

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Vodní hospodářství a vodní stavby

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Posouzení transportu vody v systému půda-zdivo
barokního kostela sv. Anny ve Vižňově

Vypracoval: Bc. Oldřich Peleška

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.

Praha 2018



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta stavební
Tháškova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Peleška	Jméno: Oldřich	Osobní číslo: 410072
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posouzení transportu vody v systému půda-zdivo barokního kostela Sv. Anny ve Vižňově	
Název diplomové práce anglicky: Assessment of the water transport in a soil-masonry system of the baroque church of St. Anna in Vižňov	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte detailní rešerši zaměřenou na problematiku pohybu vody v podzákladové zemině a základovém zdivu historických staveb. Proved'te podrobnou analýzu dat vlhkostí a vodních potenciálů ve zdivu a v půdě získaných z monitorovacího systému sledujícího barokní kostel Sv. Anny ve Vižňově. Zjistěte hydraulické charakteristiky půdy z bezprostřední blízkosti kostela a retenční čáry pískovce ze vzorků kostelního zdiva. Navrhněte a ověřte pracovní hypotézy cest transportu vody do kostelního zdiva. Vybrané výsledky monitoringu interpretujte pomocí matematického modelování. Výsledky diskutujte. Na základě provedené analýzy doporučte postup pro nápravu nevyhovujícího stavu.	
Seznam doporučené literatury: 1) Články v časopisech indexovaných v databázích WOS a SCOPUS.	
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 12.10.2017	Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018 <i>Údaj uved'te v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>12.10.2017</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
--	---

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Posouzení transportu vody v systému půda-zdivo barokního kostela sv. Anny ve Vižňově zpracoval samostatně za použití uvedené literatury a pramenů.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7. 1. 2018

.....
Jméno Příjmení

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Michalu Sněhotovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a užitečné rady při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Tomáši Princovi za pomoc s celou řadou problémů, jež se vyskytly jak při instalaci a kontrolách měřící soustavy v terénu, tak při zpracování vzorků v laboratoři.

Tato práce je prováděna v rámci projektu Ministerstva kultury České republiky NAKI DG16P02R049 „Zhodnocení stabilitního a stavebně technického stavu Broumovské skupiny kostelů a návrh opatření k zachování tohoto jedinečného evropského kulturního dědictví“.

POSOUZENÍ TRANSPORTU VODY V SYSTÉMU PŮDA-ZDIVO
BAROKNÍHO KOSTELA SV. ANNY VE VIŽŇOVĚ

ASSESSMENT OF THE WATER TRANSPORT IN A SOIL-
MASONRY SYSTÉM OF THE BAROQUE CHURCH OF ST.
ANNA IN VIŽŇOV

Abstrakt

Práce je součástí víceoborového výzkumu barokních kostelů patřících do Broumovské skupiny. V práci je pak zkoumán pohyb vody ve zdivu kostela sv. Anny ve Vižňově a v půdě v bezprostřední blízkosti kostela. V práci byla provedena rešerše literatury týkající se problémů způsobených přítomností vody v konstrukcích historických budov. V terénu pak bylo v severní zdi kostela a na pozemku přiléhajícím k této stěně bylo instalováno dlouhodobé měření, monitorující tlakový potenciál v půdě, teploty a vlhkost v půdě i ve zdivu. V této práci jsou pak vyhodnocena data z období od června do prosince 2017. Proudění vody v půdě je interpretováno pomocí modelu Hydrus 1D. Dále je provedeno laboratorní vyhodnocení materiálových charakteristik půdy i zdiva.

Z výsledků měření je patrné, že půda je v celém pozorovaném období velmi vlhká. Hodnoty vlhkosti se často blíží hodnotám plného nasycení. Velmi vlhké je také kostelní zdivo, především pak severní stěna kostela, která je nejspíše v úzkém hydraulickém kontaktu se svrchním horizontem půdy. Definice hypotézy transportu vody do zdiva je pak součástí práce, stejně jako doporučení opatření pro zlepšení současné situace, spočívající především v realizaci drenáže a případném odvětrání základů kostela.

Klíčová slova

Transport vody v půdě, potenciál půdní vody, půdní vlhkost, retenční křivka, vlhkost zdiva, pískovec

Summary

The presented thesis is part of a multidisciplinary research on the condition of Baroque churches, which belong to the Broumov group of churches. In this thesis, transport of water in the soil and the masonry of the church of St. Anna in Vižňov is investigated. Literature review on problems caused by the presence of water in historic buildings is presented. A long-term measurement system was installed in the masonry of the northern wall of the church and in the neighboring soil. The pressure head, temperature and water contents of soil and masonry were monitored continuously. Data from June to December 2017 are evaluated in this thesis. An attempt to interpret the data of the water flow using the Hydrus 1D model was done. Laboratory determination of physical and hydraulic properties of soil and fragments of the masonry was performed.

In the measurement results it is evident that the soil moisture in the vicinity of the church is very high within the whole observed period. Values of the soil moisture are often close to the value of full saturation. Moisture in the church masonry is also high. The definition of the hypothesis of water transport to masonry is then part of the work, as well as recommendations for measures to improve the current situation. Suggestion of technical measures that should lead to the improvement of the current state is given. The measures include realization of drainage and possibly a ventilation channel at the base of the wall.

Key words

Water transport, water potential, soil moisture, retention curve, masonry moisture, sandstone

1. Úvod	10
2. Cíl práce	11
3. Teoretická část.....	12
3.1. Pórovité prostředí	12
3.1.1. Charakteristiky pevné fáze	12
3.1.2. Hydraulické charakteristiky.....	14
3.2. Proudění vody v pórovitém prostředí.....	18
3.2.1. Síly působící na vodu v pórovitém prostředí	19
3.2.2. Proudění vody v nasyceném prostředí.....	19
3.2.3. Proudění vody v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí.....	21
4. Rešerše literatury.....	24
4.1. Výskyt vody ve stavebních konstrukcích.....	24
4.2. Zdroje vlhkosti ve stavebních konstrukcích.....	24
4.3. Nežádoucí účinky způsobené vlivem vlhkosti.....	25
4.4. Nápravná opatření.....	26
4.5. Charakteristiky pískovce	29
4.6. Modelování transportu vody	30
5. Metody a materiál	32
5.1. Popis lokality	32
5.1.1. Geologické poměry	33
5.1.2. Klimatické poměry.....	34
5.1.3. Broumovská skupina kostelů.....	34
5.1.4. Současný stav kostela	36
5.2. Odběr vzorků půdy, zdiva a jejich analýza.....	37
5.2.1. Vzorky půdy	38
5.2.2. Vzorky zdiva.....	42
5.3. Monitoring.....	44
5.3.1. Měřicí přístroje	47
5.3.2. Monitoring uvnitř kostela	49
5.4. Analýza srážkoměrných dat	52
5.5. 1D modelování proudění vody	54
5.5.1. Řídící rovnice	55
5.5.2. Vstupní data	55
5.5.3. Stanovení nasycené hydraulické vodivosti.....	56
5.5.4. Výpočet výparu	57

5.5.5.	Počáteční podmínky.....	61
5.5.6.	Okrajové podmínky	62
5.5.7.	Modelované období.....	62
5.6.	Terénní průzkum	62
6.	Výsledky a diskuse	65
6.1.	Vzorky půdy	65
6.1.1.	Měrná hmotnost	65
6.1.2.	Čára zrnitosti	65
6.1.3.	Retenční křivky.....	66
6.2.	Vzorky zdiva.....	70
6.2.1.	Objemová hmotnost	70
6.2.2.	Retenční křivky.....	72
6.3.	Výsledky monitoringu v místě kostela	73
6.3.1.	Teploty	74
6.3.2.	Tenzometry	79
6.3.3.	Čidla vlhkosti	88
6.3.4.	Zásoba vody.....	89
6.3.5.	MPS-6	91
6.3.6.	Odhad zvrstvení půdního profilu	92
6.4.	Výsledky matematického modelování.....	93
6.5.	Návrh opatření	95
7.	Závěr.....	97
8.	Použitá literatura	99
9.	Seznam tabulek	104
10.	Seznam obrázků.....	104
11.	Seznam příloh	106
12.	Přílohy	107

1. Úvod

Kostely, respektive církevní památky obecně, tvoří významnou část architektonického a kulturního dědictví České republiky. Právě kostely pak ve většině měst a menších obcí patří k základním urbanistickým prvkům.

U velkého množství kostelů, především pak v menších obcích, však byla dlouhodobě zanedbávána údržba. Některé kostely tak jsou ve značně zchátralém stavu a k jejich zachování je nezbytná rozsáhlejší oprava. Na opravy nebo sanace kostelů jsou tak vynaloženy nemalé finanční prostředky. Pokud však před realizací oprav není zjištěna příčina špatného stavu konstrukcí, nápravná opatření nemusí být účinná a efektivní.

Z tohoto důvodu je řešitelským týmem studentů a výzkumných pracovníků na Fakultě stavební, Českého vysokého učení technického v Praze před rekonstrukcí kostelů na Broumovsku prováděn víceoborový průzkum stavu těchto barokních staveb v rámci projektu podpořeného Ministerstvem kultury České republiky pod číslem NAKI DG16P02R049. Kostely v této lokalitě tvoří takzvanou Broumovskou skupinu kostelů, což je unikátní seskupení jedenácti barokních kostelů vybudovaných v první polovině 18. století Kryštofem a Kiliánem Ignácem Dientzenhoferem. Tento projekt má za úkol zhodnotit stabilitní a technický stav Broumovské skupiny kostelů a navrhnout opatření k zachování tohoto kulturního dědictví. V rámci projektu již v roce 2016 proběhl víceoborový výzkum kostela Všech svatých v Heřmánkovicích. Součástí výzkumu bylo také vypracování diplomové práce posuzující transport vody v systému voda-zdivo tohoto kostela. V současné době je pak prováděn víceoborový výzkum kostela sv. Anny ve Vižňově, jehož součástí je tato diplomová práce.

2. Cíl práce

Cílem práce je analýza problematiky pohybu vody v základovém zdivu barokního kostela sv. Anny ve Vižňově a zemině na pozemku přiléhajícímu ke kostelu ze severní strany a doporučení postupu pro nápravu nevyhovujícího stavu. Součástí práce je také rešerše literatury zabývající se tématem výskytu a transportu vody ve zdivu historických budov.

3. Teoretická část

V této kapitole bude charakterizováno pórové prostředí a pohyb vody v něm.

3.1. Pórovité prostředí

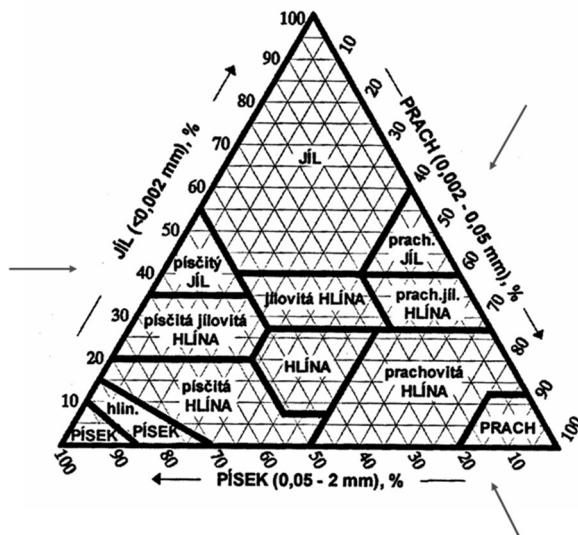
Pórovité prostředí je, zjednodušeně řečeno, složitý systém minerálních zrn tvořících pevnou fázi půdy a prostorů mezi nimi, jež nazýváme póry. Pórovité prostředí tak je charakterizováno vlastnostmi pevné fáze a hydraulickými charakteristikami prostředí. Z hlediska transportu vody lze póry rozdělit podle velikosti na makropóry, kapilární póry a ultrakapilární póry. Ultrakapilární póry jsou menší než molekula vody a nemůže v nich tak docházet k jejímu vedení. V kapilárních pórech pak při proudění vlivem kapilárních sil dochází převážně k laminárnímu proudění. Kapilární síly naopak nemají účinek v makropórech a při proudění se zde často vyskytuje turbulentní režim proudění vlivem gravitačních sil (Císlerová a Vogel, 1998; Kutílek, 1984).

3.1.1. Charakteristiky pevné fáze

Tyto charakteristiky jsou určeny geometrií pórového prostoru a jsou tak nezávislé na proudící kapalině. Podle autorů Císlerové a kol. (1998) se jedná o zrnitostní čáru, objemovou hmotnost, specifickou hmotnost, pórovitost, propustnost a disperzivitou. Tyto charakteristiky jsou popsány v následujících odstavcích.

Čára zrnitosti

Jedná se o součtovou čáru udávající procentní zastoupení zrn určitého průměru a všech zrn menších. Zastoupení jednotlivých velikostí zrn je určeno proséváním na sítích a v případě zrn menších než 0,1 mm hustoměrnou metodou. Výsledky jsou zaneseny do grafu čáry zrnitosti, odkud lze vyčíst podíl jílové, prachové, písčité a případně štěrkové frakce v půdě. Na základě tohoto podílu pak dochází k zatřídění zeminy například dle trojúhelníkového diagramu zrnitosti půd-NRSC USDA (viz obr. 1). (Mls, 1988; Lamboj a Štěpánek, 2005).



Obr. 1 Trojúhelníkový diagram zrnitosti půd – NRSC USDA (CHMI, 2017)

Objemová hmotnost (ρ_d)

Tato veličina určuje hmotnost pevné fáze v celkovém objemu vzorku půdy, přičemž zohledňuje i míru zhutnění půdy. Stanovení hodnoty se provádí na neporušeném půdním vzorku. Hodnoty objemové hmotnosti závisí na půdní textuře, struktuře, podílu organické hmoty a pohybují se v rozmezí $0,5\text{ g/cm}^3$ u půd s vysokým podílem organické hmoty až do $2,65\text{ g/cm}^3$. Většina půd se pak pohybuje v rozmezí $1,2\text{ g/cm}^3 - 1,8\text{ g/cm}^3$ (Urbancová a Lacková, 2015).

Specifická hmotnost (ρ_s)

Specifická hmotnost vyjadřuje objemovou hmotnost pouze suché fáze. Je tedy vyjádřena jako podíl hmotnosti pevné fáze k objemu pevné fáze. Nezávisí tedy na půdní textuře a lze ji stanovit z porušeného vzorku. Typicky se hodnoty specifické hmotnosti pohybují kolem $2,65\text{ g/cm}^3$, pokud je však v zemině velký podíl organické hmoty, může hodnota klesnout až na $1,5\text{ g/cm}^3$ (Urbancová a Lacková, 2015).

Pórovitost (p)

Pórovitost udává vzájemný poměr objemu pórů, tedy části půdy tvořené volným prostorem, k celkovému objemu pórovité látky. Orientační hodnoty pórovitosti jsou pro jíly 34-60 %, písčité půdy 26-53 % a pro půdy s velkým podílem prachu 34-61 %. V případě velkého podílu organické hmoty může být pórovitost až 80 % (Císlerová a Vogel, 1998; Urbancová a Lacková, 2015).

Propustnost (k)

Propustnost neboli permeabilita udává míru schopnosti porézního prostředí propouštět tekuté fáze. Z hlediska proudění vody v půdě je permeabilita jedním z nejdůležitějších parametrů. Na rozdíl od hydraulické vodivosti však není permeabilita závislá na proudící kapalině a je závislá především na geometrii jednotlivých pórů a vlastnostech povrchu pevné fáze. Pro jílovité zeminy je například rozmezí hodnot permeability od 10^{-15} cm² do 10^{-9} cm², písčité zeminy pak dosahují hodnot od 10^{-10} cm² do 10^{-6} cm² (Císlerová a Vogel, 1998; Valentová 1998)

Disperzivita (α)

Míru prostorového šíření rozpuštěné látky v porézním prostředí vyjadřuje disperzivita. Jedná se o tenzor čtvrtého řádu, avšak používají se pouze 2 složky, a to příčná a podélná disperzivita. Hodnota disperzivity je pak stěžejní pro výpočet koeficientu mechanické disperze, který následně vystupuje v advekčně disperzní rovnici, což je rovnice kontinuity pro celkový tok rozpuštěné látky. Disperzivita se tak uplatňuje především při transportech látek vodou v pórovém prostředí. Typické hodnoty disperzivity se pohybují u podélné v rozmezí 10^{-2} m až 10^4 m u prostorových měřítek 10^{-1} m až 10^5 m, lze tedy říci že velikost podélné disperzivity odpovídá desetina prostoroového měřítka. Příčná disperzivita má pak hodnotu přibližně čtvrtiny disperzivity podélné. Je tedy patrné že kvůli závislosti hodnoty disperzivity na měřítku pozorování se nejedná o konstantní veličinu (Císlerová a Vogel, 1998).

3.1.2. Hydraulické charakteristiky

Hydraulické charakteristiky umožňují popsat proudění vody v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí.

Retenční čára

Při zvlhčování suchého pórovitého prostředí dochází k zaplňování pórů postupně od nejmenších po největší. Při odvodňování naopak dochází jako první k vyprázdňování větších pórů a poté až těch menších. Při obou procesech pak každé hodnotě vlhkosti půdy odpovídá určitý kapilární tlak, jež se odvíjí od různého zakřivení kapilárních menisků v souvislosti s různou šířkou kapilár neboli velikostí pórů zaplněných vodou. Vztah mezi vlhkostí a kapilárním tlakem určuje retenční čára. Retenční čáru je možné charakterizovat jako skupinu rovnovážných stavů mezi objemovou vlhkostí a odpovídající kapilární tlakovou výškou. Při stanovování bodů retenční čáry se tak měří vlhkosti odpovídající danému kapilárnímu tlaku (Císlerová a Vogel, 1998).

Funkčním vztahem mezi objemovou vlhkostí a kapilární tlakovou výškou pak je retenční křivka. Pomocí retenční křivky lze charakterizovat pórovité prostředí z hlediska plnění a prázdňení. Funkční závislost dostaneme analytickým vyjádřením retenční čáry, což může být provedeno proložením bodů retenční čáry různými vzorci. Nejpoužívanější jsou pak dva vzorce. Jedním je funkční vztah Brookse a Coreya (1964) ve tvaru:

$$\theta_e(h) = \begin{cases} \left(\frac{H_b}{h}\right)^\lambda & h < H_b \\ 1 & h \geq H_b \end{cases} \quad [1]$$

kde λ vyjadřuje distribuci velikosti pórů, H_b je vstupní hodnota vzduchu, h je tlaková výška a θ_e je efektivní vlhkost. Z efektivní vlhkosti pak lze dopočítat hodnotu aktuální vlhkosti vzorcem ve tvaru:

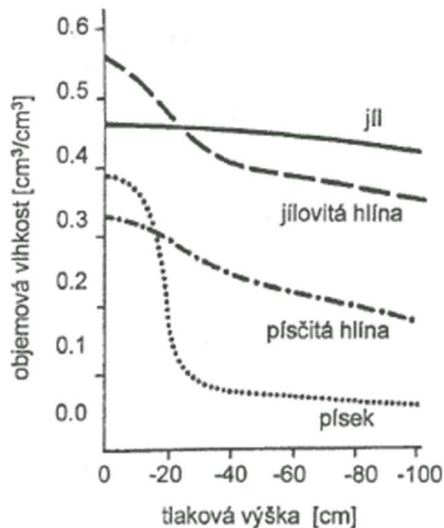
$$\theta_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad [2]$$

kde θ_e vyjadřuje efektivní vlhkost, θ aktuální vlhkost, θ_r reziduální vlhkost a θ_s nasycenou vlhkost.

Druhým analytickým vyjádřením retenční čáry je pak funkční vztah van Genuchtena (1980) v podobě:

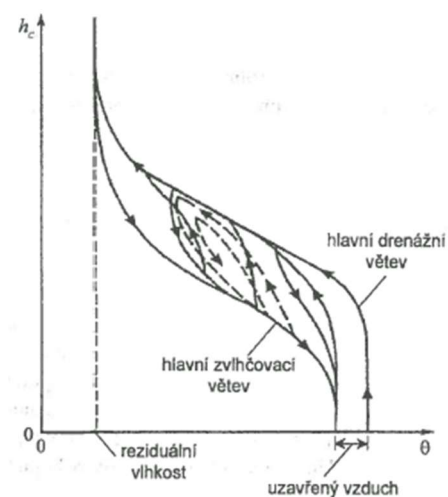
$$\theta_e(h) = \begin{cases} \frac{1}{(1 + (-\alpha h)^n)^m} & h < 0 \\ 1 & h \geq 0 \end{cases} \quad [3]$$

kde jsou α , m a n parametry, h tlaková výška a θ_e efektivní vlhkost. Aktuální vlhkost je pak opět dopočtena tak, jako v případě proložení vzorcem Brooks a Corey. Typický průběh retenční křivky pro různé materiály je možné vidět na obrázku č. 2 (Císlerová a Vogel, 1998).



Obr. 2 Retenční křivky různých typů půd (Císlerová a Vogel, 1998, str. 27)

V souvislosti s retenční křivkou je nezbytné zmínit také jev zvaný hystereze. Hysterezi retenční křivky lze vysvětlit, jako rozdílný průběh křivky při zvlhčování suché zeminy a drénování vlhké zeminy (viz obr. 3). To je způsobeno především uzavíráním vzduchu v pórech, proměnlivostí průřezu pórů a odlišnou hodnotou smáčecího úhlu při pohybu kapaliny po suchém a vlhkém povrchu neboli při zvlhčování a drénování. Rozlišujeme takzvanou hlavní zvlhčovací a hlavní drenážní větev, mezi nimiž se pohybují průběhy retenčních křivek například při zvlhčování půdy, které začalo ještě před úplným oddrénováním vody z půdy. Významněji se tento jev tedy uplatňuje při opakovaném zvlhčování půdy například v důsledku série dešťových srážek (Císlerová a Vogel, 1998, Kutílek, 1984).



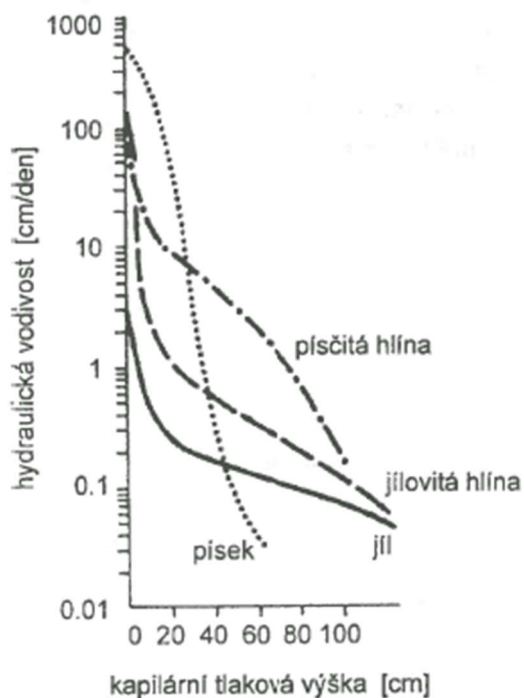
Obr. 3 Hystereze retenční křivky (Císlerová, a Vogel, 1998, str.29)

Hydraulická vodivost

Tato charakteristika vyjadřuje schopnost pórovitého prostředí vést vodu, má rozměr rychlosti a závisí jak na charakteristikách porézního prostředí, tak na vlastnostech proudící kapaliny. Nejvíce hydraulickou vodivost z vlastností kapaliny ovlivňují její hustota a viskozita. Rozlišujeme nasycenou a nenasycenou hydraulickou vodivost (Valentová, 1998).

Nasycená hydraulická vodivost se značí K_s . Měření probíhá buď laboratorně na neporušeném, plně nasyceném vzorku při experimentu s konstantním nebo proměnným spádem. V trénu se pak měří takzvaná výtopová infiltrace dvouválcovou metodou, kde opět musí být zajištěno plné nasycení půdy vodou. Měření probíhá nepřímou a hodnota nasycené hydraulické vodivosti je dopočítána z Darcyho rovnice na základě známého hydraulického gradientu a průtoku. Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti se u jílovitých půd pohybují v rozmezí 10^{-12} až 10^{-6} , písčité zeminy pak 10^{-7} až 10^{-3} m/s (Kutílek a kol., 1994; Císlerová a Vogel, 1998).

Hodnota nenasycené hydraulické vodivosti značící se $K(\theta)$ je závislá na vlhkosti půdy a není tudíž konstantní (viz obr. 4).



Obr. 4 Průběh nenasycené hydraulické vodivosti různých materiálů (Císlerová a Vogel, 1998, str. 34)

Nenasycenou hydraulickou vodivost lze stanovit měřením infiltrometrem, odkud jsou výstupem přímo body nenasycené hydraulické vodivosti v závislosti na tlakové výšce, nebo výpočtem. Stanovení na základě výpočtu probíhá odhadem na základě vzorce:

$$K'(\theta) = K_r(\theta)K_s \quad [4]$$

kde $K'(\theta)$ je odhad nenasyčené hydraulické vodivosti, $K_r(\theta)$ je relativní hydraulická vodivost a K_s je nasycená hydraulická vodivost. Hodnoty relativní hydraulické vodivosti jsou získány integrací retenční křivky. Pro integraci retenční křivky existuje několik vztahů, z nichž nejpoužívanější je vzorec autora Mualema, který pro zpřesnění odhadu relativní hydraulické vodivosti zavádí vliv relativní tortuosity:

$$K_r(\theta) = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\int_0^\theta \frac{d\theta}{h_c}}{\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta}{h_c}}\right)^2 \quad [5]$$

kde $K_r(\theta)$ je relativní hydraulická vodivost, θ vlhkost, θ_s nasycená vlhkost a h_c kapilární tlaková výška (Císlerová a Vogel, 1998).

3.2. Proudění vody v pórovitém prostředí

Pohyb vody v pórovitém prostředí je možné sledovat a popsat na různých úrovních rozlišení s různým prostorovým měřítkem. Nejpodrobnější je popis na molekulární úrovni. Zde dochází ke sledování pohybu molekul vody a tohoto měřítka je využíváno například při simulaci fázového přechodu vodních par. Při řešení pohybu na mikroskopické úrovni jsou popisovány jednotlivé póry. Dochází zde k nahrazení skutečné fáze kontinuem, jež zcela vyplňuje dílčí část prostoru. V každém bodě prostoru se pak vyskytuje v daném okamžiku pouze jedno kontinuum, které je nutné od sousedního oddělit přesně definovanou hranicí. Pro řešení proudění pórovitým prostředím je však v praxi mikroskopické měřítko příliš detailní a je tak používán makroskopický přístup. V tomto přístupu je pórovitý prostor spojitě vyplněn fiktivními makrokontinui, která se vzájemně překrývají. Odpadá tak nutnost přesně definovat hranice jednotlivých mikrokontinuí, čímž dochází k usnadnění výpočtu (Císlerová a Vogel, 1998).

