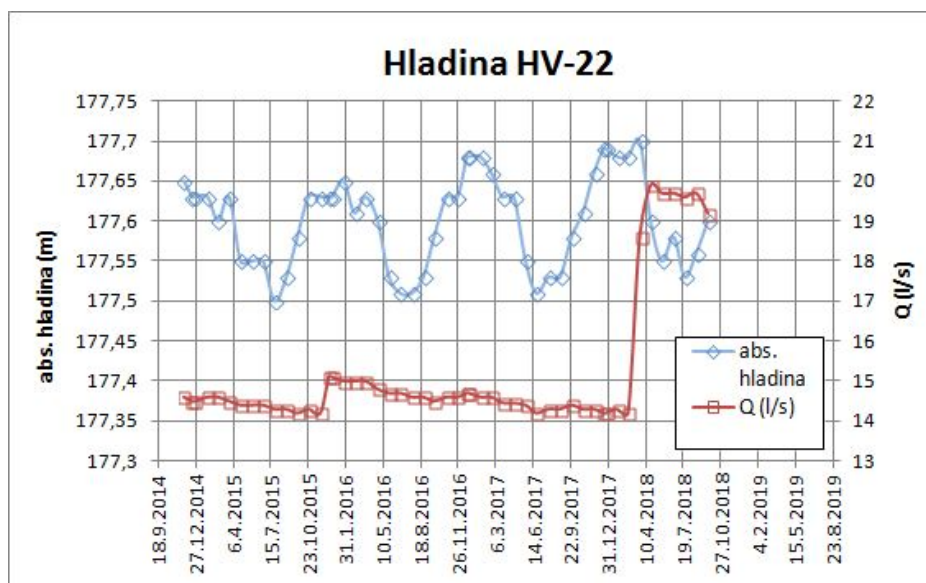
Obrázek „3.6“ zobrazuje vývoj hladiny podzemní vody a čerpaný objem za roky 2014–2018. V rozmezí konce roku 2014 a 2015 jsou patrné poněkud rozkolísané odběry. Od druhé poloviny roku 2015 došlo nejspíše k účelovému nárůstu čerpaného množství z 23,4 l/s na 26,4 l/s. Tento objem se čerpal až do března roku 2016, kdy začalo postupné snižování čerpaného množství až na hodnotu 25,1 l/s v roce 2018. Během čerpání docházelo k menším výkyvům čerpaného množství. Hladina vykazuje soustavný poklesový trend s reakcí na zvýšení čerpání v červenci 2015. Během monitorovacího období hladina poklesla o cca 2,5 m.

Obrázek „3.7“ zobrazuje vývoj hladiny podzemní vody a čerpaný objem za roky 2014–2018. Hodnoty čerpaného množství vykazují přibližně stále stejný stav mezi 14–15 l/s od začátku monitoringu do března 2018. V dubnu nastalo nejspíše účelové zvýšení čerpání až na hodnotu 19,7 l/s. Při pohledu na hodnoty výšky hladiny podzemní vody a jejich proměnlivost je patrný sinusoidní charakter, kdy se hodnoty absolutní výšky opakovaně pohybují v rozmezí 177,5–177,7 m.n.m. Předpokládám, že podzemní voda ve vrtu reaguje na měnící se stavy blízkého povrchového toku Želízská svodnice v průběhu hydrologického roku. Jelikož je hladina podzemní vody napjatá, neměla by být v kontaktu s povrchovým tokem. Výška hladiny vykazuje do konce roku 2017 pozvolný růstový charakter se za-

nedbatelnou reakcí na skokové zvýšení čerpání. To, že výška hladiny nereaguje výrazným poklesem na skokový nárůst čerpání, může znamenat, že je podzemní voda ve vrtu dotována z povrchového zdroje. Předpoklad provázání podzemní vody ve vrtu s povrchovým tokem dále rozvíjím v kapitole 3.5.



Obrázek 3.6: Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-19



Obrázek 3.7: Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-22

3.3 Vyhodnocení čerpacích zkoušek

Pro správnou interpretaci výsledků čerpacích zkoušek je nutné si uvědomit, jaké okolnosti mohou vrt a jeho vydatnost ovlivňovat. Jedná se zejména o vliv výraznějších srážkových výkyvů a s tím související přirozený cyklus hydrologického roku, zvětšování hydraulických odporů na vnějším plášti vrtu a jeho blízkém okolí vlivem působení kolmatačních procesů, nebo o netěsnosti vrtu a jeho ovlivňování blízkým tokem.

Při uvedení vodárenských vrtů do provozu se vycházelo z křivek vydatnosti z roku 1969 a dle toho byl vodárnou určen objem čerpaného množství a snížení hladiny podzemní vody. Současné čerpání podzemní vody je kontinuální, neboť kolísání odběrů v síti je upravováno vodojemy. Z výsledků měření je patrné, že i když je tendence držet stále stejné hodnoty čerpaného množství, přesto dochází ke snižování hladiny podzemní vody.

Pro vyhodnocení čerpací zkoušky je důležitá křivka vydatnosti, která vyjadřuje závislost přítoku podzemní vody do vrtu na snížení hladiny při podmínkách ustáleného proudění. Křivka vydatnosti se používá pro stanovení využitelné kapacity hydrogeologického vrtu. K sestrojení této křivky potřebuji znát nasycenou hydraulickou vodivost (k , [m/s]), poloměr vrtu (r , [m]), čerpané množství (Q , [l/s]), mocnost zvodně (m , [m]), výšku vodního sloupce od báze perforace (mp , [m]) a snížení hladiny podzemní vody (s , [m]). Křivky vydatnosti zpracovávám pouze pro vrty HV-19 a HV-22, ke kterým mám k dispozici údaje z čerpacích zkoušek z roku 1969, které jsem převzala ze zprávy S. Šuly (Šula, 1969b).

Pro zpracování křivky vydatnosti jsem vypočítala nasycenou hydraulickou vodivost na plášti vrtu a jeho blízkém okolí, a to z průměrných ročních hodnot čerpaného množství a snížení hladiny podzemní vody pro roky 2014 a 2018. Jedná se o první a poslední ukončený rok monitoringu a vybrala jsem tyto roky proto, abych mohla v rámci let 2014–2018 porovnat, zda v tomto období dochází ke změnám hydraulických odporů, či nikoli. Pro srovnání vývoje nasycené hydraulické vodivosti v delším časovém období jsem použila i hodnotu nasycené hydraulické vodivosti z doby konstrukce vrtu v roce 1969, kterou jsem též převzala ze zprávy S. Šuly. K výpočtu nasycené hydraulické vodivosti používám specializovaný program EXPERT (Pastuszek, 2011).

Parametry nejen pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti, ale i sestrojení křivek vydatnosti pro vrty HV-19 a HV-22 jsou vyneseny v tabulkách „3.5“ a „3.6“.

