

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie

Studijní obor: Povrchová a podzemní voda



Jakub Harmáček

Hydrogeologie areálu Pražského hradu

Hydrogeology of the Prague Castle area

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel: Mgr. et Mgr. Tomáš Weiss

Praha, 2021

Prohlášení

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

V Praze dne 3.5.2021

.....
Jakub Harmáček



Příprava na čerpací zkoušku na Vrtu A

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému školiteli Mgr. et. Mgr. Tomášovi Weissovi za odborné rady, vstřícnost, ochotu a trpělivost s mou osobou. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Ivě Herichové, PhD. za pomoc a rady poskytnuté pro psaní práce a Ing. Evě Stuchlíkové za poskytnutá data. Také děkuji mé rodině a partnerce za podporu při psaní této práce a podporu během celého studia. Nakonec bych chtěl poděkovat Technologické agentuře ČR za financování části prací v rámci projektu TL03000603 „Skryto pod povrchem. Archeologické terény Pražského hradu, jejich ochrana a prezentace v moderním světě.“

Abstrakt

Práce se zabývá hydrogeologií areálu Pražského hradu a blíže se zaměřuje na jeho III. nádvoří, kde se nachází významná archeologická lokalita ukryta pod betonovou deskou vlastního nádvoří. Díky přítomné podzemní vodě a jejímu vlivu na mikroklima pod touto deskou jsou archeologické památky ohroženy a je třeba zvolit správné konzervační příp. restaurátorské zásahy. Navzdory důležitosti vlivu vody na památky je prozkoumanost oblasti z hlediska hydrogeologie malá a většina dat pochází pouze ze stavebních zpráv, které pojednávají o hydrogeologii pouze okrajově. Cílem mé práce je kromě komplexní rešerše pomocí terénního měření tyto poznatky rozšířit a lépe popsat místní hydrogeologické poměry. V teoretické části se zaměřuji na zkompletování dosavadních poznatků o hydrogeologii a jejího ovlivnění člověkem. Na rešerši navazuje praktická část, kde za pomoci hydrodynamické zkoušky a hydrochemických rozborů klasifikuji původ vody a způsob, jakým proudí v půdě. Z literatury i provedených měření vyplývá, že voda se v oblasti nachází ve dvou horizontech: mělký kvartérní horizont v navážkách a voda proudící v ordovických vrstvách. Oba tyto kolektory spolu hydraulicky, alespoň lokálně v místě mého měření, nekomunikují a voda, která ohrožuje archeologické nálezy, je sycena ze srážek zasakujících se do půdy. Transmisivita navážek v místě měření je cca $1,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{d}$ a průtok půdou je tak velmi omezený. Kvůli tomu se při větších srážkových událostech místy tvoří na archeologických terénech kaluže a sedimenty jsou rychle nasyceny. Navíc díky množství inženýrských sítí a kanalizací v oblasti může docházet k únikům a zvyšovat se tak riziko poškození památek.

Klíčová slova: hydrogeologie, Pražský hrad, vodovody, hydrodynamická zkouška

Abstract

The thesis deals with the hydrogeology of the Prague Castle area and focuses on its III. courtyard, where there is an important archeological site hidden under the concrete slab of the courtyard itself. Due to the present groundwater and its influence on the microclimate under this slab, archaeological monuments are endangered and it is necessary to choose the right conservation or restoration interventions. Despite the importance of the influence of water on monuments, the exploration of the area from the point of view of hydrogeology is small and most of the data come only from construction reports, which deal with hydrogeology only marginally. The aim of my work is, in addition to a comprehensive search to extend field measurements, to expand this knowledge and better describe local hydrogeological conditions. In the theoretical part I focus on completing the existing knowledge about hydrogeology and the way humans impact this hydrogeology. The research is followed by a practical part, where with the help of hydrodynamic test and hydrochemical analysis I classify the origin of water and the way it flows in the soil. The literature and measurements show that the water is located in the area in two aquifers: a shallow Quaternary aquifer in the backfills and water flowing in the Ordovician layers. Both of these aquifers do not communicate with each other hydraulically, at least locally at the place of my measurement. The water that threatens the archaeological finds is saturated with precipitation seeping into the soil. The transmissivity of the backfills at the measuring point is about $1,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{d}$ and the water discharge through the soil is very limited. Due to this, during larger precipitation events, puddles form in places on archaeological terrains and sediments are quickly saturated. In addition, due to the number of utilities and sewers in the area, leaks can occur and the risk of damage to monuments increases.

Keywords: hydrogeology, Prague castle, water conduits, hydrodynamic test

Obsah

1	Úvod.....	- 1 -
2	Charakteristika oblasti	- 3 -
2.1	Lokalizace oblasti.....	- 3 -
2.2	Geologie oblasti	- 3 -
2.3	Hydrogeologie oblasti	- 5 -
2.3.1	Urbánní hydrogeologie	- 5 -
2.3.2	Ordovická zvodeň	- 8 -
2.3.3	Kvartérní horizont v půdě	- 9 -
2.3.4	Ovlivnění hydrogeologie stavbami.....	- 9 -
2.4	Hydrochemie oblasti	- 10 -
3	Ovlivnění hydrogeologie člověkem na Pražském hradě.....	- 12 -
3.1	Historie jímání vody na Pražském hradě	- 12 -
3.2	Vodovody.....	- 14 -
3.2.1	Historie vodovodů.....	- 14 -
3.2.2	Břevnovský vodovod	- 14 -
3.2.3	Zámecký vodovod.....	- 16 -
3.2.4	Královský vodovod.....	- 16 -
3.2.5	Užitkový vodovod.....	- 18 -
3.2.6	Königsmanka	- 18 -
4	Metodika	- 19 -
4.1	Hydrogeologické mapování	- 19 -
4.2	Hydrodynamická zkouška.....	- 21 -
4.3	Odběry vzorků.....	- 22 -
5	Výsledky	- 24 -
5.1	Výsledky hydrodynamické zkoušky	- 24 -
5.2	Hydrochemické výsledky	- 28 -

6	Diskuse.....	- 30 -
7	Závěr	- 33 -
8	Zdroje.....	- 34 -
8.1	Literatura	- 34 -
8.2	Datové zdroje	- 37 -
9	Seznam obrázků.....	- 38 -
10	Seznam tabulek	- 38 -
11	Seznam grafů	- 38 -
12	Přílohy.....	- 39 -
12.1	Příloha č. 1 Laboratorní zkoušky čerpadla SUBMERSIBLE 188	- 39 -
12.2	Příloha č. 2 Topografická mapa zájmové oblasti	- 40 -

1 Úvod

Areál Pražského hradu se nachází na hradčanském hřbetu, který byl osídlen už do dob neolitu a ve svojí historii se postupně stal centrem naší země a moci. Celou svoji historii se tento areál rozšiřoval, zástavba hradního vrchu se rozrůstala, a proto se zde nacházejí jedny z nejvýznamnějších památek České republiky jako například Chrám sv. Víta, bazilika sv. Jiří nebo Starý královský palác. Na III. nádvoří se navíc nachází archeologicky významná lokalita, která se ukrývá pod betonovým skeletem a je tak pro veřejnost neviditelná.

Archeologický areál pod III. nádvořím obsahuje památky, které pocházejí z rozmezí od 10. do 18. století, na nichž se provádějí restaurátorské a konzervační práce pod vedením ARUP Akademie věd ČR. K tomu, aby se mohly aplikovat správné metody ochrany a restaurování, je potřeba provést výzkum všech faktorů ovlivňujících tyto práce. Jedním ze zásadních faktorů je podzemní voda přítomná v antropogenních sedimentech. Pokud nastanou větší srážkové události, vytváří se zde i stojaté kaluže. Tyto podmínky nejsou vzhledem k charakteru historického zdiva a násypů ideální a je tak potřeba zjistit, zda je tento problém možné nějak vyřešit.

Výzkum v této oblasti probíhal hlavně během minulého století, a to skrze stavební práce. Díky výstavbě nových kolektorů na dešťovou vodu, podzemních tras inženýrských sítí a rekonstrukci povrchů byly součástí stavební zprávy pokaždé i kapitoly o geologických a hydrogeologických poměrech. Většina těchto zpráv je však podobná, nijak obsáhlá, autoři se navzájem často opakovali, tudíž prakticky žádné nové informace nepřinášeli. Až Vágner (1967) a Řepka (1981) přispěli novými poznatky z hlediska hydrogeologie a hydrochemie oblasti. Většina zpráv není jednoduše dostupná, a tak jsou i vlastní literární rešerše zdrojů v archivech ČGS Geofond a archivech Pražského hradu významným výsledkem práce. Hlavním zdrojem je pro mne práce RNDr. Ivy Herichové, Ph.D., která zpracovala většinu zdrojů a vytvořila tak ucelený obrázek o celém areálu. Mou snahou bylo připojit další zdroje, kriticky je zhodnotit a vytvořit tak ještě celistvějšího obrazu zdejšího prostředí. V práci se také pokouším o popsání vlivů člověka na zdejší hydrogeologický režim. Jímání vody, vedení vodovodů a objekty spojené s vodou zde vytvořily zcela specifické prostředí, pro jehož zkoumání je potřeba s těmito zásahy člověka počítat. Cílem mé práce je tedy popsat hydrogeologický režim oblasti za pomoci literatury a vlastního výzkumu. Dílčími cíli, které mě dovedou k výsledku, je

provedení hydrodynamické zkoušky, hydrochemický rozbor a důkladná rešerše v archivech a knihovnách.

Práci strukturuji tak, že v úvodu seznamuji čtenáře s lokalizací oblasti a její geologií, na kterou má hydrogeologie přímou vazbu. V další části se věnuji hydrogeologii oblasti z hlediska rešeršní práce, tedy kriticky zpracovávám již existující literaturu. Následuje kapitola o jímání vody a vodovodech, které značně ovlivňují zdejší přirozenou hydrogeologickou podobu. Na celou literární rešerši navazuji vlastním terénním měřením v podobě hydrodynamické zkoušky na vrtu na III. nádvoří a také hodnocením hydrochemických rozborů vod odebraných z pěti míst. Uvedu výsledky a v diskusi zmíním nezodpovězené otázky. Na závěr shrnu, na co jsem přišel a jaký je výsledek mé práce.

2 Charakteristika oblasti

2.1 Lokalizace oblasti

Mým zájmovým územím je oblast Pražského hradu a zejména pak jeho III. nádvoří. Místo se nachází v centrální části Prahy na levém břehu řeky Vltavy na vyvýšenině hradčanský hřbet, která je protáhlého charakteru a orientovaná ve V – Z směru. Na východní straně vybíhá v ostře zahrocenou výspu (Herichová, 2019). Nadmořská výška je přibližně 250 m n. m. Ostroh je obklopen poměrně členitým terénem, který spadá pod celek Pražské plošiny, v rámci které dosahuje výškového rozpětí až 225 m (Kovanda et al., 2001). Charakterizujícím znakem pro Pražskou plošinu jsou zarovnané erozně-denudační povrchy, do kterých se od jihu k severu zařezává tok Vltavy. Směrem k jihu k Malostranskému náměstí se terén snižuje a je omezen strahovskou brázdou, která je vyplněna dejekčními kužely a deluviálními sedimenty (Řepka, 1975). Na jihozápad se pak vypínají stráně Petřína. Na severní straně je terén oddělen údolím potoka Brusnice od bruského návrší, které je spojnicí mezi střešovickou a letenskou plošinou. Od Hradčanského náměstí (u Arcibiskupského paláce čp. 56/IV) k Opyši na východním konci Pražského hradu klesá současný povrch v intervalu 257,70–235 m n. m. (Herichová, 2019). Souřadnice přibližného středu III. nádvoří jsou 50.0902725N, 14.4005122E.

2.2 Geologie oblasti

Oblast skalního ostrohu, na kterém se nachází Pražský hrad, je výsledkem složité geologické činnosti, která v sobě zahrnuje procesy tektonické, exogenní a antropologické. Hlavním činitelem v této oblasti byl tok Vltavy, která na území Prahy vytvářela terasy v pleistocenním období. Ve stejné době se utvářel hradčanský ostroh (Herichová, 2019). V širší souvislosti patří jeho podklad k barrandienskému ordoviku a leží na jeho severním okraji. Ordovik je v Barrandienu zastoupen úplným sledem od tremadoku až po hranici se silurem a ordovické uložení tvoří centrální část Barrandienu mezi Prahou a Plzní (Chlupáč, 2011). Hradčanský ostroh je tvořen dvěma krami, které od sebe odděluje tektonická linie směru SZ – JV probíhající od věže Mihulka dále pod východní částí Chrámu sv. Víta do zahrady Na Valech (Řepka, 1975). Spodní vrstvy jsou tvořeny převážně ordovickými letenskými vrstvami, ve kterých se střídají vrstvy slídnatých šedých a hnědošedých břidlic a lavice navětralých žlutošedých až narezavělých křemenců, které jsou u povrchu navětralé až zvětralé (Chlupáč, 2011). Letenské souvrství

je lokálně nejmocnější jednotkou barrandienského ordoviku (až 650m) (Chlupáč, 2011). Vrstevnatost je zde pod úhlem $50^{\circ} - 60^{\circ}$, a to směrem k jihu (Kos, 1967). Břidlice se pohybují v centimetrových až desetimetrových polohách, jak je známo z některých okolních dokumentovaných sond (Řepka, 1981). Samotný skalní podklad ostrohu je zakryt mohutnými svahovými sutěmi, svahovými hlínami, navážkami, stavebním materiálem (často kámen a opuka) a fortifikačními násypy - tedy násypy sloužícími dříve k opevnění hradu. Díky jejich nehomogenním vlastnostem jako jsou mocnost, ulehlost, složení příměsí a velikost zrna znesnadňují vyjádření souhrnných vlastností těchto materiálů.

Tyto vrstvy antropogenního původu mají kolísavou mocnost, která se dle Fořta (1964) pohybuje v rozmezí 1,2 – 3,1 m. V těchto vrstvách se nachází zbytky opukového zdiva, malty, úlomky křemenců a cihel. Celý obecný průběh vrstev na III. nádvoří popsal ve svém geologickém průzkumu Řepka (1981) jako vrstvy A-D takto:

A. „Násypy, archeologické vrstvy

Označení pro tuto vrstvu používané ve starší dokumentaci: „jíl promíchaný s opukovými valounky“ naznačuje antropogenní původ této vrstvy.

B. Zdivo opukové násypy

Tato vrstva označovaná v minulé dokumentaci jako zvětralá opuka nemůže být ve skutečnosti vrstva autochtonní opuky (nepřemístěna, zvětralá na místě), ale pravděpodobně jde o starší popř. rozpadlé historické zdivo, možná odpady kamenické parléřovské huti nebo jiné násypy.