Pro přechod od mikroskopického k makroskopickému popisu fází se využívá objemové průměrování, využívající koncept reprezentativního elementárního objemu. Reprezentativní elementární objem, značící se REV, je takový objem ze vzorku, který při zvětšení své velikosti nebo při přesunutí odběru tohoto objemu do jiného místa vzorku nemění své makroskopické veličiny. Pouze v případě makroskopicky homogenního vzorku lze dosáhnout jednoznačné hodnoty REV, v případě makroskopicky heterogenního prostředí již hodnota REV mírně kolísá (Císlerová a Vogel, 1998).

3.2.1. Síly působící na vodu v pórovitém prostředí

Na vodu v pórovitém prostředí působí několik typů sil – gravitační, tlakové a retenční, jež se dále dělí ještě na kapilární a adsorpční. Všechny tyto složky jsou využity při popisu proudění v nenasycené zóně. Při proudění v nasycené zóně pak zanikají retenční síly. Při matematickém popisu jsou působící síly zahrnuty v celkovém potenciálu. Nejvýznamnějšími složkami celkového potenciálu jsou gravitační a tlaková složka. V tlakovém potenciálu jsou zahrnuty tlakové i retenční síly, které jsou v inženýrských aplikacích vyjádřeny pomocí tlakové výšky h . Gravitační potenciál zahrnuje geodetickou výšku, tedy převýšení bodu nad srovnávací rovinou. Někdy jsou pak do výpočtu zahrnuty i další složky jako například potenciál osmotický. V inženýrských aplikacích je celkový potenciál nejčastěji vyjádřen pomocí hydraulické výšky, jež je součtem tlakové a geodetické výšky. K pohybu vody v porézním prostředí pak dochází na základě gradientu celkového potenciálu, a to z míst s vyšším potenciálem do míst s nižším potenciálem (Císlerová a Vogel, 1998).

3.2.2. Proudění vody v nasyceném prostředí

Tento typ proudění se odehrává ve zvodních s volnou hladinou, kde je horní hranicí nasycené zóny volná hladina podzemní vody a dolní hranicí nepropustná či polopropustná vrstva, nebo ve zvodních s napjatou hladinou, kde je spodní i horní hranice tvořena nepropustnou či polopropustnou vrstvou. Popis proudění se provádí použitím Darcyho zákona v případě 1D proudění nebo pomocí Richardsovy rovnice (Císlerová a Vogel, 1998; Valentová 1998).

Darcyho zákon

Jedná se o označení rovnice vyplývající z pokusů zkoumajících proudění vody zeminou prováděných H. Darcym (1856) ve tvaru:

$$Q = K_s S \frac{H_1 - H_2}{L} \quad [6]$$

kde K_s je nasycená hydraulická vodivost, S je průtočná plocha, H_1 je hydraulická výška na začátku vzorku, H_2 je hydraulická výška na konci vzorku a L je délka vzorku. Darcyho zákon platí jen v nasycené zóně, při proudění v nenasycené zóně je nutná jeho modifikace, jež je popsána v dalším bodě. Darcyho zákon má i další omezující podmínky platnosti. Jedná se o lineární zákon a platí tak jen v lineární oblasti, kde dochází k lineárnímu proudění. Naopak v prelineární a postlineární oblasti Darcyho zákon neplatí. K prelineárnímu proudění dochází ve velmi jemnozrnných materiálech. Zde je voda silně vázána na pevnou fázi a k proudění téměř nedochází. K postlineárnímu proudění pak dochází v případě, kdy

hodnota Reynoldsova čísla stoupne nad hodnotu přibližně 10. Od této hodnoty i při zachování laminárního proudění již nepřevažují vazké síly a při dalším nárůstu Reynoldsova čísla přibližně nad hodnotu 100 pak dochází k turbulentnímu proudění (Valentová, 1998).

Darcyho zákon lze rovněž zapsat ve zobecněné formě jako objemový tok:

$$q = -K_s \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad [7]$$

kde q je objemový tok nebo také Darcyovská rychlost, K_s je nasycená hydraulická vodivost a $\frac{\Delta H}{\Delta l}$ je gradient hydraulické výšky. Tato rovnice platí za předpokladu homogenního, isotropního prostředí a jednorozměrného proudění. V případě anizotropního proudění je pak zaveden tenzor hydraulické vodivosti, udávající hodnoty hydraulické vodivosti ve všech směrech. Pro případ heterogenního prostředí s postupnou změnou hydraulické vodivosti se řeší zavedením hydraulické vodivosti jako funkce prostorových souřadnic a v případě heterogenity s náhlou změnou je oblast proudění rozdělena na homogenní podoblasti ve kterých je jednotlivě počítán objemový tok (Císlarová a Vogel, 1998; Valentová, 1998).

Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity vychází ze zákona zachování hmotnosti. Matematický zápis rovnice má podobu:

$$\frac{\partial \rho n}{\partial t} = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) \quad [8]$$

kde ρ je objemová hmotnost, n pórovitost a v_x, v_y, v_z složky rychlosti proudění.

Při zavedení specifické storativity do výpočtu je pak tvar rovnice kontinuity:

$$- \left(\frac{\partial}{\partial x} \rho v_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho v_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho v_z \right) = \rho S_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad [9]$$

kde ρ je objemová hmotnost, v_x, v_y, v_z složky rychlosti proudění, S_0 specifická storativita a $\frac{\partial H}{\partial t}$ je změna hydraulické výšky v čase. Specifická storativita vyjadřuje schopnost nasyceného pórovitého prostředí uchovat v sobě určitý objem vody (Valentová, 1998).

Řídící rovnice proudění

Tato rovnice, jež popisuje trojrozměrné proudění vody půdním profilem, je pro nasycenou zónu výsledkem spojení Darcyho zákona a rovnice kontinuity. Pro sestavení rovnice je použit zobecněný tvar Darcyho zákona a rovnice kontinuity ve tvaru po zavedení specifické storativity. Pro nehomogenní a neizotropní proudění je pak tvar rovnice:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = S_0 \frac{\partial H}{\partial t} \quad [10]$$

kde K_x , K_y , K_z jsou složky nasycené hydraulické vodivosti, $\frac{\partial H}{\partial x}$, $\frac{\partial H}{\partial y}$, $\frac{\partial H}{\partial z}$ jsou hodnoty hydraulického gradientu v příslušných směrech a $\frac{\partial H}{\partial t}$ je hodnota hydraulického gradientu v závislosti na čase.

3.2.3. Proudění vody v proměnlivě nasyceném pórovitém prostředí

Nenasycená nebo také vadózní zóna je ohraničena shora povrchem terénu a zdola volnou hladinou podzemní vody či nepropustným podložím. V této zóně jsou póry vyplněny z části vodou a z části vzduchem. Může nastat i situace kdy jsou vodou zaplněny všechny póry a v takovém případě pak probíhá popis proudění stejně jako v případě nasycené zóny. Ve vadózní zóně dochází k infiltraci srážek a vztlínání podzemní vody. K popisu proudění vody se používá Darcy-Buckinghamův zákon a Richardsova rovnice (Císlerová a Vogel, 1998).

Darcy-Buckinghamův zákon

Jedná se o modifikaci Darcyho zákona pro použití v nenasyceném prostředí. Hustota toku zde není závislá na nasycené hydraulické vodivosti, ale na nenasycené hydraulické vodivosti, jejíž hodnota se mění v závislosti na vlhkosti půdy. Zobecněný vzorec pro objemový tok má tedy tvar:

$$q = -K(\theta)\text{grad}H \quad [11]$$

kde q je objemový tok, $K(\theta)$ nenasycená hydraulická vodivost a $\text{grad}H$ je hydraulický gradient. Touto rovnicí je opět jako v případě Darcyho zákona možné popsat jednorozměrné proudění podzemní vody v isotropním prostředí. V případě anizotropního prostředí je pak opět nutné zavést tenzor hydraulické vodivosti. Stejný postup jako v případě řešení proudění pomocí Darcyho zákona je použit rovněž pro nehomogenní proudění, kde je opět hydraulická vodivost nahrazena funkcí prostorových souřadnic

v případě postupné změny nebo rozdělení oblasti na homogenní podoblasti v případě skokových změn hydraulické vodivosti způsobených vrstvami rozdílných materiálů (Císlerová a Vogel, 1998; Valentová, 1998).

Rovnice kontinuity

Aplikací zákona zachování hmotnosti lze rovnici kontinuity pro trojrozměrné proudění vody v nenasycené zóně při zanedbání změn hustoty vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \left(\frac{\partial}{\partial x} q_x + \frac{\partial}{\partial y} q_y + \frac{\partial}{\partial z} q_z \right) = 0 \quad [12]$$

kde $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ je změna vlhkosti v čase a v_x, v_y, v_z složky rychlosti proudění (Císlerová a Vogel, 1998; Kutílek a kol., 1994).

Richardsova rovnice

V nenasycené zóně je Richardsova rovnice, popisující trojrozměrné proudění vody půdním profilem, výsledkem spojení Darcy-Buckinghamovy rovnice a rovnice kontinuity. Výsledná rovnice pak má tvar:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad [13]$$

kde $K(\theta)$ je koeficient nenasycené hydraulické vodivosti, $\frac{\partial H}{\partial x}, \frac{\partial H}{\partial y}, \frac{\partial H}{\partial z}$ hodnoty hydraulického gradientu v příslušných směrech a $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ změna vlhkosti v čase (Císlerová a Vogel, 1998; Kutílek a kol., 1994).

Pro jednorozměrné vertikální proudění s tlakovou výškou jako proměnnou má pak Richardsova rovnice tvar:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad [14]$$

kde $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ je změna vlhkosti v čase, $K(h)$ nenasycená hydraulická vodivost závislá na tlakové výšce a h tlaková výška (Kutílek a kol., 1994).

Při řešení Richardsovy rovnice je opět nutné stanovit počáteční a okrajové podmínky a dále pak také zdroje, případně propady. Zdroje a propady se přímo přičítají, respektive odčítají na levé straně Richardsovy rovnice. Příkladem propadového členu rovnice může být odebírání vody z oblasti kořeny rostlin.

Pro řešení proudění vody je pak nezbytné stanovit počáteční a okrajové podmínky. Počáteční podmínky charakterizují stav proudění v celé oblasti na počátku výpočtů pomocí známých hodnot hydraulických výšek ve všech bodech. Okrajové podmínky jsou trojího typu – Dirichletova, Neumannova a Newtonova (Císlerová a Vogel, 1998; Valentová 1998).

První je tlaková okrajová podmínka neboli Dirichletova, kdy je na hranici oblasti znám časový průběh hydraulické výšky. Zvláštními případy této okrajové podmínky jsou volná hladina vody ve zvodni a výronová plocha. Při výskytu volné hladiny vody je hydraulická výška na této hladině rovna nule, avšak přesný tvar hladiny není předem znám a výpočty s použitím této okrajové podmínky vyžadují iterativní postup při řešení. Při výskytu výronové plochy je v místě průniku vody přes hranici porézního prostředí opět nulová hodnota hydraulické výšky. Přesná poloha bodu ovšem opět není známa a při nestacionární úloze se bude jeho poloha dokonce měnit (Císlerová a Vogel, 1998; Valentová, 1998).

Další okrajovou podmínkou je Neumannova nebo také toková okrajová podmínka, kde je známa hodnota toku vody přes hranici oblasti ve směru na ni kolmém. Zvláštním případem tokové podmínky je nepropustná hranice, kdy je hodnota toku nulová (Císlerová a Vogel, 1998; Valentová, 1998).

Třetí okrajovou podmínkou je polopropustná hranice, respektive Newtonova podmínka. Ta kombinuje Dirichletovu a Neumannovu okrajovou podmínku. Zavádí se v případě oddělení jedné zvodně od druhé tenkou polopropustnou vrstvou, která svou nižší hydraulickou vodivostí způsobuje gradient hydraulických výšek mezi jednou a druhou zvodní a zároveň umožňuje přítok vody do oblasti. Rychlost toku kolmo k hranici oblasti pak lze vyjádřit jako:

$$q_n = \frac{H_0 - H}{c} \quad [15]$$

kde q_n je rychlost toku kolmo k hranici oblasti, H_0 je hydraulická výška vně oblasti, H je hydraulická výška uvnitř oblasti a c je odpor vrstvy vypočtený jako podíl šířky vrstvy a její hydraulické vodivosti. Tato okrajová podmínka je ale využita pouze při proudění v nasycené zóně (Valentová, 1998).

4. Rešerše literatury

4.1. Výskyt vody ve stavebních konstrukcích

Přítomnost vody ve zdivu, přesněji její transport dovnitř materiálu a ven z něj, je jedním z hlavních problémů ohrožujících historické budovy, potažmo pak zachování architektonického dědictví, jež tyto budovy představují. Vlhkost zdiva je rovněž jedním z problémů, který je nutné řešit u nových budov. Zde však, na rozdíl od historických budov, nehrozí bezprostřední nebezpečí porušení konstrukce a vlhkost zde ovlivňuje především hygienické a estetické parametry. U nových staveb tak je podle směrnice Evropské rady 89/106/CEE požadováno, aby ve stavebních materiálech byla znemožněna tvorba vlhkosti, a to především z hygienických důvodů. V případě historických budov, kde již k výskytu vlhkosti dochází, jsou prováděna nápravná opatření (D'Agostino, 2013; Franzoni, 2014; Sandrolini a Franzoni, 2006).

Dynamika transportu vody do zdiva a ze zdiva zahrnuje různé fyzikální a chemické procesy a porozumění této problematice je tak velmi náročné, neboť transport vody velmi závisí na struktuře a materiálu konkrétního zdiva. Porozumění této dynamice je nezbytné pro vybrání optimálního nápravného opatření. Některé studie dokonce uvádějí, že v důsledku použití nevhodného nápravného opatření došlo k urychlení degradace zdiva (D'Agostino, 2013).

4.2. Zdroje vlhkosti ve stavebních konstrukcích

Při řešení pohybu vlhkosti v materiálu zdiva je nezbytné zahrnout rovněž zdroj pronikání vody do konstrukce. Toto téma dále rozvíjí několik studií, z nichž ovšem většina zanedbává vstup vody do zdiva z půdy kapilárním vztlínáním. Jedním z příkladů takových prací je studie autorů Tariku a kol. (2010), kde je modelována výměna vzduchu, tepla a vlhkosti mezi interiérem budovy a venkovním prostředím. V modelu vystupují jako stěžejní faktory výměny tepla a vlhkosti jednak konstrukce stěn a stropu objektu, vnitřní prostředí a dále pak lokální venkovní podmínky. Vnitřním prostředím budovy je myšlena především teplota a relativní vlhkost v interiéru. Mezi venkovní podmínky pak patří déšť, déšť unášený větrem dopadající na stěny budovy a sluneční záření. Přestup tepla a vlhkosti z půdy není v modelu vůbec zahrnut.

Zahrnutí podloží budovy do modelu je popsáno například ve studii autorů Dos Santos a Mendes (2006). Problém přestupu tepla a vlhkosti je zde popsán jako interakce tří domén-půdy, obálky budovy a vzduchu uvnitř budovy. Tato studie se zabývá energetickou efektivitou budov a je zde primárně řešen vliv vlhkosti na prostup tepla konstrukcí. Ke klasickým modelům bez zahrnutí vlivu podloží je zde přidáno ještě řešení prostupu tepla

z půdy do podlahy. Tento transport je řešen rovnicemi na základě teorie Philipa a De Vriese o transportu tepla a objemu vody porézními médii.

Souhrnně tak lze říci, že za hlavní zdroje vlhkosti ve stavebních konstrukcích, potažmo v interiéru budov, můžeme označit zaprvé kapilární vztlínání vody z půdy a s ním související transport a ukládání rozpustných solí. Dále pak srážky, a to jak ovlivněné, tak neovlivněné větrem a také zkondenzovanou vzdušnou vlhkost v interiéru i v exteriéru (Franzoni, 2014; Mol a Viles 2012).

4.3. Nežádoucí účinky způsobené vlivem vlhkosti

Tématu nežádoucích účinků způsobených vlivem vlhkosti a popisem indikátorů ukazujících na poškození zdiva se zabývá studie autorů Bergera a kol. (2015). V této studii bylo poškození zdiva rozděleno do 4 kategorií podle toho, jakým způsobem se vlhkost podílí na degradaci materiálu. První ze čtyř kategorií je poškození přímým vlivem vlhkosti, další pak degradace působením vlhkosti jako vektoru, jako třetí uvádí autoři poškození vyskytující se v mokřem prostředí a poslední skupinou je pak poškození způsobené výskytem vlhkosti v interiéru.

Přímý vliv vlhkosti zahrnuje tepelné izolační vlastnosti, mechanickou odolnost a způsobuje objemové změny konstrukcí. Mechanická odolnost materiálu klesá se zvyšující se vlhkostí, kdy je při dosažení kritické vlhkosti zdiva ohrožena stabilita konstrukce. Tepelná vodivost zdiva v závislosti na zvyšující se vlhkosti roste, neboť součinitel tepelné vodivosti vody je 25krát vyšší než vzduchu, kterým jsou za suchých podmínek vyplněny póry zdiva. Vlhké zdivo tak zvyšuje tepelné ztráty budovy a to tak, že při zvýšení vlhkosti zdiva o 1 % dojde k 3-5% navýšení toku tepla. Objemovými změnami je myšleno bobtnání a smršťování porézních materiálů konstrukcí. Voda v pórech působí tlakem na pevnou fázi a dochází tak ke změně objemu, což může opět v konečném důsledku vést k poruchám materiálu. Při modelování takového ohrožení konstrukce je nutné rozlišit, kdy jde o objemové změny způsobené teplotou a kdy je rozhodující vliv vlhkosti. Při objemových změnách způsobených pouze teplotou, dochází k působení pouze na pevnou fázi a přítomnost vody tak nehraje žádnou roli (Berger a kol., 2015).

Poškození vzniklé působením vlhkosti jako vektoru je způsobeno gradientem obsahu vody v pórech v různých částech zdiva. Je možné rozlišit dva druhy takového poškození. Jedním z nich je poškození mrazem, druhým pak krystalizace solí. Poškození mrazem souvisí se zvýšením objemu vody při zamrznutí. Nebezpečné jsou pak především zmrazovací cykly v mikropórech, kde není dostatek prostoru pro rozpínání a led tak narušuje pevnou fázi zdiva. Poškození krystalizací solí je způsobeno transportem těchto rozpuštěných solí vodou při kapilárním vztlínání a následném ukládání. Při ukládání dochází k opětovné krystalizaci, která může způsobit povrchovou ztrátu materiálu například formou odlupování (Berger a kol., 2015; Mol a Viles 2012).

Poškození vyskytující se v mokrém prostředí lze rozdělit na biologické a korozi. Biologické poškození neboli biodegradace je způsobena různými typy organismů, jejichž přítomnost je podmíněna dostatečnou dodávkou vody, příznivou teplotou pro organismy a přístupem světla. Jedná se o bakterie, houby, řasy a lišejníky. Tyto organismy jsou potenciálně toxické pro obyvatele, protože mohou způsobovat alergie nebo nemoci. Koroze pak způsobuje různé poškození od znečištění fasád až po úplné zničení určitých částí konstrukce. Tato degradace je zapříčiněna praskáním materiálu vlivem vytvoření povlaku zkorodovaného kovu, čímž dochází ke zvětšení objemu kovových částí. Koroze se objevuje v případech, kdy kov dosáhne teploty rosného bodu. Vodní pára pak na povrchu kovu zkapalní a vytvoří tekutý povlak, který umožňuje oxidaci kovu (Berger a kol., 2015).

Poškození způsobené vlhkostí v interiéru se týká komfortu obyvatel z hlediska teploty a kvality ovzduší. V případě teploty je komfort pro bydlení popisován pomocí statického nebo adaptivního přístupu. Statický model používá ukazatele PMV (Predicted Man Vote – předpokládaná volba člověka) a PPD (Predicted Percentage Dissatisfied – předpokládané procento nespokojenosti), jež umožňují kvantifikovat teplotní atmosféru pociťovanou obyvateli v závislosti na teplotě v místnosti, relativní vlhkosti vzduchu, množství oblečení a rychlosti proudění vzduchu. Adaptivní přístup pak uvažuje navíc ještě aktivitu člověka v tomto prostředí a snahu dosáhnout komfortních podmínek. Kvalita vzduchu je hodnocena podle ukazatelů znečištění, kterými jsou bakterie, viry, těžké organické sloučeniny, prachové roztoci a plísně. Množství těchto polutantů je závislé především na přítomnosti vody, v tomto případě ve formě vodní páry, a tedy relativní vlhkosti vzduchu. Jako optimální rozsah relativní vlhkosti pro dobrou kvalitu vzduchu v místnosti je pak uváděno 40–60 % (Berger a kol., 2015).

4.4. Nápravná opatření

Stoupající vlhkost a s ní spojené problémy zejména v historických budovách jsou podnětem pro zavádění nápravných opatření, která se pokoušejí tento jev omezit. Takovými opatřeními se ve svých studiích zabývají autoři Franzoni (2014) a také Torres a Freitas (2007). Tyto studie jsou popsány v následujících odstavcích. Každé z řešení má samozřejmě jinou efektivitu, některá se rovněž ukázala být nevhodná a v současnosti se již nepoužívají.

Nejstarším příkladem nápravných opatření je vybudování podzemního drenážního systému v okolí stavby. Principem je snížení úrovně volné hladiny podzemní vody do požadované výšky, což u systému funguje spolehlivě. Tento systém však nezabrání vztlínání kapilární vody a lze také diskutovat o rozdílné efektivitě v závislosti na půdních vlastnostech. Další nevýhodou je poměrně značná prostorová náročnost systému a

system tak například nelze použít v případě, že k řešenému objektu přiléhají další budovy (Franzoni, 2014).

Jednou z dalších technik používajících se pro zabránění vzrůstající vlhkosti zdiva je umístování vodotěsných zábran v horizontálních vrstvách přímo do konstrukce, čímž dojde k přerušení vztlínání vody. Problémy však nastávají už při realizaci, kdy je velice problematické až nemožné použít toto opatření u velmi silných zdí, jež se u kostelů zpravidla vyskytují. Při instalaci jsou pak způsobovány vibrace, které mohou poškozovat budovu. Rovněž bylo prokázáno, že je tímto opatřením snížena smyková pevnost zdiva a je tak ohrožena stabilita budovy během zemětřesení. Závěrem pak není splněn ani základní cíl realizace tohoto opatření, které je velmi neefektivní pod úrovní terénu a ani nad terénem nejsou účinky optimální. Dochází zde k situacím, kdy je objem vody ve zdivu pod zábranou téměř na hodnotě plného nasycení a může tak dojít k vážnému poškození zdiva z důvodu snížení mechanické odolnosti, jak bylo uvedeno v bodě 4.3. (Franzoni, 2014; Torres a Freitas, 2007).

Další možností je vytvoření chemické bariéry použitím hydrofobních chemikálií, jež na rozdíl od předchozího případu brání transportu vody zdivem na chemické, nikoliv fyzické bázi. Chemikálie jsou aplikovány pomocí injektaže přímo do základů budovy. Úskalím této metody je nutnost průniku chemikálie do všech pórů ve zdivu. Pokud se tak nestane, nedojde k přerušení transportu vody zdivem. Z tohoto důvodu bylo provedeno velké množství studií, z nichž vyplývá, že výsledky účinnosti chemické bariéry jako nápravného opatření stále nejsou zcela průkazné. Velmi totiž záleží na použité chemikálii, injektážním tlaku, materiálu zdiva, přítomnosti prasklin ve zdivu a stupni nasycení zdiva. V této oblasti probíhá ještě další výzkum (Franzoni, 2014; Torres a Freitas, 2007).

Existují také opatření, jejichž princip je založen na zvýšení výparu, čímž dochází k redukci obsahu vody ve zdivu. Mezi tato opatření patří tzv. Knappenovy kanálky, systém odvětrání základů, obnovovací omítky a termální metoda (Franzoni, 2014).

Knappenovi kanálky nebo také atmosférické drenážní sifony fungují na základě principu vyšší hmotnosti vlhkého vzduchu v porovnání se vzduchem suchým. Kanálky z pálené hlíny či perforovaných plastů jsou umístěny v šikmém směru přímo do zdiva a zazátkovány porézní maltou. Díky sklonu kanálků, které jsou vedeny od vnitřní strany zdi šikmo dolů směrem k vnější straně, by měl být těžší vlhký vzduch odváděn dolů právě k vnějšímu okraji zdi, kde dochází k výparu, a naopak suchý vzduch nahoru do interiéru. Bohužel se tento systém ukázal být málo efektivní a v některých podmínkách, jako například v nevytápěných místnostech nebo absenci přímého slunečního záření na vnější povrch zdi, dokonce způsobuje zvýšení vlhkosti zdiva. V současné době se tak tento systém již nepoužívá (Franzoni, 2014; Torres a Freitas, 2007).

Naopak slibným opatřením na bázi zvyšujícího se výparu je systém odvětrání základů zdiva. Odvětrávání je zajištěno pomocí odvětrávacích kanálků vyústěných do šachet ústících nad povrch okolního terénu. Tyto kanálky jsou instalovány jak na vnější straně zdiva, tak v interiéru pod podlahou v podobě porézního potrubí. Systém prokazatelně snižuje vlhkost zdiva v porovnání se stavem bez zásahu, a to jak v laboratorních, tak v terénních podmínkách. Efektivita systému samozřejmě závisí na materiálu zdiva a jeho tloušťce, přesto je systém obecně považován za účinný. Stále je však nutný výzkum především účinků krystalizace na ventilační systém (Franzoni, 2014; Torres a Freitas, 2007).

Obnovovací omítky podporují výpar z vnějšího povrchu zdí budov a zároveň zmírňují poškození způsobené krystalizací rozpustných solí. Jedná se o vysoce porézní materiály, které tak urychlují transport vodní páry a díky velkým pórům značně omezují kapilární vztlínání. Zmírnění poškození od rozpustných solí je pak u některých druhů omítek dosaženo ukládáním solí v jejich pórech, u jiných pak transportem solí k vnějšímu povrchu, kde vykrystalizují bez způsobení jakýchkoliv škod. Podle E. Franzoni (2014) ale v praxi bohužel není chování obnovovacích omítek vždy uspokojivé, a to především z důvodu životnosti materiálu. Efektivita také velmi závisí na charakteristikách prostředí, podle kterých musí být vhodně vybrán druh omítky, což bývá velmi často zanedbáváno a systém tak většinou nedosahuje optimální účinnosti.