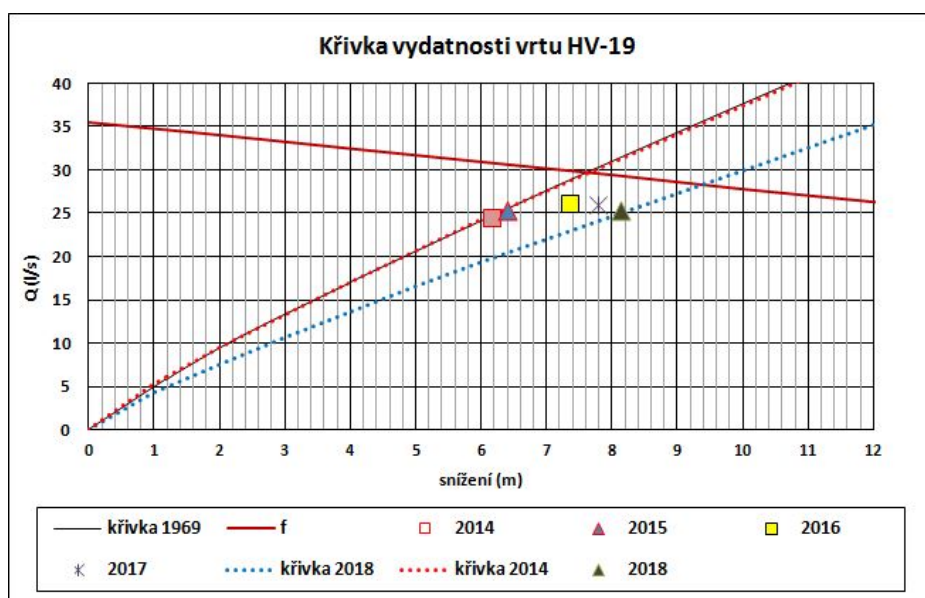
Tabulka 3.5: Parametry vrtu HV-19

| rok | Q (l/s) | s (m) | m (m) | mp (m) | r (m) | k (m/s) |
|------|---------|-------|-------|--------|-------|------------------|
| 1969 | 26,92 | 6,80 | 28,0 | 44,00 | 0,15 | $1,68 * 10^{-4}$ |
| 2014 | 24,45 | 6,17 | 28,0 | 44,63 | 0,15 | $1,68 * 10^{-4}$ |
| 2018 | 25,40 | 8,12 | 28,0 | 42,67 | 0,15 | $1,32 * 10^{-4}$ |

Tabulka 3.6: Parametry vrtu HV-22

| rok | Q (l/s) | s (m) | m (m) | mp (m) | r (m) | k (m/s) |
|------|---------|-------|-------|--------|-------|----------------------|
| 1969 | 27,87 | 3,0 | 30,0 | 47,80 | 0,15 | $2,15 \cdot 10^{-4}$ |
| 1969 | 27,87 | 5,0 | 30,0 | 45,80 | 0,15 | $2,15 \cdot 10^{-4}$ |
| 2014 | 14,53 | 6,54 | 30,0 | 44,25 | 0,15 | $8,34 \cdot 10^{-5}$ |
| 2018 | 18,32 | 6,57 | 30,0 | 44,22 | 0,15 | $1,10 \cdot 10^{-4}$ |

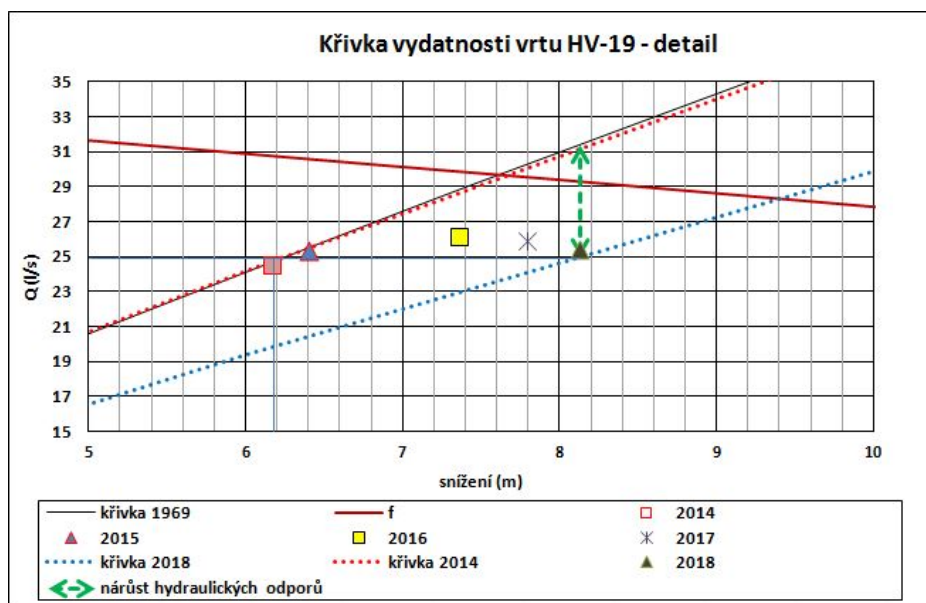
Na obrázku „3.8“ jsou zobrazeny tři křivky vydatnosti vrtu HV-19 z let 1969, 2014 a 2018. Vypočtená křivka vydatnosti pro rok 2014 je prakticky identická s křivkou vydatnosti pro rok 1969. V období let 1969-2014 pravděpodobně nedošlo ke změnám hydraulických odporů ve vrtu a jeho nejbližším okolí. Je otázkou, zda byl tento vrt vůbec využíván. Pro období 1969-2013 nemám k dispozici žádná data. Snížení nasycené hydraulické vodivosti nastalo až v rozmezí let 2014–2018 o 21 procent, a to z původní hodnoty $1,68 \cdot 10^{-4}$ m/s na hodnotu $1,32 \cdot 10^{-4}$ m/s.



Obrázek 3.8: Křivka vydatnosti vrtu HV-19

Pro přehlednost jsem do grafu „3.8“ doplnila za roky 2015–2018 ještě hodnoty průměrných ročních hodnot čerpaného množství (Q) na snížení hladiny podzemní vody (s). Graf jasně ukazuje, že v monitorovacím období od roku 2014 dochází k narůstání hydraulických odporů, tzv. kolmataci, a tím klesá vydatnost vrtu. Hodnota nasycené hydraulické vodivosti neovlivněného kolektoru se v čase nemění - viz základní předpoklad PA (kapitola 1.1).

Obrázek „3.9“ ukazuje výřez detailu obrázku „3.8“ křivky vydatnosti vrtu HV-19. V tomto detailu je lépe patrný nárůst hydraulických odporů (viz. tabulka „3.7“). Hydraulické odpory, definované také jako ztráta tlakové výšky, vzrostly z původní nulové hodnoty z roku 2014 (leží na křivce z roku 1969) o 1,95 m do roku 2018. Tzn. pokud by tento vrt nekolmatoval, pak by se mohlo v roce 2018 čerpat 31,5 l/s při snížení hladiny podzemní vody o 8,13 m.