C. Zvětralé ordovické břidlice

Vrstva označená v původní dokumentaci „hnědá břidla“ odpovídá zvětralé nebo navětralé ordovické břidlici.

D. Pevné ordovické břidlice

Odpovídá jednoznačnému označení pro ordovické břidlice. Stupeň tvrdosti nebo pevnosti břidlice je samozřejmě posuzován subjektivně.“

Podle rozborů sondy, kterou provedl Řepka (1981), se první vrstva naspů skládá téměř z 80 % z opuky, ovšem jedná se pouze o lokální výsledky. Nicméně díky tomu, že byly vzorky odebírány na místech u základových patek betonového skeletu zastřešující

III. nádvoří, je velmi pravděpodobné, že složení těchto vrstev bude alespoň v okolí těchto míst podobné.

2.3 Hydrogeologie oblasti

Hladina podzemní vody je v mé zájmové oblasti – tedy v areálu Pražského hradu – zastoupena na dvou úrovních. První mělký kvartérní horizont je vázaný na antropogenní navážky a voda se v nich pohybuje díky průlinové propustnosti. Místy je pod touto vrstvou izolátor tvořen z jílových eluvíí a svahových sedimentů. Druhý spodnější horizont je tvořen ordovickou zvodní vázanou na letenské vrstvy, kde se voda pohybuje pomocí puklinové propustnosti (Kos, 1965). Přirozený vývěr pramenů z těchto vrstev můžeme očekávat v místech, kde skalní podklad tvoří porušené křemence a droby letenských vrstev.

Kolektor v navážkách je výrazně ovlivněn lidskou činností a jeho parametry se liší od přírodních půd, proto se na začátku kapitoly budu věnovat urbánní hydrogeologii, odnoži klasické obecné hydrogeologie. Tato odnož se věnuje městskému prostředí, kde je hydrogeologický režim ovlivněn pokryvem a materiály vytvořenými člověkem. Můžeme totiž říct, že antropogenní navážky se díky velkému počtu stavebních zásahů člověka podobají přírodním krasovým systémům. Mezi stavby, které zde v půdě vytvářejí pseudokrasové systémy, se řadí vodovody, studny, kanalizace a systémy odvodňující stavby. Ordovická zvodněn je naproti tomu jen málo ovlivněná člověkem díky výrazné tvrdosti horniny a z toho vyplývající obtížné opracovatelnosti.

2.3.1 Urbánní hydrogeologie

Urbánní hydrogeologie, obor, který vznikl a zásadněji se rozvíjel až v posledních desetiletích, je směr, který díky růstu městské populace a rozšiřování měst bude stále více stoupat na významu (Wong et al., 2012). Urbanizace má velký vliv na hydrologický cyklus a na vodu v krajině jako takovou, když díky použitým materiálům a odlišnému mikroklimatu mění místní přírodní podmínky. Vedle dopadů na vodní bilanci v krajině má urbanizace vliv i na kvalitu vzduchu, půdy a vodních zdrojů (Schirmer et al., 2013). Urbanizace znamená větší koncentraci obyvatelstva na km² a v městských aglomeracích tak běžně dochází k situacím jako je nadbytečné čerpání, kontaminace zdrojů a v pobřežních oblastech k zasolování podzemních vod díky zvětšování dosahu depresního kuželu (Hibbs & Sharp, 2012). Jako dobrý příklad, kde se tento problém podařilo zdárně vyřešit, bych uvedl Izrael, který využívá reverzní osmózu k přeměně mořské vody na vodu pitnou. Problémy s nadbytečným čerpáním mimo pobřežní oblasti

můžeme vidět například v Jordánu ve městě Irbid, kde díky větší populaci a větší poptávce po pitné vodě došlo ke snížení hladiny podzemní vody o 70 m (Odeh et al., 2019). V posledních letech se díky většímu výzkumu v této oblasti a nepřehlížení problémů vedeními měst podmínky zlepšují a podzemní zdroje vody přestávají být v západním světě přečerpávány.

V hydrogeologii je důležité z hlediska průzkumu co nejlépe pochopit vodní bilanci daného místa (Schirmer et al., 2013). Městské oblasti se totiž liší od přírodního prostředí nejenom vlastnostmi půd, ale i pokryvem, který má většinou téměř nepropustný charakter. I na tak malém území jako jsou města se střídá hned několik oblastí s naprosto odlišnými podmínkami dotace podzemní vody a zasakování, které můžeme rozdělit na 2 hlavní skupiny. První skupinou jsou plochy téměř nepropustné a plochy, ze kterých se voda svádí buď do dešťové kanalizace nebo na místa, kde se voda zasakuje do půd. Tyto povrchy jsou na Pražském hradě téměř všude, konkrétně celé III. nádvoří je pokryto betonovou dlažbou. Další takové plochy jsou ve městech zastoupeny chodníky, silnicemi, parkovišti atp. (Hibbs & Sharp, 2012). Druhou skupinou jsou pak místa, kde se nacházejí přírodě podobné půdy, jako jsou parky, zelené pásy okolo silnic a golfová hřiště. Tato místa jsou sice propustná, ale složení půd je zde určováno člověkem a půda navíc bývá zhutněná a má upravované vlastnosti.

V místech, kde jsou povrchy nepropustné, musí být voda odváděna na místa určená k zasakování. Díky tomu dochází k zamezení zasakování na větší ploše a tím se zvyšuje riziko povodní. Zejména vrcholy povodní jsou díky tomuto jevu zvyšovány, povodeň se nerozloží ve větším časovém úseku a graf povodně nemá pozvolný průběh. Z těchto rizik vyplývá, že je stále důležitější plánování a designování městského pokryvu, aby se těmito situacím dalo předcházet a lépe je předpovídat (Hibbs & Sharp, 2012). Obecně by se zdálo, že čím více je v městech zastoupen nepropustný povrch, tím více je omezena a snížena dotace podzemních zásob vody. Ovšem jak demonstroval Garcia-Fresca a Sharp (2005) v kompilaci dat z 21 měst, dotace jsou naopak běžně zvýšeny (Hibbs & Sharp, 2012). Tyto odhady jsou definovány pro celou plochu města. Je tedy velice pravděpodobné, že se lokálně v některých oblastech dotace zmenšily a v jiných naopak výrazně zvýšily. Na Pražském hradě docházelo díky chrličům na budovách běžně ke koncentrování velkého množství vody na jednom místě. Voda se pak nestačila vsakovat a docházelo k narušení soudržnosti půdy i statiky staveb. Ke snižování dotací dochází hlavně ve městech s vysoce efektivní infrastrukturou a vysokým poměrem

přírodních ploch, jako je například Kodaň či Birmingham (Hibbs & Sharp, 2012). Velký vliv na dotaci podzemní vody mají klimatické podmínky, které mohou mít za následek větší evapotranspiraci. Nicméně se vzrůstající ariditou klimatu stoupá množství závlah ve městech, a tudíž stoupá i dotace podzemní vody (Hibbs & Sharp, 2012). Lokalizování zdroje největších dotací je ve městech problematické kvůli případné kontaminaci podzemní vody a jejich rezervoárů. Pražský hrad není ohrožen povodněmi primárně kvůli své lokalizaci či uspořádání, avšak je zde patrně nedostatečná kapacita kanalizace a dochází ke shromažďování vody na několika místech určených k jejímu odvádění.

Druhá skupina, tedy místa, kde je vsakování prováděno přímo skrze půdy, je pak nejvíce ovlivňována zhutněním materiálu, jak uvádí Yang & Zhang (2011). Čím více je tedy materiál zhutněný, tím nižší je schopnost infiltrace a pohybu vody v něm. Z toho vyplývá, že nízká schopnost infiltrace negativně ovlivňuje městské životní prostředí, zvyšuje okamžitou rychlost povodně a zhoršuje kvalitu povrchové vody (Yang & Zhang, 2011).

Fungování hydrologického cyklu ve městech nenarušují pouze svrchní materiály a půdy, ale je ovlivněn i změnou podzemních podmínek. Díky budování velkých podzemních staveb a různých kanalizací, štol, vrtů a studen se stávají města a jejich podloží velmi podobná přírodním krasovým oblastem (Hibbs & Sharp, 2012). Například tunely metra se podobají velkým jeskyním. Přestože jsou tyto stavby dobře utěsněny, slouží jako preferenční cesty pro vodu, která se díky nim může rychleji dostávat do větších vzdáleností i hloubek. Je to kvůli tomu, že obsyp těchto potrubí a štol mívá o 2 až 5 řádů vyšší propustnost než okolní přírodní půdy (Hibbs & Sharp, 2012). Pokud dojde k porušení potrubí nebo jiné stavby, může se propustnost a schopnost vést vodu ještě mnohonásobně zvýšit a tím se i zvyšuje šance kontaminace větší oblasti za relativně krátký časový úsek.

Podzemní voda a její dotace ve městech je dnes velmi důležité téma. Tato problematika je navíc zcela unikátní v každém městě díky jiné infrastruktuře a městskému plánování. Voda ze srážek se do půd dostává přímým zasakováním na otevřených plochách, poruchami v nepropustném pokryvu nebo v podzemním vedení kanalizací a inženýrských sítí nebo díky vegetaci. Na Pražském hradě je nutno počítat se všemi těmito možnostmi, ale nejvíce je zde zasakování ovlivněno nepropustným pokryvem v podobě dlažby a pochozího betonu. Zároveň je podzemí výrazně ovlivněno stavbami

člověka, a tak zde musí být uplatňován přístup podobným nepravým krasovým systémům. Všechna voda je dnes navíc vedena do kanalizace, ve které může docházet k trhlinám a únikům vody do půdy.

2.3.2 Ordovická zvodeň

Letenské vrstvy mají sklon k vytváření puklinové porozity a pohyb vody ve skalním podloží je tak ovlivňován hlavně mírou zvětrání horniny, protože v neporušeném a nezvětralém stavu jsou ordovické břidlice téměř nepropustné. V knize Neživá příroda Prahy (Budil et al., 2020) Kaprasová mj. píše: „Dle zkušeností v terénu má i nejvyšší, silně zvětralá zóna poměrně malou propustnost vlivem jílového charakteru zeminy. Podstatně příznivější podmínky pro pohyb podzemní vody má pod ní ležící zóna s intenzivním rozpukáním.“ Kolektor podzemní vody se může v ordovických horninách formovat pouze v pásmu přípovrchového rozvolnění a rozpukání horniny, kde je různý poměr průlinové a puklinové porozity (Budil et al., 2020). Do větších hloubek v hornině se pak voda dostává pouze skrze strmě uložené a rozpukané křemence a poruchové zóny. Také Kos (1965) píše, že při sondovacích pracích se narazilo na tento horizont podzemní vody v místech, kde je vázán na porušení horniny a na místa s lokálně vyšší propustností. Nejvýše bývá hladina tam, kde je větší podíl křemenců díky jejich rozpukanosti a rozvětralosti (Herichová, 2015). Vývěry byly dle analýzy pylových spekter zjištěny v příčné brázdě vedoucí přes III. nádvoří. Dalším místem s možným výskytem pramenů je pak oblast na severní straně Hradu. Tam byla odkryta část deprese s bahnem na dně (Herichová, 2015).

O vydatnosti v letenských vrstvách píše i Vágner (1967), který se ve své stavební zprávě zmiňuje o studnách na jižním svahu hradčanského návrší s nepatrným přítokem. Konkrétně mluví o Rudolfově studni nebo také tzv. Hluboké studni (bod 6 na obrázku č.1), do níž ústí přítok s naměřenými hodnotami mezi 0,18 a 4,8 l/min. Hlavní přítoky do studny byly pozorovány v četných zlomových puklinách v okolí ohybu letenských vrstev v přibližné hloubce 45 m. V Thunovské ulici na jižním svahu hradčanského ostrohu byla vyhloubena jímka pod úrovní sklepa domu čp. 185 (bod 1 obr. 1) a v lednu 1967 byl zjištěn přítok do jímky 0,004 l/s. Tato voda pochází zčásti ze srážek, které se infiltrovaly na jižních svazích Hartigovské zahrady (bod 4 obr. 1), a podle obsahu síranů ve vodě, které pocházejí ze zvětrávání pyritu, je pravděpodobné, že větší část vody pochází z ordovické zvodně.

2.3.3 Kvartérní horizont v půdě

Druhý horizont podzemní vody, který nalézáme na Pražském hradě, je ten v navážkách při povrchu, tedy ve vrstvě mocné 5 – 6 metrů. V navážkách proudí voda díky průlinové propustnosti mezi zrny půdy. Suť je podle Kosa (1965) špatně propustná a dokládá to tvrzením, že již při výstavbě chrámu se voda zdržovala ve formě kaluží na povrchu a stavitel tak musel vyhloubit zasakovací jámu. Kolektor je dotován výhradně ze srážek, které se do sedimentů infiltrují skrze mezery mezi dlažbou nebo podél líců staveb (Kos, 1965). Okapy na III. nádvoří jsou svedeny do kolektorů a kanalizace, která však může místy protékat a tvořit tak nebezpečný lokální zdroj přesycení.

Sondovací práce, které provedl Kos (1965) ve Vikářské ulici (bod 5 obr. 1), zachycují hladiny podzemní vody tak, jak je uvedeno v tabulce č.1:

Tabulka č.1 Seznam sond ve Vikářské ulici. Zdroj: Kos, 1965

Sonda č.	Kóta povrchu [m n. m.]	Hladina podzemní vody [m]	V hornině
1	256,72	-6,94	břidlice
2	257,17	-8,98	břidlice
3	257,48	-8,89	suť
4	257,56	-8,89	suť
5	257,82	-8,83	suť
6	257,81	∅	suť
7	257,80	-8,44	suť
8	257,80	-7,69	suť
9	257,74	-7,47	suť
10	257,74	-7,08	břidlice
11	258,27	∅	břidlice

Z tabulky je zřejmé, že hladina v tomto kolektoru se pohybuje relativně nízko při spodní hranici vrstev navážek. Nemůžeme sice říct, jaké zde byly srážkové úhrny před výkopem sond, ale vše nasvědčuje minimálním úhrnům, protože na dvou místech nebyla hladina zachycena vůbec.