Posledním z opatření zvyšujících výpar je termální metoda. Jde o jednoduchý princip zahřívání povrchu zdí. Toho je docíleno mírným ohřevem částí konstrukce, odkud se pak dodané teplo šíří. Zdi jsou zahřívány na teplotu jen o pár stupňů vyšší, než je teplota prostředí. Na základě matematické simulace a laboratorních testů bylo zjištěno, že metoda je velmi účinná při použití u vápenatých pískovců nebo lehkých betonů. Naopak u materiálů s vysokou kapilární vodivostí je účinnost vysoušení menší. Tato tvrzení bohužel nejsou prozatím podložena terénním experimentem, takže pro případné použití této metody je ještě nutný další výzkum (Dreyer, 2005; Franzoni, 2014).

Závěrem pak existuje také metoda založená na principu elektrokinetiky, jež využívá výskyt elektrické dvojvrstvy na povrchu kapilár v porézních materiálech. Tato metoda se nazývá aktivní elektroosmóza a je, zjednodušeně řečeno, založena na principu zavedení externího elektrického pole do systému voda-zdivo, což vyvolá přesun částic. Vytvoření elektrického pole je docíleno zavedením elektrického proudu do elektrod umístěných do zdiva a do půdy. Vytvořením elektrického pole pak dochází k přesunu elektronů mezi zdivem, které tvoří anodu a půdou, která je v tomto systému katodou, což v důsledku zapříčiní vysoušení zdiva. Tento princip byl testován na historické budově ve městě Kronshtadt City a výsledkem bylo výrazné snížení vlhkosti. Velký důraz je pak kladen především na

umístění anody. Ta by neměla být umístěna nad maximální výšku kapilárního vztlínání. V opačném případě je pak systém nefunkční (Ivliev, 2007; Franzoni, 2014).

4.5. Charakteristiky pískovce

Stavebním materiálem velkého množství historických budov, včetně kostela, který je předmětem této studie, je pískovec, proto je nezbytné v souvislosti s poškozením zdiva vlivem vlhkosti tento materiál charakterizovat. Retenčním křivkám a dalším materiálovým charakteristikám pískovce se věnuje studie Záleské a kol. (2014).

Pískovec je charakterizován jako jemnozrnná šedobílá nebo žlutá usazená hornina s nažloutlými až hnědými skvrnami tvořená z 90–95 % stmelými zrnky křemene. V hornině jsou přítomny i další minerály jako muskovit, zirkon, turmalín a epidot (Záleská a kol., 2014).

Během studie bylo laboratorně testováno 7 vzorků pískovce z lokalit Božanov, Hořice, Kocbeře, Libná, Úpice, Mšené a Těšín, u kterých byla měřena retenční křivka na přetlakovém aparátu při tlacích 1, 3, 5, 10 a 15 bar. Rovněž byla u vzorků zjištěna objemová hmotnost, měrná hmotnost a pórovitost (Záleská a kol., 2014).

Z výsledků pak je patrné, že se objemová hmotnost a pórovitost liší v závislosti na místě odebrání vzorku. Konkrétně objemová hmotnost dosahuje hodnot od 1845 kg/m³ u vzorku z Mšeného až do 2490 kg/m³ u vzorku z Těšína. S těmito výsledky korespondují i hodnoty pórovitosti pohybující se v rozmezí 5,8 % u vzorku z Těšína do 30,6 % u vzorku odebraného v Mšeném. S pórovitostí pak souvisí hodnota potenciální maximální objemové vlhkosti. Specifická hmotnost pískovce má jen velmi malý rozptyl od 2565 kg/m³ do 2680 kg/m³. Z výsledných retenčních křivek lze vyčíst, že největší pokles vlhkosti nastává při tlacích nižších než 3-5 bar, což ukazuje na poměrně vysoké zastoupení velkých kapilárních pórů (Záleská a kol., 2014).

V mokřém prostředí se na povrchu zdiva může objevit vrstva biologického povlaku nazývaného také biogenní skalní kůra, jež má odlišné hydraulické charakteristiky než původní materiál zdiva a tím ovlivňuje transport vody dovnitř a ven z konstrukce. Experimentálně bylo na pískovcovém bloku zjištěno, že biogenní vrstva snižuje hydraulickou vodivost pískovce přibližně o řád. To v důsledku znamená, že voda z okolí sice nenasákává do zdiva takovou rychlostí, je ale rovněž zpomalen průnik vlhkosti ze zdiva ven a dochází tak ke zvýšení vlhkosti těsně pod biogenní vrstvou. Z tohoto důvodu je pak pískovec náchylnější například k mrazovému zvětrávání. Účinky biologického povlaku na povrchu pískovce byly zkoumány na vzorku odebraném z přírodního skalního útvaru, pro zjištění míry ovlivnění, nebo zda jsou vůbec ovlivněny hydraulické charakteristiky pískovcového zdiva tak musí být proveden ještě další výzkum (Berger a kol., 2015; Slavík a kol., 2017).

4.6. Modelování transportu vody

Pro popis transportu vody v půdě a zdivu je ve většině modelů řešen použitím Richardsovy, případně Darcyho rovnice v různých modifikacích. Jednotlivé modely, jež jsou v tomto bodě popsány, se pak liší detailností, s jakou jsou řešeny okrajové podmínky, případně jiné faktory ovlivňující proudění vody.

Jednou z okrajových podmínek, na jejíž optimalizaci se některé modely zaměřují, je výpar. Modelováním výparu se zabývá studie autorů Warda a kol. (1993). Jak je v této studii uvedeno, výměna vody mezi půdou a atmosférou probíhá prostřednictvím dvou hlavních procesů. Průnik vody z atmosféry do půdy je zprostředkován infiltrací, jež závisí především na vlastnostech půdy. V opačném směru je pak přenos vody ve formě vodní páry způsoben výparem, jež je závislý jak na vlastnostech půdy, tak na atmosférických podmínkách a jedná se tedy o komplikovanější proces. Model představený v této studii se pak věnuje právě stanovení hodnoty výparu, a to jak na holém povrchu půdy, tak na povrchu porostlém vegetací.

Výpar z nenasyceného půdního profilu je počítán modifikací Penmanovy rovnice:

$$E = \left(\frac{\tau Q_n + \eta E_a}{\tau + \eta A} \right) \quad [16]$$

kde τ je sklon tlaku nasycené vodní páry vůči křivce průměrné teploty vzduchu, Q_n čistá radiace, η psychrometrická konstanta, E_a funkce tlaku vodní páry nad povrchem v závislosti na rychlosti větru a A je inverzní hodnota relativní vlhkosti vzduchu. V případě, že je půda nasycena, dochází k úpravě rovnice zpět na originální Penmanovu rovnici.

Proudění vody v zemině je popsáno pomocí Darcyho zákona. Proudění páry v půdě je pak modelováno použitím Fickova zákona. Vlivem kombinace tranzientního proudění kapalné vody a vodní páry půdním profilem dochází ke změně objemu kapalné a plynné fáze v půdě. V modelu je v souvislosti s tímto prouděním uvažováno, že změny objemu těchto dvou fází si navzájem odpovídají, přičemž změna objemu pevné fáze se zanedbává. Tato změna je pak vyjádřena rovnicí Fredlund a Morgernstern (1976) ve tvaru:

$$\frac{\Delta V_w}{V} = [m_1^w d(\sigma_y - u_a) + m_2^w d(u_a - u_w)] \quad [17]$$

kde $\frac{\Delta V_w}{V}$ je změna objemu vody, σ_y vertikální napětí, u_a tlak vzduchu, u_w tlak vody, m_1^w sklon $d(\sigma_y - u_a)$ ku $d(u_a - u_w)$ a m_2^w sklon $d(u_a - u_w)$ ku $d(\sigma_y - u_a)$.

Výpočet tlaku vodní páry závisí na tlaku nasycených vodních par a na teplotě, proto je v modelu počítán i transport tepla.

Při porovnání modelu s laboratorním pokusem bylo dosaženo shody. Jak model, tak laboratorní pokus pak poukázaly na existenci tří fází vysychání půdy. V první fázi, kdy je povrch zcela nasycen, nebo se blíží nasycení, je hodnota výparu téměř rovna hodnotě výparu potenciálního a jeho velikost je ovlivňována téměř výhradně atmosférickými podmínkami. Po vytvoření vysušené vrstvy půdy na povrchu nastává druhá fáze vysychání, kdy dochází k prudkému poklesu velikosti výparu. Tato fáze je pak významně ovlivněna hydraulickou vodivostí půdy. Následuje pak třetí fáze vysychání, kdy je půda dále vysušována do větší hloubky a velikost výparu je přibližně dvacetkrát menší, než tomu je ve fázi první.

Dalším významným faktorem, jež ovlivňuje proudění vody v půdním profilu je topografie. Zahrnutí tohoto vlivu do modelů proudění vody se věnuje studie autorů Choi a kol. (2006). Topografie má výrazný vliv na proudění vody na povrchu i pod povrchem, přesto není ve většině modelů tento faktor zahrnut. Děje se tak i přesto, že jsou již k dispozici digitální modely terénu s velmi podrobným rozlišením.

Autoři se ve studii zabývají modifikací Richardsovy rovnice, tak aby bylo možné zahrnout přímo do výpočtu sít vygenerovanou modely terénu. Tento model byl vyvinut jako optimalizace modelů stávajících, které již topografii do výpočtů zahrnují. Optimalizace se týká především parametrů popisujících variabilitu půd a dále pak funkcí závisících na měřítku úlohy.

Při modelování transportu vody zdivem, nebo jinými stavebními materiály, je pro zvýšení přesnosti vhodné zahrnout vliv preferenčního proudění způsobeného poruchami materiálu. Tomuto tématu se věnuje studie autorů Roelse a kol. (2004). Stávající modely nahrazují praskliny médiem s vysokou propustností o šířce odpovídající prasklině. Tento přístup však nezahrnuje různorodou podobu trhlin s variabilní šířkou a různými propojeními, jež mohou výrazně ovlivnit výslednou propustnost.

Zahrnutí prasklin do kontinuálního modelu však způsobuje numerickou nestabilitu modelu. Z tohoto důvodu je v této studii popsán model používající metodu konečných prvků, jež vznikl kombinací dvou diskrétních modelů. Jedním z použitých modelů je takzvaný oddělený model trhliny, jež simuluje rozšiřování trhliny v závislosti na poromechanickém zatížení. Druhým pak metoda sledování čela v kontinuálním modelu, jež simuluje přenos vlhkosti v diskrétním médiu. Zvláštní pozornost pak byla věnována spolehlivé předpovědi rychlosti absorpce vlhkosti v prasklině a redistribuce do neporušeného materiálu.

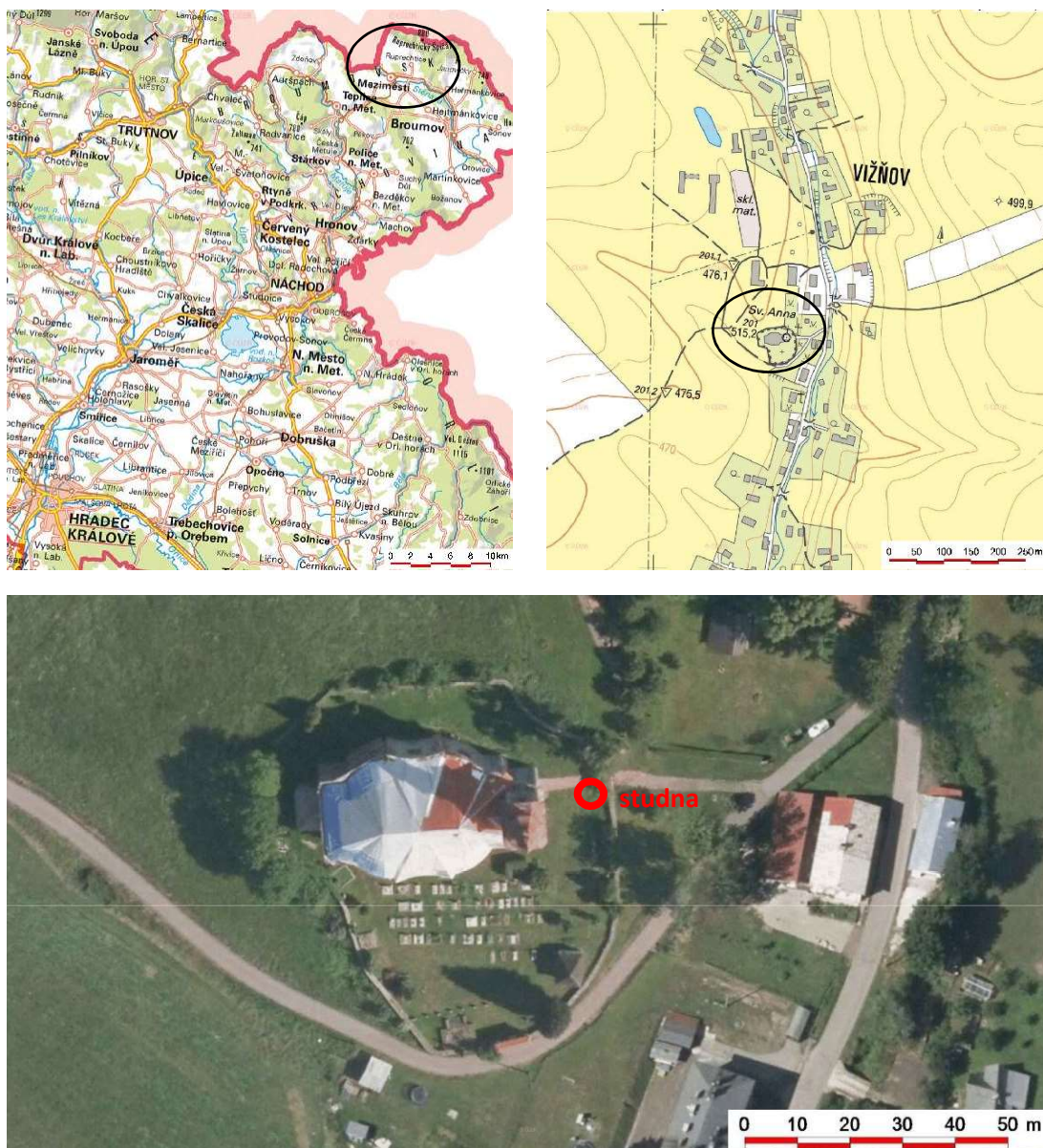
Model ukázal důležitý efekt zvlhčování na stabilitu materiálu, dále pak také na vývoj a chování trhlin.

5. Metody a materiál

Pro posouzení transportu vody v systému půda-zdivo barokního kostela sv. Anny byl v červnu 2017 instalován systém pro dlouhodobé měření uvnitř kostela, konkrétně ve zdi a pilířích na severní straně, a dále pak ve dvou stanovištích na pozemku přiléhajícím ke kostelu. Během instalace byly odebrány vzorky zdiva a půdy, které byly následně zpracovány v laboratoři.

5.1. Popis lokality

Kostel sv. Anny se nachází v obci Vižňov na Broumovsku severovýchodně od Hradce Králové u státní hranice s Polskem. Celá tato oblast pak spadá pod CHKO Broumovsko.



Obr. 5 Mapa lokality, ortofoto (ČUZK, 2017a; ČUZK 2017,b)

5.1.1. Geologické poměry

Jedná se o hornaté území o průměrné nadmořské výšce 495 m n. m. Konkrétně Vižňov pak leží v nadmořské výšce 470 m n.m.

Obec Vižňov se nachází mezi Broumovskou vrchovinou a Javořími horami. Geologicky území patří do Českého masivu, konkrétně se jedná o Český masiv-pokryvné útvary a postvariské migmatity, přičemž tato oblast je označována jako Vnitrosudetská pánev. Podloží je tvořeno zpevněnými sedimenty, konkrétně pestrobarevnými aleuropelity, jež jsou často vápnité s příměsí silicitů (Česká geologická služba, 2017).



Obr. 6 Půdní typy (VUMOP, 2017b)

Půdní typy vyskytující se v oblasti kostela jsou dystrické kambizemě, podzoly a kryptopodzoly. Půda je bezskeletovitá až slabě skeletovitá (VUMOP, 2017a; VUMOP, 2017b).



Obr. 7 Skeletovitost (VUMOP, 2017c)

5.1.2. Klimatické poměry

Území, kde se nachází kostel, spadá do mírně chladného, vlhkého klimatického regionu. Průměrná lednová teplota zde dosahuje hodnot -3°C až -4°C , průměrná červencová pak 16°C až 17°C . Průměrný roční srážkový úhrn nabývá hodnot v rozmezí 700–800 mm. Sněhová pokrývka pak leží na území průměrně 80-100 dnů v roce (AOPK, 2017).



Obr. 8 Klimatické regiony (VUMOP, 2017c)

5.1.3. Broumovská skupina kostelů

Zkoumaný kostel sv. Anny ve Vižňově patří do tzv. Broumovské skupiny kostelů. Jedná se o skupinu 11 barokních kostelů a jedné kaple, vybudovaných podle plánů Kryštofa Dientzenhofera a jeho syna Kiliána Ignáce v první polovině 18. století. Stavbu kostelů inicioval opat z broumovského opatství Otmar Zinke z důvodu nadále již nevyhovujícího stavu stávajících dřevěných kostelů (Klášter Broumov, 2017; Omnium, 2017).

Nejstarší stavba, která je řazena do skupiny Broumovských kostelů, byla dokončena roku 1698 a jedná se o kostel sv. Jiří a Martina v Martínkovicích. Tento kostel je jediným z celé skupiny, kde došlo pouze k přestavbě, nikoliv ke stržení starého a výstavbě nového kostela. Zároveň je také jediným dílem, jehož návrh nepochází od rodiny Dientzenhoferů. Autorem díla je stavitel Martin Allia. Několik dalších kostelů je pak návrhem Kryštofa Dientzenhofera. Konkrétně je to kostel sv. Michaela ve Verněřovicích (1722), sv. Jakuba Většího v Ruprechticích (1723), na němž stavební práce řídil syn Kryštofa Dientzenhofera - Kilián Ignác, sv. Barbory v Otovivích (1727) a kostel sv. Máří Magdalény v Božanově (1743). Kilián Ignác Dientzenhofer je pak autorem zbylých kostelů, které byly postaveny v rozmezí přibližně dvaceti let v první polovině 18. století. Jedná se o kostel Všech svatých v Heřmánkovicích (1723), sv. Prokopa v Bezděkově (1727), sv. Anny ve Vižňově (1728), sv. Václava v Broumově (1729), sv. Markéty v Šonově (1730) a klášterní kostel sv. Vojtěcha

v Broumově (1733). Do Broumovské skupiny kostelů pak patří také kaple Hvězda ležící na území zvaném Broumovské stěny, která byla dokončena roku 1733 rovněž podle návrhu Killiána Ignáce Dientzenhofera (klášter Broumov, 2017).



Obr. 9 Kostel sv. Anny (Omnium, 2017)

Před výstavbou zděného barokního kostela sv. Anny byl na stávajícím místě dřevěný kostel z první poloviny 14. století. Tento kostel však byl v roce 1722 stržen a na jeho místě byl v letech 1724 až 1728 vystavěn kostel nový. Autorem projektu je Kilián Ignác Dientzenhofer, stavbu vedl zednický mistr z Broumova a malby jsou dílem Josefa Hagera. Hranolová věž přiléhající k východní straně kostela pak byla postavena Johannem Heinrichem Opitzem z Ruprechtic. Z hlediska výzdoby stojí za zmínku především Freska na klenbě za kněžištěm (viz obr. 10), jejíž autorem je již zmiňovaný Josef Hager (Klášter Broumov, 2017; Omnium, 2017).

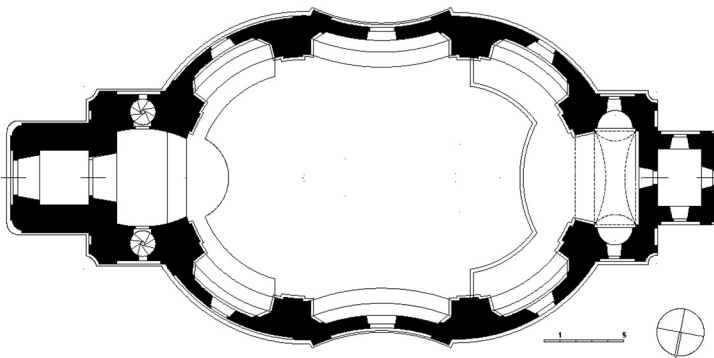
Velký význam z hlediska kulturního dědictví má pak především celá skupina kostelů, nikoli jednotlivé kostely. Z tohoto důvodu pak byla v květnu roku 2016 zahájeny přípravy pro podání podnětu k zapsání Broumovské skupiny kostelů na seznam UNESCO, na nichž se podílí Královéhradecký kraj (Hradecký deník, 2016). Aby bylo možné usilovat o zapsání této skupiny do seznamu památek UNESCO, je nezbytné zajistit opravy několika kostelů, jež jsou v poměrně špatném stavu. Jedním z výrazně poškozených kostelů v Broumovské skupině je pak také kostel sv. Anny ve Vizňově, na který se zaměřuje tato práce.



Obr. 10 Freska na klenbě za kněžištěm

5.1.4. Současný stav kostela

Barokní kostel sv. Anny se sestává z hlavní lodi o rozměrech 24x15 m, kněžiště o rozměrech 6x3 m, sakristie umístěné za kněžištěm a hranolové věže umístěné na východní straně. Loď má eliptický tvar a po obvodu je umístěno 8 pilířů podpírající trémový strop, mezi kterými jsou umístěné výklenky (Collegium, 2017).



Obr. 11 Půdorys kostela sv. Anny ve Vižňově (Itras, 2017)

V současné době je možné pozorovat významné poruchy konstrukcí kostelního zdiva vlivem vysoké vlhkosti. Příčiny a možné následky takových poruch jsou nastíněny již v kapitolách 4.2. a 4.3. Vlivem vysoké vlhkosti se na podlaze a v patách stěn kostela vytváří vrstva plísně a řas (viz obr. 12 vpravo nahoře), což má nejen negativní estetický dopad, ale je zde také možnost zdravotních rizik. Mikroorganismy pak způsobují také urychlení degradace nejprve omítky a následně také zdiva. V patě stěny se pak také objevují trhliny, které jsou pravděpodobně způsobeny transportem a akumulací solí

rozpuštěných ve vodě do zdiva. Vlivem vysoké vlhkosti vzduchu uvnitř kostela, dochází ve vyšších patrech k popraskání říms a omítky (viz obr. 12 dole). V exteriéru budovy pak vlivem kolísání hladiny podzemní vody a s tím spojenými zmrazovacími cykly, jež nejspíše způsobily úplnou degradaci malty, dochází k odpadávání pískovcových kvádrů z konstrukce (viz Obr. 12. 12 vlevo nahoře).

Během podzimu 2017 proběhla alespoň rekonstrukce střechy kostela, jež zabrání zvyšování vlhkosti vlivem zatékání vody do kostela stropem při srážkách. Kostel je však ve špatném stavu a bude nezbytná poměrně rozsáhlá rekonstrukce.



Obr. 12 Poškození stěn kostela v exteriéru (vlevo nahoře), u podlahy v interiéru (vpravo nahoře) a římsy pod stropem (obrázky dole)

5.2. Odběr vzorků půdy, zdiva a jejich analýza

Při výkopech prováděných při instalaci čidel dlouhodobého měření ve dvou venkovních stanovištích byly odebrány porušené i neporušené vzorky zeminy. Porušené vzorky byly odebrány v obou stanovištích z horizontů 10, 20 a 30 cm pod povrchem a použity pro stanovení čár zrnitosti a měrné hmotnosti zeminy. Neporušené vzorky pak byly odebrány rovněž v obou stanovištích z totožných horizontů jako vzorky porušené. Neporušené vzorky byly odebrány do Kopeckého válečku a použity pro stanovení retenčních křivek.

Při instalaci měření uvnitř kostela pak byly odebrány také vzorky omítky a zdiva ze stěny a pilíře ve výšce 80 cm nad podlahou kostela. Neporušené vzorky potřebné pro další

analýzu se však povedlo odebrat pouze z pilíře. U těchto vzorků byla stanovena objemová hmotnost a dále pak retenční křivka.

Čáry zrnitosti a měrné hmotnosti půdy pro jednotlivé hloubky odběrů byly stanoveny pracovníky KHMKI FSv ČVUT pracovními postupy popsány níže. Zbylé charakteristiky pak byly stanoveny autorem diplomové práce postupy, které jsou rovněž prezentovány v následujících bodech.

5.2.1. Vzorky půdy

Měrná hmotnost půdy

Pro stanovení měrné hmotnosti byla nejprve část vlhkého porušeného vzorku zvážena, dále pak 24 hodin sušena při 105 °C a znovu zvážena. Druhým vážením byla stanovena hmotnost sušiny vzorku, z které pak byla vypočtena hmotnostní vlhkost nezbytná pro finální výpočet. Hmotnostní vlhkost byla vypočtena vzorcem:

$$w = \frac{m - m_s}{m_s} \quad [18]$$

kde w je hmotnostní vlhkost, m hmotnost vlhkého vzorku a m_s hmotnost vysušeného vzorku.

Dále byl stanoven objem pevné fáze měřením v pyknometru. Měrná hmotnost pak byla stanovena na základě vzorce:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [19]$$

kde ρ_s je měrná hmotnost zeminy, m_s je hmotnost suché zeminy a V_s objem suché zeminy. Hmotnost suché zeminy je v případě navážky umístěné do pyknometru vypočtena z hmotnosti vlhkého vzorku a hodnoty hmotnostní vlhkosti pomocí vzorce:

$$m_s = \frac{m_v}{w + 1} \quad [20]$$

kde m_s je hmotnost suché zeminy, m_v hmotnost vlhké zeminy a w hmotnostní vlhkost.

Čára zrnitosti

Čára zrnitosti byla u vzorků stanovena proséváním na sítích pro zrna o průměru větším než 0,1 mm a Cassagrandeho hustoměrnou metodou pro zrna o průměru menším než 0,1 mm.