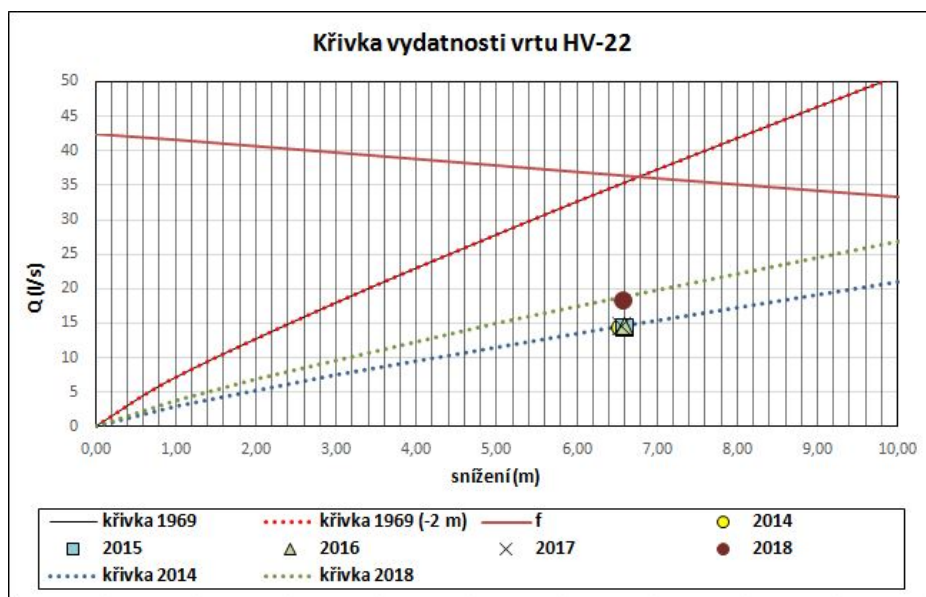


Obrázek 3.9: Detail křivky vydatnosti vrtu HV-19

Tabulka 3.7: Hodnoty hydraulických odporů (HO) ve vrtu HV-19

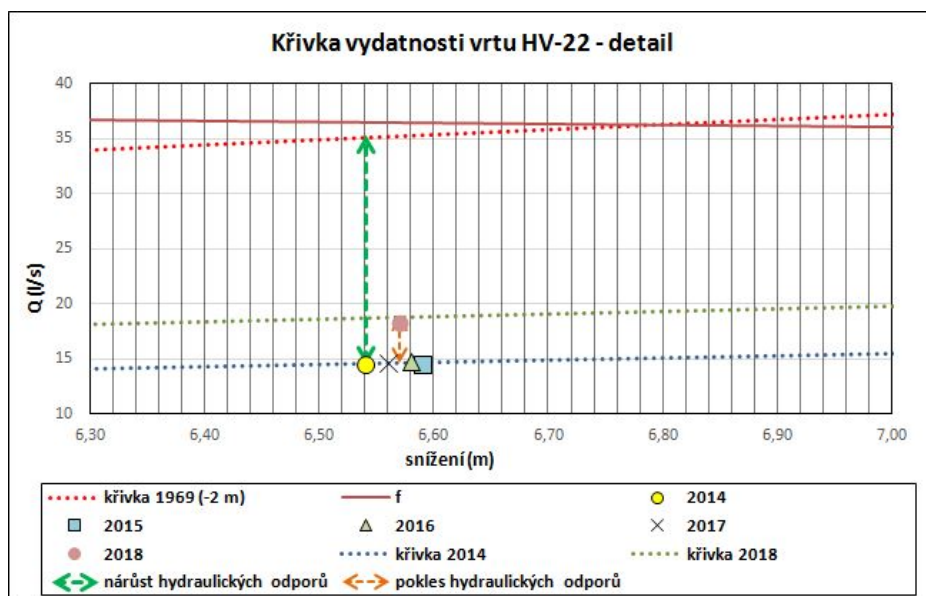
| rok | Velikost HO (m) |
|------|-----------------|
| 2014 | 0,00 |
| 2015 | 0,22 |
| 2016 | 1,17 |
| 2017 | 1,62 |
| 2018 | 1,95 |

Obrázek „3.10“ zobrazuje čtyři křivky vydatnosti vrtu HV-22 z let 1969 (2x), 2014 a 2018. První křivka z roku 1969 vychází z dat čerpací zkoušky provedené po vybudování vrtu a druhá křivka vychází ze stejných dat, ale uvažovala jsem neovlivněnou úroveň hladiny podzemní vody o 2 metry nižší. Pokusila jsem se tím simulovat situaci vyvolanou poklesem přírodních zdrojů podzemní vody, které se projeví snížením piezometrického napětí napjaté zvodně. Obě křivky se překrývají. Z toho je patrné, že pokles hladiny podzemní vody o 2 metry nemá na průběh křivky vydatnosti vliv. Křivka z roku 2018 se od křivky z roku 1969 i 2014 značně liší. Nasycená hydraulická vodivost klesla mezi lety 1969 a 2014 o 62 procent z původní hodnoty $2,15 \cdot 10^{-4}$ m/s na $8,34 \cdot 10^{-5}$ m/s. Pro přehlednost jsem do grafu doplnila za roky 2014–2017 místo jednotlivých křivek vydatnosti průměrnou roční hodnotu závislosti čerpaného množství (Q) na snížení hladiny podzemní vody (s).



Obrázek 3.10: Křivka vydatnosti vrtu HV-22

Na obrázku „3.11“ je zobrazen detail těchto ročních průměrných hodnot. Nasycená hydraulická vodivost se mezi roky 2014–2017 výrazně nezměnila (viz. tabulka „3.8“). Hodnoty za zmíněné období leží na křivce z roku 2014. Až v roce 2018 vzrostla průměrná roční hodnota čerpaného množství o cca 30 procent - viz vysvětlení na str. 16 u tabulky „3.4“. V tomto roce došlo ke zvýšení nasycené hydraulické vodivosti a poklesu hydraulických odporů.

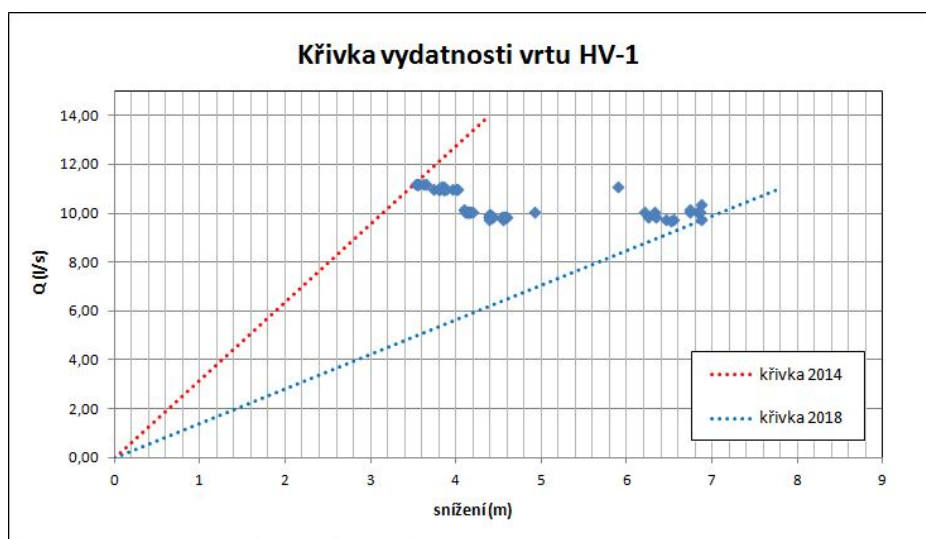


Obrázek 3.11: Detail křivky vydatnosti vrtu HV-22

Tabulka 3.8: Hodnoty hydraulických odporů (HO) ve vrtu HV-22

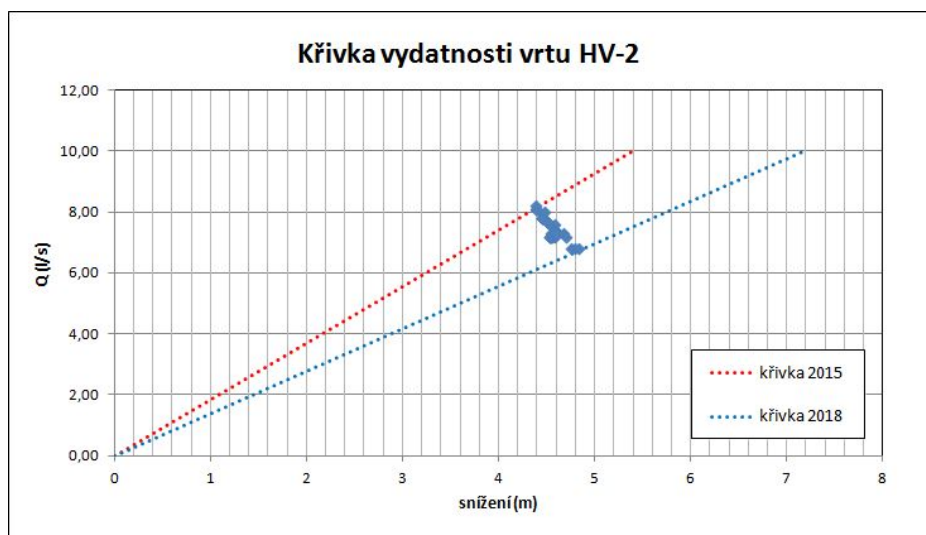
| rok | Velikost HO (m) |
|------------|-----------------|
| 2014 | 4,16 |
| 2015 | 4,18 |
| 2016 | 4,20 |
| 2017 | 4,21 |
| 1.-2. 2018 | 4,21 |
| 3.-9. 2018 | 3,56 |
| prům. 2018 | 3,36 |

Na obrázku „3.12“ jsou zobrazeny dvě křivky vydatnosti vrtu HV-1 z let 2014 a 2018. Jelikož k tomuto vrtu nejsou k dispozici údaje z čerpací zkoušky z doby konstrukce vrtu, křivky vydatnosti sestavují pouze na základě dat získaných z monitoringu. To, že se od sebe křivky vydatnosti navzájem liší ukazuje, že dochází k nárůstu hydraulických odporů na stěně vrtu a jeho blízkém okolí. Na obrázku je patrná tendence čerpat stále stejné množství vody v rozmezí 10-11 l/s, přičemž se razantně zvětšuje snížení hladiny podzemní vody. V časovém úseku let 2014-2018 došlo k výraznému poklesu hladiny podzemní vody na dvojnásobek původní hodnoty z roku 2014, což opět dokazuje nárůst hydraulických odporů na plášti a v blízkém okolí vrtu.