2.3.4 Ovlivnění hydrogeologie stavbami

Díky významnosti hradčanského ostrohu jakožto panovnického sídla, byly na jeho svazích stavěny měšťanské domy od období pozdního středověku. K tomu, aby mohla být stavba zahájena, byly vytvořeny umělé terasy na založení základů domů. Vnější nosné zdi na straně do svahu byly připojeny k terénu a využívaly tak skálu jako statickou oporu. Problémem byly prameny vytékající z obnažené skály a mířící tak do nosné zdi. Ovšem

díky vědomostem, které se do Čech dostaly spolu s Cisterciáky a Benediktiny ve 13. století, bylo možné vyřešit tyto problémy pomocí větracích a drenážních systémů (Řehák et al., 2019). V domech tak byly navrhovány systémy sběrných štol, které pak vedly do podzemních galerií, kde se voda hromadila. Odtud byla odváděna do kanalizačních stok, nebo se využívala jako zásobárna pitné vody pro obyvatele domů. Prameny, které nebyly lehce zachytitelné, bylo potřeba usměrnit pomocí vyražených štol ve skále (Řehák et al., 2019). Herichová (2019) zmiňuje štolu vedoucí k Hradu od studny na zahradě anglického velvyslanectví (bod 3 obr 1).

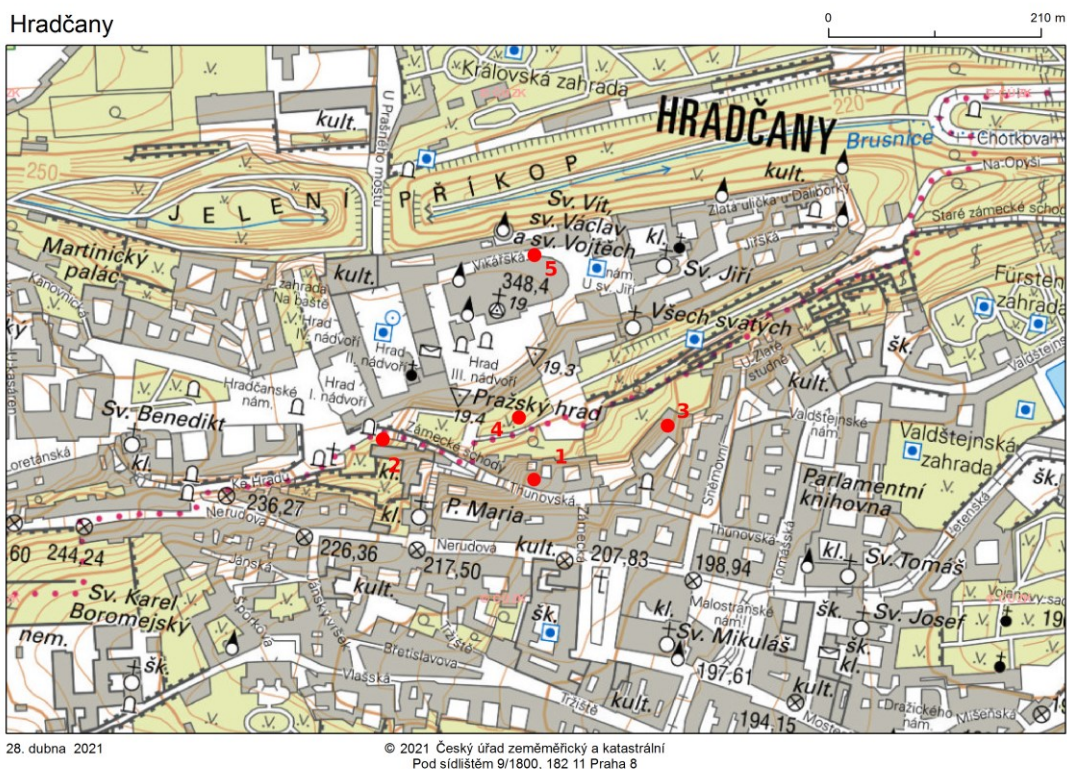
Problémem je, že v průběhu let byly tyto štoly a drenážní systémy zasypány sutí nebo vyplněny betonem, protože kvůli neznalosti jejich funkce byly považovány za nežádoucí. To ale znamenalo statické poškození staveb a také změnu proudění podzemní vody, která se začala vsakovat do zdí a základů budov. Díky tomu, že voda, která zde proudí, pochází ze srážek infiltrovaných výše na hradčanském ostrohu, dochází zde také k poškození kvůli složení vody. Ta může být díky síranům agresivní vůči stavebním konstrukcím a může docházet i k rekrytalizaci solí na povrchu zdiva. Všechny tyto stavební úpravy zároveň výrazně ovlivňují odtok na jižním svahu hradčanského ostrohu tím, že vodu odvádějí do kanalizace, nebo ji zachycují v cisternách. Navíc díky vybudování teras jsou zde vývěry pramenů, které by jinak za přírodních okolností pokračovaly dále pod povrchem a vynořovaly se až níže po svahu.

2.4 Hydrochemie oblasti

V literatuře z minulého století můžeme nalézt několik hydrochemických rozborů vod, které byly prováděny v součinnosti se stavebními pracemi a voda tak byla posuzována hlavně kvůli možné agresivitě na stavební konstrukce. Z těchto rozborů můžeme vyvodit, že voda, která se nachází v areálu Pražského hradu v horní vrstvě navážek, pochází ze srážek a je obohacována o jednotlivé kationty a anionty až v půdě. Například Řepka (1981) píše o rozboru provedeném u podpěrné patky na III. nádvoří takto: „Voda je málo mineralizovaná, měkká, alkalické reakce s převahou kationtů Na^+ , Ca^{2+} a aniontů HCO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} . Jde o vodu srážkového původu, která je tangována povrchovým ošetřováním dlažby v zimě (Na^+ , Cl^-) a průnikem neizolovanou dlažbou a propustnými betonovými stropy opěrné konstrukce.“ Voda je tak velmi ovlivňována městským prostředím a její složení závisí i na roční době.

Také Vágner (1967) píše o vodě, která vtékala do jímky pod sklepem domu čp. 185 (bod 1 na obr. 1) v Thunovské ulici, která má podle něj velkou síranovou agresivitu. Koncentrace síranů v rozboru dosahovala 1500 mg/l stejně jako u Šimka (1959), který ve své zprávě uvádí: „Agresivní bývají podzemní vody cirkulující po puklinách ordovických hornin obsahující až 1400 mg/l SO_4^{2-} .“ Takové zastoupení síranů zdůvodňuje ve své práci Drábková (2012) jako důsledek zvětrávání pyritu v ordovických horninách. Jako další látky, které mají zvýšenou koncentraci, uvádí Vágner dusičnany a dusitany. Ty by mohly pocházet z rozkladu živočišných a rostlinných látek obsažených v půdě.

Burgetová (2013), která dělala výzkum na mostním oblouku pod Zámeckými schody (bod 2 obr. 1), také zmiňuje vyšší obsah dusičnanů, který připisuje trusu koní, kteří se po komunikacích pohybovali a stále pohybují. Vyšší obsah sulfidů je zde zřejmě opět díky pyritu z podloží. Na oblouku mostní konstrukce se objevuje černá sádra, která má tloušťku 2–3 mm, a skládá se z jemnozrnných klastů tvořených od prachem až po jemnozrnný písek. Pod touto krustou probíhá rekrystalizace solí a následně dochází k poškození zdiva (Burgetová & Fořtová, 2013).



Obrázek č. 1 Situační mapa Hradčan. (1) Dům č.p. 185, (2) Oblouk mostní konstrukce pod zámeckými schody, (3) Anglické velvyslanectví, (4) Hartigovská zahrada, (5) Vikářská ulice. Zdroj podkladové mapy ČÚZK

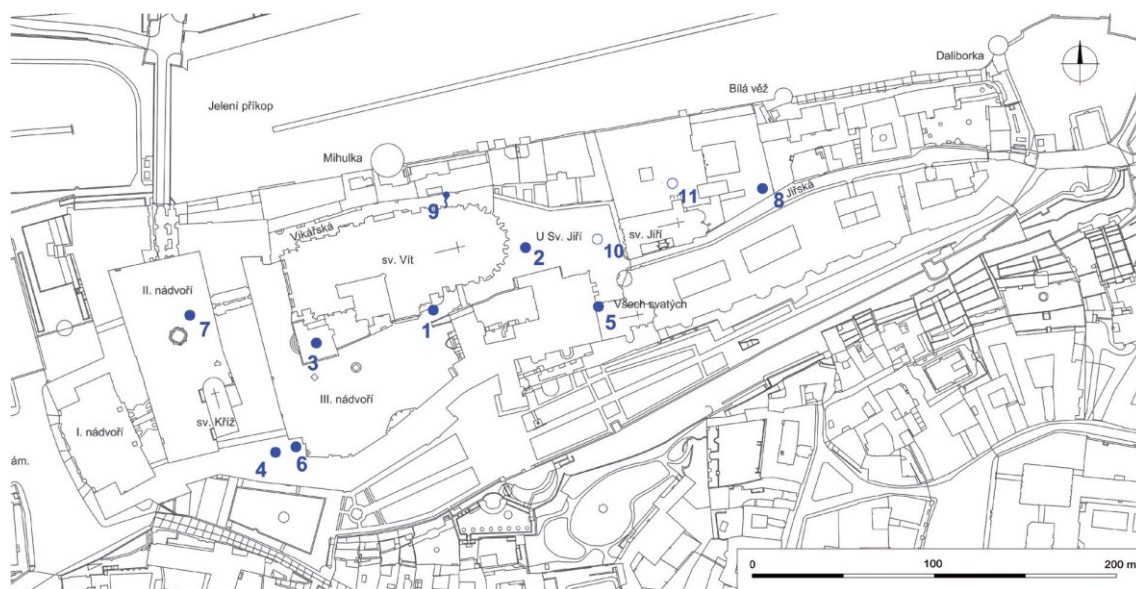
3 Ovlivnění hydrogeologie člověkem na Pražském hradě

3.1 Historie jímání vody na Pražském hradě

Vliv obyvatelstva na hydrogeologický režim je na Pražském hradě díky jeho dlouhé historii velmi značný, hlavně pak z hlediska podzemních staveb a inženýrských sítí. Prakticky žádný kus půdy, který leží na skalním břidlicovém podloží, není přírodního původu. Díky změnám ve složení a stavbě geologického podloží se voda v oblasti šíří jinak, než by bylo normální v přírodních podmínkách. Díky trvalému osídlení Pražského hradu bylo zapotřebí získávat pitnou vodu pro jeho obyvatelstvo, což bylo zajišťováno jímáním podzemní vody nebo zachycením vody atmosférické – ať už v podobě hloubených studní nebo zachytáváním srážek do cisteren (Herichová, 2019). Všechny tyto zásahy měnily zdejší hydrogeologické podmínky. K tomu, aby byla studna správně umístěna, bylo potřeba znát morfologii daného místa a podle toho postupovat. To v případě hradčanského ostrohu znamenalo počítat s ukloněním letenských vrstev.

Herichová ve své knize Vrch hradní z edice Castrum pragense (2019) zmiňuje celkem 11 historických míst, kde se v minulosti jímala podzemní voda. Osm z těchto

objektů je charakteru studny, dva jsou cisterny pro zachycení srážek a jeden odpovídá vývěru (viz obr. 2). Asi nejstarší z těchto objektů je cisterna na III. nádvoří takzvaná Svatováclavská studánka, která se tak nazývá pravděpodobně jen díky svému kruhovému tvaru. Dosahovala hloubky 2,63 m od okraje obezdívky z opukových kamenů (Herichová, 2019). Sbírala do sebe jen povrchové vody, a proto byla málo vydatná.



Obrázek č. 2 Znamé zdroje vody na Pražském hradě. Objekty zachované a zaniklé (doložené archeologickými nálezy). Studny (1–8), cisterny (10, 11), vývěr (9). Zdroj: Herichová, 2019

Na Jiřském náměstí byla objevena studna s kamenným roubením (bod 2 na obr. 2), jejíž hloubka dosahovala 4,3 m a průměr byl 1,6 m. Byla pravděpodobně napájena puklinovým pramenem, pro jehož vývěr byl na dně studny vyzděn výklenek. Podle stáří geologických vrstev, do kterých byla studna zahlobena, můžeme její vznik odhadovat na 13. století. Jako další byla objevena tzv. Románská studna nacházející se pod Bílou věží (bod 4 na obr. 2), která byla hluboká 7,5 m. Ta byla na rozhraní 12. a 13. století zasypana a voda v ní zmizela. Příčinou toho mohly být terénní práce v západní části Hradu. Dalším důležitým objektem je tzv. Hluboká studna (bod 6 na obr. 2), která byla v roce 1931 vyčištěna. V tu dobu výška hladiny dosahovala 49,5 m ode dna studny. Ve stejném roce, kdy proběhlo její vyčištění, bylo vyzorováno, že přítok do této studny byl roven 6 cm vodního sloupce za 24 hodin. (Herichová, 2019). Další studny, které jsou založením mladší, můžeme vidět na obrázku v oblasti II. nádvoří (bod 7 na obr. 2) a ve východní části kláštera sv. Jiří (bod 8 na obr. 2). Za zmínku stojí také studna v zahradě

anglického velvyslanectví (bod 3 na obr. 1), ze které je vedena hluboká štola směrem k Hradu napojená na silný pramen čisté vody.

3.2 Vodovody

3.2.1 Historie vodovodů

Pražský hrad byl vždy centrem moci a místní obyvatelé k životu potřebovali větší množství pitné vody než většina populace hlavně díky vybavení, jako byly stáje, kuchyně a úřady. Z minulé kapitoly ale víme, že pitné vody bylo ze zdrojů přímo na hradčanském ostrohu nedostatek. Tak vznikla myšlenka zásobovat hrad gravitačním vodovodem. V době středověku bylo vytvořeno několik větví a řadů, které se výrazně podepisují na proudění vody v okolí Pražského hradu i Pražském hradu samotném. Obrázek č. 3 ukazuje, kudy přibližně tyto vodovody vedly. Jako první byl postaven Břevnovský vodovod, který během své existence podstoupil rozšíření o prameny u osady Střešovic, a to v době renesance (Streit, 1960). Další nutnost rozšíření zásobování přišla s nástupem Habsburků na český trůn v roce 1526, a tak začala vznikat větev Zámeckého vodovodu. Během následujících let vlády Ferdinanda I. a Rudolfa II. se královský dvůr dále rozšiřoval, a tak se zvětšovaly i nároky na pitnou vodu. Za vlády Rudolfa II. začalo hledání 7 hlavních štol, které napájely Královský vodovod. Ten byl posledním vodovodem na pitnou vodu. Později vznikl ještě Příkopový vodovod, ten byl však určen pouze na užitkovou vodu pro Pražský hrad.