Při měření na sítích byly zaznamenávány hmotnosti půdy, jež zůstala na sítu s určitým průměrem ok. Při měření v hustoměru byla zrnitost stanovena nepřímo, a to sledováním sedimentace. V hustoměru byla měřena hustota suspenze v pravidelných intervalech. Na základě Stokesova zákona pak byl v závislosti na rychlosti sedimentace, a tedy hustoty suspenze, vypočítán průměr zrna a procentuální zastoupení této velikosti zrna a zrn menších v dané suspenzi. Velikost zrn byla vypočtena pomocí vzorce:

$$D_{(t)} = 10 \sqrt{\frac{18\eta H}{gt(\rho_s - \rho_0)}} \quad [21]$$

kde $D_{(t)}$ je velikost zrna v čase t , η dynamická viskozita vody, H odpovídající hloubka hustoměru v suspenzi, g gravitační zrychlení, t čas odečtu hodnoty na hustoměru, ρ_s měrná hmotnost zeminy a ρ_0 měrná hmotnost vody při dané teplotě (ČVUT, 2017a).

Procentuální zastoupení částic o velikosti D a menší byl vypočten vzorcem:

$$O_{(t)} = \frac{100}{s} \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} (R + c + m) \quad [22]$$

kde $O(t)$ je procentuální zastoupení částic o velikosti zrna D a menších v čase t , s navážka zeminy přepočtená na sušinu, ρ_s měrná hmotnost zeminy, R čtení na hustoměru, c menisková korelace a m teplotní korelace (ČVUT, 2017a).

Výsledné hodnoty pak byly zaznamenány do grafu čáry zrnitosti, odkud lze vyčíst podíl jílové, prachové a písečné fáze, na základě čehož pak byly vzorky zeminy zatříděny pomocí trojúhelníkového diagramu zrnitosti půd-NRSC USDA.

Retenční křivka

Pro stanovení retenčních křivek půdy bylo na místě měření odebráno celkem 22 neporušených vzorků půdy do Kopeckého válečků. Ty byly nejprve v laboratoři opatřeny sítkou na spodní straně, zváženy a nasyceny vodou (viz obr. 13).



Obr. 13 Sycení vzorků

Po nasycení byly vzorky umístěny do pískového tanku (viz obr. 14), který pracuje na principu vytvoření podtlaku o určité, předem nastavené, tlakové výšce. Tímto podtlakem je pak z vzorků drénována voda. Množství oddrénované vody je zjištěno zvážením vzorků po dosažení rovnovážného stavu, tedy v momentě, kdy ze vzorku při daném podtlaku již neodtéká voda. Na pískovém tanku byly nastaveny hodnoty podtlaků -3 cm, -10 cm, -30 cm a -50 cm.



Obr. 14 Pískový tank

Pro tlakové výšky od 100 cm, neboli 0,1 bar, pak byl použit přetlakový aparát (viz obr. 15). V přetlakovém aparátu je voda vytlačována ze vzorku přes porézní keramickou destičku za pomoci přetlaku vzduchu vháněného do aparátu kompresorem. Po dosažení rovnovážného stavu, tedy v momentě, kdy ze vzorku již neodtéká voda, jsou vzorky z aparátu vyjmuty, zváženy a měření pak pokračuje s novou hodnotou přetlaku. Pro stanovení bodů retenční čáry byly použity tlaky 0,1 baru, 0,3 baru, 1 bar a 3 bary. Vzhledem k dlouhé době potřebné pro oddrénování vody ze vzorku při vysokých tlacích nebylo již možné stanovit poslední dvě zbývající hodnoty retenční čáry pro tlaky 5 a 15 barů.



Obr. 15 Přetlakový aparát

V grafu retenční čáry jsou hodnotami na osách absolutní hodnota tlakové výšky, tedy hodnoty podtlaku nastavované na pískovém tanku a hodnoty tlaku nastavované na přetlakovém aparátu, a objemová vlhkost, kterou bylo nutné dopočíst z hmotností vzorků. Objemová vlhkost byla z hmotností zvážených vzorků dopočítána pomocí vzorce:

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{m_w}{V\rho_w} = \frac{m - m_s}{V\rho_w} \quad [23]$$

kde θ je objemová vlhkost, V_w objem vody ve vzorku, V objem vzorku (100 cm³ v případě Kopeckého válečku), m_w hmotnost vody ve vzorku, ρ_w hustota vody, m hmotnost vzorku a m_s hmotnost pevné fáze.

Body retenční čáry byly doměřeny pouze do hodnoty 3 barů, zbývající hodnoty pro 5 a 15 barů budou doměřeny až po dokončení této diplomové práce. Vzhledem k neukončenému měření tak nebylo možné k datu dokončení diplomové práce vzorky vysušit a zjistit tak hmotnost pevné fáze, jež je nezbytná pro stanovení objemové vlhkosti. Hodnota m_s tak byla odhadnuta výpočtem z vlhkosti při plném nasycení, jež byla odečtena z dat čidel CS 650 v hloubce 25 cm v místě odběrů vzorků. Vzorec použitý pro odhad m_s byl získán úpravou vzorce pro výpočet objemové vlhkosti a má tvar:

$$m_s = m - \theta V \rho_w \quad [24]$$

kde θ je objemová vlhkost při plném nasycení, V objem vzorku (100 cm³ v případě Kopeckého válečku), ρ_w hustota vody, m hmotnost vzorku při plném nasycení a m_s hmotnost pevné fáze.

Po získání bodů retenční čáry byly tyto body proloženy v programu ARC, čímž byly získány retenční křivky pro jednotlivé vzorky. Proložení bodů retenční čáry je provedeno metodou van Genuchtena, jež byla popsána v kapitole 3.1.2.

Pro získání jedné reprezentativní retenční křivky z více vzorků byl dále v programu ARC proveden ještě scaling (Vogel, 1990). Výsledkem tedy je jedna retenční křivka půdy pro každý horizont v obou stanovištích odběru vzorků.

5.2.2. Vzorky zdiva

Během odvrtávání otvorů pro čidla MPS-6 byly ze zdiva odebrány neporušené vzorky, u kterých byla laboratorně stanovena objemová hmotnost a retenční křivka. Neporušené vzorky se podařilo odebrat pouze z jednoho vrtu, a to konkrétně v pilíři. Neporušených vzorků vhodných pro další analýzu bylo celkem 5 (viz obr. 16) Podle struktury lze předpokládat, že o pískovcové zdivo se jedná jen v případě vzorku číslo 531. Ostatní vzorky jsou pak odebrány z omítky.

Vzorky jsou označeny číslem váženky, ve které byly sušeny. Podle struktury lze předpokládat, že o pískovcové zdivo se jedná jen v případě vzorku číslo 531. Ostatní vzorky jsou pak odebrány z omítky.



Obr. 16 Vzorky zdiva

Vzorky byly nejprve vysušeny při 105 °C a zváženy, čímž byla zjištěna hmotnost pevné fáze potřebná pro přepočítání hmotností vlhkých vzorků na objemovou vlhkost, na základě čehož byly následně stanoveny body retenční čáry. Následně byly vzorky nasyceny vodou a zváženy podruhé, čímž byla později stanovena hodnota vlhkosti při plném nasycení.

Pro stanovení objemové hmotnosti a objemové vlhkosti bylo nezbytné stanovit objem vzorků. To bylo provedeno metodou Archimédova vážení, jež umožňuje vypočítat objem vzorku pomocí výpočtu vztlakové síly. Tento výpočet byl upraven pro použití klasické digitální váhy, jelikož v laboratoři nejsou k dispozici váhy závěsné, pro něž je vzorec odvozen. Měření probíhalo tak, že byla nejprve zvážena nádoba s vodou (m_1), následně

byl do vody ponořen plně nasycený vzorek tak, aby se nedotýkal stěn ani dna nádoby (viz obr. 17) a byla zaznamenána celková hmotnost (m_2).

Za předpokladu, že rozdíl hmotností m_2 a m_1 je roven vztlakové síle působící na vzorek, je pak možné vypočítat objem vzorku použitím vzorce:

$$V = \frac{m_2 - m_1}{\rho_w} \quad [25]$$

kde m_1 a m_2 jsou již zmíněné hmotnosti, V objem vzorku a ρ_w hustota vody (ČVUT, 2017b).

Při známém objemu pak lze dopočítat objemovou hmotnost vzorků pomocí vzorce:

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad [26]$$

kde ρ_d je objemová hmotnost, m_s hmotnost pevné fáze a V objem vzorku.



Obr. 17 Archimédovo vážení

Po stanovení objemu byly vzorky umístěny do pískového tanku k vzorkům půdy. Nastavené hodnoty podtlaku byly -30 cm a -50 cm. Následně byly vzorky umístěny do přetlakového aparátu, kde byly změřeny hodnoty vlhkosti při tlacích 0,1 baru, 0,3 baru 1 baru a 3 barech. Pro zlepšení kontaktu zdiva s porézní destičkou aparátu byla na povrch vzorků zdiva nanesena tenká vrstva ultra jemného písku (viz

Obr. 18 obr. 18), která byla následně při každém vážení odstraněna a před umístěním vzorků zpět do přetlakového aparátu opět nanesena. Vzhledem k časové náročnosti měření nemohly být opět změřeny hodnoty vlhkosti při tlacích 5 a 15 barů.



Obr. 18 Umístění vzorků zdiva v přetlakovém aparátu

Hodnoty objemové vlhkosti pak byly dopočítány z naměřených hodnot hmotností vzorků, a to stejným způsobem jako v případě vzorků půdy. Podstatným rozdílem však je fakt, že u vzorků zdiva je hodnota hmotnosti pevné fáze známá a není tedy nutné tuto hodnotu odhadovat.

Po získání bodů retenční čáry byly tyto body opět, jako v případě vzorků půdy, proloženy křivkou v programu ARC, čímž byly získány retenční křivky pro jednotlivé vzorky. Proložení bodů retenční čáry je v tomto programu provedeno metodou van Genuchtena, jež byla popsána v kapitole 3.1.2.

Pro získání jedné reprezentativní retenční křivky z daných pěti vzorků byl dále v programu ARC proveden ještě scaling (Vogel, 1990). Výsledkem tedy je jedna retenční křivka pro zdivo v pilíři kostela.

5.3. Monitoring

Systém dlouhodobého měření se skládá celkem ze 3 stanovišť. První stanoviště je uvnitř kostela na severní straně (viz obr. 19), kde jsou čidla umístěna ve stěně, v pilíři a v podlaze pod nimi.



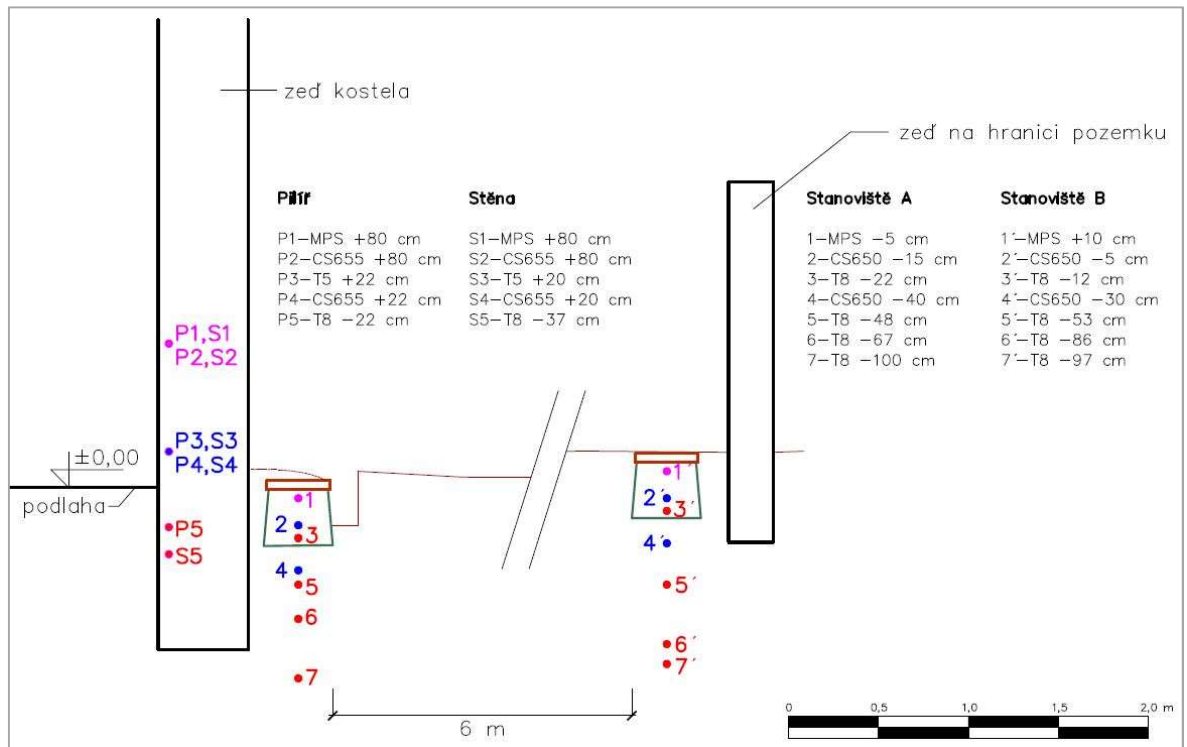
Obr. 19 Stanoviště uvnitř kostela

Další dvě stanoviště pak jsou umístěna na pozemku severně od kostela (viz obr. 20). Zde jsou vyhloubeny dvě jámy (A, B) vzdálené od sebe přibližně 8 metrů. Jáma A přiléhá těsně ke kostelu, jáma B je pak v blízkosti zdi kostelního hřbitova. Data z měření jsou pak vedena kabelem ze stanoviště B do stanoviště A, odkud pak dále pokračují skrz zeď kostela k vnitřnímu stanovišti. Odtud vede kabel do dataloggeru Campbell Scientific CR1000 umístěného uvnitř kostela v prostoru schodiště.



Obr. 20 Venkovní stanoviště

Umístění čidel v jednotlivých stanovištích je znázorněno na následujícím náčrtku. Zde je především vidět výškové uspořádání. Výška podlahy kostela byla zvolena jako referenční hodnota a zbylé výšky jsou k ní vztaženy. Poloha podlahy kostela vůči venkovnímu terénu však musela být do jisté míry odhadnuta, jelikož přesné měření není k dispozici.



Obr. 21 Náčrtek umístění čidel

Umístění jednotlivých čidel vztažené k povrchu, případně hloubky uvnitř materiálu, ve kterých čidla měří jsou popsány v následující tabulce.

Tabulka č. 1 Umístění čidel

CS 650	umístění	hloubka pod terénem	délka hrotu
1	stanoviště A	25 cm	30 cm
2	stanoviště A	50 cm	30 cm
3	stanoviště B	25 cm	30 cm
4	stanoviště B	50 cm	30 cm

CS 655	umístění	výška nad podlahou	délka hrotu
1	pilíř	22 cm	12 cm
2	pilíř	80 cm	12 cm
3	stěna	20 cm	12 cm
4	stěna	80 cm	12 cm

MPS-6	umístění	poloha k terénu	hloubka umístění ve zdi
1	stanoviště A	-10 cm	22 cm
2	stanoviště B	-10 cm	20 cm
3	pilíř	80 cm	22 cm
4	stěna	80 cm	20 cm

T8	umístění	hloubka pod terénem
1	pilíř	22 cm
2	stěna	37 cm
3	stanoviště A	32 cm
4	stanoviště A	58 cm
5	stanoviště A	77 cm
6	stanoviště A	110 cm
7	stanoviště B	32 cm
8	stanoviště B	73 cm
9	stanoviště B	106 cm
10	stanoviště B	117 cm

T5	umístění	výška nad podlahou	hloubka umístění ve zdi
1	pilíř	22 cm	13,5 cm
2	stěna	20 cm	13,5 cm

5.3.1. Měřící přístroje

Pro měření vlhkostního potenciálu jsou využity tenzometry UMS T8, UMS T5 (Meter Group, Německo) a čidla MPS-6 (Meter Group, USA). Vlhkost je pak měřena čidly CS 650 a CS 655 (Campbell Scientific, USA). Všechna čidla kromě UMS T5 měří také teplotu.

UMS T8

Tenzometry UMS T8 měří tlakovou složku potenciálu půdní vody v nasyceném i nenasyceném prostředí. K přenosu tlaku z vody v půdě do vody v přístroji slouží porézní keramická čepička, jež umožňuje jejich vzájemný kontakt. Voda v přístroji pak přenáší kladné i záporné kapilární tlaky na tlakové čidlo. V porézní čepičce je umístěno také čidlo teploty.



Obr. 22 Tenzometr UMS T8 (UMS, 2017a)

Přístroj je možné ponechat v půdě i během zimního období, pokud je splněna podmínka, že je čepička tenzometru minimálně 20 cm pod povrchem. V případě že půda zamrzne je pak na datech z tenzometru vidět skok na konstantní hodnotu, která je měřena až do chvíle, kdy půda opět rozmrzne, poté měření dále pokračuje.

Rozsah měření tlaků je od -85 kPa do 100 kPa s přesností $\pm 0,5$ kPa. Teploty jsou pak měřeny od -30°C do 70°C s přesností 0,2 K pro teploty od -10°C do 30°C a 0,4 K pro teploty pod -10°C a nad 30°C (UMS, 2012).

Praktickou výhodou tenzometru UMS T8 jsou doplňovací hadičky na vršku přístroje, kterými je možné doplnit do tenzometru vodu bez nutnosti přerušování měření a vyjmutí tenzometru z půdy.

UMS T5

Tenzometr UMS T5 je obdoba tenzometru UMS T8 a funguje tedy na stejném principu. Na rozdíl od UMS T8 jsou však měřeny pouze tlaky, nikoliv teploty. Kromě teplotního čidla neobsahuje UMS T5 ani hadičky pro doplňování vody. Jeho výhodou je však malý průměr těla měřícího přístroje, čehož bylo využito při měření talkového potenciálu ve zdivu kostela. Délka tenzometru je 10 cm.

Rozsah měření je od -160 kPa do 100 kPa s přesností $\pm 0,5$ kPa (UMS, 2009).



Obr. 23 UMS T5 (UMS, 2017b)

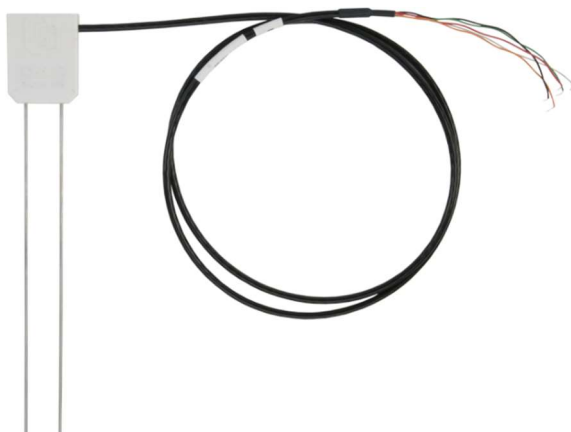
CS 650 a CS 655

Čidla vlhkosti od společnosti Campbell Scientific - CS 650 se skládají ze dvou nerezových hrotů dlouhých 30 cm, připojených k elektronickým obvodům krytých epoxidovou krabičkou. Čidla CS 655 se pak skládají rovněž z dvou nerezových jehel připojených na obvodovou desku, jež jsou však jen 12 cm dlouhé. Přístroje měří hodnoty objemové elektrické vodivosti, objemové vlhkosti a teploty.

Určení vlhkosti probíhá na principu měření rychlosti šíření elektromagnetických vln podél sondy v závislosti na měnící se permitivitě půdního prostředí. Zvýšený obsah vody způsobí zvýšení permitivity, což snižuje rychlost šíření vln. Rychlost šíření vln je získána měřením času uplynulého od vyslání po návrat signálu nerezovou jehlou. Tato rychlost je pak pomocí kalibrační rovnice přímo přepočítávána na objemovou vlhkost.

Čidlo měřící teplotu je v kontaktu s ocelovým hrotem, ale je umístěno uvnitř epoxidové krabičky. V případě instalace čidla do zdiva, je vzhledem k nízké hodnotě teplotní vodivosti oceli a malému průměru hrotů měřena spíše teplota u povrchu, nikoliv uvnitř materiálu zdiva.

Pro čidla CS 650 i CS 655 je rozsah měření vlhkosti od 5% do 50% s přesností ± 3 %. Teploty jsou měřeny v rozsahu od -50°C do 70°C s přesností $\pm 0,1\%$ pro rozsah teplot od 0°C do 40°C a $\pm 0,5\%$ pro teploty vyšší než 40°C a nižší než 0°C (Campbell Scientific, 2017a).



Obr. 24 CS 650 (Campbel Scientific, 2017b)

MPS-6

Přístroj pro měření tlakového potenciálu MPS-6 se skládá ze dvou keramických disků připojených k obvodové desce. Přístroj měří také teplotu v místě keramického disku.

Tlakový potenciál je měřen na základě stejného principu jako v případě čidel CS 650 a CS 655, tedy pomocí měření permitivity. Na rozdíl od čidel CS 650 a CS 655 probíhá měření u MPS-6 na keramických discích, které jsou v rovnováze s okolním prostředím.

Rozsah měření vlhkostního potenciálu je od -9 kPa do -100 000 kPa s přesností \pm (10% hodnoty čtení + 2 kPa) při rozsahu hodnot -9 kPa až -100 kPa. Rozsah měření teploty je pak od -40°C do 60°C s přesností \pm 1°C (Decagon, 2017a).



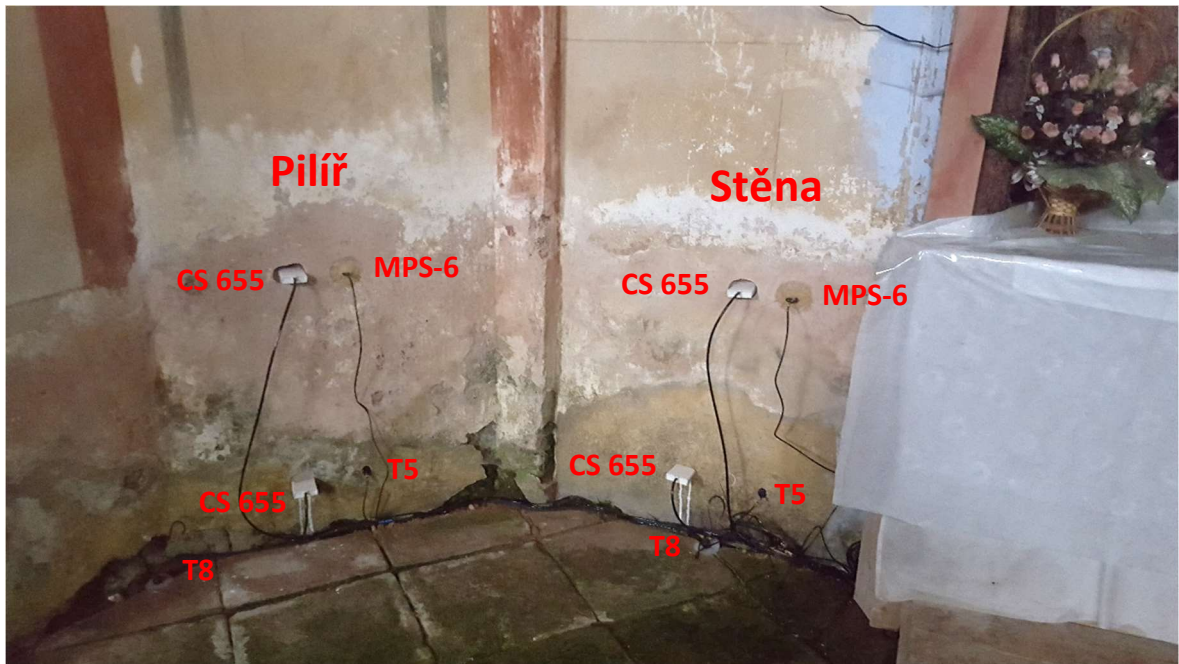
Obr. 25 MPS-6 (Decagon, 2017b)

5.3.2. Monitoring uvnitř kostela

Uvnitř kostela probíhá měření ve dvou místech (viz obr. 26), a to ve stěně a v pilíři. V každém stanovišti je pak šikmo v podlaze umístěn tenzometr UMS T8 délky 50 cm, který měří vlhkostní potenciál pod stěnou, respektive pilířem.

Ve výšce 20 cm nad podlahou jsou vedle sebe ve vodorovné poloze umístěna do zdiva čidla CS 655 měřící vlhkost a tenzometr UMS T5 měřící vlhkostní potenciál.

Ve výšce 80 cm jsou pak vedle sebe umístěna čidla CS 655 měřící vlhkost a MPS-6 měřící vlhkovostní potenciál.



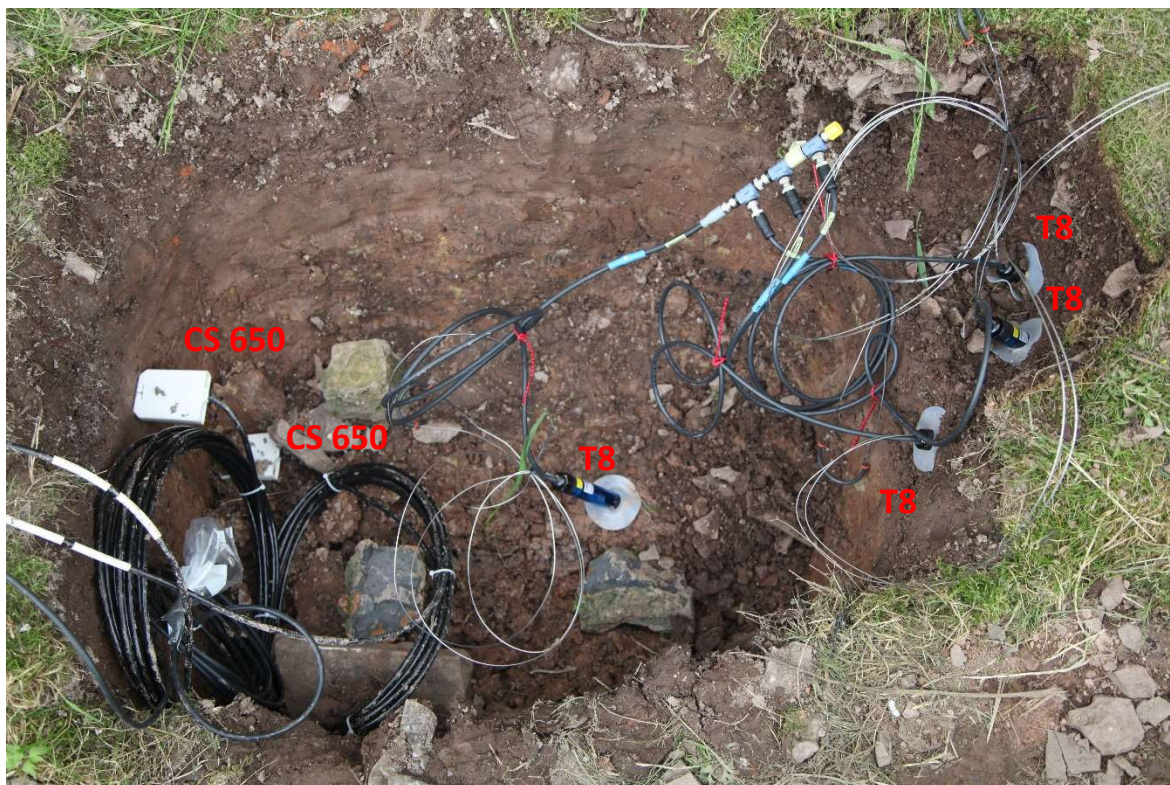
Obr. 26 Umístění měření uvnitř kostela

5.3.3. Monitoring na pozemku u kostela

Ve dvou stanovištích probíhá měření také na pozemku přiléhajícím k severní straně kostela. Rozložení stanovišť je naznačené již na začátku kapitoly na obr. 20 a obr. 21.