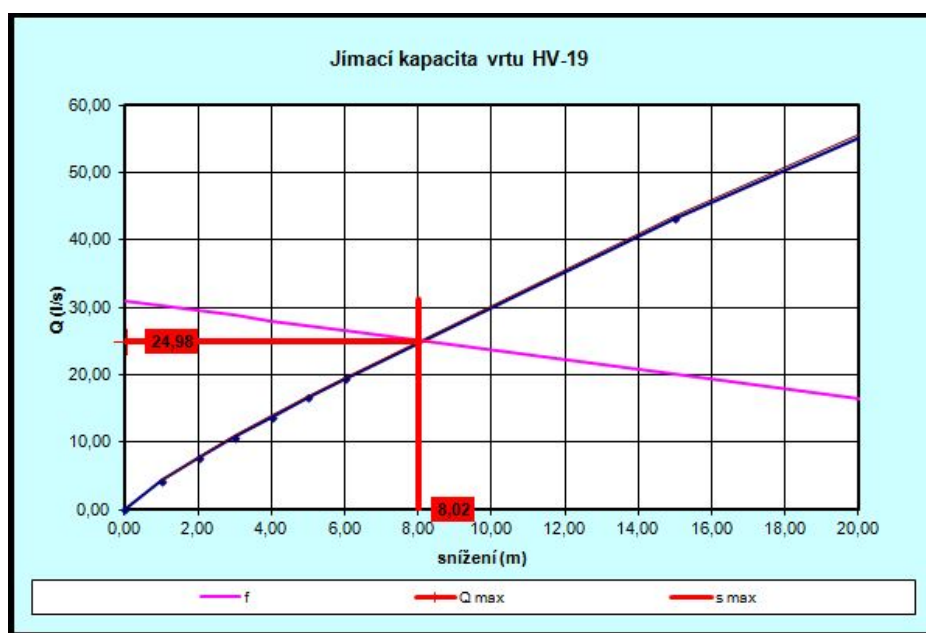
Obrázek 3.12: Křivka vydatnosti vrtu HV-1

Na obrázku „3.13“ jsou zobrazeny dvě křivky vydatnosti vrtu HV-2 z let 2015 a 2018. Jelikož k tomuto vrtu nejsou k dispozici údaje z čerpací zkoušky z doby konstrukce vrtu, křivky vydatnosti sestavují pouze na základě dat získaných z monitoringu. Z obrázku křivek vydatnosti je vidět strmý pokles čerpaného množství podzemní vody mezi roky 2015-2018. Množství odebírané podzemní vody pokleslo v daném období o 16 procent. Zároveň došlo pouze k mírnému poklesu hladiny podzemní vody, a to o 0,5 m.



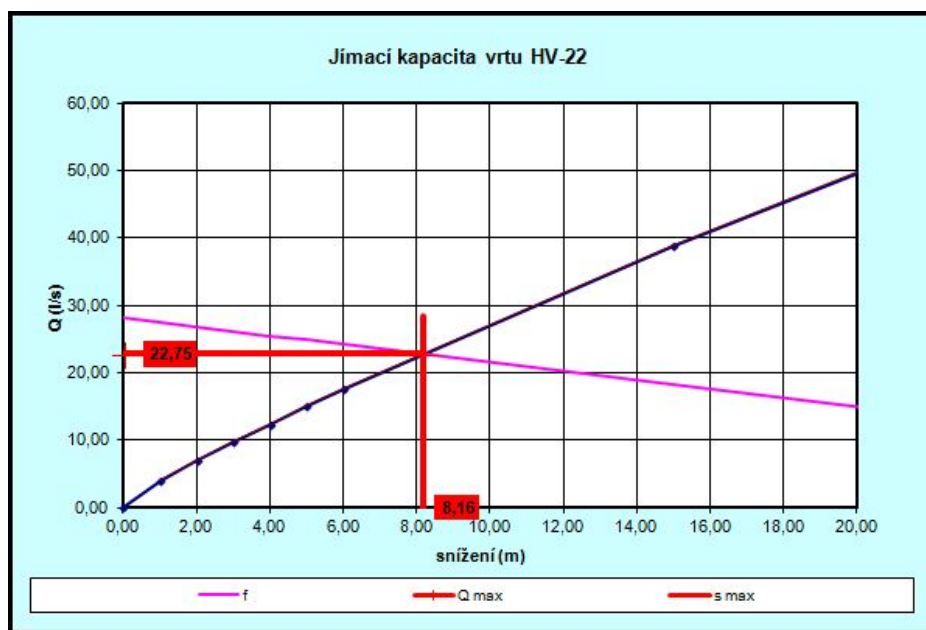
Obrázek 3.13: Křivka vydatnosti vrtu HV-2

Obrázek „3.14“ reprezentuje jímací kapacitu vrtu HV-19 s maximální hodnotou čerpaného množství a snížení hladiny podzemní vody, kterého můžeme ve vrtu v současnosti dosáhnout. Maximální jímací kapacita se stanovuje průsečíkem křivky vydatnosti s funkcí jímací schopnosti studny (f). Při větším čerpání či výraznějším snížení, než je zobrazeno na obrázku, se riskuje pískování vrtu. Maximální čerpané množství, které můžeme momentálně z vrtu odebírat, je 24,98 l/s při maximálním snížení hladiny podzemní vody na 8,02 m. V současné době se odebírá 25,40 l/s při snížení 8,12 m. Lze říci, že vrt je využíván lehce nad svou jímací kapacitu a vodárna by měla v nejbližší době zajistit výraznější pokles čerpaného množství, alespoň na výše zmíněnou hodnotu.



Obrázek 3.14: Jímací kapacita vrtu HV-19

Obrázek „3.15“ zobrazuje jímací kapacitu vrtu HV-22 s maximální hodnotou čerpaného množství a maximálním snížením hladiny podzemní vody. Tento obrázek jímací kapacity vychází z naměřených hodnot monitoringu, ale nebere v úvahu velký rozdíl nasycené hydraulické vodivosti mezi roky 1969 a 2014. Může se tedy jevit, že maximální čerpané množství, které lze z vrtu odebírat, je 22,75 l/s při maximálním snížení hladiny podzemní vody 8,16 m. V současné době se odebírá 18,32 l/s při snížení 6,57 m. To by znamenalo, že je ve vrtu ještě rezerva 4,52 l/s. Avšak s přihlédnutím k obrázku „3.10“, který jasně ukazuje, jak se od sebe křivky vydatnosti z roku 1969 a 2014 liší, bych spíše řekla, že vrt už je využíván nad svou jímací kapacitu ovlivněnou kolmatací.



Obrázek 3.15: Jímací kapacita vrtu HV-22

3.4 Vyhodnocení normované specifické kapacity

Normovaná specifická kapacita (dále jen "NSC") vyjadřuje závislost specifické vydatnosti pro dané datum čerpání (q , [l/s/m]) na počáteční specifické vydatnosti (q_0 , [l/s/m]):

$$NSC = \frac{q}{q_0} \quad (3.1)$$

Specifická vydatnost (q) je definována jako podíl velikosti čerpaného množství (Q) k hodnotě snížení hladiny podzemní vody (s). Výsledné hodnoty vyjadřují v procentech pro lepší názornost grafu.