Obrázek č. 3 Schématický záznam průběhu historických štol, resp. Královského vodovodu jako celku, Zdroj: Dragoun in Závěrečná zpráva ČGS Řepka, 1975

3.2.2 Břevnovský vodovod

Břevnovský vodovod bral na začátku své existence za vlády Karla IV. vodu z oblasti Tejnky, Kajetánky a Malovanky z několika štol ústících výškově přibližně na úrovni dnešní Bělohorské třídy, která částečně sleduje bázi křídových sedimentů, a to někde mezi domy č.p. 220 až 260 (Čurda, 2006). Krchov (2006) o této oblasti píše: „V Břevnově si na nedostatek vody nemohli nikdy moc stěžovat. Z opukového a pískovcového podloží

petřínského svahu a svahu od střešovické strany prýštilo nemalé množství pramenů, které naši předkové uměli zužitkovat.“ Důkazem toho je i klášter v Břevnově, který využíval pro své potřeby pramen Vojtěška a další prameny už od svého založení kolem roku 993 (Čurda, 2006). Podzemní voda byla z těchto štol odváděna do akumulací nádrže pod Kajetánkou, kde k ní byla přimíchávána povrchová voda z potoka Brusnice. Tento tok má povodí dlouhé 4,5 km a dříve byl celý jeho průběh povrchový (Krchov, 2006). Dnes je ovšem jeho významná část vedena potrubím. Tento tok má povodí dlouhé 4,5 km a ústí do Vltavy.

Na začátku každé z větví Břevnovského vodovodu se nacházela sada jímacích štol, které sváděly vodu do soustavy rybníků na Kajetánce, které sloužily jako rezervoáry zadržující vodu, dle dnešních názvů: Kajetánka, Vincentinum a Kuklík. Buchtík (1973) uvádí: „Hlavním jímacím objektem pravděpodobně prvního hradního vodovodu byl jímka podchycený pramen Kajetánka s naměřenou vydatností $0,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ v roce 1963, který byl postupně přebudován v pramenný rybníček - akumulací nádrž, do které byla později zaústěna Brusnice.“ Tento údaj je uveden i v mnohem starší knize Divy staré Prahy od Streita (1960). Z Břevnova byla voda vedena potrubím pod Strahovskou bránou a Loretánskou ulicí až na III. nádvoří Pražského hradu, kde byl vodovod zaústěn do tzv. Orlí kašny (Čurda, 2006). Ta měla původně jiné místo, stála těsně při severní zdi jižního křídla, východně od balkonu, jak je zakreslena na plánu z roku 1733 (Rybařík, 2014). Čurda (2006) uvádí, že výškový rozdíl mezi akumulací nádrží na Kajetánce a výtokem v kašně činil 20 výškových metrů. Kašna měla přepad a rozváděla vodu dále do malostranských domů. Odpadní voda, která vznikala v Královském paláci, byla jímána a byly s ní proplachovány kanalizační stoky vedoucí dolů z hradčanského ostrohu směrem na Malou Stranu, k Vltavě nebo do hradního příkopu. Dodnes není známo, kudy přesně vedl a jestli je zcela nefunkční.

Dalším prokazatelně dokumentovaným jímacím objektem pro Břevnovský hradní vodovod je štola pod Bělohorskou třídou pod domem čp. 182. Má délku 27,8 m s ústím v nadmořské výšce 326 m n. m. (Řepka, 1975). Tu uvádí Cílek (2008) ve své knize a následně ho opravuje Vojtíš (Vojtíš, 1990) ve svém článku na stránce společnosti Nautilus. Píše: „Objekt L-19 Štola pod Bělohorskou ulicí pod domem čp. 182 v délce 27,8 m v 326 m n. m. byla popsána Šimkem 1958, rovněž ji zmiňuje Řepka 1985, ale nově nebyla nalezena. Tato štola byla jedním ze zdrojů tzv. Břevnovského hradního vodovodu (...) Bohužel tyto zdroje byly svou vydatností velmi malé a v případném

obnovení gravitačního svodu ku Hradu bránila pozdější zástavba a především stavba Strahovského tunelu. Proto jsme již nepřistoupili k jejich otevření, případně opětovnému využití.“ Z těchto dat vyplývá, že většina štol Břevnovského vodovodu je dnes pravděpodobně nefunkčních a jejich vliv na hydrogeologický režim Pražského hradu je považován za nulový.

3.2.3 Zámecký vodovod

Vodovod byl založen mezi lety 1540 až 1573 a byl využíván. Pavlánský (1927) o tomto vodovodu napsal: „Voda přivádí se ze 7 štol založených v křídovém pískovci na severním svahu stráně u Liboce, Veleslavína a Střešovic.“ V roce 1540 se podařilo studnaři Jiřímu Winklerovi zachytit pramen v tehdejší vsi Střešovice. Začal tedy s kopáním štoly, která byla dlouhá 7,7 m (Streit, 1960). Tato štola nebyla nijak vystrojená ani vyzděná, a tak se po několika letech zavalila. Bylo nutné ji vyčistit a ještě prohloubit, nově tak dosahovala délky 36,60 m. Štola se nacházela ve vinici zvané Andělka (Jásek, 1997). Tento nový Zámecký vodovod byl veden téměř po vrstevnici s minimálním spádem potřebným pro gravitační vodovod. Některé jeho části byly vedeny keramickým potrubím (Jásek, 1997) a Streit (1960) o vodovodu napsal: „Byl zřízen z dřevěných a hliněných trub světlosti 2 palce (5,08 cm). Dřevěné trouby byly spojovány pomocí kovových zděří nebo čepy. Kladly se do rýh hlubokých 5 až 6 stop (1,48 až 1,78 m) a obkládaly se jílem, aby se zvýšila těsnost trub i spojů a aby se celý řad zajistil proti posuvům.“ Zámecký vodovod ústil do Královské zahrady.

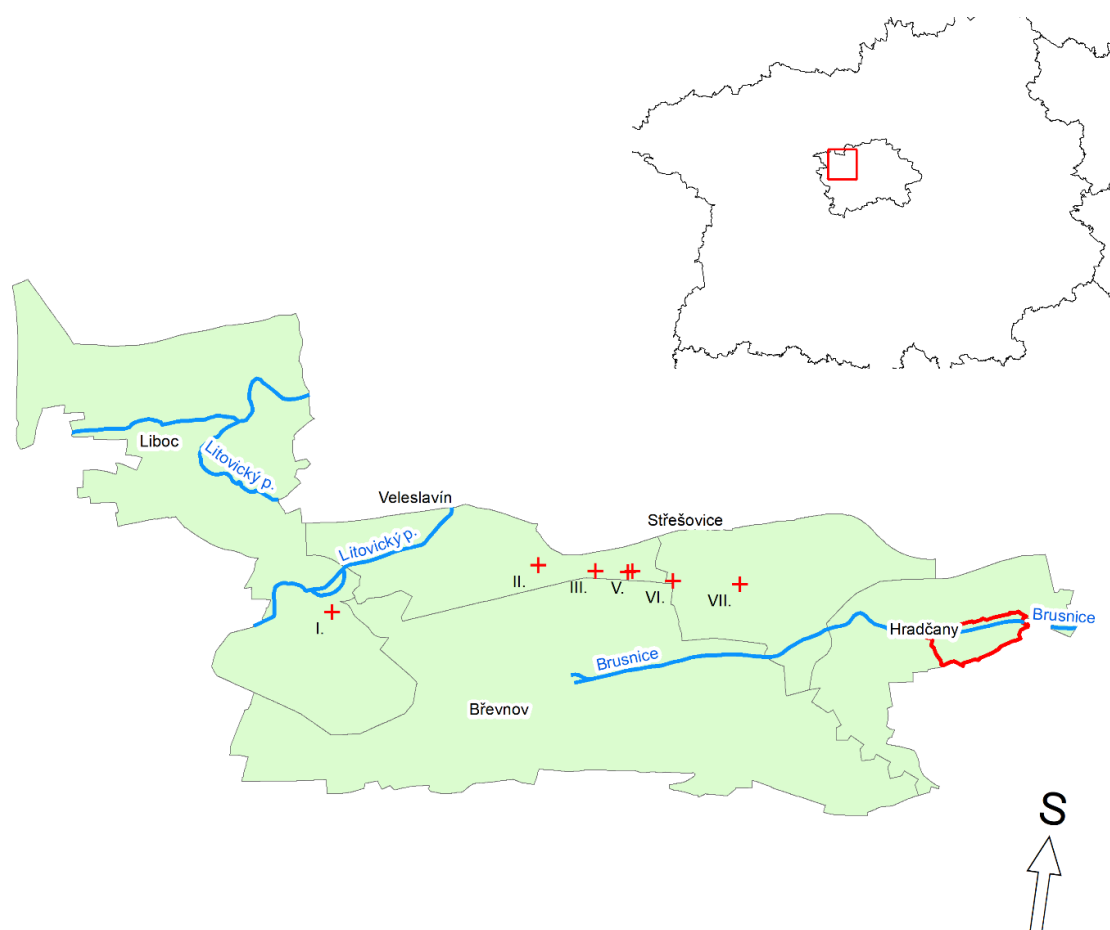
3.2.4 Královský vodovod

Kvůli zvýšeným nárokům byla založena druhá část hradního vodovodu, která vedla na severní stranu Střešovické tabule směrem k Veleslavínu, jak je vidět na Obrázku 3. Tato druhá část, nazývaná vodovodem Královským, byla značně rozšířena za vlády Rudolfa II., kdy se začalo s jímáním pramene Královka. Tento pramen byl sveden zvláštním řadem do zahrady Lažanských, kde byla voda vmíchána do hlavního řadu Královského vodovodu. Ten dosahoval v té době neuvěřitelných 4,73 km (Streit, 1960).





Královský vodovod napájelo (kromě pramene Královka) 7 hlavních štol. V dokumentu závěrečné zprávy České geologické společnosti (Budil et al., 2020) se uvádí toto (viz tabulka č 2):

Tabulka č. 2 Štoly královského vodovodu a jejich charakteristiky. Zdroj: Budil et al., 2020

Číslo štoly	Název štoly	Lokalizace	Délka	Vystrojení	Vydatnost	Kóta výtoku ze štoly
I.	Královka	čp. 360/2	97 m	vyzděná z cihel	5 l/s	325,5 m n. m.
II.	U Klapků	čp. 84/32	21 m		1,5 l/s	318,6 m n. m.
III.	U Bahenského	čp. 170/74	133 m	cihly	5 l/s	314,52 m n. m.
IV.	Pod Strnadem	čp. 420/29	59 m		4 l/s s průsakem	314,8 m n. m.
V.	Proti Strnadovi	čp. 417/27	20 m	strop cihly a boky stavební kámen	do 1 l/s	314,45 m n. m.
VI.	Před Bůzkem	parc. č. 2101	59 m	vysekána v pískovci následně vyzděná	2,2 l/s	314,45 m n. m.
VII.	Zasypaná	parc. č. 147	60-80 m			



Legenda

-  Vodní tok
-  Areál Pražského hradu
-  Městské části
-  Štoly

0 0,5 1 2 Km

Obrázek č.4 Schématická mapa štol Královského vodovodu. Zdroj: ČÚZK, Dibavod, Budil et al., 2020

3.2.5 Uživatelský vodovod

Tento vodovod byl napájen soustavou rybníků u obcí Chýně a Hostivice (Jásek, 1997). Voda tekla do Litovického potoka, ze kterého bylo oddělovačem odejmuto dostatečné množství vody do Markétského rybníka. Z toho pak voda tekla přes česle do otevřeného příkopu, který napájel zásobní rybník Bažantnice. Pak byla voda rozváděna dřevěným potrubím.

3.2.6 Königsmanka

Pavlánský (1927) píše ve své knize o dalším vodovodu jménem Königsmanka, který zásoboval pitnou vodou Hradčany a Malé Sirany. „Jímal vodu v Břevnově na Závěrce,

konkrétně z jednoho pramene z vinice Königsmanka, ze 7 okolních pramenů.“ Vodovod byl založen v roce 1792 a fungoval do roku 1904.

Hradní vodovody jsou nedílnou součástí místního podzemí a díky tomu se i významně podílejí na proudění podzemní vody. To, jestli nějakou vodu na Pražský hrad stále přivádí, není jisté, ale vzhledem k jejich malému prozkoumání ani nemožné. Je to velmi zajímavý kus historie pražského vodárenství a zároveň jasný činitel ve změně charakteru podzemí.