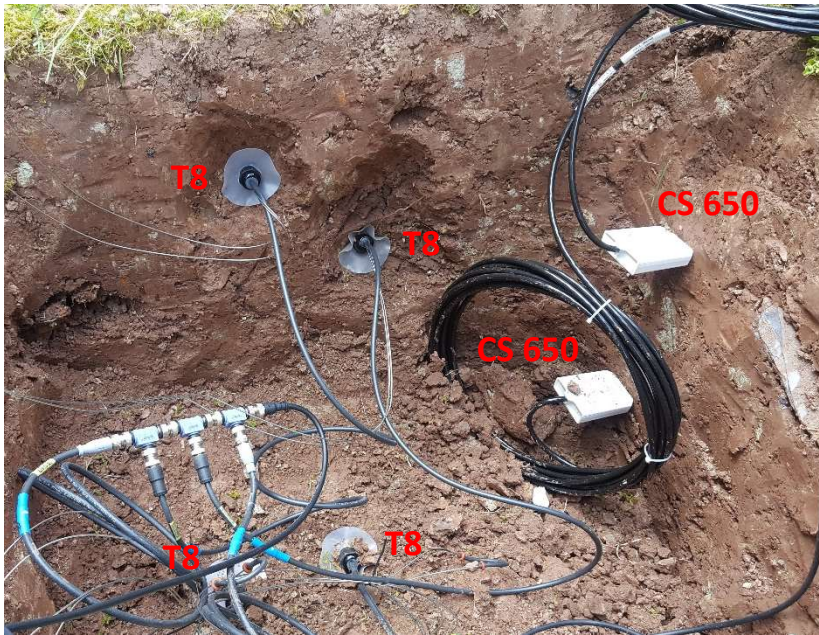
Stanoviště A přiléhá ke stěně kostela, na jejíž druhé straně se nachází vnitřní stanoviště. Stanoviště B je pak u zdi kostelního hřbitova. Mezi stanovišti je malý výškový rozdíl přibližně 20 cm. V každém stanovišti jsou umístěna čtyři čidla UMS T8 o délce 40, 60, 80 a 100 cm, dvě čidla SC 650 a jedno čidlo MPS-6. Do obou vyhloubených jam byly po instalaci čidel vsunuty šachtice, díky nimž je umožněn přístup k doplňovacím hadičkám tenzometrů a ke kabelům jednotlivých čidel.

Ve stanovišti A je podloží tvořeno velmi tuhým jílem, který významně ztěžoval instalaci především tenzometrů. Tenzometr délky 40 cm je umístěn v hloubce 25 cm pod terénem pod úhlem 11°, čímž je dosaženo měření v hloubce 31,6 cm pod terénem. V hloubce 24 cm pod terénem jsou umístěny tenzometry dlouhé 60 a 80 cm pod úhlem 43° a 42°, jimiž jsou měřeny hodnoty tlakového potenciálu v hloubce 58 a 77 cm pod úrovní terénu. Poslední tenzometr, jež je 100 cm dlouhý, je umístěn v hloubce 50 cm pod úhlem 46°, což zajišťuje měření v hloubce 110 cm pod úrovní terénu. Čidla CS 650 jsou pak umístěna vodorovně v hloubce 25 a 50 cm pod terénem a jsou nasměrována rovnoběžně se stěnou kostela. MPS-6 je pak umístěno v hloubce 10 cm pod úrovní terénu. Rozložení čidel je možné vidět na Obr. 27, kde ale nejsou zachycena čidla MPS-6, jež byla k monitorovací sestavě přidána až po 3 měsících od instalace.



Obr. 27 Stanoviště A

Ve stanovišti B je nainstalována stejná sada čidel jako ve stanovišti A. Tenzometr délky 40 cm je umístěn v hloubce 20 cm pod povrchem v úhlu 17° , čímž je dosaženo měření v hloubce 32 cm pod úrovní terénu. V hloubce 30 cm je pod úhlem 46° umístěn tenzometr délky 60 cm, jež zajišťuje měření v hloubce 73 cm pod terénem. V hloubce 50 cm pak jsou nainstalovány tenzometry dlouhé 80 a 100 cm pod úhly 44° a 46° , které měří hodnoty tlakového potenciálu v hloubkách 106 a 117 cm. Čidla CS 650 jsou stejně jako u stanoviště A umístěny vodorovně v hloubkách 25 a 50 cm a jsou natočeny proti svahu směrem ke kostelní zdi. Čidlo MPS-6 je pak umístěno v hloubce 10 cm pod povrchem. Rozložení čidel je možné vidět na Obr. 28, kde opět není možné vidět čidla MPS-6, jež byla k monitorovací sestavě přidána až po 3 měsících od instalace.



Obr. 28 Stanoviště B

5.4. Analýza srážkoměrných dat

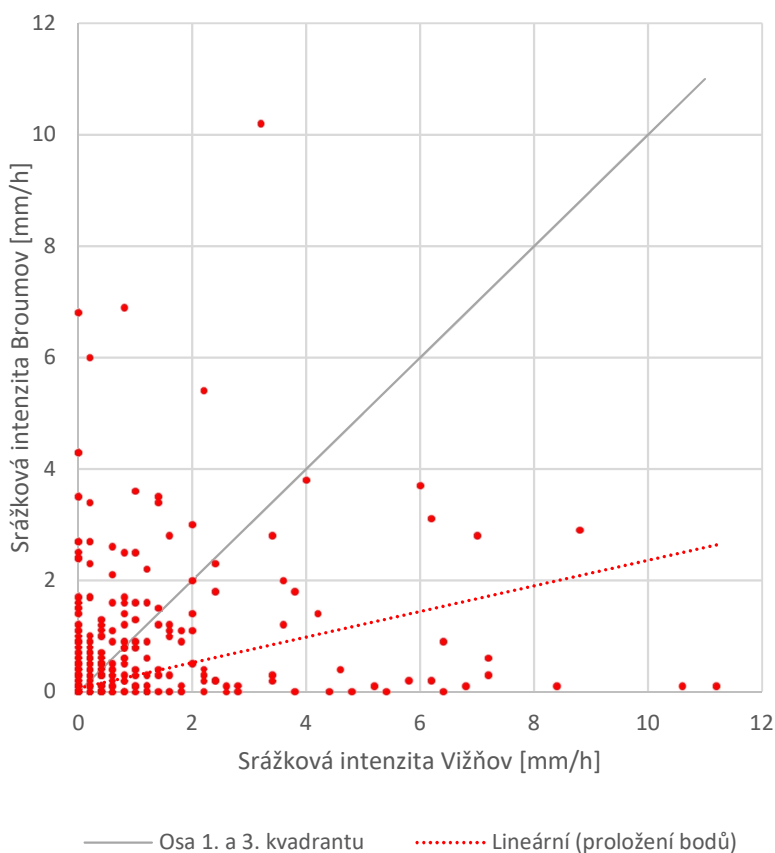
Na pozemku sousedícím s kostelem sv. Anny je nově umístěn srážkoměr (viz obr. 29) patřící Regionálnímu hydrologickému informačnímu systému, jež poskytuje online volně použitelná data. Měření však začalo až 14.7.2017 a data z předešlého období byla tedy získána od ČHMÚ z meteorologické stanice Broumov. Tato stanice je od kostela sv. Anny vzdálena přibližně 11 km a je tedy nutné ověření, zda si data z obou srážkoměrů odpovídají a lze tedy chybějící data ze srážkoměru ve Vižňově doplnit daty ze srážkoměru v Broumově.



Obr. 29 srážkoměr ve Vižňově

Pro porovnání dat bylo vybráno období od 14.7. do 31.10., kdy jsou k dispozici data z obou srážkoměrů.

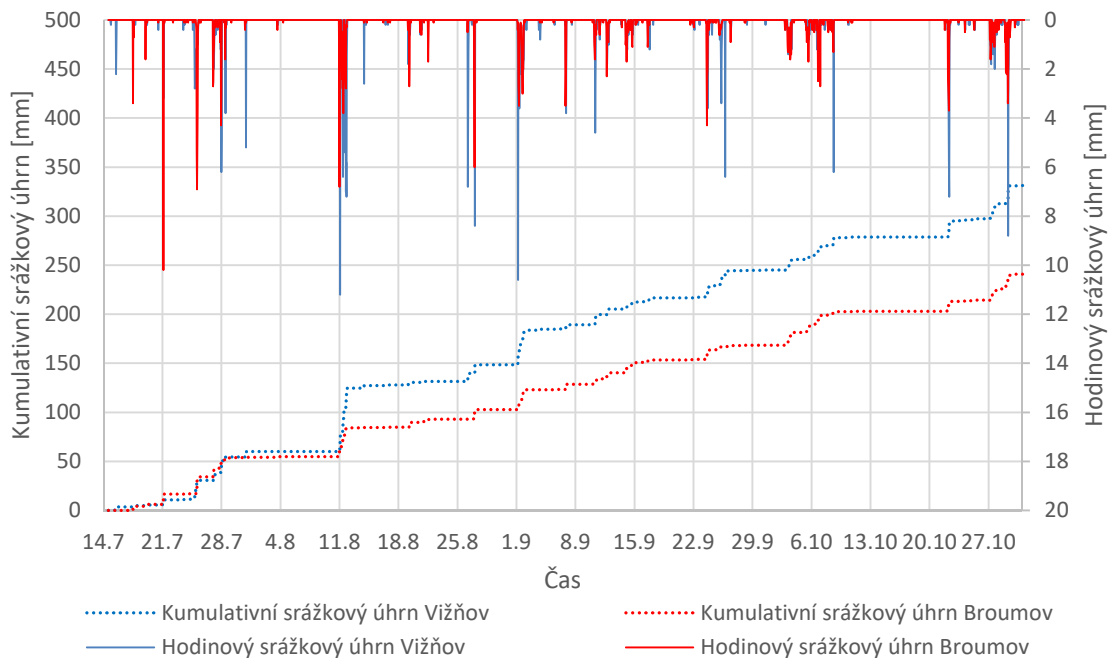
Data od ČHMÚ byla získána v podobě sumy srážkového úhrnu v hodinovém kroku. Data ze srážkoměru ve Vižňově tak musela být nejprve upravena, jelikož zde je měřen srážkový úhrn v šestiminutovém kroku. Po převedení dat ze srážkoměru ve Vižňově na úhrny v hodinovém kroku, byla data obou srážkoměrů porovnána použitím korelace. Hodnoty byly pro názornost také vyneseny do grafu. Po vynesení časově si odpovídajících dat do grafu, byly hodnoty lineárně proloženy. V případě závislých dat, by proložení odpovídalo ose 1. a 3. kvadrantu, což, jak lze vidět v grafu, neplatí. Pro možnost kvantifikace byl také vypočten korelační koeficient, který má hodnotu 0,33. V případě, že by se jednalo o na sobě závislá data, by korelační koeficient nabýval hodnot 1 nebo -1.



Obr. 30 Porovnání dat srážkoměrů

V následujícím grafu byly vyneseny srážkové úhrny a kumulativní srážkové úhrny. Na základě těchto dat lze potvrdit, že nízký koeficient korelace není způsoben časovým posunem srážek. Průběh kumulativního srážkového úhrnu je velmi podobný v obou srážkoměrech, což znamená že ve většině případů dochází k výskytu srážky v obou místech. Liší se však hodnoty hodinových srážkových úhrnů, což je typické pro horské

oblasti, kterou Broumovsko bezesporu je. Hodinový srážkový úhrn je ve Vižňově vyšší prakticky při každé větší srážkové události. Podobných hodnot nabývají pouze srážky malé intenzity, které zasahují vždy velké území.



Obr. 31 Srážkové úhrny

Po porovnání obou sad dat je nutné konstatovat, že pro období od 14.6. do 14.7. nelze zcela nahradit data chybějící ve srážkoměru ve Vižňově daty měřenými v Broumově. Data z Broumova lze však brát jako orientační hodnoty, které ukáží, kdy v daném časovém úseku přišlo. Jelikož se ale jedná o letní období s intenzivními srážkami, nebudou se srážkové intenzity shodovat tak, jak by tomu případně bylo v zimním období.

5.5. 1D modelování proudění vody

Pro modelování proudění vody byl použit program Hydrus 1D 4.0. Tento program se zabývá transportem vody, tepla a znečištění v jednorozměrném systému s proměnným nasycením (Šimůnek a kol, 2009).

Jednorozměrný model byl zvolen především z důvodu velké obsahové a časové náročnosti modelu dvourozměrného, neboť matematický model není stěžejním bodem této práce, ale slouží jen jako jeden ze způsobů interpretace měřených dat. Dalším důvodem pro výběr pouze jednorozměrného modelu byla skutečnost, že vzhledem k povaze měření v oblasti by při dvourozměrném modelování nebyly známy okrajové podmínky na bocích modelované oblasti. Vzhledem ke skutečnosti, že území není v této oblasti příliš svažité,

byl předpoklad převládajícího proudění vody ve svislém směru, jež lze popsat pomocí jednorozměrného modelu oprávněný.

Výsledky modelování jsou uvedeny v kapitole 6.4.

5.5.1. Řídící rovnice

Modelování provádí simulaci proudění podzemní vody na základě Richardsovy rovnice ve tvaru:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \cos \alpha \right) \right) - S \quad [27]$$

kde $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ je změna vlhkosti v čase, α úhel mezi směrem proudění a svislou osou, h hydraulická výška, S propadový člen a K nenasycená hydraulická vodivost.

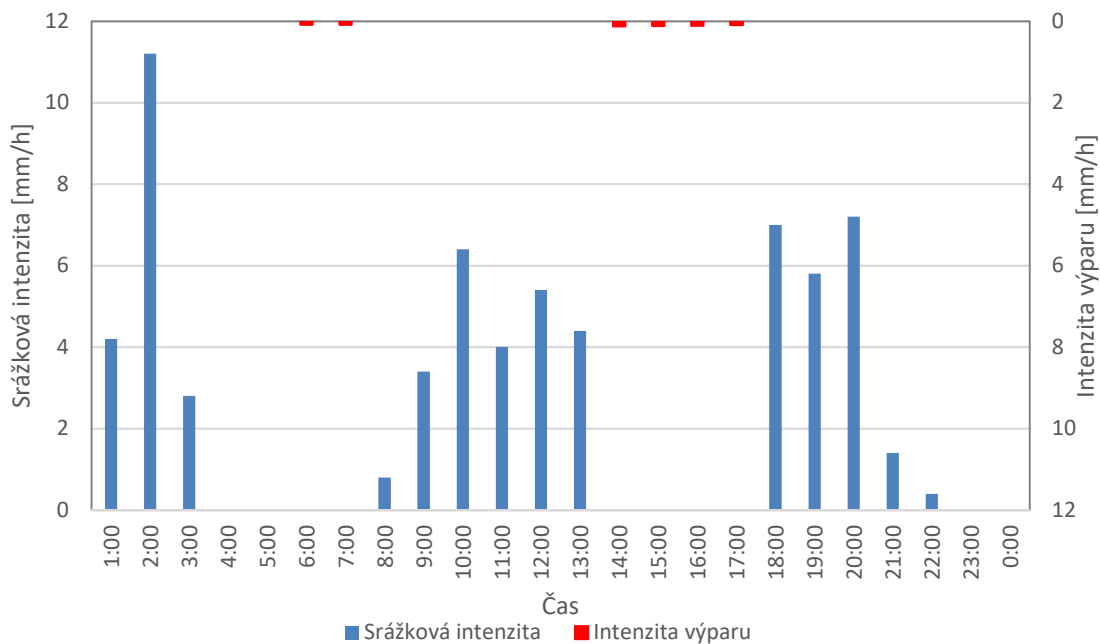
Model využívá pro vyjádření retenční křivky vztah van Genuchtena a pro nenasycenou hydraulickou vodivost vztah Mualema. Oba tyto vztahy jsou uvedeny v kapitole 3.1.2. (Šimůnek a kol., 2009).

5.5.2. Vstupní data

Charakteristiky půdy nezbytné pro modelování proudění podzemní vody byly určeny při laboratorním zpracování vzorků odebraných na místě. Do modelu pak vstupují jako van Genuchtenovy parametry pro vykreslení retenční křivky. Další charakteristikou půdy, jež byla do modelu zadávána je hodnota nasycené hydraulické vodivosti, jejíž stanovení je popsáno v bodě 5.4.3.

Srážková data byla získána ze srážkoměru umístěného přímo v místě monitorovací sestavy. Údaje o rychlosti větru, teplotě a délce slunečního svitu potřebné pro výpočet výparu byly získány z meteorologické stanice v Broumově. Výpočet výparu je uveden v bodě 5.4.4. Porovnání srážek a výparu během modelovaného období je zobrazeno na obrázku číslo 32.

Hloubka modelované oblasti byla zvolena 150 cm, přičemž do hloubek, kde se nachází tenzometry T8 byly umístěny pozorovací body.



Obr. 32 Vstupní hodnoty srážek a výparu vstupující do modelu

5.5.3. Stanovení nasycené hydraulické vodivosti

Hodnota nasycené hydraulické vodivosti byla určena výpočtem z dat měřených na místě. Při instalaci čidel monitoringu byl proveden infiltrační experiment, kterým byla měřena nenasyčená hydraulická vodivost. K tomu byl použit nový měřicí přístroj (Klípa a kol., 2015) na bázi podtlakového infiltrometru, který však automaticky odečítá pokles hladiny ve válcích (viz

Obr. 33). Při známé hydraulické výšce a rychlosti nenasyčené infiltrace pak bylo možné dopočítat hodnotu infiltrace nasycené.



Obr. 33 Měření hydraulické vodivosti půdy

Při měření byl v infiltrometru nastaven podtlak -5 cm. Hodnota nenasycené hydraulické vodivosti, která byla při této tlakové výšce změřena je 0,245 cm/den.

Pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti pak bylo nezbytné stanovit hodnotu relativní hydraulické vodivosti při tomto tlaku. To bylo provedeno na základě parametrů retenční křivky vyjádřené vzorcem van Genuchtena. Tyto parametry byly brány z retenčních křivek určených pro vzorky půdy ve stanovišti B, neboť měření bylo prováděno v blízkosti tohoto stanoviště. Na základě těchto parametrů byla stanovena relativní hydraulická vodivost použitím vzorce podle Mualema ve tvaru:

$$K_r(h) = \frac{\{1 - (-\alpha h)^{mn} [1 + (-\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (-\alpha h)^n]^{m/2}} \quad [28]$$

kde K_r je relativní hydraulická vodivost, h hydraulická výška nastavená v infiltrometru, α a n jsou parametry retenční křivky vyjádřené vzorcem van Genuchtena a m je parametr vypočítaný vzorcem $m = 1 - 1/n$ (Kutílek a kol., 1994).

Vstupní hodnoty byly následující: $h = -5$ cm, $\alpha = 0,0199$, $n = 2,622$ a $m = 0,619$. Výsledná hodnota relativní hydraulické vodivosti pro podtlak 5 cm je 0,953.

Výpočet nasycené hydraulické vodivosti je pak proveden pomocí vzorce pro odhad nenasycené hydraulické vodivosti ve tvaru:

$$K_{(h)} = K_{r(h)} \cdot K_s \quad [29]$$

kde $K_{(h)}$ je nenasycená hydraulická vodivost, K_r relativní hydraulická vodivost a K_s nasycená hydraulická vodivost (Císlerová a Vogel, 1998).

Vypočtená hodnota nasycené hydraulické vodivosti má hodnotu 0,245 cm/den, což představuje $2,97 \times 10^{-8}$ m/s.

Podle rozsahů K_s , jež bylo uvedeno v kapitole 3.1.2. odpovídá hodnota hydraulické vodivosti jílovité půdě, což na základě rozborů čáry zrnitosti odpovídá skutečnosti a výsledek výpočtu nasycené hydraulické vodivosti může být považován za správný.

5.5.4. Výpočet výparu

Výpočet výparu byl proveden pomocí kombinované metody Penman-Monteith. Vztahy pro výpočet výparu jsou obsaženy v příloze manuálu k programu Hydrus 1D 4.0 autorů Šimůnka a kol. (2009).

Pro výpočet byla použita data měřená hydrometeorologickou stanicí v Broumově, odkud byla získána data rychlosti větru, vlhkosti vzduchu, teploty a délky slunečního svitu během dne. Ze srážkoměru umístěného ve Vižňově pak byly získány úhrny srážek.

Vzorec pro výpočet výparu má podobu:

$$E = \frac{Q_\lambda}{\lambda \cdot \rho_w} \quad [30]$$

kde E je výpar, λ specifické latentní teplo, Q_λ tok latentního tepla a ρ_w hustota vody.

Specifické latentní teplo je závislé na teplotě a výpočet tak byl proveden jednotlivě pro každou hodinu použitím vzorce:

$$\lambda = 2501 - (2,361 \cdot T) \quad [31]$$

kde T je teplota ve °C.

Tok latentního tepla se pak skládá ze složky radiačního výparu a aerodynamického výparu. Výpočet byl proveden pomocí vzorce:

$$Q_\lambda = \frac{\delta Q_A + \rho_a c_p (p_{vs} - p_v) / r_a}{\delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad [32]$$

kde δ je sklon křivky tlaku nasycené vodní páry, Q_A čistá radiace, ρ_a celková hustota vzduchu, c_p specifická izobarická kapacita, p_{vs} tlak nasycené vodní páry, p_v aktuální tlak vodní páry, r_a aerodynamický odpor, γ psychrometrická konstanta a r_s povrchový odpor.

Tlak nasycené vodní páry je závislý na teplotě a je tak vypočítán jednotlivě pro každou hodinu pomocí vzorce:

$$p_{vs} = p_{vs(T_0)} \exp\left(\frac{\Delta H_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad [33]$$

kde $p_{vs(T_0)}$ je referenční stav, ΔH_{vap} molární latentní teplo výparu, R univerzální plynová konstanta, T_0 teplota při referenčním stavu v kelvinech a T aktuální teplota ve stupních Kelvina.

Z hodnot tlaku nasycené vodní páry pak lze stanovit sklon křivky tlaku nasycené vodní páry:

$$\delta = \frac{p_{vs(T+0,1)} - p_{vs(T)}}{\Delta T} \quad [34]$$

kde $p_{vs(T)}$ je tlak nasycené vodní páry při dané teplotě, $p_{vs(T+0,1)}$ tlak nasycené vodní páry při teplotě o 0,1 K vyšší než daná teplota a ΔT je rozdíl mezi teplotami.

Pomocí známé hodnoty tlaku nasycené vodní páry pro určitou teplotu lze také vypočítat aktuální tlak vodní páry vzorcem:

$$p_v = r \cdot p_{vs} \quad [35]$$

kde r je relativní vlhkost vzduchu a p_{vs} je tlak nasycené vodní páry.

Aktuální tlak vodní páry poté slouží k výpočtu celkové hustoty vzduchu, a to soustavou vzorců:

$$p_d = p_a - p_v \quad [36]$$

kde p_d je tlak suchého vzduchu, p_a atmosferický tlak a p_v tlak vodní páry.

$$\rho_d = \frac{p_d M_d}{RT} \quad [37]$$

kde p_d je tlak suchého vzduchu, M_d molární hmotnost suchého vzduchu, R univerzální plynová konstanta a T teplota v kelvinech.

$$\rho_v = \frac{p_v M_v}{RT} \quad [38]$$

kde p_v je tlak vodní páry, M_v molární hmotnost vodní páry, R univerzální plynová konstanta a T teplota v kelvinech.

Hledaná hodnota celkové hustoty vzduchu je pak vypočítána pomocí Daltonova zákona v podobě:

$$\rho_a = \rho_d + \rho_v \quad [39]$$

kde ρ_a je celková hustota vzduchu, ρ_d hustota suchého vzduchu a ρ_v hustota vodní páry.

Další veličinou nezbytnou pro výpočet výparu je hodnota aerodynamického odporu, jež byla kvůli měnící se rychlosti větru vypočítána opět zvlášť pro každou hodinu použitím vzorce:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_2 - d}{z_{om}}\right)}{K^2 u_2} \cdot \frac{\ln\left(\frac{z_2 - d}{z_{oh}}\right)}{K^2 u_2} \quad [40]$$

kde r_a je aerodynamický odpor, z_2 je výška měření větru, d je posun nulové hladiny rovný $2/3 h_c$, z_{om} je rovno $0,123 h_c$, z_{oh} je rovno $0,0123 h_c$, h_c je výška vegetace, K von Kármánova konstanta a u_2 rychlost větru.

Poslední veličinou, jež zahrnuje složka aerodynamického výparu je povrchový odpor, jež byl stanoven vzorcem:

$$r_s = \frac{r_1}{LAI} \quad [41]$$

kde r_s je povrchový odpor, r_1 povrchový odpor listu, kde se uvažuje hodnota 100 s/m a LAI je index listové plochy, jež se pro travní porost stanovuje jako $24h_c$, kde h_c je výška travního porostu (v tomto konkrétním případě $0,05 \text{ m}$).

Radiační složka výparu reprezentovaná členem toku latentního tepla je uvažována rovná hodnotě čisté radiace R_n , jež je vypočtena vzorcem:

$$R_n = J_n + L_n \quad [42]$$

kde J_n je čisté krátkovlnné záření a L_n čisté dlouhovlnné záření.

Čisté krátkovlnné záření je určeno výpočtem na základě vzorců:

$$J_n = J_t - \alpha J_t \quad [43]$$

kde J_t je globální radiace a α albedo.

$$J_t = J_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad [44]$$

kde J_0 jsou denní hodnoty insolance pro zeměpisnou šířku $50,5^\circ$ a den 11.8., $a=0,25$, $b=0,5$, n je počet hodin slunečního svitu a N maximální možná hodnota n .