K vyhodnocení NSC využívám analýzu produkční schopnosti vrtu, která slouží k predikci budoucího vývoje vrtu. K tomu používám jednu z Arpsových poklesových křivek (tzv. harmonickou), jež v roce 1945 definoval J. J. Arps (Arps, 1945). Doposud se Arpsovy křivky uplatňovaly pouze při těžbě ropy a zemního plynu, kde bylo nutné vědět, jaká je produkční schopnost daného ložiska a v jakém časovém horizontu bude ložisko vytěženo. Míra produkce ropy a plynu je funkcí

času. Příčinou poklesu produkce je obvykle ztráta tlaku v rezervoáru, kolmatace nebo změna relativních objemů těžebných surovin. Arpsova křivka vychází z dat NSC naměřených během těžebního období a uvažuje stejný poklesový trend i pro budoucí vývoj (Houzé a kolektiv, 2008).

J. J.Arps definoval tři typy poklesových křivek, a to exponenciální, harmonickou a hyperbolickou. V základní podobě je poklesová křivka vyjádřena jako (Houzé a kolektiv, 2008):

$$q_t = \frac{q_i}{(1 + b * D_i * t)^{1/b}} \quad (3.2)$$

kde:

- q_t vyjadřuje specifickou vydatnost v čase,
- q_i jednotlivé hodnoty specifické vydatnosti,
- D_i je poklesový faktor,
- t vyjadřuje čas,
- b je parametr pohybující se mezi 0 a 1, definuje o jaký typ křivky jde.

Exponenciální křivka s parametrem b velmi blízkým 0.

$$q_t = q_i * e^{-D_i * t} \quad (3.3)$$

Hyperbolická křivka je definovaná parametrem $b \in [0,1]$.

Harmonická křivka je definovaná parametrem b rovným 1.

$$q_t = \frac{q_i}{(1 + D_i * t)} \quad (3.4)$$

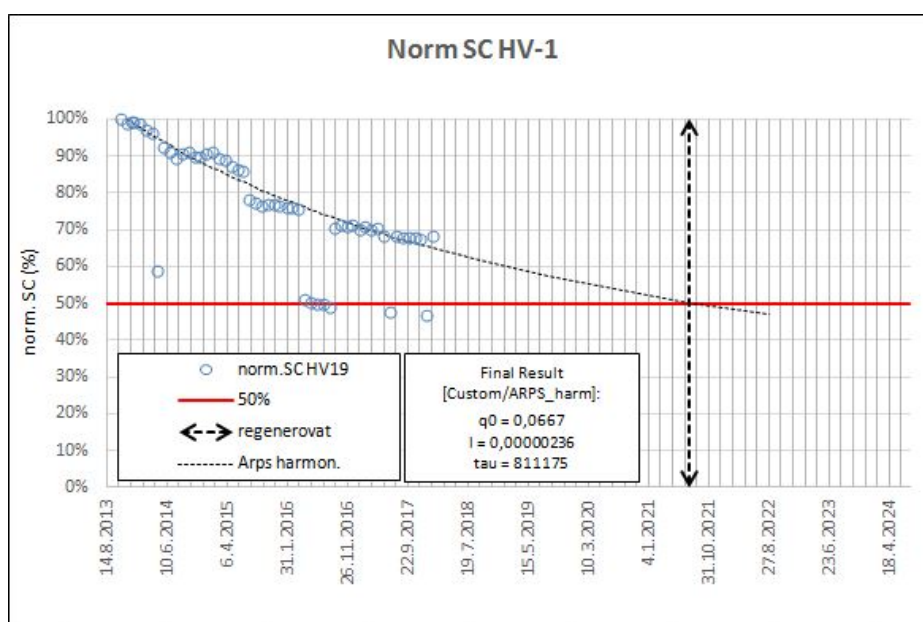
Harmonická křivka se využívá u ložisek s neomezenými, stále doplňovanými zdroji (tj. zdroje podzemní vody). Proto tento typ křivky využívám také ve svých výpočtech prognózy vývoje vodárenských vrtů. K výpočtu parametrů pro sestavení Arpsovy harmonické křivky (dále jen "AHK") používám aplikaci Curve Finder v programu EXPERT. Program pracuje na principu nelineární regrese s využitím Levenberg-Marquardtovy procedury a stanovuje takové parametry q_i , D_i a t (vyjadřující poklesový a časový faktor), z nichž vypočtená aproximační křivka vykazuje nejvyšší hodnotu koeficientu korelace, Durbin-Watsonova koeficientu a nejmenší hodnotu střední kvadratické chyby (Pastuszek, 2018).

Upravenou harmonickou aproximační křivku jsem sestrojila na základě hodnot vypočtených z rovnice 3.3.

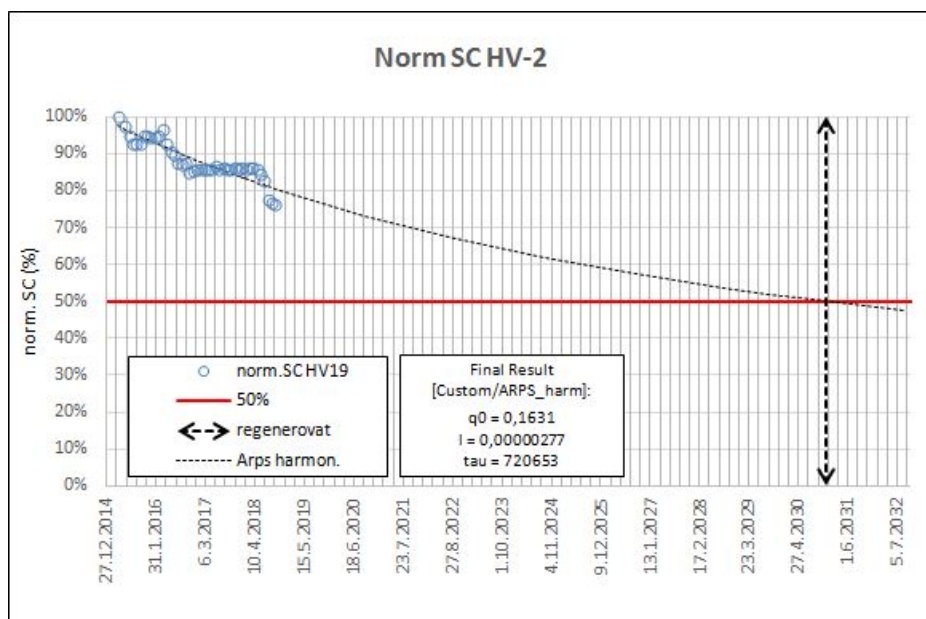
Tabulka 3.9: Parametry Arpsovy harmonické křivky

| Vrt | q_0 | l | τ |
|-------|--------|------------------|--------|
| HV-1 | 0,0667 | $2,36 * 10^{-6}$ | 811175 |
| HV-2 | 0,163 | $2,77 * 10^{-6}$ | 720653 |
| HV-19 | 0,1344 | $2,95 * 10^{-5}$ | 71280 |
| HV-22 | 0,856 | $4,25 * 10^{-6}$ | 76335 |

Obrázek „3.16“ vyjadřuje grafické znázornění normované specifické kapacity vrtu HV-1 a zároveň predikci nejzazšího termínu pro provedení regenerace vrtu. Vývoj hodnot NSC vykazuje výrazný poklesový trend, kdy došlo k poklesu mezi roky 2013 a 2018 o 35 procent a současně reaguje na výkyvy hladiny podzemní vody. Takto výrazný poklesový trend indikuje rychle narůstající hydraulické odpory na plášti vrtu a jeho blízkém okolí, tj. dochází ke kolmataci. V době, kdy Arpsova křivka poklesne na 50procentní hranici kapacity vrtu, je daný vrt na pokraji kolapsu. Arpsova křivka protíná 50procentní hranici kapacity vrtu HV-2 přibližně v červenci roku 2021, což také vyjadřuje nejzazší termín, do kdy je potřeba provést regeneraci vrtu.