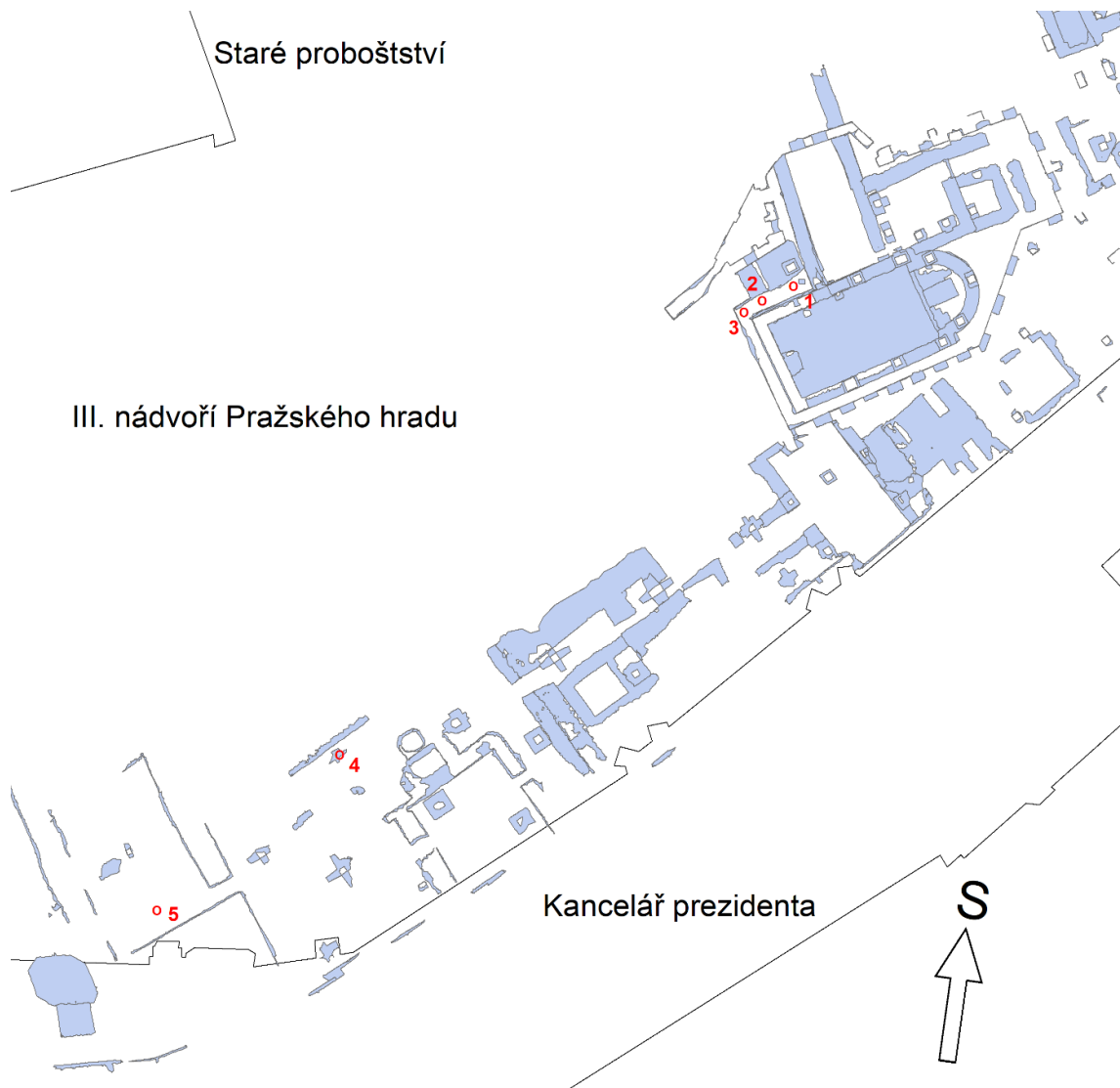
4 Metodika

4.1 Hydrogeologické mapování

Prvním krokem v mé vlastní práci bylo hydrogeologicky zmapovat archeologický areál pod III. nádvořím, abych mohl navrhnout další postup terénního výzkumu. Kvůli velmi rozličným názvům pro stavby a místa na Pražském hradě je často velmi obtížné dopátrat se umístění objektu nebo jeho dnešního názvu. Proto je třeba postupovat při rešeršování a mapovací části velmi opatrně a informace ověřovat z různě starých zdrojů. Na III. nádvoří jsem měl možnost si areál sám projít a lokalizovat tak 3 vrty označené na obr. č. 5 čísly 1, 4, 5. U vrtů jsem změřil jejich hloubku, vzdálenost zhlaví od terénu, průměr zhlaví a výšku hladiny (tabulka č. 3). Dalšími objekty, které jsem zaměřil a zaznamenal, byl drén vedoucí z torza románské zdi (obr. 5 bod 2), kaluž vytvořená u paty románské zdi přímo pod drénem (obr. 5 bod 2) a místo skapu vody pod komunikační lávkou (obr. 5 bod 3). Všechny tyto objekty se nacházejí v blízkosti vrtu A. U těchto objektů jsem, pokud to bylo možné, změřil teplotu vody, pH a konduktivitu.

Tabulka č. 3 Charakteristiky vrtů na II. nádvoří

	Materiál pažnice	hloubka [cm]	Průměr zhlaví [mm]	Zhlaví od terénu [cm]	Hladina zachycena
Vrt A	sklo	79	51	46	ano
Vrt B	železná	517	70	12	ne
Vrt C	železná	556	70	15	ne



Obrázek č. 5 Výsledky hydrogeologického mapování. (1) Vrt A, (2) Drén a Kaluž (hydrochemie), (3) Skap (hydrochemie), (4) Vrt B, (5) Vrt C. Zdroj: "Geografický informační systém. DSP, ČÚZK

4.2 Hydrodynamická zkouška

Čerpací zkoušku jsem prováděl 20. 8. 2020 za účelem zjistit vydatnost zdroje a následně vykonat i zkoušku stoupací, přičemž obě tyto zkoušky jsem dělal pouze na vrtu A. Do vrtu jsem zavedl čerpadlo a druhý konec hadice jsem vložil do odběrné nádoby o objemu 10 l. Průtok čerpadla se po celou dobu zkoušky nezměnil a byl stejný – 0,042 l/s. K čerpací zkoušce jsem používal čerpadlo SUBMERSIBLE 188. V příloze č. 1 přikládám popis zkoušek čerpadla, které jsem prováděl v laboratoři na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy. Čerpadlo bylo v terénu napájeno z autobaterie Aroso o napětí 12 V. Před začátkem zkoušky jsem změřil výšku hladiny, pH, teplotu, konduktivitu a následně jsem začal čerpat. Čerpal jsem vodu až do chvíle, dokud nedosáhlo snížení hladiny ve vrtu takové úrovně, že čerpadlo nemohlo odebírat další vodu. Když jsem čerpadlo vyjmul z vrtu, zapsal jsem si celkový vyčerpaný objem vody a opět hladinoměrem změřil výšku hladiny. Následně jsem znovu změřil pH, konduktivitu a teplotu vody. Do vrtu jsem umístil tlakové čidlo, pomocí kterého jsem měřil výšku hladiny, a zahájil jsem stoupací zkoušku. Do blízkosti vrtu jsem instaloval druhé čidlo se stejným nastavením, které měřilo tlak vzduchu, abych mohl tyto data následně využít k vyhodnocení. Hodnotu pH jsem měřil pomocí přístroje Oakton pHTester 30 a konduktivitu přístrojem WTW Cond 3310. Na obrázku č. 6 vidíme vrt A.



Obrázek č. 6 Vrt A. Vlastní foto autora

4.3 Odběry vzorků

Vzorky na hydrochemický rozbor byly odebrány z každého zdroje pouze jednou. Datum odběru vzorků je uvedeno v Tabulce č. 4. Odběr jsem prováděl pomocí vzorkovnice s filtrem 0,45 μm , díky kterému se voda přefiltrovala a následně byla uzavřena do plastové zkumavky. Chemické rozborby vzorků vody byly odeslány do Laboratoře geologických ústavů Univerzity Karlovy, která využívá k analýze tyto metody: titrace a emisní spektrometrie s indukčně vázanou plazmou (ICP OES), atomová absorpční spektrometrie (AAS) a vysoce účinná kapalinová chromatografie (HPLC). Vzorky jsem odebíral celkem z pěti lokalit, které spolu blízce sousedí. Byly to tyto lokality: vrt A (Vrt), prostřední drén vyvrtaný do románské zdi (Drenáž), skap z místa pod komunikační lávkou (Skap), stojatá kaluž u paty románské zdi (Kaluz u paty zdi) a také vzorek z hladiny, když se kaluž důsledkem srážek zvětšila a pokryla větší plochu (Kaluz kolem vrtu)¹. Na obrázku 7 a 8 vidíme místa odběru vzorků Skap a Kaluz u paty zdi a na obrázku 9 stav vody po větší srážkové události 15. 10. 2020, kdy se voda rozšířila až k vrtu A.

¹ Výrazy v závorkách odpovídají názvům chemických vzorků v tabulkách.



Obrázek č. 7 Odběrné místo Skap. Vlastní foto autora



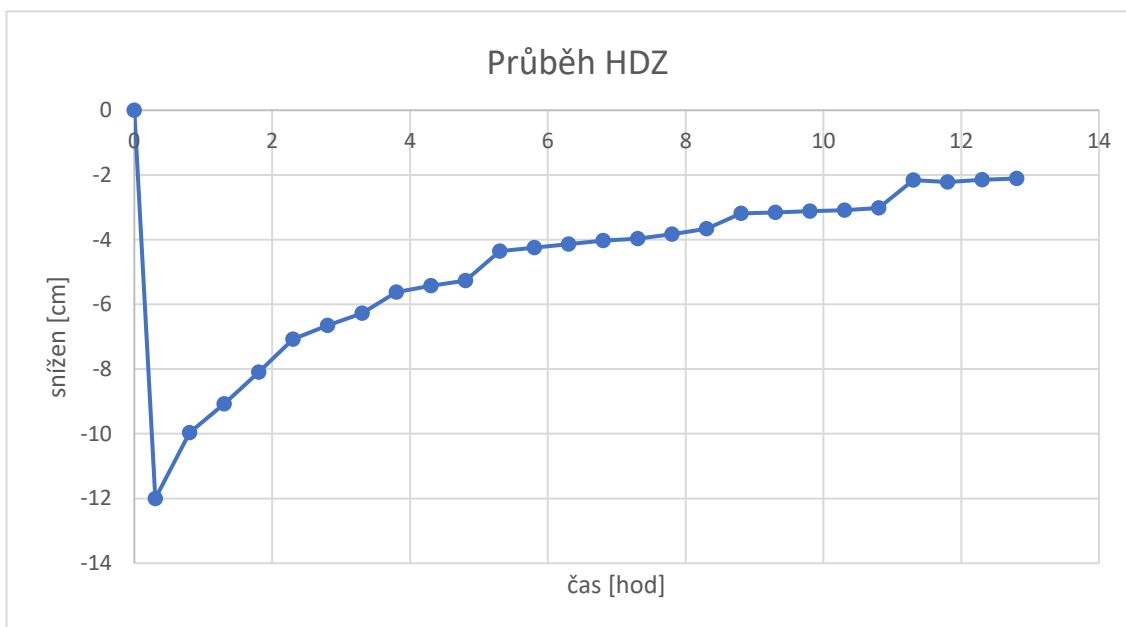
Obrázek č. 8 Odběrné místo Kaluž. Vlastní foto autora



Obrázek č. 9 Odběrné místo Kaluž kolem vrtu A – 15.10.2020. Vlastní foto autora

5 Výsledky

5.1 Výsledky hydrodynamické zkoušky



Graf č. 1 Průběh hydrodynamické zkoušky na vrtu A

Na grafu č. 1 můžeme vidět průběh hladiny ve vrtu při hydrodynamické zkoušce v závislosti na měnícím se čase. Osa x nám znázorňuje snížení hladiny v centimetrech a osa y pak čas v hodinách. Čerpání nám začíná v čase 0 a na výchozí hladině 0. Ta je rovna 63 cm od zhlaví vrtu. Na začátku vidíme snížení při čerpací zkoušce a hodnota hladiny po ukončení čerpání se dostává na -12 cm tedy 75 cm od zhlaví vrtu. Na úseku křivky čerpací zkoušky chybí na ose body snížení, protože vrt má tak malý průměr, že se dovnitř nedal instalovat hladinoměr a čerpadlo zároveň. Čerpací zkouška trvala 18,5 minuty a snížení dosahovalo 12 cm. Celkové vyčerpané množství vody činilo 47 litrů, což bylo více, než jsem očekával. Bohužel, vzhledem ke krátkému průběhu čerpací zkoušky by nebyly její výsledky vypovídající, proto jsem tuto zkoušku ani nevyhodnocoval.

Hlavní částí hydrodynamické zkoušky tedy byla stoupací zkouška, která je založena na určování transmisivity T z úseků grafu průběhu hladiny od začátku čerpání. Výhodou stoupací zkoušky je, že se dá provádět i ve vrtech, kde není možné dosáhnout uspokojivých výsledků z klasických čerpacích zkoušek, což byl i můj případ.

Transmisivita je veličina, která představuje rychlost, s jakou se šíří voda s danou hustotou a viskozitou skrze plochu horniny za čas (Hiscock & Bense, 2014). Určování transmisivity je založeno na jednoduché Theisově metodě, která se u stoupací zkoušky provádí tak, že se sleduje vzestup hladiny podzemní vody a následně se podle Theisovy rovnice vypočte transmisivita (Willmann et al., 2007):

$$T = 0.183 * \frac{Q}{m}$$

Stoupací zkouška probíhala ustáleně 12,5 hodiny po skončení čerpání a hladina se na svou původní hodnotu nevrátila. Zastavila se 2,4 cm pod původní výškou. Na hladinu před čerpáním, tedy 63 cm od zhlaví vrtu, hladina vystoupala až 29. 8. 2020 ve 12 hodin, po 9 dnech od začátku čerpání. Mezi tím však hladina kolísala a trend jejího pohybu tak nebyl pouze vzestupný, ale reagoval na srážkové události, které se odehrály mezi 20. 8. 2020 a 29. 8. 2020. Jako úsek k vyhodnocení stoupací zkoušky jsem vybral ten od začátku řady až do konce prvního souvislého stoupajícího úseku.

Stoupací zkoušku jsem vyhodnocoval z dat získaných z tlakových čidel umístěných uvnitř a vně vrtu, jejichž hodnoty jsem od sebe odečetl a výšku hladiny získal pomocí této rovnice:

$$H = (p_h - p_v) \times 10,19$$

kde H je hodnota hladiny

p_h je hodnota tlaku ve vrtu

p_v je hodnota tlaku mimo vrt

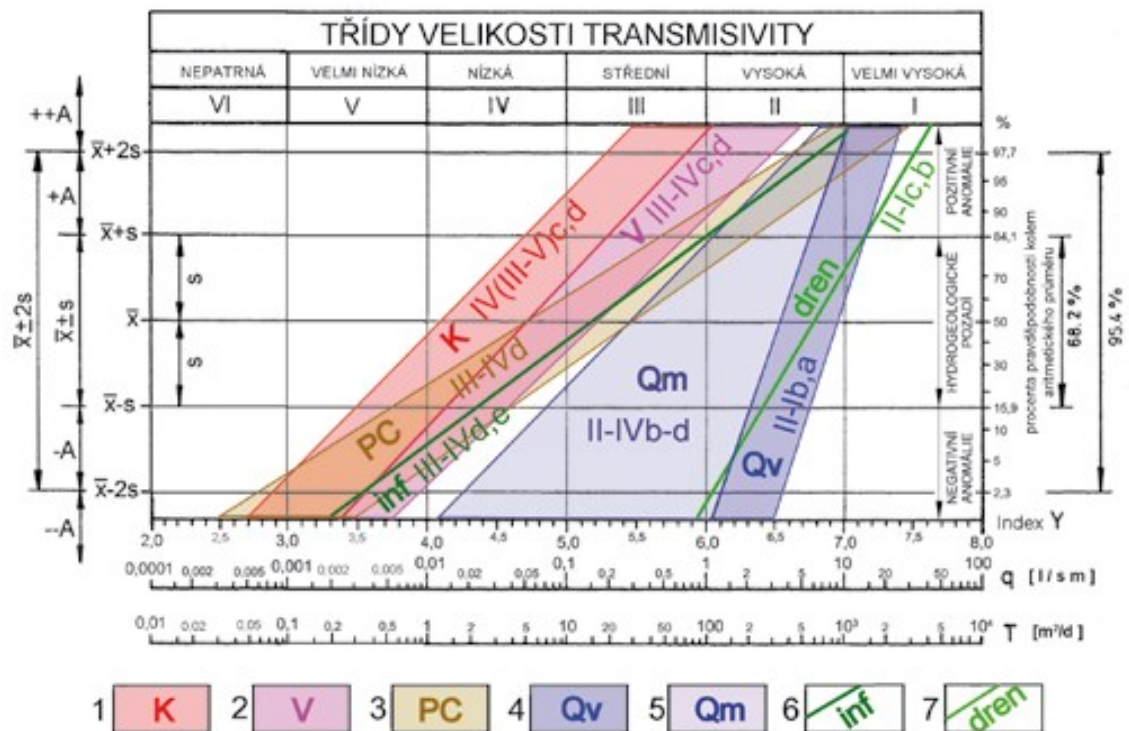
10,19 konstanta pro převod kPa na cm vodního sloupce

K vyhodnocení stoupací zkoušky jsem vytvořil graf, kde osa x představuje logaritmus t' a osa y pak snížení hladiny v mm, viz Graf 2 a Graf 3. Zde jsem zvolil dva úseky, které byly nejvíce přímkové, a jimi jsem proložil regresní přímku. Konstantu z rovnice regresní přímky jsem dosadil do vzorce pro výpočet transmisivity z Theisovy metody.