Hodnota albeda pro travní porost použitá ve výpočtu je 15 %. Denní hodnota insolance byla uvažována 400 W/m^2 . Počet hodin slunečního svitu byl 11.8. změřen stanicí patřící ČHMÚ a má hodnotu 1,5 h/den. Slunce pak v tento den mohlo svítit maximálně 15h (Meteogram, 2017).

Čisté dlouhovlnné záření je vypočteno vzorcí:

$$L_n = \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) (\varepsilon_{ac} - 1) \sigma T^4 \quad [45]$$

kde n je počet hodin slunečního svitu, N maximální možná hodnota n , ε_{ac} emisivita při jasné obloze, σ Stefan-Boltzmanova konstanta a T teplota v kelvinech.

$$\varepsilon_{ac} = a + b\sqrt{p_v} \quad [46]$$

kde $a=0,66$, $b=0,44$ a p_v je tlak vodní páry.

Jelikož není zaznamenáno, kdy během dne svítlo slunce, byla hodnota čisté radiace rozdělena do hodin, kdy k výparu mohlo docházet. Tedy do hodin během dne, kdy se nevyskytovaly srážky. Pro tyto hodiny byla pak vypočtena hodnota výparu podle předchozích vzorců. Výsledky výpočtu výparu jsou uvedeny v příloze č. 1. Vzhledem ke klimatickým podmínkám v modelovaném období jsou hodinové hodnoty výparu téměř zanedbatelné, kvůli vyšší přesnosti jsou však do modelu zahrnuty.

5.5.5. Počáteční podmínky

Jako počáteční podmínka byla uvažována známá hydraulická výška v bodech, kde jsou umístěny tenzometry. Rozdělení hydraulické výšky mezi body bylo zvoleno jako lineární.

5.5.6. Okrajové podmínky

Horní okrajová podmínka

Na horní hranici byla zvolena atmosférická okrajová podmínka s povrchovou akumulací s maximální výškou akumulované vody 1 cm. Tato hodnota byla zvolena z důvodu mírného sklonu pozemku, kdy kromě akumulace vody na povrchu dochází také k povrchovému odtoku. Srážková data získaná ze srážkoměru byla zpracována a zadávána do modelu v hodinovém kroku. Rovněž byla zadána data výparu v hodinovém kroku, vypočtená metodou Penman-Monteith.

Dolní okrajová podmínka

Pod simulovanou oblastí byla v hloubce 150 cm vytvořena vrstva málo propustné zeminy mocnosti 200 cm, která by měla reprezentovat vrstvu izolantu, jež se v této hloubce pravděpodobně skutečně nachází. Na dolním okraji této málo propustné vrstvy je pak zvolena jako okrajová podmínka volná drenáž.

5.5.7. Modelované období

V modelu byly interpretovány tři rychle po sobě jdoucí srážkové události dne 11.8. Příčiny a závěry z toho vyplývající jsou uvedeny v kapitole 6.4.

Data srážek a výparu jsou zadávána v hodinových krocích, a to z důvodu hodinového kroku dat získaných z ČHMÚ, a tudíž hodinového kroku hodnot výparu.

5.6. Terénní průzkum

Při instalaci čidel byly vyhloubeny sondy přibližně do hloubky 60 cm a bylo tak možné zkoumat půdní profil.

Jak lze vidět na obrázku 34, zemina v lokalitě je velmi jemnozrnná. Ve stanovišti A (obrázek nalevo) je pak dobře patrná vrstva jemnozrnného materiálu - izolantu, začínající v hloubce přibližně 15 cm pod povrchem. Ve stanovišti B pak lze vidět jemnozrnnou zeminu prakticky od povrchu až do hloubky 60 cm.



Obr. 34 Půdní profil ve stanovištích A a B

Jak se ukázalo při prohlídkách stanovišť při sběru dat, velké problémy způsobuje nekompletní strouha vykopaná přímo vedle stanoviště A. Z této strouhy nevede žádný odtok, a tak vlivem jemnozrnné zeminy na pozemku dochází k zadržování a vzduť hladiny vody v této strouze, což má za následek zatápění šachtice ve stanovišti A a z toho pramenící selhávání měření čidel vlhkosti. Stav zachycený na obrázku 35 byl podle dat odečtených ze srážkoměru vyfocen 27 hodin po srážce o celkovém úhrnu 9 mm. V šachtici tak dochází k zatápění až do úrovně víka. Stanoviště B zatopené nebylo.

Při následující kontrole stanovišť, jež proběhla v prosinci, byl stav stanoviště A stejný jako při předchozí kontrole. Tentokrát však došlo také k částečnému zatopení stanoviště B. Bylo také možné vidět, že lešení postavené z důvodu opravy střechy zasahuje do míst, kde probíhá měření. Pohyb nákladních vozidel, případně jiné zásahy způsobené stavbou tak mohly způsobit výpadek měření čidel T8, ke kterému došlo v říjnu. Fotografie z této kontroly lze vidět na obrázku 36.



Obr. 35 Stav strouhy a šachtice po dešti



Obr. 36 Kontrola území prováděná v prosinci

6. Výsledky a diskuse

V této kapitole budou prezentovány a komentovány výsledky jednotlivých měření, z nichž budou následně vyvozovány pracovní hypotézy transportu vody ze svahu nacházejícím se nad kostelem na pozemek kostela a následně pak do kostelního zdiva. Hypotézy jsou podrobně diskutovány.

6.1. Vzorky půdy

Postup při zpracování jednotlivých vzorků půdy v laboratoři je popsán již v kapitole 5.2.1. Zpracování Měrných hmotností vzorků a čar zrnitosti bylo provedeno pracovníky KHMKI FSv ČVUT. Celkem bylo zpracováno 6 porušených a 22 neporušených vzorků. V obou stanovištích (A a B) se jednalo o vzorky z hloubky 10, 20 a 30 cm.

6.1.1. Měrná hmotnost

Hodnoty měrné hmotnosti jsou uvedeny v tabulce č. 2 a pohybují se nad úrovní 2,65 g/cm³. Tyto výsledky naznačují, že v zemině tedy je minimální podíl organické hmoty.

Tabulka č. 2 Měrná hmotnost

vzorek	ρ_s
	[g/cm ³]
A-10 cm	2,64
A-20 cm	2,68
A-30 cm	2,73
B-10 cm	2,75
B-20 cm	2,80
B-30 cm	2,73

6.1.2. Čára zrnitosti

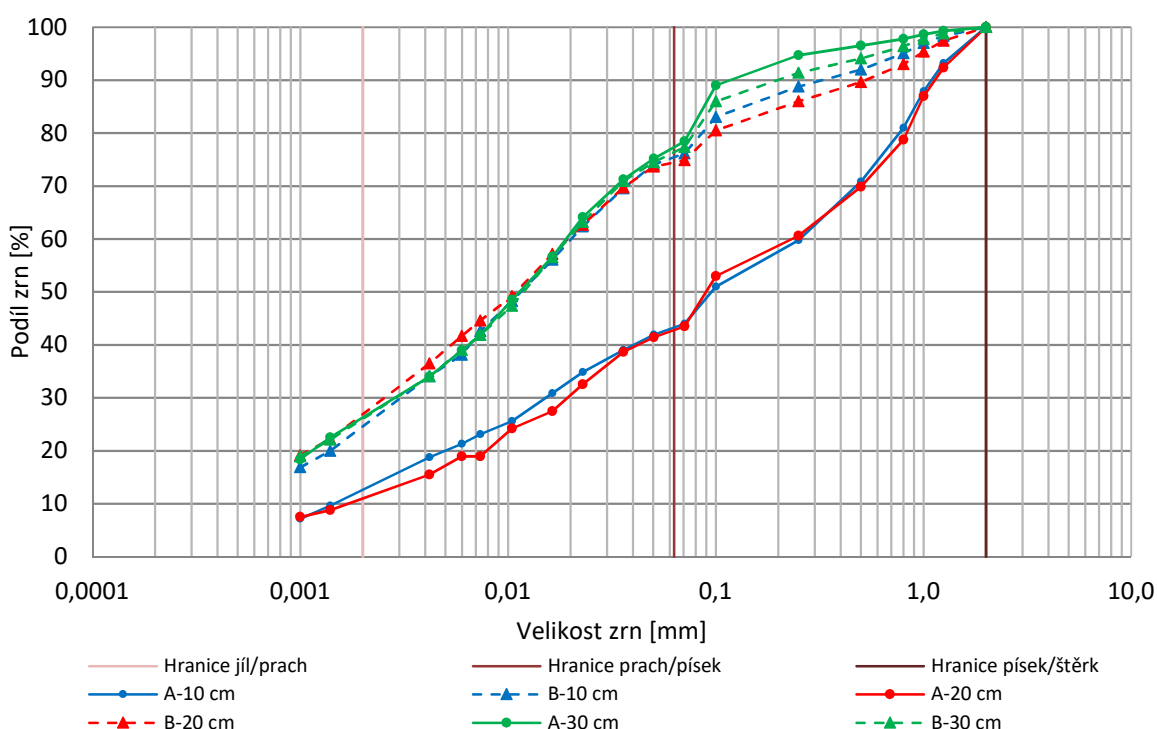
Výsledné čáry zrnitosti stanovené pracovníky KHMKI FSv ČVUT byly seskupeny do jednoho grafu a pro přehlednost byly vyznačeny stejným typem čar vzorky ze stanoviště A a B, dále pak byly barevně odlišeny jednotlivé hloubky odběrů vzorků. Výsledný graf je možné vidět na obrázku 37.

Na základě procentuálního podílu frakcí pak bylo provedeno zatřídění pomocí trojúhelníkového diagramu zrnitosti půd (NRSC USDA). Zatřídění je uvedeno v tabulce č. 3.

Tabulka č. 3 Zatřídění vzorků zemin

Vzorek	Procentuální obsah frakcí			Zatřídění
	jíl	prach	písek	
A-10 cm	12,67	30,61	56,73	písčité hlína
A-20 cm	10,83	31,69	57,48	písčité hlína
A-30 cm	26,51	51,60	21,88	prachovitá hlína
B-10 cm	25,28	50,74	23,98	prachovitá hlína
B-20 cm	27,84	47,03	25,13	jílovitá hlína
B-30 cm	26,54	50,67	22,79	prachovitá hlína

Jak lze vyčíst z tabulky u všech vzorků je významný podíl jemnozrnných částic- jílu a prachu.



Obr. 37 Čáry zrnitosti

6.1.3. Retenční křivky

Stanovení retenčních křivek vzorků bylo provedeno postupem popsáním v bodě 5.2.1. Parametry potřebné pro vyjádření retenční křivky vzorcem van Genuchtena byly získány v programu ARC, ve kterém byl také následně proveden scaling retenčních křivek v každém stanovišti (Vogel, 1990).

Van Genuchtenovy parametry retenčních křivek a parametry výsledné scalované křivky pro každý horizont v obou stanovištích jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka č.4 van Genuchtenovy parametry retenčních křivek zeminy

stanoviště A				
č. vzorku	θ_r	θ_s	α	n
103	0,100	0,539	0,255	1,118
46	0,100	0,546	0,027	1,093
224	0,100	0,545	0,054	1,064
149	0,419	0,545	0,018	1,464
674	0,100	0,542	0,083	1,091
76	0,299	0,550	0,219	1,197
78	0,169	0,545	0,030	1,066
65	0,383	0,544	0,046	1,180
188	0,415	0,543	0,025	1,360
57	0,100	0,546	0,019	1,049
scale 20 cm	0,010	0,545	0,108	1,064
scale 30 cm	0,301	0,545	0,033	1,112

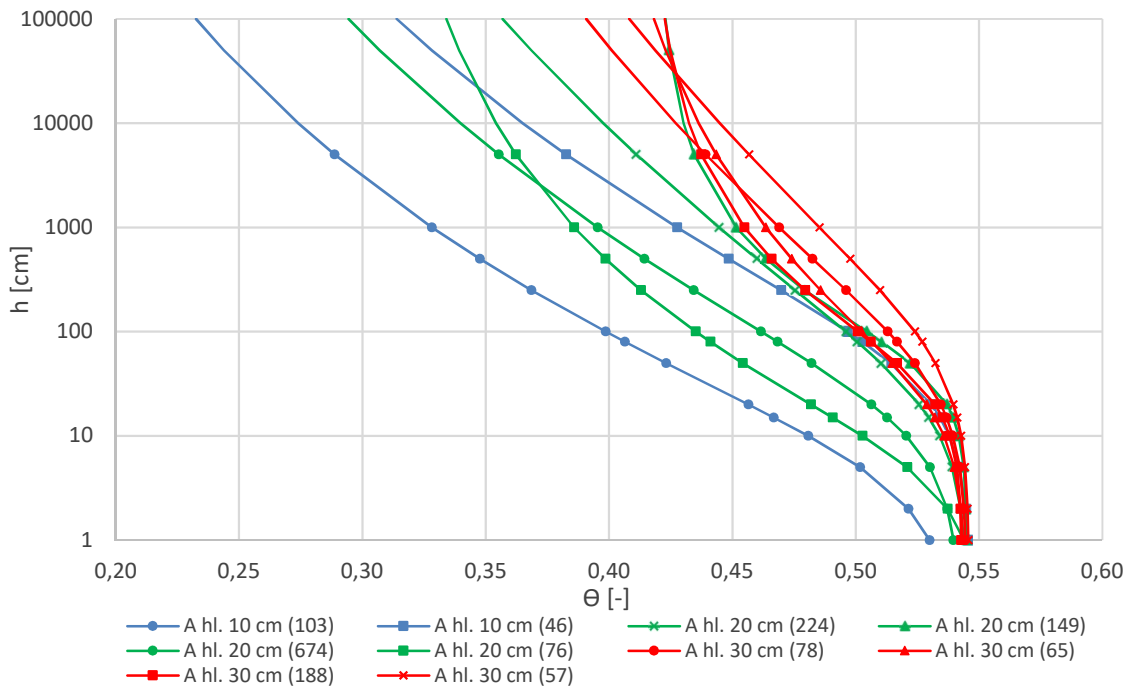
stanoviště B				
č. vzorku	θ_r	θ_s	α	n
651	0,382	0,511	0,019	2,647
642	0,398	0,508	0,016	3,307
91	0,386	0,502	0,018	3,439
640	0,423	0,510	0,149	4,188
661	0,424	0,508	0,173	2,923
652	0,373	0,505	0,021	2,601
96	0,363	0,509	0,051	1,521
187	0,394	0,508	0,028	2,151
110	0,371	0,505	0,026	2,202
26	0,283	0,508	0,062	1,585
52	0,399	0,509	0,017	3,040
89	0,435	0,511	0,016	4,286
scale 10 cm	0,398	0,508	0,017	3,303
scale 20 cm	0,390	0,507	0,026	2,063
scale 30 cm	0,402	0,508	0,019	2,949

Parametry scalovaných retenčních křivek byly porovnány s databází programu Hydrus 1D (Šimůnek a kol., 2009). Hodnoty parametrů získaných ze scalovaných křivek se vždy neshodují se všemi charakteristickými hodnotami půdních druhů, jež jsou v programu uvedeny, vzorky tak lze zařadit jen velmi obtížně.

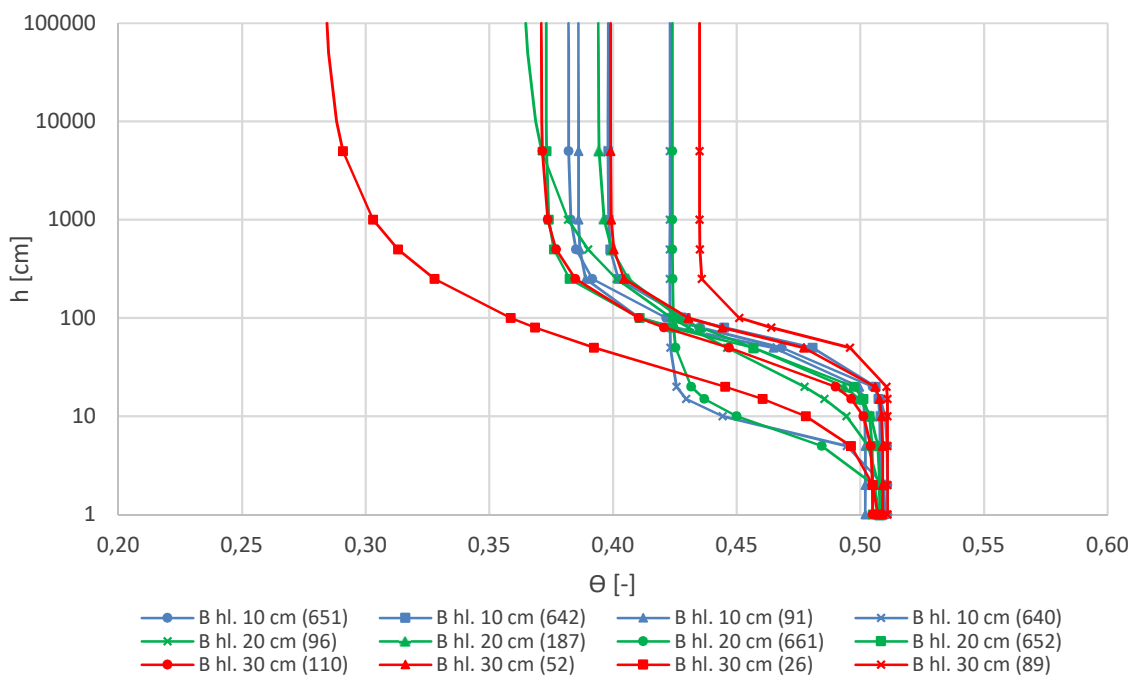
Parametry retenčních křivek z hloubek 10 (vzorek číslo 46) a 30 cm ve stanovišti A nabývají hodnot, jež se nejvíce podobají písčité jílovité hlíně. Jedná se především o parametry alfa a n, dále pak poměrně vysokou hodnotu nasycené vlhkosti.

Parametry retenčních křivek ze stanoviště B se nejvíce podobají parametrům uváděným pro prachovitou hlínu. Tomuto zařazení opět odpovídají především hodnoty nasycené vlhkosti a parametru alfa. Parametr n se liší a svou hodnotou odpovídá spíše písčité hlíně.

Vzhledem k poměrně velkému množství vzorků byly vyneseny retenční křivky zvlášť pro každé stanoviště. V grafu jsou barevně odlišeny křivky pro jednotlivé hloubky odběrů vzorků. V závorce jsou pak v popisu uvedena čísla Kopeckého válečků jednotlivých vzorků.



Obr. 38 Retenční křivky vzorků půdy ve stanovišti A



Obr. 39 Retenční křivky vzorků půdy ve stanovišti B

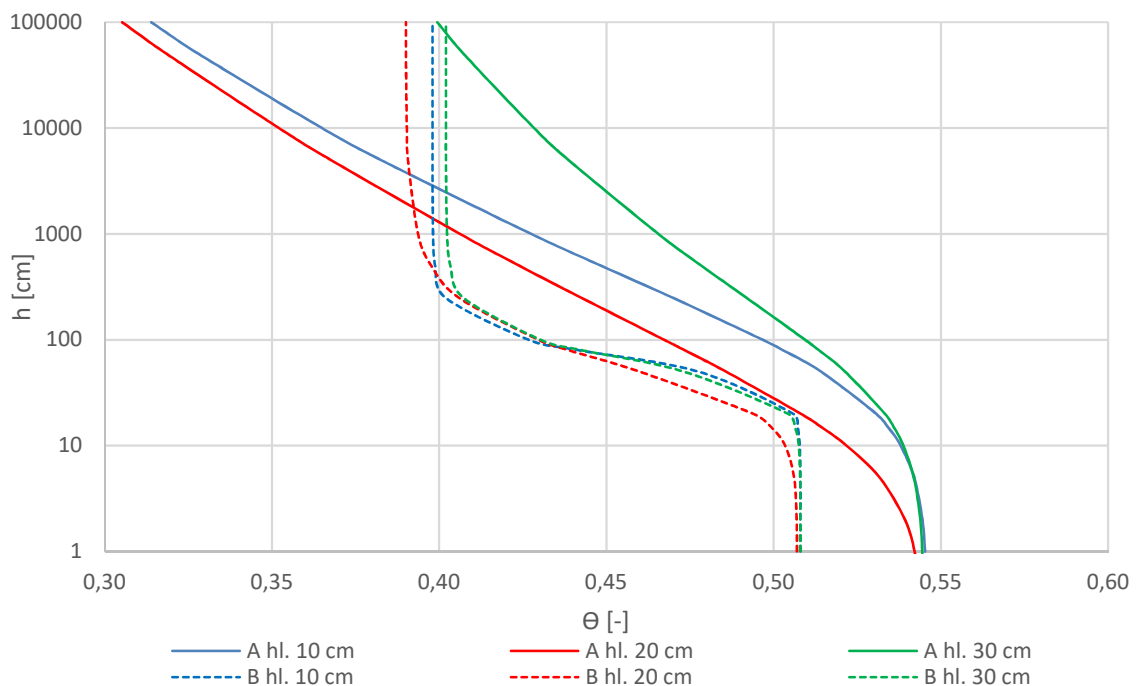
Ze souboru naměřených retenčních čar z každého stanoviště byla pak před prováděním scalingu vyřazena jedna retenční čára. Obě tyto retenční čáry (čísla váženek 103 a 110) mají ve srovnání s ostatními odlišný průběh. K odlišnostem dochází na základě poruch vzorků, kde bylo u jednoho vzorku nezbytné odstranit obložku, což zapříčinilo nedostatek

zeminy ve válečku. U druhého pak lze vidět kořen přítomný ve vzorku. Oba tyto vzorky jsou zdokumentovány na následujícím obrázku.



Obr. 40 Poškozené vzorky zeminy

U zbylých devíti retenčních křivek ve stanovišti A a jedenácti ve stanovišti B byl proveden scaling, čímž byla získána jedna referenční retenční křivka pro každý horizont v obou stanovištích (viz obr. 41). Ve stanovišti A zbyla v horním horizontu po vyřazení poškozeného vzorku pouze jedna retenční křivka, zde tedy scaling proveden nebyl.



Obr. 41 Výsledné retenční křivky půdy

Mezi průběhy retenčních křivek ve stanovišti A a B lze vidět zřetelný rozdíl. Ten je způsoben různou zrnitostí, kdy ve stanovišti B je dle čáry zrnitosti půda tvořena jílovitou a prachovitou hlínou. Naopak ve stanovišti A jsou horní dvě vrstvy půdy tvořeny hlínou písčitou a až půda v hloubce 30 cm je tvořena hlínou jílovitou. Podobné složení půdy ve

stanovišti B a v horizontu v hloubce 30 cm ve stanovišti A je pak vidět i na lehce podobném průběhu retenčních křivek. Vzhledem k neukončenému měření, v důsledku čehož nemohla být zvážena hmotnost pevné fáze po vysušení, jež je nezbytná pro určení nasycené vlhkosti, je pravděpodobné, že se retenční křivky především ve stanovišti A v hloubce 30 cm změní. V tomto místě je složení půdy velmi podobné stanovišti B a průběh retenčních křivek tak bude také podobný tomuto stanovišti. V hloubce 30 cm však není umístěno čidlo CS 650 a pro celý profil je tak brána jednotná hodnota nasycené vlhkosti, měřená v hloubce 25 cm. Výsledné podoby retenčních křivek z obou stanovišť tak budou k dispozici až po dokončení měření a zvážení vysušených vzorků pravděpodobně v průběhu února či března 2018.

6.2. Vzorky zdiva

Postup zpracování vzorků zdiva je stejně jako tomu bylo u vzorků půdy podrobně popsán v kapitole 5.2.2. Vzorky použitelné pro další analýzu byly odebrány pouze z pilíře z vrtu ve výšce 80 cm nad podlahou. Vzorky ze stěny jsou všechny rozdrolené a pro stanovení objemové hmotnosti a retenční křivky tudíž nepoužitelné.

6.2.1. Objemová hmotnost

Nejprve byly zjištěny hmotnosti pevné fáze a plně nasyceného vzorku, jež jsou nezbytné pro výpočet objemové hmotnosti. Hmotnost pevné fáze je pak také nezbytná pro stanovení bodů retenčních čar. Hmotnost pevné fáze byla vypočítána odečtením hmotnosti váženky, ve které byl vzorek sušen od celkové hmotnosti zvážené po vysušení. Nasycená hmotnost vzorků byla získána pouhým zvážením vzorků po nasycení. Hodnoty hmotností jsou uvedeny v tabulce číslo 5.

Tabulka č. 5 Hmotnost vzorků zdiva

číslo váženky	hmotnost váženky	celková hmotnost vzorek+ váženka (po vysušení)	hmotnost pevné fáze	nasycená hmotnost	hmotnost po odběru
-	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
P84	16,35	56,36	40,01	48,55	42,28
531	12,87	42,74	29,87	30,81	30,60
277	17,14	36,90	19,76	24,17	20,71
873	13,89	48,77	34,88	38,54	36,15
846	14,21	23,35	9,14	10,82	9,72

Dále byl stanoven objem vzorků metodou tzv. Archimédova vážení. Naměřené hmotnosti a následné výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce číslo 6. Hmotnost m_1 je hmotnost nádoby s vodou a m_2 je hmotnost po ponoření vzorku zdiva do nádoby.

Tabulka č. 6 Stanovení objemu vzorků

číslo váženky	m_1	m_2	V
	[g]	[g]	[cm ³]
P84	802,90	828,01	25,11
531	802,34	814,32	11,98
277	801,64	814,63	12,99
873	801,38	818,44	17,06
846	800,64	806,21	5,57

Při známém objemu, hmotnosti suchého a nasyceného vzorku pak bylo možné dopočítat objemovou hmotnost. Výsledky jsou uvedeny v tabulce číslo 7.

Tabulka č. 7 Objemová hmotnost vzorků

číslo váženky	ρ_d	nasycená vlhkost	vlhkost po odběru
	g/cm ³	-	-
P84	1,59	0,34	0,09
531	2,49	0,08	0,06
277	1,52	0,34	0,07
873	2,04	0,21	0,07
846	1,64	0,30	0,10

Na základě hodnot objemových hmotností, lze potvrdit, že vzorky P84, 277 a 846 jsou vzorky omítky s nízkou objemovou hmotností a vysokou pórovitostí. Vzorek 873 je pak tvořený směsí pískovce a omítky. Pouze vzorek číslo 531 je tvořen pískovcem. Při porovnání se vzorky pískovců zkoumaných ve studii Záleské a kol. (2014), jež je popsána v kapitole 4.5., dosahuje tento vzorek nejvyšších hodnot i mezi pískovci zkoumanými v této studii a je možné ho srovnávat se vzorkem pískovce z Těšína. Odlišné hodnoty objemové hmotnosti, potažmo pórovitosti by se pak měly projevit v průběhu retenčních křivek.