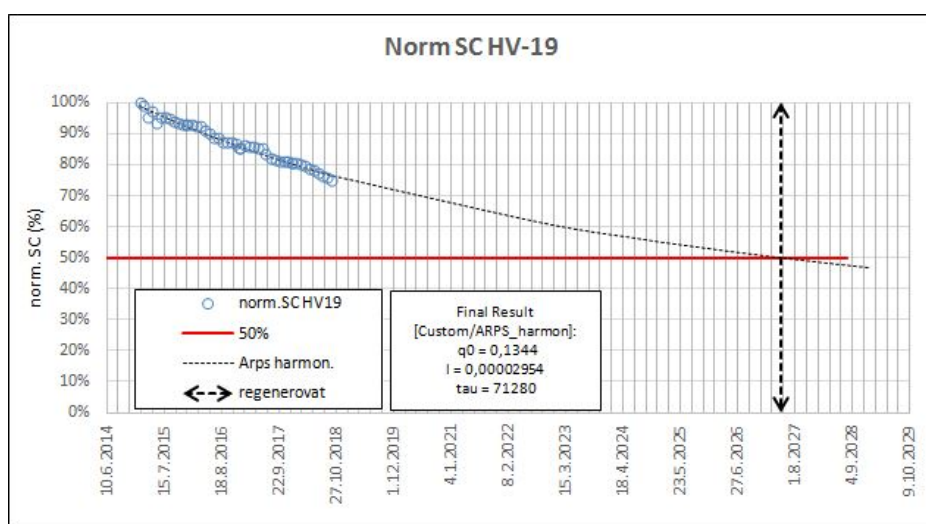
Obrázek 3.16: Normovaná specifická kapacita vrtu HV-1



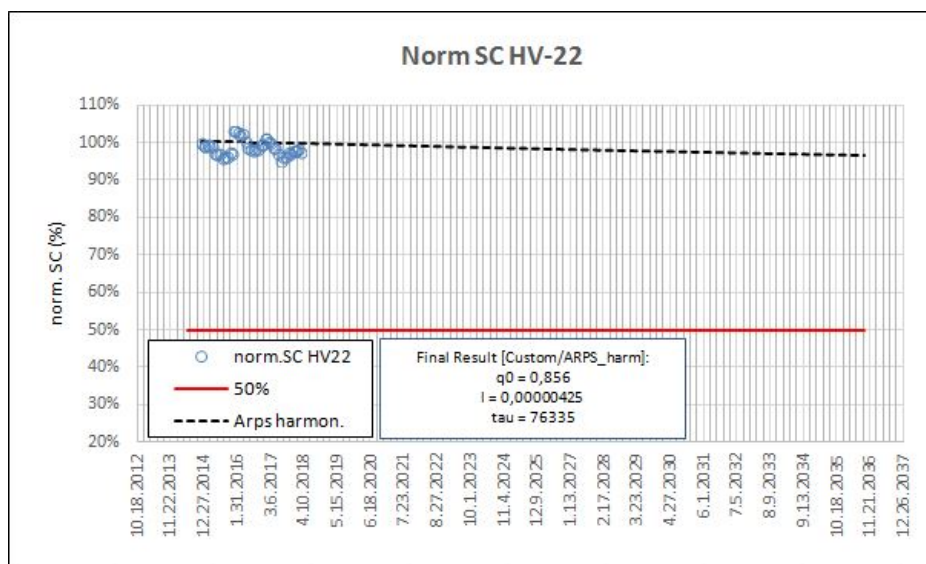
Obrázek 3.17: Normovaná specifická kapacita vrtu HV-2

Obrázek „3.17“ vyjadřuje grafické znázornění normované specifické kapacity vrtu HV-2 a zároveň predikci nejzazšího termínu pro provedení regenerace vrtu. Graf hodnot NSC vykazuje výrazný poklesový trend, kdy došlo k poklesu od roku 2015 do roku 2018 o 25 procent. Arpsova křivka protíná hranici 50 procent kapacity vrtu HV-2 přibližně v prosinci roku 2030, což také vyjadřuje nejzazší termín, do kdy je potřeba provést regeneraci vrtu.

Obrázek „3.18“ vyjadřuje grafické znázornění normované specifické kapacity vrtu HV-19 a zároveň predikci nejzazšího termínu pro provedení regenerace vrtu. Graf hodnot NSC vykazuje též výrazný poklesový trend, kdy došlo k poklesu mezi lety 2014 a 2018 o 25 procent. Arpsova křivka protíná hranici 50 procent kapacity vrtu HV-19 přibližně v dubnu roku 2027, což také vyjadřuje nejzazší termín, do kdy je potřeba provést regeneraci vrtu.



Obrázek 3.18: Normovaná specifická kapacita vrtu HV-19



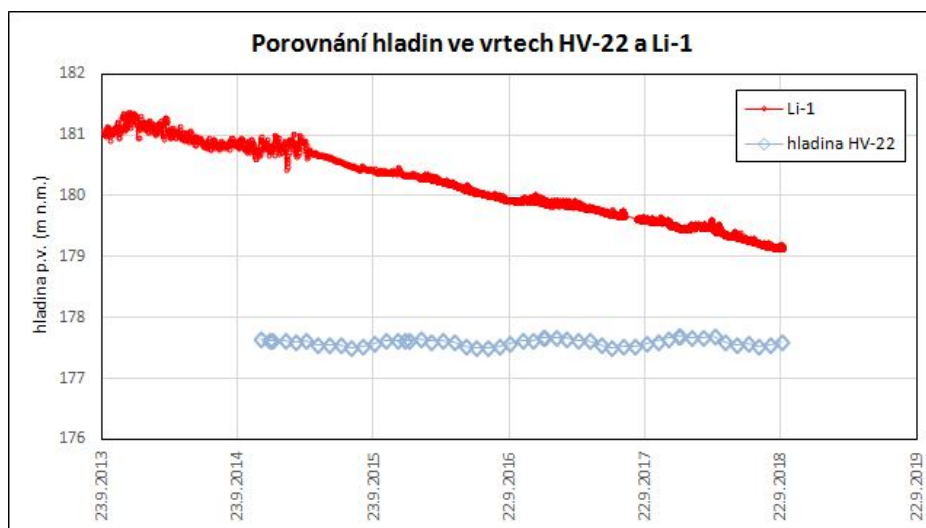
Obrázek 3.19: Normovaná specifická kapacita vrtu HV-22

Obrázek „3.19“ vyjadřuje grafické znázornění normované specifické kapacity vrtu HV-22 a zároveň predikci nejzazšího termínu pro provedení regenerace vrtu. Graf hodnot NSC vykazuje velmi mírný poklesový trend, kdy došlo k poklesu mezi lety 2014 a 2018 o pouhých 2 procenta. Na první pohled by se mohlo zdát, že vrt kolmatuje velmi málo nebo vůbec, protože Arpsova křivka v následujících 20 letech neprotíná 50procentní hranici kapacity vrtu HV-22. Beru však v úvahu, že křivka vydatnosti z roku 2014 se velmi výrazně odlišovala od křivky z roku 1969, na rozdíl od vrtu HV-19, kde se křivka vydatnosti z roku 2014 rovnala křivce z roku 1969. Z toho vyplývá, že obrázek „3.19“ vyobrazuje pouze koncovou část dlouhého období (tj. 49 let) poklesu specifické kapacity vrtu a je možné, že vrt 50procentní kapacity již dosáhl. Pokud by se za výchozí stav uvažovala hodnota specifické vydatnosti z doby vybudování vrtu - viz křivka vydatnosti „3.10“, pak by pokles NSC byl jednoznačně výraznější. Bohužel pro časové vyhodnocení NSC v období mezi léty 1969 a 2013 nemám k dispozici žádné údaje. Vrt kolmatuje velmi výrazně a v porovnání s ostatními vrty je na tom nejhůře.

3.5 Další poznatky

Vrt Li-1 jsem zahrnula do této práce, abych mohla prokazatelně říci v případě vrtu HV-22, zda pokles hladiny má, či nemá vliv na zásoby podzemní vody. Porovnání vývoje hladin podzemní vody ve vrtech HV-22 a Li-1 prezentuje graf na obrázku „3.20“.