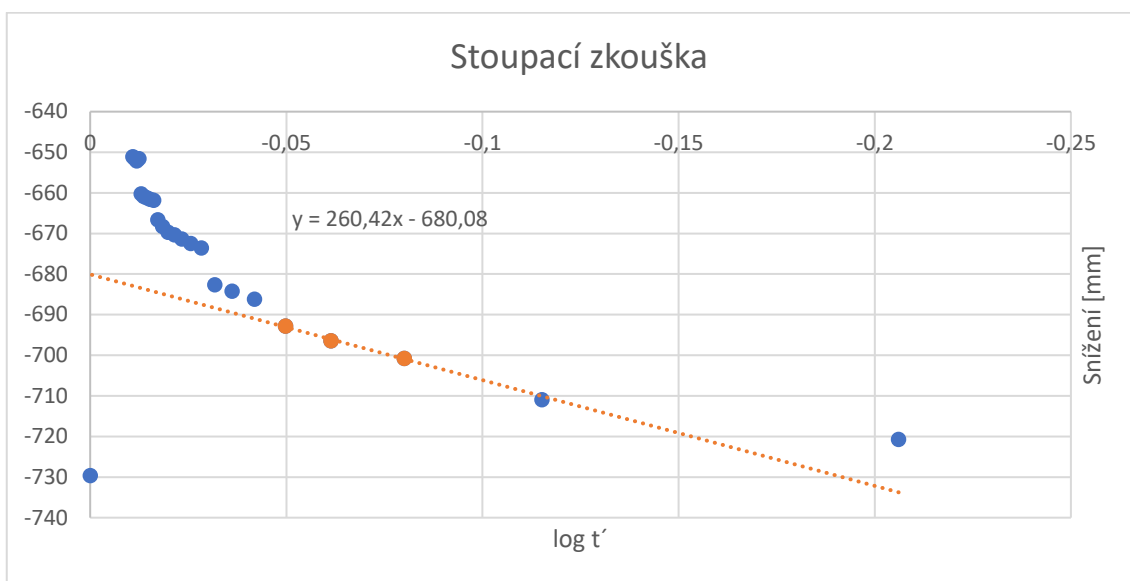
Transmisivita tak vyšla v prvním úseku $2,2 \times 10^{-8}$ m²/s a ve druhém úseku $1,6 \times 10^{-8}$ m²/s. Po přepočtu na m²/d dostáváme hodnoty $1,9 \times 10^{-3}$ m²/d a $1,4 \times 10^{-3}$ m²/d, což po zařazení do tabulky (obr. 10) v knize Podzemní vody České republiky na straně 858

(Krásný, 2012) odpovídá ještě o jeden řád menší hodnotě, než je hranice kolonky VI NEPATRNÁ. Za pomoci průměru vrtu jsem následně spočítal průtok do vrtu, který mi vyšel $1,5 \times 10^{-6}$ l/s. Tato hodnota se v tabulce shoduje s transmisivitou.

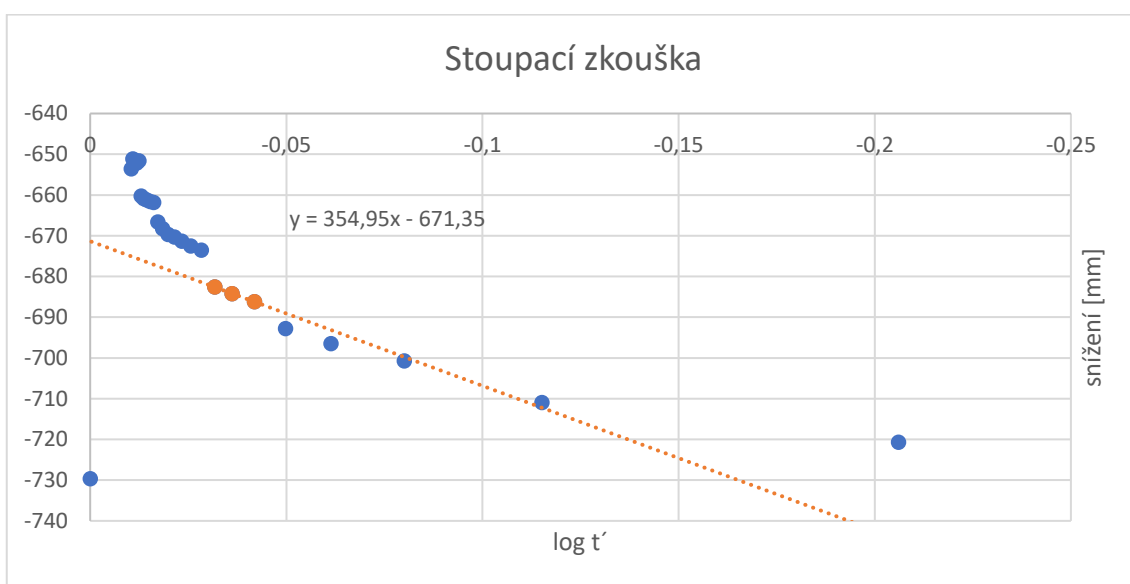
Můžeme tedy říci, že antropogenní navážky, které se na III. nádvoří nacházejí, mají koeficient průtočnosti obecně velmi malý a průtok těmito sedimenty je omezený touto hodnotou. Tyto výsledky jdou ovšem aplikovat pouze lokálně, protože složení vrstev se může i v rámci metrů velmi lišit.



Obrázek č. 10 Třídy velikostí transmisivity. Zdroj: Krásný & et al., 2012

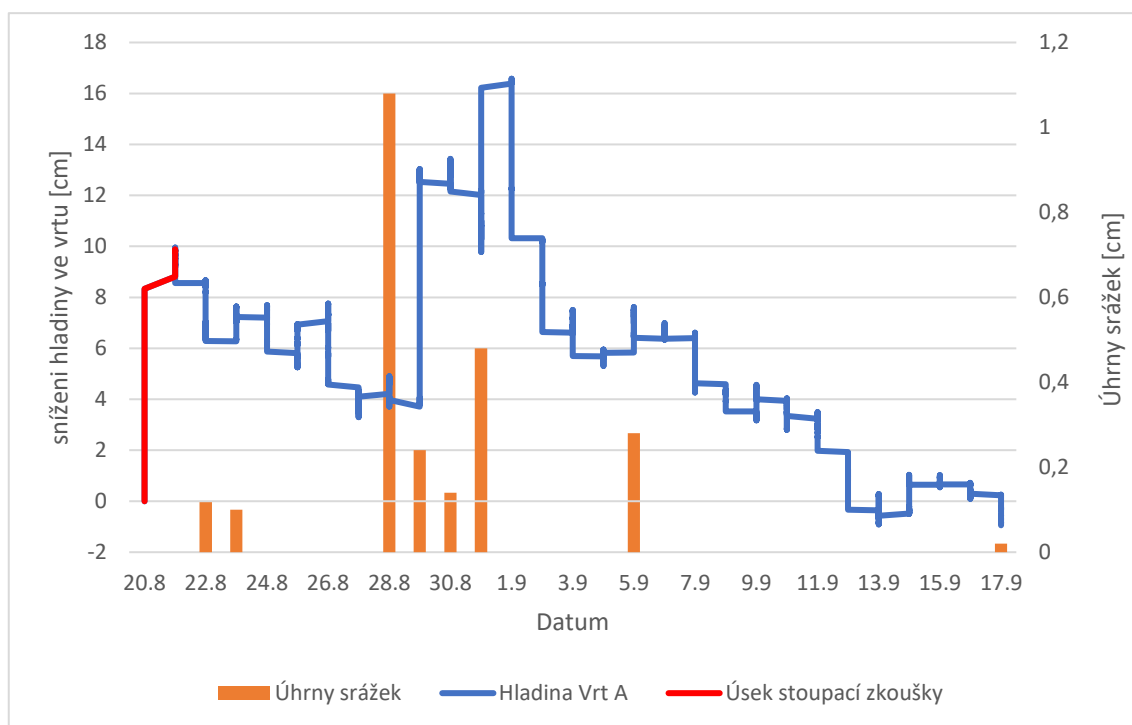


Graf č. 2 Vyhodnocení stoupací zkoušky– část 1



Graf č. 3 Vyhodnocení stoupací zkoušky– část 2

Na Grafu č. 4 můžeme vidět srovnání průběhu hladiny ve vrtu a denních úhrnů srážek v čase. Z grafu si můžeme všimnout souvislosti mezi srážkovými událostmi a pohybem hladiny ve vrtu. Je také patrné, že ačkoliv nebyly žádné srážky na území Prahy hlášeny, vyskytují se zde úseky, na kterých hladina stoupá. To se děje například 9. 9. 2020, kdy hladina stoupla během 6 hodin o více než 1 cm (více viz diskuze). Doba, která je mezi srážkami a reakcí hladiny, je přibližně jeden den. Dále pak můžeme z grafu odečíst, že pokud nedochází k dotaci, hladina klesá v průměru o 1,15 cm/den.



Graf č. 3 Průběh hladiny ve Vrtu A ve srovnání se srážkovými událostmi.

5.2 Hydrochemické výsledky

V tabulce č. 4 jsou uvedeny výsledky z hydrochemických rozborů. Celková mineralizace se pohybuje mezi 0,23 do 0,55 g/l, což je typické pro povrchové a podzemní vody ve slínovcích (Pitter, 2014). To sice odpovídá tomu, že hlavní složkou násypů je opuka, ale zde bude tato mineralizace zřejmě způsobena hlavně betonem, skrz který srážky protékají. Voda je obecně velmi zásaditá a vzorky jsou si dost podobné. Hlavními anionty jsou hydrogenuhličitan, anionty chloru a dusičnanů, nejvíce zastoupené kationty jsou draslík, sodík a vápník. Typy vod jsou si velmi podobné a díky tomu, že jsou místa odběru blízko sebe, liší se od sebe pouze v pořadí iontů. Obecně lze říci, že u podzemních vod (Vrt a Kaluž u paty zdi) se jedná o typ hydrogenuhličitano-kalio-nitrátový. U vzorků Drenáž a Kaluž u vrtu se vyměnily na druhém místě ionty draslíku za vápník a sírany. Všechna tato voda pochází ze srážek a je obohacována o ionty dle typu prostředí, kterým protéká. U vzorků Drenáž a Kaluž kolem vrtu chybí v rozboru HCO_3 a díky tomu je i výsledný typ vody a celková mineralizace menší².

² V tabulce č. 5 je u těchto vzorků uveden symbol * – laboratoří nebyla určena hodnota HCO_3 , která není započtena do celkové mineralizace. Ovšem vzhledem k ostatním typům vod a jejich příbuznosti se typ vody nebude lišit.

Vzorek Skap, který je odebrán z rohu pod komunikační lávkou, má celkovou mineralizaci nižší a také typ vody je odlišný od dalších dvou vzorků pod ním. Na třetím místě se zde nenacházejí dusičnany pravděpodobně kvůli tomu, že tato voda se nedostává do půdy, ze které se dusičnany uvolňují do vody. To, že voda protéká pouze zdivem a betonovým skeletem, je zároveň důvodem poloviční mineralizace oproti ostatním vzorkům. U zbylých čtyř vzorků můžeme vidět ve větším zastoupení draslík, chlor, sodík, dusičnany a vápník, což jsou hlavní anionty a kationty běžně zastoupené ve vodách. Důvod a původ jejich vyšších koncentrací rozebírám v Diskusi.

Tabulka č. 4 Výsledky hydrochemických rozborů

Místo odběru	Datum odběru	Typ vody	Celková mineralizace [g/l]	pH
Drenáž	15. 10. 2020	HCO ₃ * – K – Ca - Na	0,22	10,93
Kaluž kolem vrtu	15. 10. 2020	HCO ₃ * – K – SO ₄ – Na	0,29	10,42
Skap	17. 12. 2020	HCO ₃ – Na – K – Cl	0,24	10,23
Kaluž u paty zdi	20. 8. 2020	HCO ₃ – K – NO ₃ – Na	0,55	10,26
Vrt	20. 8. 2020	HCO ₃ – K – NO ₃ – Na	0,51	9,89

Tabulka č. 5 Koncentrace iontů ve vzorcích ve srovnání s hydrochemickým rozbořem srážek ze stanice Praha - Libuš

	Al [mg/l]	Ca [mg/l]	Fe [mg/l]	K [mg/l]	Mg [mg/l]	Mn [mg/l]	Na [mg/l]	Si [mg/l]
Srážky Praha-Libuš	–	0,21	0,03	0,036	0,024	0,002	0,08	–
Prostřední drén	0,60	38,23	0,00	71,97	0,03	0,01	36,39	22,14
Louže na povrchu u vrtu	0,59	40,05	0,01	75,56	0,04	0,01	40,99	21,20
Skap hrad	0,57	3,88	0,002	39,2	0,071	0,001	41,5	0,551
Louže	0,362	28,89	0,011	82,916	0,085	0,002	45,396	23,487
Vrt	0,281	19,339	0,013	82,717	0,309	0,002	47,864	24,96
F [mg/l]	Cl [mg/l]	Br [mg/l]	SO ₄ [mg/l]	NO ₃ [mg/l]	PO ₄ [mg/l]	HCO ₃ [mg/l]	pH	
0,004	0,139	–	0,736	1,376	–	–	5,03	
0,20	19,80	0,20	12,95	19,80	0,40	–	10,93	
0,20	21,87	0,20	58,95	24,44	0,40	–	10,42	
0,2	20,9034	0,2	7,0734	9,9556	0,4	114	10,23	
0,2	38,9336	0,2	36,5286	46,9222	0,4	240,95	10,26	
0,2	40,9117	0,2	36,8777	48,0753	0,4	205,875	9,89	