Před vysušením byly vzorky zdiva zváženy, na základě čehož bylo možné stanovit vlhkost zdiva v době zahájení měření. Hodnota vlhkosti zdiva se pohybuje u vzorků v rozmezí 6–10%, což odpovídá měření vlhkostního čidla CS 655 umístěného v pilíři ve výšce 80 cm nad podlahou.

6.2.2. Retenční křivky

V případě vzorků zdiva bylo postupováno obdobně jako v případě vzorků půdy. Na rozdíl od vzorků půdy však byly vzorky zdiva nejprve vysušeny a tím byla zjištěna hmotnost pevné fáze. V tomto případě tak nejsou výsledky zatíženy chybou spočívající v odhadu hodnoty vlhkosti při plném nasycení. Měření však také není z časových důvodů dokončené a hodnoty vlhkostí při vysokých tlacích jsou tak získány pouze proložení již změřených bodů do tlaku 3 bary. Získání parametrů potřebných pro vyjádření retenční křivky vzorcem van Genuchtena, stejně tak jako následný scaling, bylo opět provedeno v programu ARC (Vogel, 1990).

Celkově bylo zpracováno 5 vzorků ze stejného vrtu v pilíři ve výšce 80 cm nad podlahou, proto jsou retenční křivky popsány pouze podle čísla váženky. Přesnou podobu vzorků je pak možné vidět v kapitole 5.2.2 na obrázku číslo Podle struktury lze předpokládat, že o pískovcové zdivo se jedná jen v případě vzorku číslo 531. Ostatní vzorky jsou pak odebrány z omítky.

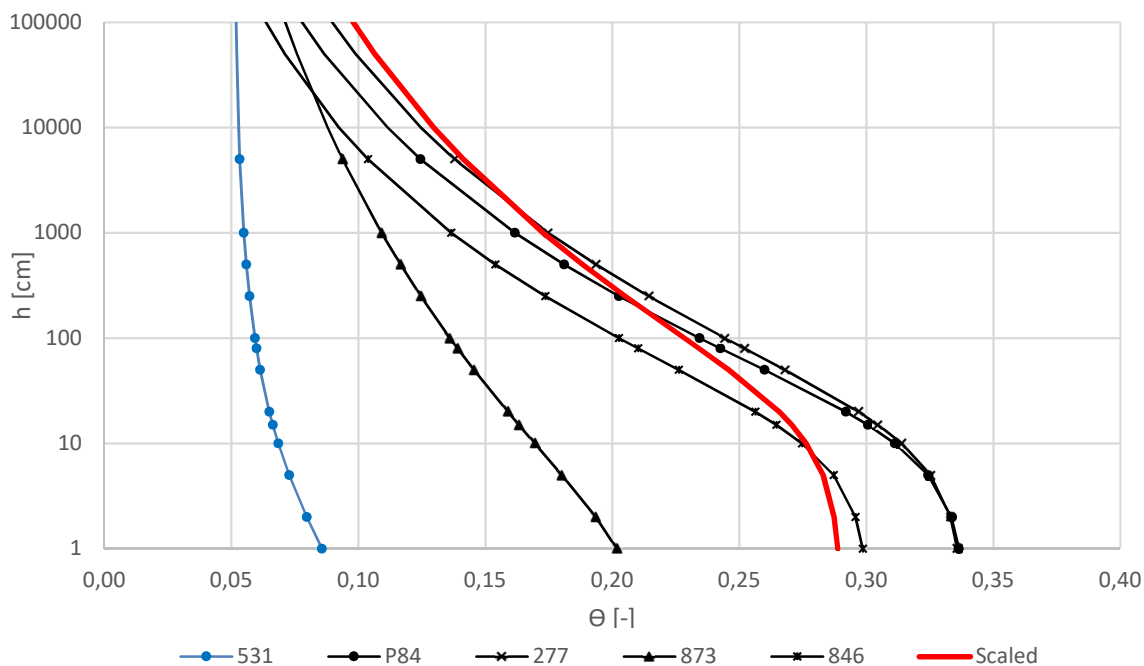
Vzhledem k nízkému počtu vzorků byla do grafu vynesena rovněž křivka, jež je výsledkem scalingu.

Vzorek s označením 531 je jako jediný tvořen pískovcem. Při provádění scalingu tak nebyl tento vzorek zahrnut a výsledná křivka je tak stanovena pouze ze 4 vzorků omítky.

Van Genuchtenovy parametry retenčních křivek a parametry výsledné scalované křivky jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka č. 8 van Genuchtenovy parametry retenčních křivek zdiva

č. vzorku	θ_r	θ_s	α	n
531	0,051	0,100	2,326	1,326
P84	0,010	0,339	0,083	1,175
277	0,010	0,338	0,078	1,158
873	0,010	0,215	1,031	1,105
846	0,010	0,301	0,085	1,187
scaled	0,010	0,290	0,057	1,134



Obr. 42 Retenční křivky zdiva kostela

Z průběhu retenčních křivek je patrné, že omítka je poměrně pórovitá. Větší pórovitost materiálu pak umožňuje snadnější transport vody zdívem. Naopak samotný pískovec lze na základě průběhu retenční křivky považovat za poměrně nenasákavý materiál. Vzhledem k měření pouze na jednom vzorku pískovce však nelze říct, zda je tento průběh retenční křivky charakteristický pro celou část zdiva tvořenou pískovcem.

6.3. Výsledky monitoringu v místě kostela

Naměřené hodnoty vlhkosti, tlakové výšky a teploty za celé období, tedy od 14. 6. 2017 do 6. 12. 2017, jsou z důvodu lepší čitelnosti uvedeny v přílohách. V této kapitole budou prezentovány výsledky monitoringu pro vybraná kratší období. Pro interpretaci byla vybrána charakteristická období pro letní a zimní, respektive podzimní měsíce. Zároveň je však díky interpretaci pouze krátkého období možné zahrnout grafy přímo do textové části.

Při měření docházelo místy k výpadkům čidel, což má v jednotlivých grafech za následek chybějící data. V tomto ohledu jsou nejproblémovější data měřená vlhkosními čidly CS 650 a CS 655, kde k výpadkům dochází téměř při každé větší srážce. Půda je však v těchto situacích nasycená a údaj z čidla CS 650 by tak nesdělil podstatné informace. Důvodem výpadků je pak nejspíše zatopení šachtice ve stanovišti A. K úplnému výpadku měření však došlo během celého období u čidla CS 655 umístěném ve stěně ve výšce 22 cm. Tento

výpadek je pravděpodobně způsoben chybou v programu, kdy nedochází k načítání dat z tohoto čidla. U dat měřených tenzometry T8 nastal kompletní výpadek v období od 12. 10. do 22. 10. Tento výpadek postihl pouze tenzometry T8 a má pravděpodobně souvislost se stavbou, jež probíhá jak uvnitř kostela, tak na pozemku, kde jsou přítomna čidla. Příčinu se však nepodařilo zjistit.

6.3.1. Teploty

S výjimkou tenzometrů T5 jsou teploty měřeny všemi čidly. Výsledky měření teplot jsou rozděleny do grafů podle umístění. Přesné umístění čidel již bylo popsáno v kapitole 5.3. Teplotu vody lze použít jako stopovač. Na základě průběhu teploty lze, při uvažování dalších výsledků pozorování, stanovit hypotézy transportu vody v systému.

Interpretované období je od 13.9. do 27. 9. Toto období bylo vybráno především z toho důvodu, že jsou již nainstalována čidla MPS a zároveň ještě v tomto období dochází k výraznějšímu kolísání teplot během dne v porovnání s následujícími měsíci.

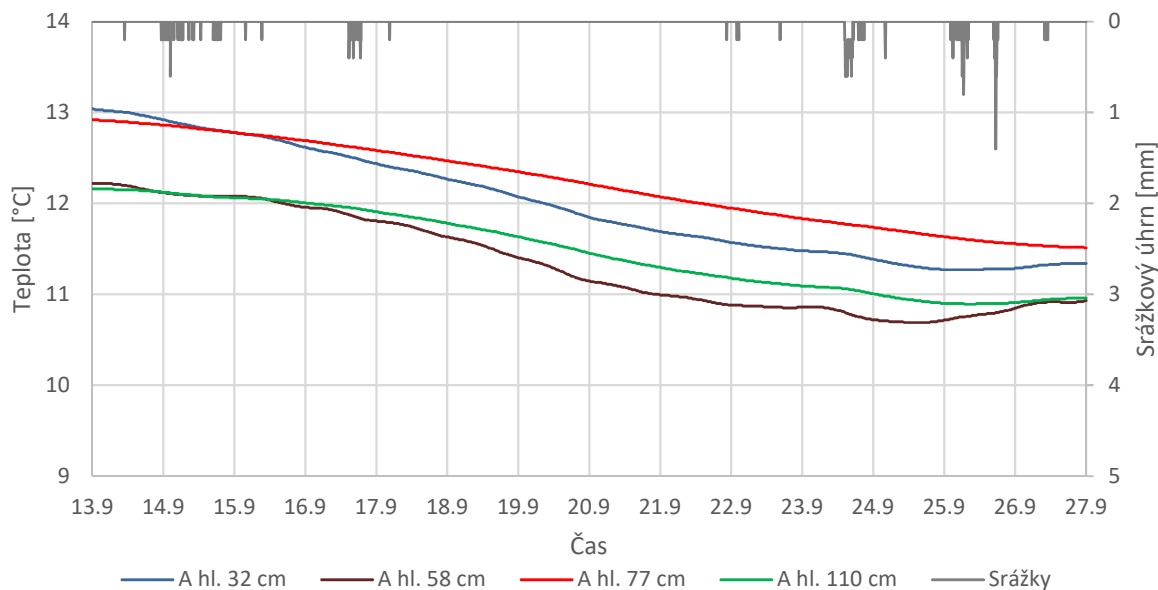
Teploty ve venkovních stanovištích

Tato data jsou z důvodu velkého množství čidel v obou stanovištích interpretována zvlášť pro tenzometry ve stanovišti A, stanovišti B a zvlášť pro čidla CS 655 a MPS-6.

Z průběhu teplot ve stanovišti A lze vyzorovat prakticky shodný průběh teplot v hloubkách 32 a 58 cm, kdy je rozdíl mezi vrstvami přibližně 0,75 °C. Podobný je pak také průběh teplot v hloubce 110 cm a 32 cm. Jak podle teplot, tak podle hodnot tlakového potenciálu interpretovaného v následujícím bodě, lze odhadovat, že v hloubce mezi 65 a 80 cm se nachází málo propustná vrstva. Tím lze vysvětlit podobný průběh teplot v hloubkách 32 a 110 cm. Čidlo v hloubce 110 cm je ovlivňováno podzemní vodou přitékající do tohoto místa z horních vrstev ze svahu nad kostelem.

Čidla v hloubce 32 a 58 cm jsou ovlivněna podzemní vodou přítomnou v půdě nad vrstvou izolantu. Výkyvy teplot v hloubce 58 cm shodné s hloubkou 32 cm jsou způsobeny přítomností strouhy u stanoviště A hluboké přibližně 30-40 cm, ve které při srážkách dochází ke vzduť vody, která pak ve strouze zůstává velmi dlouho, jak bylo popsáno již v kapitole 5.6.

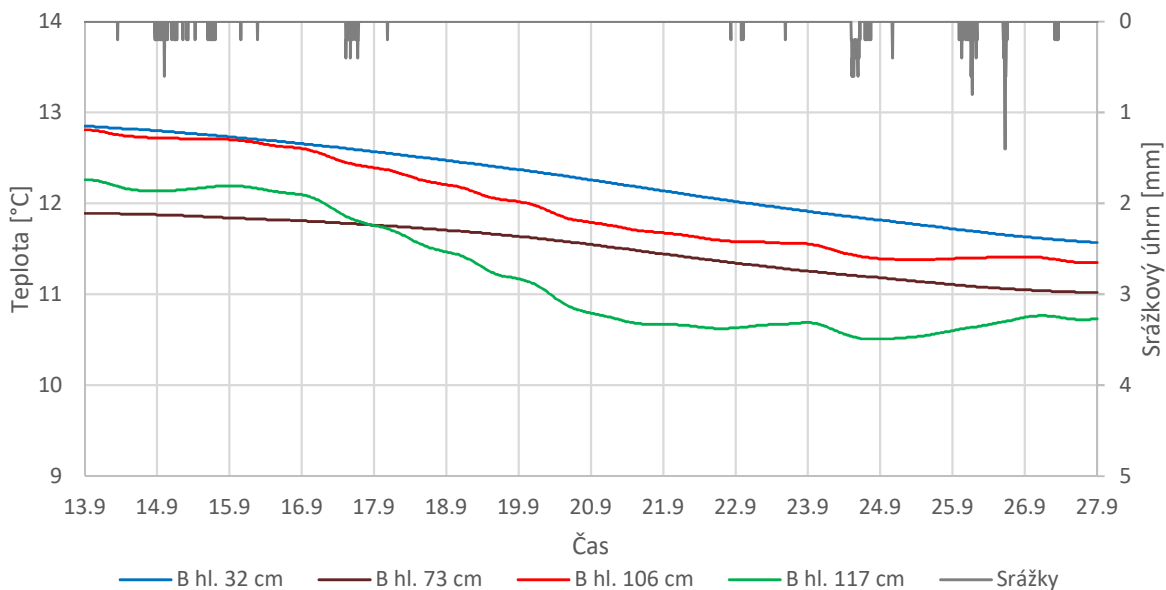
Denní kolísání teplot není na grafu patrná pravděpodobně z důvodu nízké citlivosti měření. Teplotní senzor je umístěn v čepičce tenzometru a měří teplotu vody uvnitř této čepičky. Výměna tepla mezi okolním prostředím a vodou v čepičce tenzometru není příliš rychlá a čidlo tak ukazuje vyhlazené hodnoty teplot.



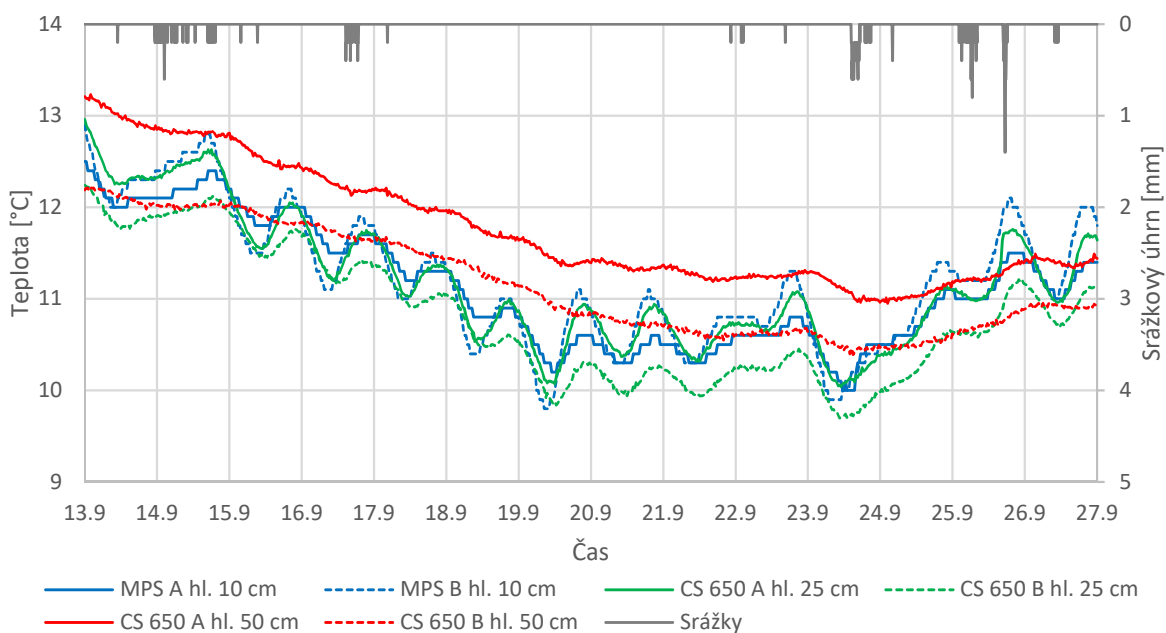
Obr. 43 Teploty měřené tenzometry T8 ve stanovišti A

Ve stanovišti B lze opět, tak jako v případě stanoviště A, na základě průběhů teplot rozlišit dva oddělené systémy. Vrstva izolantu je v případě stanoviště B přibližně v hloubce 80-100 cm. Průběhy teplot mají větší výkyvy v případě dvojice hlubších čidel, což může být způsobeno poměrně rychlým přítokem podzemní vody ze svahu nad pozemkem kostela. Další vrstva málo propustné zeminy je pak v hloubce okolo 30 cm. Půda je v této hloubce, jak je patrné z čáry zrnitosti, velmi jemnozrnná, což způsobuje pomalejší pohyb vody půdním profilem v důsledku čehož nedochází k takovému kolísání teplot i v porovnání s hloubkou 32 cm ve stanovišti A.

Pro upřesnění představy o složení podloží by bylo vhodné provést v místě kostela vrty alespoň do hloubky 150 cm a odebrat vzorky půdy pro rozbor čáry zrnitosti. Z těchto rozborů pak bude možné přesně vysledovat v jakých hloubkách se nachází vrstvy málo propustné zeminy po kterých do oblasti proudí voda ze svahu přiléhajícímu k pozemku. Podoba podloží je pak podstatná především k vhodnému návrhu drenážního systému, kterému je věnována kapitola 6.5.



Obr. 44 Teploty měřené tenzometry T8 ve stanovišti B

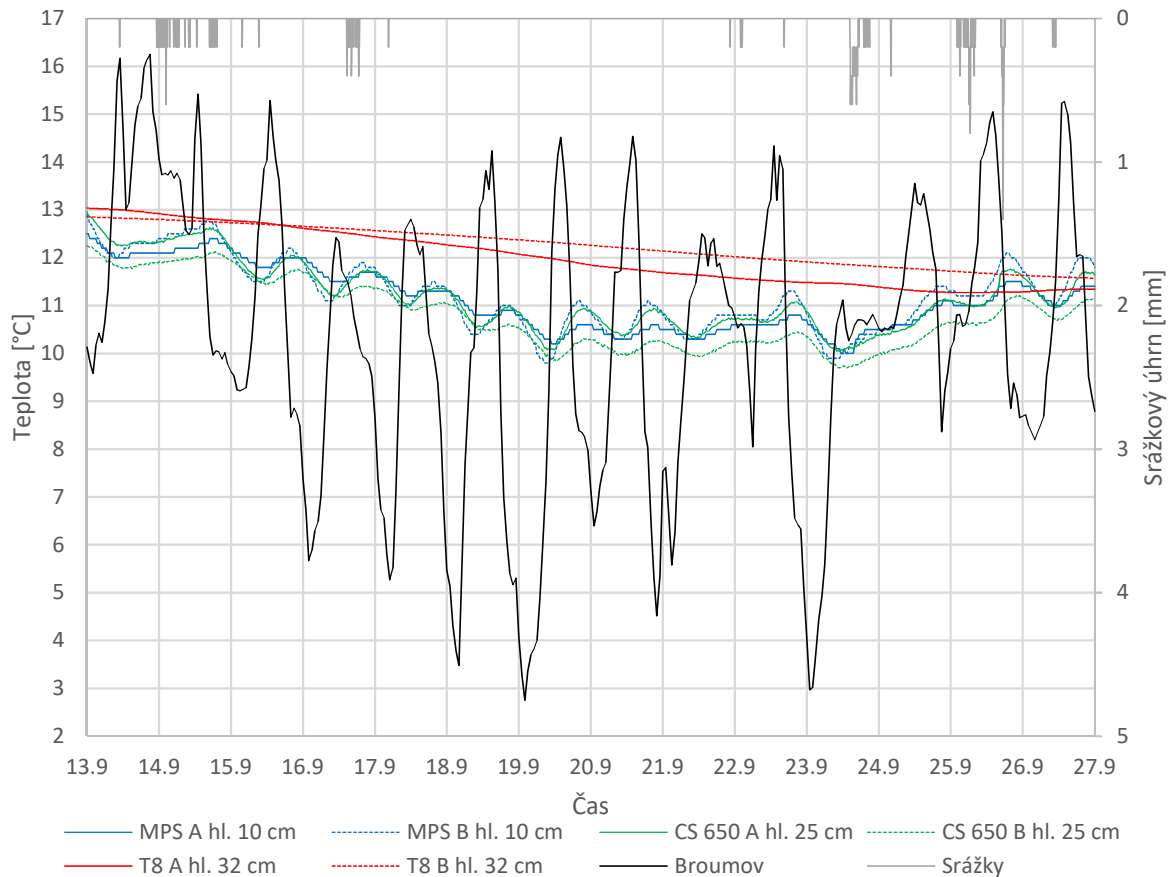


Obr. 45 Teploty měřené čidly CS 650 a MPS-6 ve venkovních stanovištích

Při porovnání teplot měřených čidly CS 650 a MPS-6 v obou stanovištích lze vypořádat, že ve stanovišti B jsou teploty nižší než ve stanovišti A, přičemž průběhy teplot si navzájem odpovídají. To lze vysvětlit polohou kostela, kdy je Stanoviště B zastíněno delší dobu během dne než stanoviště A. Ve stanovišti A pak platí, že se zvětšující se hloubkou roste teplota. To je způsobeno nízkými teplotami během noci, pohybujícími se okolo 5°C, v tomto období. Naopak ve stanovišti B nabývají hodnoty teplot měřených v hloubce 10 cm vyšších hodnot v denních maximech a nižších hodnot v denních minimech, než

v hloubce 32 cm. Toto kolísání lze vysvětlit mělčí hloubkou čidla MPS-6 a tedy vyšší náchylností na změny teploty vzduchu.

Pro porovnání velikosti kolísání teplot vzduchu během dne s teplotami v půdě byly do grafu vyneseny hodnoty měření jednotlivých čidel a teplotní údaje získané z meteorologické stanice Broumov. Pro přehlednost byla zobrazena jen čidla nejbližší povrchu, která by měla být teplotou vzduchu ovlivňována nejvíce.

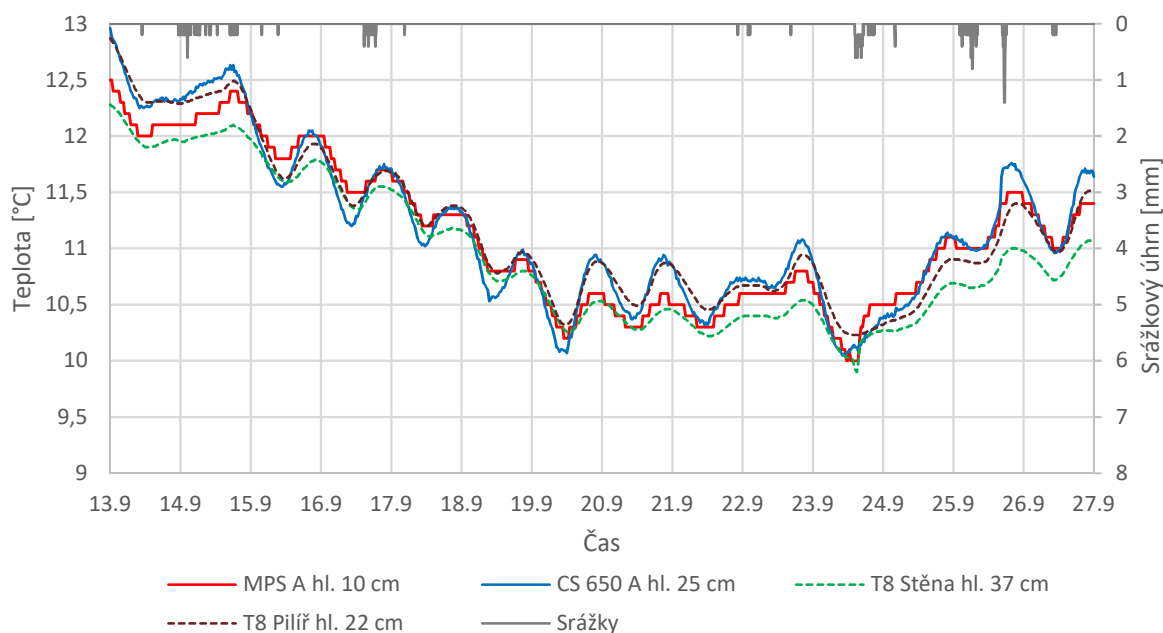


Obr. 46 Porovnání teplot měřených čidly v půdě s teplotou vzduchu měřenou v Broumově

Podle očekávání reagují na změny teploty nejvíce čidla umístěná těsně pod povrchem, a to čidla MPS-6 a CS 650. Naopak u tenzometrů umístěných v hloubce 32 cm k výkyvům nedochází. U teplot měřených v půdě lze pozorovat určité zpoždění při snižování i zvyšování teploty vzduchu, přičemž při snižování teploty je prodleva delší. To lze vysvětlit poměrně dobrými tepelně akumulacími vlastnostmi zeminy, jejíž vlhkost se téměř blíží hodnotě plného nasycení.

Hypotéza transportu vody do zdiva kostela

Použitím teploty jako stopovače lze pozorovat kontakt vody ve stanovišti A se základy kostela.



Obr. 47 Porovnání teplot v základu kostela a stanovišti A

Z průběhu teplot je patrné, že voda ve stanovišti A je v přímém kontaktu se základy kostela, jelikož průběhy teplot se prakticky neliší. Toto lze pozorovat také na datech tlakového potenciálu a vlhkosti, jež budou interpretována v následujících bodech. Z grafu lze vyčíst, že si nejvíce odpovídají průběhy teplot z tenzometru pod pilířem v hloubce 22 cm a čidla CS 650 v hloubce 25 cm. Teploty se nepatrně rozcházejí v nejnižších a nejvyšších hodnotách během dne, což však může být způsobeno tím, že se jedná o různé druhy čidel s odlišnou citlivostí na změny teplot. Z velmi podobného průběhu teplot lze usoudit, že voda z hloubky 25 cm nejspíše přitéká přímo pod pilíř kostela. Na základě velmi podobných průběhů teplot měřenými čidly MPS-6 v hloubce 10 cm, CS 650 v hloubce 25 cm a T8 pod stěnou kostela v hloubce 37 cm, je pravděpodobné, že pod stěnu zatéká voda jak z povrchové vrstvy půdy, tak z hloubky 25 cm jak tomu bylo v případě pilíře.