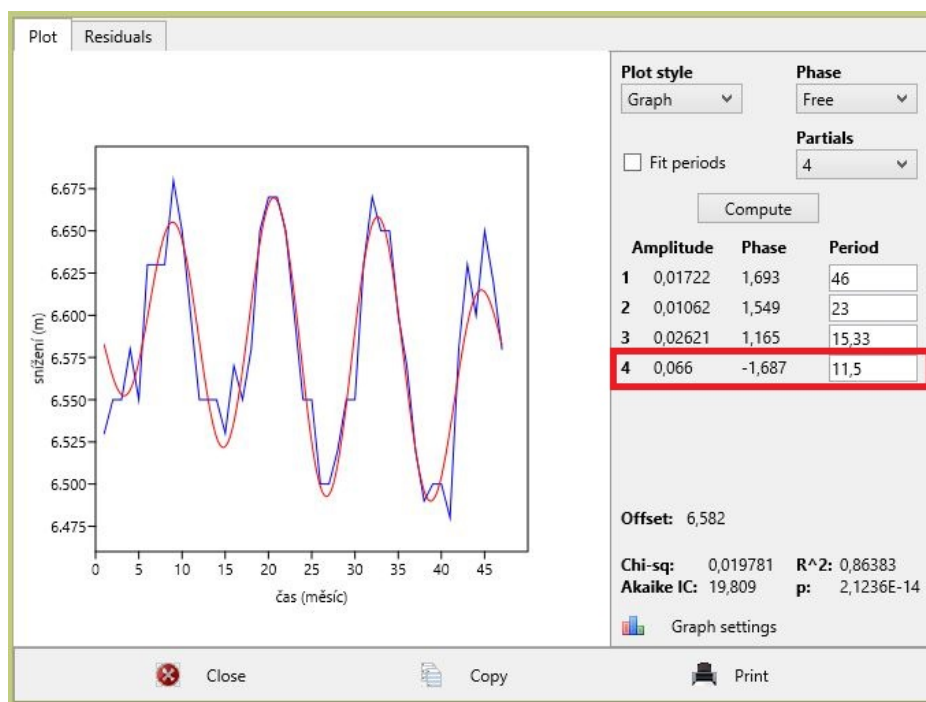
Hladina podzemní vody vrtu Li-1 od konce roku 2013 soustavně klesá, i když se z něj nečerpá. V roce 2013 dosahovala hladina nejvyšší absolutní výšky 181,3 m. n. m. Do konce roku 2018 poklesla hladina přibližně o 2,3 m na 179 m. n. m. Zatímco hladina podzemní vody ve vrtu HV-22 se drží přibližně stále ve stejné výšce, tj. mezi 177 a 178 m. n. m. K pravidelným výkyvům hladiny dochází v řádech



Obrázek 3.20: Porovnání hladin ve vrtech HV-22 a Li-1

jednotek až prvních desítek centimetrů. I když to může na první pohled vypadat, že dochází ve vrtu Li-1 k poklesům zásob podzemní vody (již několik let hladina soustavně klesá), je potřeba si uvědomit, že se zde jedná o zvodeň s napjatou hladinou. To znamená, že hladina podzemní vody v obou vrtech reprezentuje tlakovou výšku. Strop napjaté zvodně je situován přibližně 20 m pod terénem, tj. ve výšce 163,75 m. n. m. (viz příloha 1d – geologický profil vrtu HV-22). K poklesu zásob by začalo docházet tehdy, pokud by nynější tlaková výška ve vrtu poklesla až na výšku stropu zvodně a hladina ve zvodni by se stala z napjaté volnou. Současný rozdíl tlakové výšky ve vrtu Li-1 a nadmořské výšky stropu zvodně je 15,25 m. Pro vrt HV-22 je rozdíl výšek roven 13,75 m. Vzhledem k tomu, že snížení piezometrického napětí napjaté zvodně má zanedbatelný vliv na průběh křivky vydatnosti a tudíž i hodnoty specifické vydatnosti, mohou předpokládat, že veškeré změny hydraulických odporů jsou způsobeny především kolmatací.

Na grafu zobrazující časový vývoj hodnot výšky hladiny podzemní vody ve vrtu HV-22 („obrázek“ 3.7) prezentovaném v kapitole 3.2 je patrný jasný sinisodní průběh hodnot. Předpokládám, že podzemní voda ve vrtu reaguje na měnící se stavy blízkého povrchového toku Želízská svodnice v průběhu hydrologického roku. Jelikož je hladina podzemní vody napjatá, neměla by být v kontaktu s povrchovým tokem.



Obrázek 3.21: Cyklus trendu hodnot snížení

Předpoklad ovlivnění podzemní vody ve vrtu povrchovým tokem v rámci hydrologického roku dokazuje obrázek „3.21“, kde hodnoty hladiny podzemní vody kolísají během roku. Na obrázku je zvýrazněna čtvrtá amplituda daného cyklu s periodou 11,5 měsíce, což vypovídá o jeho pravidelnosti v intervalu přibližně jednoho roku. Zvolená amplituda 0,066 nejpřesněji odpovídá danému průběhu hodnot hladiny podzemní vody. Na základě tohoto faktu konstatuji, že vrt je ovlivněn hydrologickými změnami blízkého toku, nemohu však s jistotou říci, co je příčinou. Příčinou může být nedostatečné těsnění vrtu (poškozená či nedostatečná cementace) nebo koroze ocelové pažnice. Pro ověření předpokladu je nutná revize vrtu, například podvodní kamerou.

Diskuse a závěr

Ve své diplomové práci jsem prakticky ověřila, že produkční analýza je využitelná ve vodohospodářské sféře. Při analýze jsem vycházela z dat ze tří až pětiletého monitoringu z pěti vrtů, které se nacházejí ve Středočeském kraji v okrese Mělník. Tyto vrty jsem zvolila z důvodu jejich aktivního využití pro vodárenské účely. Ve sledovaných vrtech byl monitorován vývoj hladiny podzemní vody a čerpaného množství v čase. Pro vrty HV-1 a HV-2 jsem neměla k dispozici data z čerpací zkoušky prováděné při konstrukci vrtu, proto u těchto vrtů jsou vyobrazeny křivky vydatnosti konstruované pouze na základě dat monitoringu. Chybějící data z doby konstrukce vrtu však nejsou překážkou pro vyhodnocení normované kapacity vrtu.

Na základě mých výsledků mohu konstatovat, že všechny mnou vyhodnocované vrty kolmatují. V každém vrtu dochází k poklesu nasycené hydraulické vodivosti a nárůstu hydraulických odporů. Kolmataci je nejvíce zastižen vrt HV-22, kde došlo od roku 1969 k největším změnám nasycené hydraulické vodivosti. Tento vrt je momentálně na pokraji kolapsu. Vrt HV-1 dosáhne v brzké době své 50procentní kapacity. Vrty HV-2 a HV-19 vycházejí nejlépe.

V rámci běžného monitoringu vodárenských vrtů se z naměřených dat mohou za pomoci produkční analýzy získat mnohem obsáhlejší výstupy, které nám ukáží nejen to, jak se vyvíjí hladina v čase a kolik se momentálně odebírá vody, ale i to, jak se vrt bude chovat v budoucnu, jaká bude jeho reálná produktivita a kdy se přiblíží konec jeho životnosti a bude nutný regenerační zásah.

Nakonec bych chtěla zdůraznit důležitost provádění pravidelného, alespoň měsíčního monitoringu všech vodárensky využívaných vrtů, čerpaných i pozorovacích, neboť pro správná vyhodnocení monitoringu jsou důležitá kontinuální data v řádu nejlépe desítek let. Z mých výsledků produkční analýzy je patrné, kolik dalších přínosných informací je možné z běžně sledovaných dat pomocí produkční analýzy získat, což může být velkým přínosem pro provozovatele vodárenských vrtů, především z ekonomického hlediska (plánování údržby objektů např. formou regenerace).