6 Diskuse

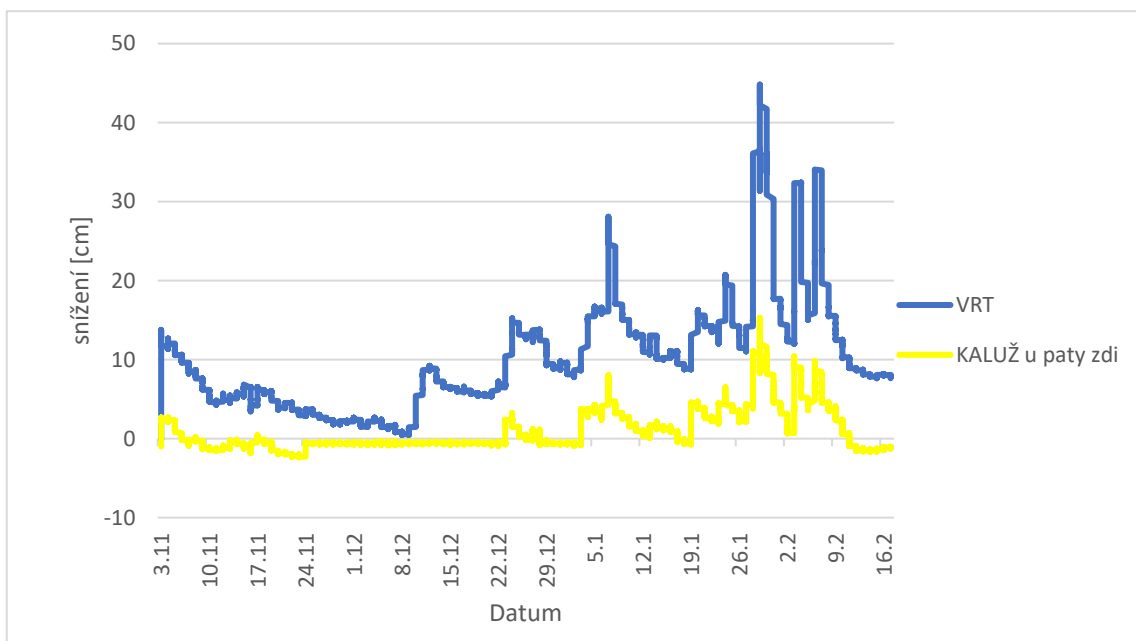
Ačkoliv jsem téma hradních vodovodů zpracoval v rešeršní práci z mnoha zdrojů, není zcela jasné, v jakém stavu jsou vodovody dnes. Jejich vedení bylo odkryto jen v pár úsecích o délce několika metrů. Je tedy možné, že toto potrubí je stále ve stavu, v němž může napomáhat k proudění vody směrem k Pražskému hradu. Každopádně, i za předpokladu, že by nevedly vodu přímo do areálu Pražského hradu a neovlivňovaly jej, tak může jít o zdroj vody a potencionálního ohrožení statiky staveb na celé jejich trase. Otázce, kudy přesně vodovody vedou a v jakém jsou dnes stavu, se, jak se zdá, doposud nikdo souhrnně nevěnoval.

Z hydrochemických rozborů plyne vcelku jasný závěr, a to že voda v místech mého odběru pochází výhradně ze srážek. Do tabulky č. 5 jsem pro srovnání zahrnul i průměrné hodnoty hydrochemického rozboru srážek ze stanice Praha-Libuš (ČHMÚ). Díky tomuto srovnání můžeme vidět, o co se voda obohacuje po tom, co se infiltruje do půdy. Hydrochemický rozbor, který provedl Řepka (1981) u základové patky na III. nádvoří, je sice z roku 1981, ale místo odběru je velmi podobné tomu mému, proto jsem si ho vybral k porovnání s mým vlastním rozbohem. Ačkoliv se naše místa odběru liší v čase o 39 let, mají společnou vysokou koncentraci vápníku, draslíku, sodíku, sloučenin chlóru, sloučenin dusíku a síranů. Prvky jako draslík a sodík jsou obvykle v poměru, kdy sodík převažuje nad draslíkem – tady tomu tak ale není. Způsobovat by to mohl například popel rostlin, kde je draslík v poměru 100:1 se sodíkem. Ten by mohl být obsažen v půdě díky ohništím. Dalším zdrojem draslíku a sodíku je lidská moč, protože denně člověk vyloučí 5 g Na a 2,2 g K. Odhaduji, že popel rostlin by zde mohl být hlavním činitelem vzhledem ke stáří osídlení na Pražském hradě. Naprosto jasným a průkazným zdrojem sodíku je posypová sůl používaná na III. nádvoří v zimním období.

Zdrojem vápníku je na třetím nádvoří velmi pravděpodobně cement, který je součástí betonu a ze kterého se vyluhuje do vody. Přírodní zdroj vápníku a křemíku jsou hlinitokřemičitany, které svým zvětráváním tyto prvky uvolňují. Tyto přírodní zdroje by ale nezpůsobovaly takovou mineralizaci. Sloučeniny chlóru, které se ve vodě pod III. nádvořím vyskytují, pochází pravděpodobně také z posypové soli používané v zimě na posyp komunikací. Malou koncentrací chlóru disponuje i lidská moč, která zde ale bude hrát minimální roli. Sloučeniny dusíku se do vody dostávají podle Pittera (2014) z rozkladu rostlinného nebo živočišného odpadu. Obecně lze předpokládat, že

v navážkách se vyskytují mnohé zbytky odpadu z hradních příbytků. Vyšší koncentraci síranů si můžeme vysvětlit městským prostředím. Pražský hrad se nachází v centru metropole a díky tomu je zde ve vzduchu obsaženo velké množství exhalací ze spalovacích motorů. Hydrogenuhlíčitany závisí na pH, tedy čím vyšší je pH a zásaditější voda, tím větší je koncentrace HCO_3^- . Tuto alkalitu, a tedy obsah HCO_3^- , způsobuje velmi pravděpodobně beton, který je zde vyluhován srážkovými vodami. Tomu nasvědčují i krasová brčka v rohu pod komunikační lávkou, kde vzniká výluh síranu vápenatého (Hynková & Bednářová, 2011).

Na Grafu č. 5 můžeme vidět porovnání průběhu hladin ve Vrtu a v Kaluži u paty zdi. Pomocí Pearsonova korelačního koeficientu ($r = 0,92$) vidíme, že závislost hladin je velmi vysoká. Z grafu vyčteme, že hladina ve Vrtu více kolísá, což může být způsobeno jeho hloubkou a větším hydraulickým kontaktem s okolím. Kaluž je sycena pravděpodobně hlavně z drenů vyvrtaných v románské zdi přímo nad ní.



Graf č. 5 Srovnání průběhu hladiny ve vrtu A a v Kaluži u paty zdi

V kapitole 5.1. Výsledky hydrodynamické zkoušky se věnují Grafu č. 4, kde se 9. 9. 2020 ukazuje stoupanutí hladiny o 1 cm během 6 hodin. Tato událost je zcela výjimečná, protože před tímto dnem nedošlo 3 dny k žádné srážkové události na žádné stanici v Praze. Tento vzestup hladiny je tedy závislý na jiném dotačním zdroji. K tomu by mohl být relevantní komentář ze zprávy Řepky (1976): „Kromě toho komplikují situaci možné průsaky z inženýrských sítí, kanalizací a dešťových svodů, které mohou způsobit lokální

kumulace podzemní vody.“ Je tedy možné, že se na tomto zvýšení podílí voda, která unikla díky průsaku z kanalizace nebo která se sem dostala z jiného místa pomocí preferenčního proudění po zónách s větší propustností, jako mohou být obsypy všech inženýrských sítí. Toto vše jsou ale jen mé odhady, které nejsou podloženy žádným měřením.

Zvodeň, na kterou je napojen Vrt A je pravděpodobně omezena pouze lokálně pod tímto vrtem a jde o zvodeň zavěšenou. K tomuto závěru jsem došel díky datům z dalších dvou vrtů na III. nádvoří. U vrtu B a C totiž nebyla zachycena hladina a jejich hloubka odpovídá pouze mocnosti navážek. Jejich pažnice však pravděpodobně není perforovaná, a tudíž sem voda z hloubky jednoho metru (což je hloubka vrtu A) nemůže proniknout. Otázkou tedy zůstává, jak moc je tato zvodeň lokální. Zda se nachází pouze v okolí několika málo metrů kolem vrtu A anebo zasahuje do větších vzdáleností. Odpovědí na tuto otázku by mohla být viditelná vlhkost terénu kolem vrtu A a skutečnost, že takové podmínky už jinde v archeologickém areálu nevidíme. To by mohlo znamenat pouze velmi lokální zdroj. K dalšímu výzkumu bych ale navrhol podniknout invazivní metodu nových pozorovacích vrtů v několika lokalitách na III. nádvoří, kde je viditelná prosakující voda nebo je zde evidentní vlhká půda.

Podle dlouhodobého pozorování vývoje hladiny můžeme určit, že voda, která je obsažena v antropogenních navážkách, je z většiny srážkového původu, protože její hladina se pohybuje v reakci na srážkové události. Díky tomu se dá v průběhu sledování vyloučit dotace z jiného zdroje. Nicméně v dostupné literatuře se mluví o několika zdrojích podzemní vody, které jsou dotovány z ordovické zvodně letenských vrstev. Například Vágner (1967) zmiňuje přítok do hluboké Rudolfovy studny. Tato voda ale pravděpodobně neovlivňuje hydrogeologický režim ve svrchních vrstvách půdy, protože se mezi těmito dvěma horizonty nachází izolátor z jílových eluvií. Ze zpráv Řeháka (2017; 2019) a Burgetové (2018; 2015; 2013) je jasné, že voda, která proudí v puklinovém systému letenských vrstev odtéká dál po směru hydraulického gradientu, a to do nižších částí svahu hradčanského ostrohu. Tam se objevuje většinou ve formě vývěru anebo skapu ve sklepeních budov. Archeologický areál a jeho objekty jsou tak nejvíce ovlivněny vodou obsaženou v navážkách.

7 Závěr

Podzemní voda se dle literární rešerše i vlastního průzkumu v areálu Pražského hradu zdržuje na dvou úrovních. První je mělký kvartérní horizont v antropogenních navážkách, které jsou tvořeny úlomky opuky a dalších stavebních materiálů, druhý pak v rámci letenských vrstev, kde se voda pohybuje po puklinách. Z terénních měření vyplývá, že voda z ordovické zvodně není na III. nádvoří v oblasti kolem vrtu A v kontaktu s horizontem v antropogenních sedimentech, protože se jedná o lokálně zavěšenou zvodně. Kolektor v sedimentech je sycen ze srážek, které se zde infiltrují poté, co se dostanou skrz bariéru v podobě betonového skeletu pokrývajícího celé III. nádvoří. Přes ten se dostávají mezi spárami a u líců staveb. Tento pochod výrazně ovlivňuje pH vody a její mineralizaci, když se při vyluhování betonu výrazně zvyšuje alkalita a snižuje koncentrace hydrogenuhličitanů a vápníku. Tato voda se pak zasakuje do navážek, kde pravděpodobně dochází k jejímu obohacení o zde přítomný draslík a dusičnany.

Z provedené stoupací zkoušky jsem zjistil, že transmisivita navážek se pohybuje okolo hodnoty $1,9E-03 \text{ m}^2/\text{d}$ a $1,38E-03 \text{ m}^2/\text{d}$. Tato transmisivita je velmi nepatrná a ukazuje tak na nízkou průtočnost. To znamená, že schopnost průtoku je u těchto vrstev velmi malá. Vrt A byl sledován i po ukončení hydrodynamické zkoušky a z měření usuzuji, že srážky jsou hlavním zdrojem dotace. Ovšem díky stoupání hladiny ve vrtu i mimo srážkové události je zřejmé, že se na dotaci vrtu podílí ještě další zdroj. Tady je místo pro další rozšíření práce, protože tento zdroj nebyl objasněn. V úvahu ale přicházejí v práci zmiňované vodovody na pitnou vodu, které nebyly zcela jasně odkryty. Dalším možným zdrojem jsou úniky z kanalizace díky špatnému stavu těsnění anebo díky trhlinám v potrubí.

Pro ochranu archeologického areálu je tak velmi důležité dbát na kontroly technického stavu okapních svodů, kanalizací a také dalších míst, kde se voda při srážkových událostech hromadí a vniká do podzemní části nádvoří. Tato práce je pouhým úvodem do tak rozsáhlé problematiky, jako je hydrogeologie areálu Pražského hradu. Dalšími kroky práce, které by bylo nutno podniknout pro lepší a ucelenější obrázek, by bylo rozšířit svůj pohled na celé Hradčany a více se zaměřit na práci v terénu.

8 Zdroje

8.1 Literatura

BUDIL, Petr, Stanislav ČECH, Jan ČURDA a Jan FRANĚK. *Zhodnocení navržených variant nového propojení železničních stanic Praha-Dejvice a Praha-Veleslavín ve vztahu ke geologické stavbě zájmového území reprezentované vytvořeným koncepčním 3D geologickým modelem* [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-1-27].

BUCHTÍK, Jaroslav. *Pražský vodovod: Historie a současnost: Výstavba a výhled: Historie a současnost*. SNTL, 1973.

BURGETOVÁ, Eva a Kristina FOŘTOVÁ. *Survey of the part of medieval fortification system of prague lesser town*. Advanced Materials Research [online]. 2013, 688, 100-104 [cit. 2021-2-23]. ISBN 9783037856796. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.688.100

BURGETOVÁ, Eva, Kristýna MICHALOVÁ a Lukáš BALÍK. *Rehabilitation of historical drainage and ventilation system in the Prague Castle area*. Key Engineering Materials [online]. 2018, 776 KEM, 191-196 [cit. 2021-2-22]. ISBN 9783035713619. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.776.191

BURGETOVÁ, Eva a Kristýna MICHALOVÁ. *A Survey of Historic Galleries in the Area of the Prague Castle*. Advanced Materials Research [online]. 2015, 1122, 61-64 [cit. 2021-2-24]. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1122.61

CÍLEK, Václav, Milan KORBA a Martin MAJER. *Podzemní Praha: [jeskyně, doly, štoly, krypty a podzemní pískovny velké Prahy]*. Praha: Eminent, 2008.

JAN, Čurda. *Jubilující Břevnov očima hydrogeologa*. In: Zprávy o geologických výzkumech v roce 2006 [online]. Česká geologická služba, 2006, s. 187-191 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/img/zpravyvyzkum/fulltext/2006-str.187-191.pdf>

DRÁBKOVÁ, Jana. *Režim a chemismus podzemních vod v širším okolí trasy metra A*. 2012. Bakalářská práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inž. geologie a užité geofyziky. Vedoucí práce Bruthans, Jiří.

HERICHOVÁ, Iva. *Vývoj georeliéfu Pražského hradu v raném středověku a jeho význam pro poznání počátků pražské sídelní aglomerace*. Praha, 2015. Dizertační práce. Univerzita Karlova, Filozofická fakulta, Ústav pro archeologii. Vedoucí práce Cílek, Václav.

HERICHOVÁ, Iva. *Castrum pragense*. Praha: Archeologický ústav AV ČR, 2019, s. - 172, 172 s. ISBN 9788075810199.

HIBBS, Barry J. a John M. SHARP. *Hydrogeological impacts of urbanization*. Environmental and Engineering Geoscience [online]. 2012, 18(1), 3-24 [cit. 2020-11-7]. Dostupné z: doi:10.2113/gsegeosci.18.1.3

HISCOCK, Kevin M. a Victor F. BENSE. *Hydrogeology - Principles and practice*. 2014, s. -505, 505 s. ISBN 9781626239777.

HYNKOVÁ, Alena a Petra BEDNÁŘOVÁ. *Koroze betonu*. Littera scripta [online]. 2011, 1(4), 231-237 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: https://www.littera-scripta.com/wp-content/uploads/2019/05/1_PDFsam_5_PDFsam_upravit.pdf

CHLUPÁČ, Ivo. *Geologická minulost České republiky*. Vyd. 2., opr. Praha: Academia, 2011. Neživá příroda. ISBN 978-80-200-1961-5.

JÁSEK, Jaroslav. *Klenot města: historický vývoj pražského vodárenství*. Praha: Atelier VR, 1997. ISBN 80-238-1055-3.

KOS, Jiří. *Stavební stav a základové poměry chrámu sv. Víta na Pražském hradě*. Geofond: p20270, 1965, 16 s.

KOS, Jiří. *Zpráva o geologických poměrech území Pražského hradu*. Geofond: p20270, 1967, 19 s.

KOVANDA, Jiří. *Neživá příroda Prahy a jejího okolí*. Praha: Academia, 2001. ISBN 80-200-0835-7. Dostupné také z: <http://www.monet.cz/atlas/>

KRÁSNÝ, Jiří. *Podzemní vody České republiky: regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. Praha: Česká geologická služba, 2012, 1143 s. ISBN 978-807-0757-970.

KRCHOV, Pavel. *Kolem potoka Brusnice*. In: Břevnovan [online]. 2006, s. 11 [cit. 2020-11-2]. 17. Dostupné z: <http://brevnovan.obadalek.cz/>

ODEH, Taleb, Alsharifa Hind MOHAMMAD, Hussam HUSSEIN, Mamoon ISMAIL a Thair ALMOMANI. *Over-pumping of groundwater in Irbid governorate, northern Jordan: a conceptual model to analyze the effects of urbanization and agricultural activities on groundwater levels and salinity: a conceptual model to analyze the effects of urbanization and agricultural activities on groundwater levels and salinity*. Environmental Earth Sciences [online]. Springer Berlin Heidelberg, 2019, 78(1), 1-12 [cit. 2020-11-24]. ISBN 0123456789. Dostupné z: doi:10.1007/s12665-018-8031-0

PAVLÁNSKÝ, Jaroslav. *Vývoj zásobování vodou hlavního města Prahy od XV. století do konce roku 1927*. Praha: Vodárny hlav. města Prahy, 1928, 74 s. Předneseno ve výtahu na VIII. sjezdu Plynárenského a vodárenského sdružení čl. v Praze r. 1927.

PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. 4., aktualiz. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2009. ISBN 978-80-7080-701-9.

RYBAŘÍK, Václav. *Pražské kamenné kašny, fontány a pítka II*. Kámen [online]. 2014, 3 [cit. 2021-1-17]. Dostupné z: http://www.revuekamen.cz/prazske_kasny_II.htm

ŘEHÁK, Jakub, Eva BURGETOVÁ a Josef ŘEHÁK. *Moisture survey of former convent in the vicinity of Prague castle*. Key Engineering Materials [online]. 2017, 731 KEM, 74-79 [cit. 2021-2-15]. ISBN 9783035711387. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.731.74

ŘEHÁK, Jakub, Eva BURGETOVÁ, Josef ŘEHÁK a Stanislav ŘEHÁK. *Reconstruction of the Monastery Next To the Prague Castle*. Acta Polytechnica CTU Proceedings [online]. 2019, 21, 33-37 [cit. 2021-2-20]. Dostupné z: doi:10.14311/app.2019.21.0033

ŘEPKA, Ladislav. *Závěrečná zpráva o inženýrsko-geologickém a hydrogeologickém průzkumu pro stavbu kolektoru v oblasti severního parkánu na PH*. Praha: Stavební geologie Praha, 1975, 18 s. Archiv ČGS Geofond: p71418.

ŘEPKA, Ladislav. *Pražský hrad – úsek jih*. Praha: Stavební geologie Praha, 1976. Archiv ČGS Geofond: p87274.

ŘEPKA, Ladislav. *Zpráva o inženýrsko-geologických a základových podmínkách podzemních konstrukcí na III. nádvoří Pražského Hradu*. Stavební geologie Praha, 1981, 20 s. Archiv ČGS Geofond: p44143.

SCHIRMER, Mario, Sebastian LESCHIK a Andreas MUSOLFF. *Current research in urban hydrogeology - A review*. Advances in Water Resources [online]. Elsevier, 2013, 51, 280-291 [cit. 2021-1-24]. Dostupné z: doi:10.1016/j.advwatres.2012.06.015

STREIT, Jiří. *Divy staré Prahy* [online]. Praha: Mladá fronta, 1960, s. -342, 342 s. [cit. 2021-1-24]. PK-0018.645-60. Dostupné z: <https://ndk.cz/view/uuid:b9c8f620-4e9c-11e8-afec-005056827e51?page=uuid:b3e677e0-7571-11e8-9588-5ef3fc9bb22f>. Místo uložení: Moravská zemská knihovna v Brně.

ŠIMEK, Rudolf. *Zpráva o inženýrsko-geologickém mapování části severozápadního území Prahy*. Zprávy o geologických výzkumech v roce 1959. Praha: Ústřední ústav geologický, 1959, s. 159-160.

VÁGNER, Jiří. *Posudek o hydrogeologický poměrech v prostoru jižních svahů hradčanského návrší*. Praha: Inženýrsko-geologický a hydrogeologický průzkum n. p. Žilina, 1967, s. -10, 11 s. Archiv ČGS Geofond: p13557.

VALENTOVÁ, Jana. *Hydraulika podzemní vody*. Praha, 1994, 158 s. ISBN 80-01-01167-4.

VOJÍŘ, Vladimír. *Nautilus: agentura pro poznání země* [online]. Praha: Vladimír Vojíš, 1990 [cit. 2021-2-27]. Dostupné z: <https://www.nautilus.cz/>

WILLMANN, Matthias, J. CARRERA, X. SÁNCHEZ-VILA a E. VÁZQUEZ-SUÑÉ. *On the meaning of the transmissivity values obtained from recovery tests*. Hydrogeology Journal [online]. 2007, 15(5), 833-842 [cit. 2021-3-12]. Dostupné z: doi:10.1007/s10040-006-0147-8

WONG, Corinne I., John M. SHARP, Nico HAUWERT, Jeffery LANDRUM a Kristin M. WHITE. *Impact of urban development on physical and chemical hydrogeology*. Elements [online]. 2012, 8(6), 429-434 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: doi:10.2113/gselements.8.6.429

YANG, Jin Ling a Gan Lin ZHANG. *Water infiltration in urban soils and its effects on the quantity and quality of runoff*. Journal of Soils and Sediments [online]. 2011, 11(5),

751-761 [cit. 2020-11-23]. ISBN 1136801103561. Dostupné z: doi:10.1007/s11368-011-0356-1

8.2 Datové zdroje

DSP: *Geografický informační systém. Databáze stavebních prvků* [online]. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v. v. i., Archeologický ústav AV ČR, Praha, v. v. i., ©2020 [cit. 2021-4-26]

ČHMÚ: *Český hydrometeorologický ústav, historická data* [online]. [cit. 2021-3-115]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz>

ČÚZK: *Geoportál, prohlížeč služby – WMS* [online]. [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://geoportal.cuzk.cz/>

DIBAVOD: *Digitální báze vodohospodářských dat*, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka [online]. [cit. 2021-4-12]. Dostupné z: www.dibavod.cz

9 Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Situační mapa Hradčan.

Obrázek č. 2: Znamé zdroje vody na Pražském hradě.

Obrázek č. 3: Schématický zákres průběhu historických štol, resp. Královského vodovodu jako celku.

Obrázek č. 4: Schématická mapa štol Královského vodovodu.

Obrázek č. 5: Výsledky hydrogeologického mapování.

Obrázek č. 6: Vrt A

Obrázek č. 7: Odběrné místo Skap

Obrázek č. 8: Odběrné místo Kaluž

Obrázek č. 9: Odběrné místo Kaluž kolem vrtu A – 15.10.2020

Obrázek č. 10: Třídy velikostí transmisivity.

10 Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Seznam sond ve Vikářské ulici.

Tabulka č. 2: Štoly královského vodovodu a jejich charakteristiky.

Tabulka č. 3: Charakteristiky vrtů na II. nádvoří.

Tabulka č. 4: Výsledky hydrochemických rozborů.

Tabulka č. 5: Koncentrace iontů ve vzorcích ve srovnání s hydrochemickým rozbořem srážek ze stanice Praha – Libuš.

11 Seznam grafů

Graf č. 1: Průběh hydrodynamické zkoušky na vrtu A

Graf č. 2: Vyhodnocení stoupací zkoušky– část 1

Graf č. 3: Vyhodnocení stoupací zkoušky– část 2

Graf č. 4: Průběh hladiny ve Vrtu A ve srovnání se srážkovými událostmi

Graf č. 5: Srovnání průběhu hladiny ve vrtu A a v Kaluži u paty zdi

12 Přílohy

12.1 Příloha č. 1 Laboratorní zkoušky čerpadla SUBMERSIBLE 188

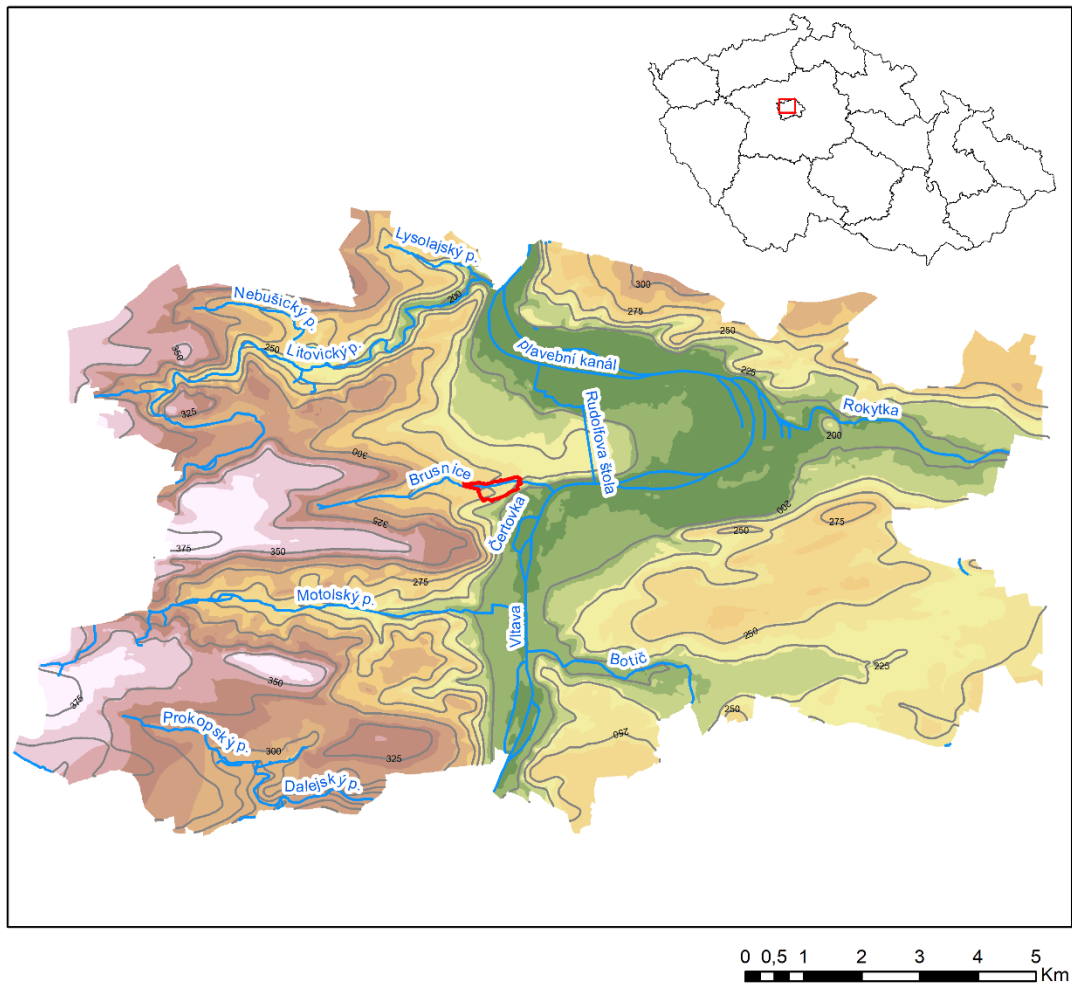
Čerpadlo SUBMERSIBLE 188 jsem si zajistil v laboratoři Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky. Hlavním parametrem při výběru čerpadla byl malý průměr vrtu, který je 51 mm. U čerpadla bylo zapotřebí zjistit vydatnost v různých výškách a zjistit tak využitelnost k čerpací zkoušce. Čerpadlo bylo napájeno autobaterií značky Aroso o výkonu 12 V. V laboratoři jsem čerpadlo umisťoval celkem do čtyř různých výšek a měřil čas za který se přečerpá voda o objemu 0,5 l. Všechna měření jsem prováděl třikrát a výsledky jsem následně zprůměroval aritmetickým průměrem. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce

Tabulka č. 1 Výsledky ze zkoušek čerpadla SUBMERSIBLE 188




Umístění válce (vertikální směr)	Čas čerpání [s]	Velikost válce[ml]
0 m	13,5	500
0,4 m	14	500
1,1 m	15	500
1,5 m	16	500

12.2 Příloha č. 2 Topografická mapa zájmové oblasti

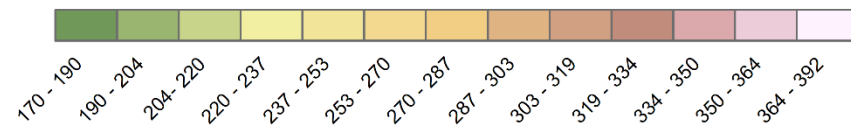
Topografická mapa zájmové oblasti a blízkého okolí



Legenda

-  Areál Pražského hradu
-  Vodní toky
-  Vrstevnice

Výškopis



Obrázek č. 1 Topografická mapa zájmové oblasti. Zdroj ČÚZK, Dibavod