Seznam použité literatury

- ADAMOVIČ, J. a KOLEKTIV (2016). Stanovení zásob podzemních vod, hydrogeologický rajon 4522 – křída liběchovky a pšovky. http://www.geology.cz/rebilance/vysledky/4522_zprava.pdf.
- ARNOLD, R. a ANDERSON, R. (1908). Preliminary report on coalina oil district. *U.S. Geol., Survey Bull.*, **357**.
- ARPS, J. J. (1945). *Analysis of Decline Curves*. Society of Petroleum Engineers.
- BOGDAN, N. a KOLEKTIV (2015). Prevention of colmatage in the injection wells at geothermal plant in pyrzyce by applying method of super soft acidizing. *Journal of Industrial and Intelligent Information*, **3**(1). URL <http://www.jiii.org/uploadfile/2014/0626/20140626093414786.pdf>. online.
- CUESTA, H. (2015). *Analýza dat v praxi*. Albatros Media a.s.
- CUTLER, W. W. (1924). Estimation of underground oil reserves by well production curves. *Bulletin, USBM 91*, page 228.
- FETKOVICH, M. J. (1980). *Decline Curve Analysis Using Type Curves*. Petroleum Technology.
- GRMELA, A. (2004). Základy hydrogeologie. http://geologie.vsb.cz/geologie/KAPITOLY/10_z%C3%A1klady_hydro/10_z%C3%A1klady_hydrogeologie.htm.
- HOUZÉ, O. a KOLEKTIV (2008). *Dynamic Flow Analysis*. KAPPA.
- JACOB, C. E. (1947). Drowndown test of determine effective radius of artesian well. *ASCE, Proc.*, **112**, 1047–1070.
- MAPY.CZ (2018). <https://mapy.cz>.
- PASTUSZEK, F. (2011). *Expertní systém*. Pastuszek, F., Praha.
- PASTUSZEK, F. (2014). *Studijní materiály hydrogeologie*. VODNÍ ZDROJE, a.s., Praha.
- PASTUSZEK, F. (2017). *Interpretace podrobných měření počátečních částí čerpacích zkoušek na samostatných vrtech*. Mezinárodní kongres hydrogeologie, Brno.
- PASTUSZEK, F. (2018). *Mělnická Vrutice, Řepín produkční analýza*. Středočeských vodáren a.s., Kladno.
- PSPČR (2019). Sbírka zákonů České republiky a mez. smluv. <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=258&r=2000>.
- QUITT, E. (1971). *Klimaticke oblasti Ceskoslovenska*. Academia, Praha.

- RORABAUGH, W. H. (1953). Grafical and theoretical analysis of step-drawdown test of artesian well. *ASCE, Proc.*, **79**(362).
- SICHARDT, W. (1928). *Method of Stabilization of Drilled Wells*. Springer, Berlin.
- VLNAS, R. (1998). Modelové hodnocení režimu podzemních vod hlubokých zvodní, povodí liběchovky. http://voda.chmi.cz/opzv/vlnas/libechov/html/lib_zpr.htm.
- ČESKÝ ÚŘAD ZEMĚMĚŘICKÝ A KATASTRÁLNÍ (2019). Katastr nemovitostí. <https://nahlizenidokn.cuzk.cz/>.
- ŠULA, S. (1969a). *Zpráva o hydrogeologickém průzkumu v dolním povodí Liběchovky*. Stavební geologie, n.p., Praha.
- ŠULA, S. (1969b). *Liběchovka - IV. etapová zpráva II. část*. Stavební geologie, n.p., Praha.
- ŠULA, S. (1970). *Závěrečná zpráva o hydrogeologickém průzkumu v povodí Liběchovky*. Stavební geologie, n.p., Praha.

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Schéma blízkého okolí vrtu (Pastuszek, 2014) | 5 |
| 1.2 | Hydraulický skok na plášti vrtu (Pastuszek, 2014) | 6 |
| 3.1 | Geologická mapa hydrogeologického rajonu 4522 (Adamovič a kolektiv, 2016) | 11 |
| 3.2 | Stratigrafie umístění kolektorů (Adamovič a kolektiv, 2016) | 12 |
| 3.3 | Situační mapa vrtů (Mapy.cz, 2018) | 14 |
| 3.4 | Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-1 | 16 |
| 3.5 | Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-2 | 17 |
| 3.6 | Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-19 | 18 |
| 3.7 | Vývoj hladiny a čerpaného množství ve vrtu HV-22 | 18 |
| 3.8 | Křivka vydatnosti vrtu HV-19 | 20 |
| 3.9 | Detail křivky vydatnosti vrtu HV-19 | 21 |
| 3.10 | Křivka vydatnosti vrtu HV-22 | 22 |
| 3.11 | Detail křivky vydatnosti vrtu HV-22 | 22 |
| 3.12 | Křivka vydatnosti vrtu HV-1 | 23 |
| 3.13 | Křivka vydatnosti vrtu HV-2 | 24 |
| 3.14 | Jímací kapacita vrtu HV-19 | 24 |
| 3.15 | Jímací kapacita vrtu HV-22 | 25 |
| 3.16 | Normovaná specifická kapacita vrtu HV-1 | 27 |
| 3.17 | Normovaná specifická kapacita vrtu HV-2 | 28 |
| 3.18 | Normovaná specifická kapacita vrtu HV-19 | 28 |
| 3.19 | Normovaná specifická kapacita vrtu HV-22 | 29 |
| 3.20 | Porovnání hladin ve vrtech HV-22 a Li-1 | 30 |
| 3.21 | Cyklus trendu hodnot snížení | 31 |

| | | |
|-----|--|----|
| A.1 | Geologický profil vrtu HV-1 | 40 |
| A.2 | Geologický profil vrtu HV-2 | 41 |
| A.3 | Geologický profil vrtu HV-19 | 42 |
| A.4 | Geologický profil vrtu HV-22 | 43 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Průměrné roční hodnoty vrtu HV-1 | 15 |
| 3.2 | Průměrné roční hodnoty vrtu HV-2 | 15 |
| 3.3 | Průměrné roční hodnoty vrtu HV-19 | 15 |
| 3.4 | Průměrné roční hodnoty vrtu HV-22 | 16 |
| 3.5 | Parametry vrtu HV-19 | 19 |
| 3.6 | Parametry vrtu HV-22 | 20 |
| 3.7 | Hodnoty hydraulických odporů (HO) ve vrtu HV-19 | 21 |
| 3.8 | Hodnoty hydraulických odporů (HO) ve vrtu HV-22 | 23 |
| 3.9 | Parametry Arpsovy harmonické křivky | 27 |

Seznam použitých zkratek

- AHK – Arpsova harmonická křivka
- b - Arpsův parametr pro poklesové křivky
- B, C - odporové charakteristiky zvodně
- ČHMÚ - český hydrometeorologický ústav
- D_i - poklesový faktor
- f - funkce jímací schopnosti vrtu
- h - hladina podzemní vody nad čidlem [m]
- ho - absolutní výška hladiny podzemní vody [m.n.m]
- H - hloubka vrtu [m]
- HO - hydraulické odpory [m]
- I - hydraulický gradient [m]
- k - nasycená hydraulická vodivost [m/s]
- m - mocnost zvodně [m]
- m.n.m - metry nad mořem [m]
- mp - výška vodního sloupce od báze perforace [m]
- NSC – normovaná specifická kapacita
- PA - produkční analýza
- q - specifická vydatnost vrtu [l/s/m]
- q_0 - počáteční specifická vydatnost vrtu [l/s/m]
- q_i - specifická vydatnost vrtu - jednot. data [l/s/m]
- q_t - specifická vydatnost vrtu v čase [l/s/m]
- Q - čerpaný objem podzemní vody [l/s]
- r - poloměr vrtu [m]
- R - poloměr depresního kužele [m]
- s - snížení hladiny podzemní vody [m]
- s_w - celkové snížení hladiny podzemní vody [m] - Jacobův vzorec
- t - čas [dny]

- T - transmisivita
- v - filtrační rychlost [m/s]
- VÚV - výzkumný ústav vodohospodářský