Jak lze vidět na grafech v přílohách č. 2 a 4, prostředí je v tomto interpretovaném období nasyceno vodou a průběh tlakového potenciálu reaguje na srážky téměř okamžitě. Lze tak předpokládat, že voda v půdě a v základech pod pilířem je ve vzájemném kontaktu.

6.3.2. Tenzometry

V této kapitole budou interpretována naměřená data tenzometry T5 a T8, která budou rozdělena zvlášť pro exteriér a interiér. V příloze č. 3 je pak zobrazeno celé monitorované období. V měření tenzometrů nastal výpadek v době od 12.10. do 22.10., který nelze přesně vysvětlit. Výpadek by však mohl souviset se stavbou v místě měření, konkrétně s instalací lešení přímo v místě, kde se nachází stanoviště A (viz obr. 36 v kapitole 5.6.).

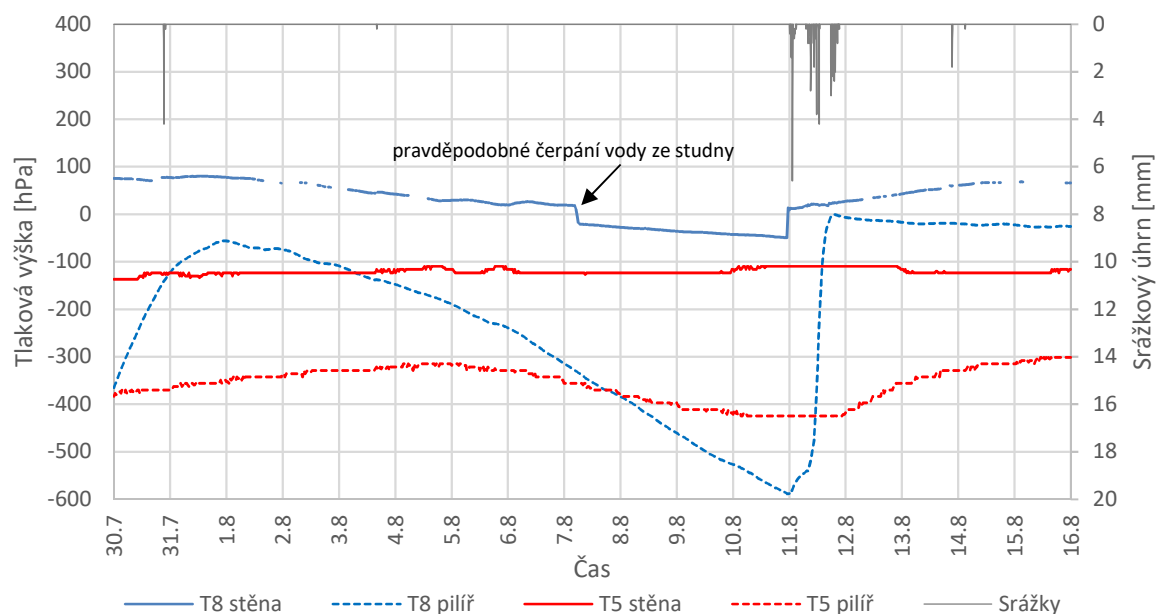
Jako první období byl vybrán časový úsek od 30. 7. 2017 do 15. 8. 2017. Tomuto období předcházelo několik srážkových událostí. Poslední z nich proběhla na počátku interpretovaného úseku. Po této srážce pak následuje několikadenní suché období zakončené opět intenzivní srážkou.

Druhým interpretovaným úsekem je pak opět čtrnáctidenní období, tentokrát však během podzimu, kdy se vyskytují dlouhodobější srážky s nižší intenzitou. Konkrétně se jedná o období od 4.11.2017 do 18.11.2017.

Tenzometry instalované uvnitř kostela

Uvnitř kostela jsou umístěny tenzometry T8 a T5, jejichž přesné rozmístění je uvedeno v kapitole 5.3.2. Letní a podzimní období je interpretováno zvlášť.

Letní období



Obr. 48 Tenzometry uvnitř kostela- letní období

Na datech z tenzometrů umístěných v podlaze kostela lze pozorovat rozdílné chování základů pilíře a stěny kostela (čidla T8). Tenzometr umístěný pod stěnou kostela

v některých obdobích neměřil a hodnoty tak jsou v grafu vynechány. V pilíři dochází k výraznějšímu kolísání vlhkosti, což je patrné z poklesu tlaku v suchém období z hodnoty -50 hPa na -600 hPa a následného prudkého nárůstu po začátku srážky. V základu stěny k tak výraznému kolísání tlakových výšek nedochází, hodnoty však ukazují na prakticky trvalou přítomnost tlakové vody v této oblasti. To lze vyčíst z grafu celkového potenciálu (viz Obr. 49). Pod pilířem dochází také k výraznému stoupání hladiny podzemní vody po srážce, avšak podzemní voda ani na konci srážky nedosahuje úrovně podlahy kostela.

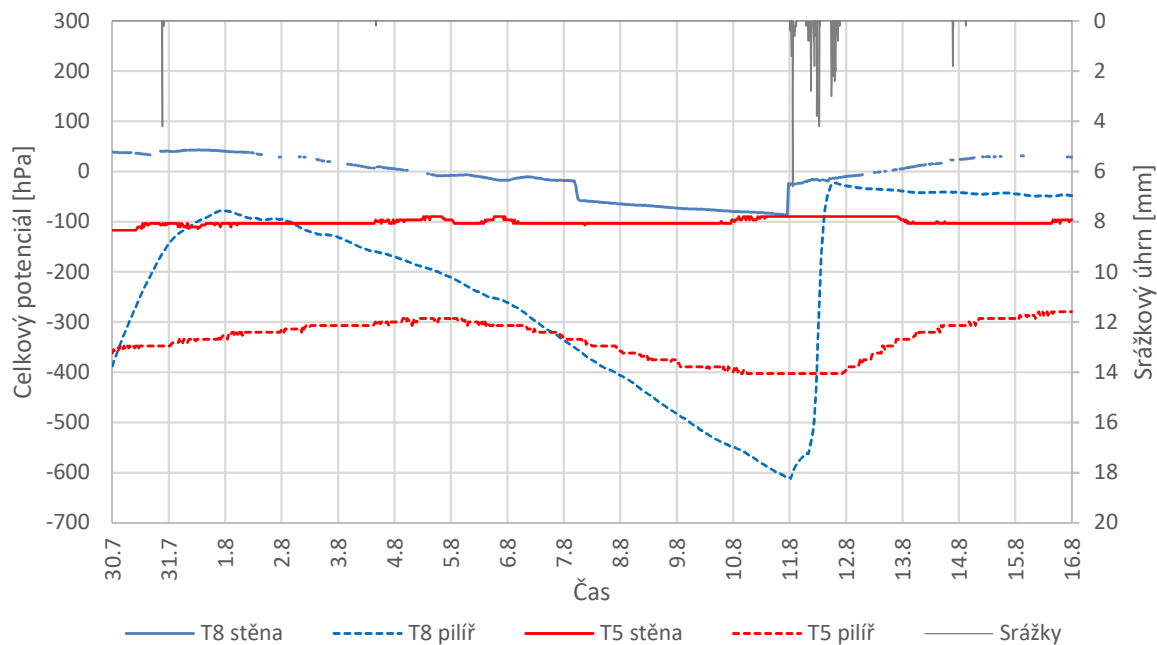
Poměrně rychlý pokles tlakové výšky u tenzometru pod stěnou 7.8. nelze s určitostí vysvětlit, podobný pokles je však zaznamenán rovněž u tenzometru ve stanovišti A v hloubce 110 cm o několik hodin později. V celém období se takovéto poklesy pravidelně opakují. Možným vysvětlením je odčerpávání vody z přilehlé studny (poloha je naznačena



na

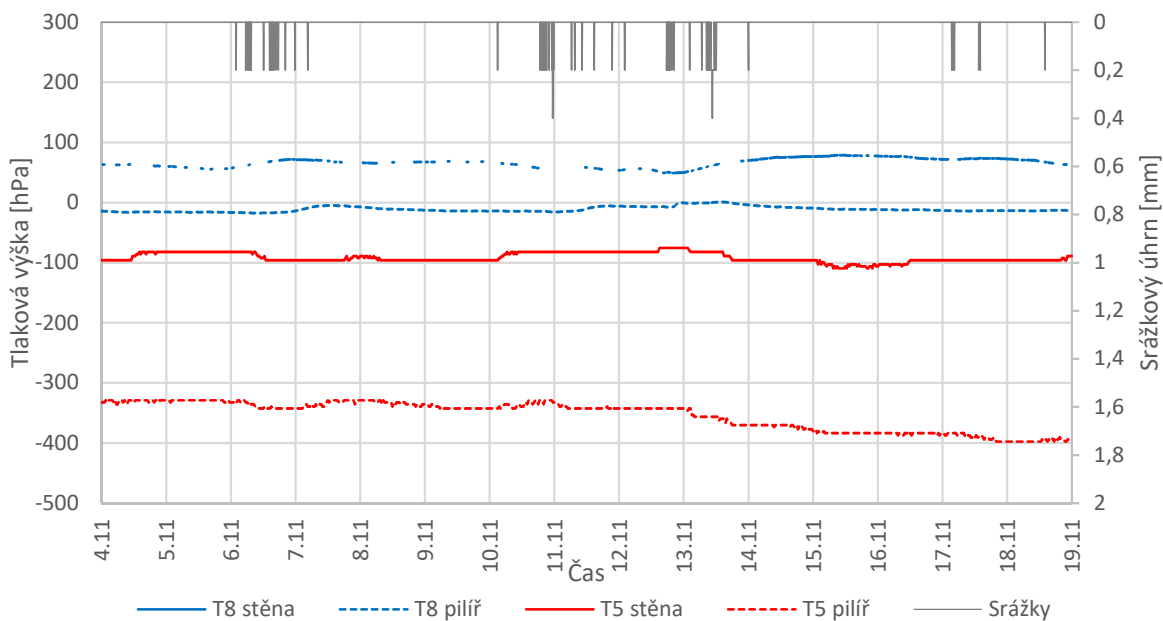
Obr. 5), což by mohlo způsobit pokles hladiny podzemní vody v jejím okolí a dojde tak k poklesu tlaku vody ve zvodni pod stěnou (vyznačeno v obr. 48). Tomuto tvrzení napovídá i fakt, že prudký pokles přišel po delším bezdeštném období a může jít o vodu pro zálivku. Odběr vody mohl být uskutečněn také pro potřeby stavby, jež zde v monitorovaném období probíhala. Žádný záznam o čerpání vody ze studny se ale získat nepodařilo.

Z měření čidel T5 umístěných v konstrukci ve výšce 20 cm nad podlahou je opět možné vypořadovat výraznější kolísání obsahu vody v pilíři než ve stěně. Stěna je však v porovnání s pilířem výrazně vlhčí.



Obr. 49 Graf celkového potenciálu letní období, vnitřní čidla

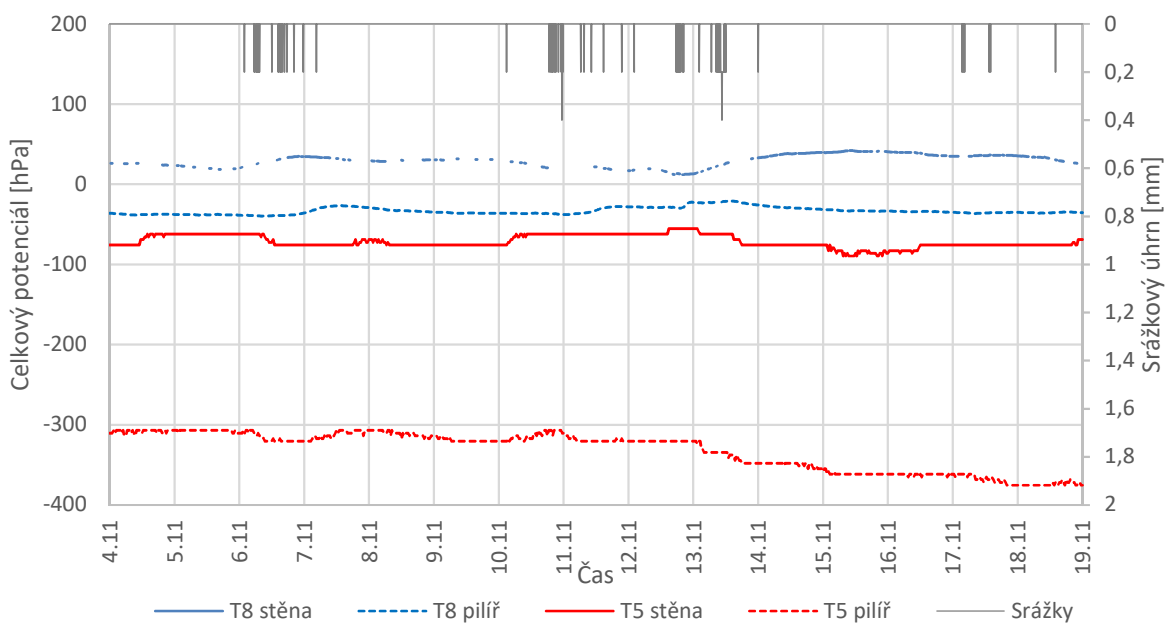
Podzimní období



Obr. 50 Tenzometry uvnitř kostela- podzimní období

V tomto období již nedochází k takovým výkyvům tlakových výšek, jak tomu bylo v letním období. Hladina podzemní vody pod základy se drží přibližně na stejné úrovni. Z grafu celkového potenciálu vztaženému opět k podlaze kostela lze vyčíst, že pod stěnou je, stejně jako v letním období, tlaková voda. Pod pilířem se opět drží hladina podzemní vody v malé hloubce pod podlahou, nedosahuje však až k povrchu. Hypotézu o prudkém poklesu tlaku u tenzometru T8 pod stěnou, jež je způsobený odčerpáváním vody ze studny, potvrzuje absence těchto poklesů během celého podzimního období.

Stěna je pak výrazně vlhčí než pilíř i ve výšce 20 cm nad podlahou. Tento jev pak je potvrzen i vlhkostními čidly CS 655 umístěnými ve stejné výšce. Stěna v zimním období je také vlhčí, než tomu bylo v letním období.



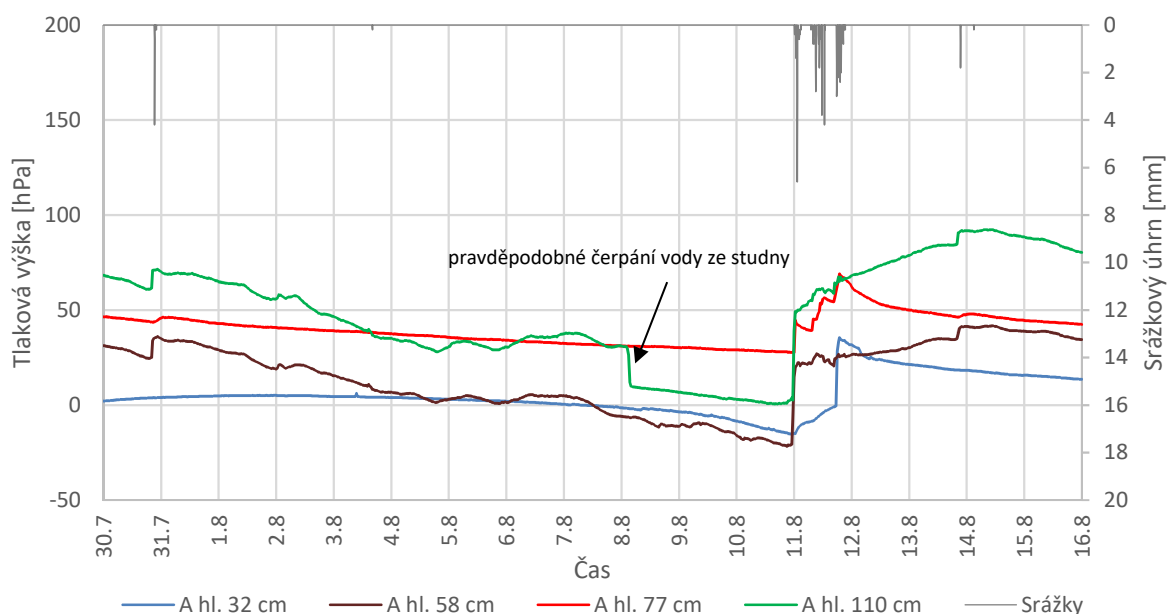
Obr. 51 Graf celkového potenciálu podzimní období, vnitřní čidla

Tenzometry instalované na pozemku u kostela

Také v tomto případě je zvláště interpretováno letní a podzimní období.

Letní období

Na pozemku přiléhajícím ke kostelu jsou umístěné tenzometry T8 ve dvou stanovištích v různých hloubkách (viz kapitola 5.3.3). Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v následujícím grafu, kde jsou přibližně stejné hloubky umístění čidel označeny stejnou barvou. Stanoviště A je pak vykresleno plnou čarou a stanoviště B čarou přerušovanou. Na konci každého období je pak vykreslen graf celkových potenciálů, do kterého jsou zakreslena obě stanoviště.



Obr. 52 Tenzometry ve stanovišti A- letní období

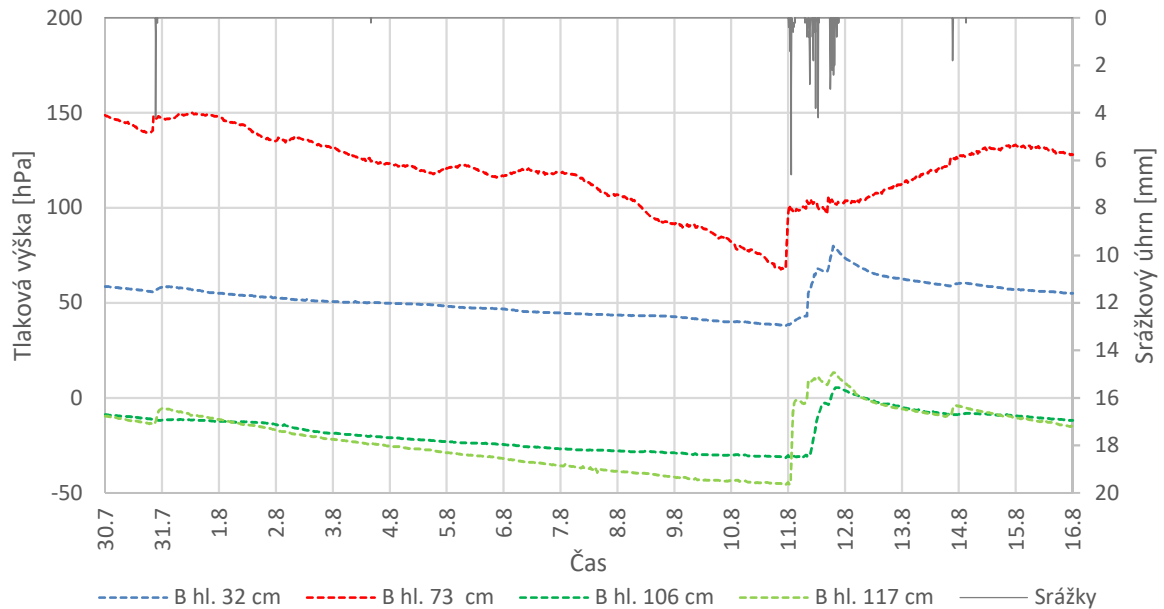
Pomocí dat měřených ve stanovišti A lze potvrdit předpoklad o výskytu málo propustné vrstvy v hloubce okolo 60-80 cm. Při suchém období lze pozorovat velmi podobný průběh tlakových výšek v hloubkách 58 cm a 110 cm, mezi kterými se vrstva izolantu vyskytuje. Čidlo v hloubce 58 cm je ovlivňováno jak vzduším tlakem v strouze, tak přítokem a odtokem vody z oblasti po nakloněné vrstvě izolantu. Hodnoty tlakové výšky v hloubce 110 cm jsou pak ovlivňovány přítokem vody do oblasti po izolantu pod tímto horizontem a opět také přítokem vody z vrstvy půdy v hloubce 77 cm.

Vzhledem k plynulému poklesu tlakové výšky u čidla v hloubce 77 cm a nulové reakci na náhlý pokles tlaku u čidla v hloubce 110 cm je pravděpodobné, že vrstva izolantu se vyskytuje právě v místech, kde je toto čidlo umístěno. Náhlý pokles tlakové výšky 8.8. (vyznačeno v obr. 52) lze vysvětlit, jak již bylo řečeno v minulém bodě, odčerpáváním vody ze studny na pozemku kostela.

Z čáry zrnitosti vzorku odebraného ve stanovišti A v hloubce 30-35 cm lze vidět, že je zde podobně jemnozrnná zemina jako v případě stanoviště B. Zrnitost a podobný průběh tlakových výšek v hloubkách 32 cm v obou stanovištích lze interpretovat, jako výskyt izolantu v této hloubce. To by pak vysvětlovalo také vzduší vody ve strouze, jež má dno právě přibližně v této hloubce.

V celém půdním profilu, kromě hloubky přibližně do 35 cm je trvale přítomna podzemní voda, což způsobuje okamžitou reakci na srážku. U tenzometru v hloubce 32 cm je možné vidět postupný nárůst až do okamžiku, kdy podzemní voda dosáhne úrovně čepičky tenzometru. Dále pak dochází k prudkému nárůstu tlakové výšky až do konce srážky.

Z grafu celkového potenciálu (viz Obr. 54) je pak vidět, že na rozdíl od stanoviště B se v celém půdním profilu nevyskytuje tlaková voda. Krátký úsek během srážky, kdy je hodnota celkového potenciálu v hloubce 32 cm v kladných hodnotách do 3,5 cm lze vysvětlit vytvořením kaluže na povrchu terénu.



Obr. 53 Tenzometry ve stanovišti B- letní období

Infiltrace srážek ve stanovišti B je ovlivněna výskytem hned několika vrstev málo propustné zeminy, jak bylo zmíněno již při interpretaci teplot. Naměřené hodnoty potenciálu toto tvrzení potvrzují a dále ještě upřesňují.

V hloubce přibližně 30 cm se téměř jistě nachází málo propustná vrstva. Tímto lze vysvětlit pozvolný a prakticky lineární pokles hodnoty tlakové výšky v bezdeštném období, neboť voda odtéká z izolantu velmi pomalu. V kontrastu s tímto poklesem je pak pokles tlakové výšky u čidla v hloubce 73 cm, které se nachází ve zvodni. Přítomnost izolantu v této hloubce rovněž potvrzuje prodleva při nárůstu tlakového potenciálu po začátku srážky. Voda ze srážky se kvůli málo propustné zemině v této vrstvě pohybuje pomaleji a k čidlu se tak dostává s časovou prodlevou.

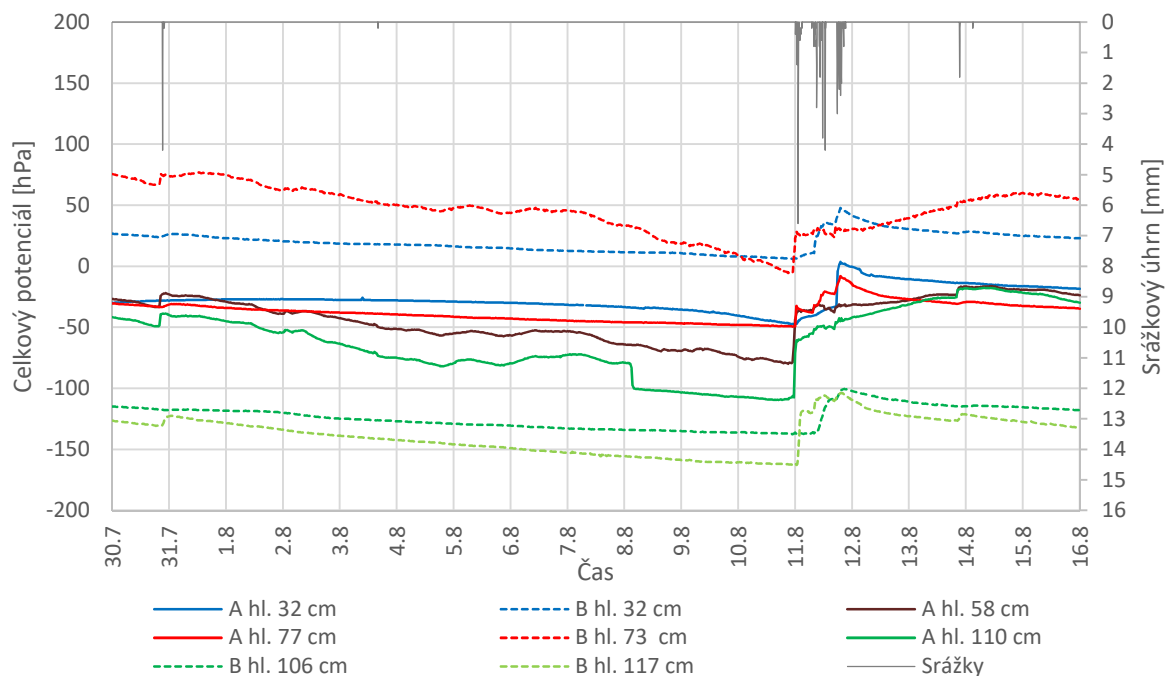
V hloubce 80-110 cm se pak pravděpodobně vyskytuje také izolant, který je však nejspíš v určitém sklonu a voda po něm odtéká. Trend průběhu tlakové výšky v bezdeštném období je v čidle v hloubce 73 cm klesající, avšak lze pozorovat i mírné nárůsty, jež mohou být způsobeny přítokem vody po skloněném izolantu z vedlejšího území. Po začátku srážky pak lze pozorovat hromadění vody v tomto profilu, čímž dochází ke zvyšování tlakového potenciálu.

V celém profilu od hloubky 80 cm až po vrstvu izolantu který by se mohl vyskytovat přibližně v hloubce 30 cm je přítomna tlaková voda, jak lze vyčíst z grafu celkového potenciálu na obrázku 54.

Ve vrstvě izolantu, který by se mohl nacházet v hloubce od 80 do 110 cm se pak nachází také čidlo umístěné v hloubce 106 cm. Tvzení, že toto čidlo je umístěno v málo propustné zemině, potvrzuje shodný průběh tlakového potenciálu s čidlem v hloubce 32 cm. Nárůst vlhkosti je pak v čidle umístěném hlouběji zpožděn o několik hodin.

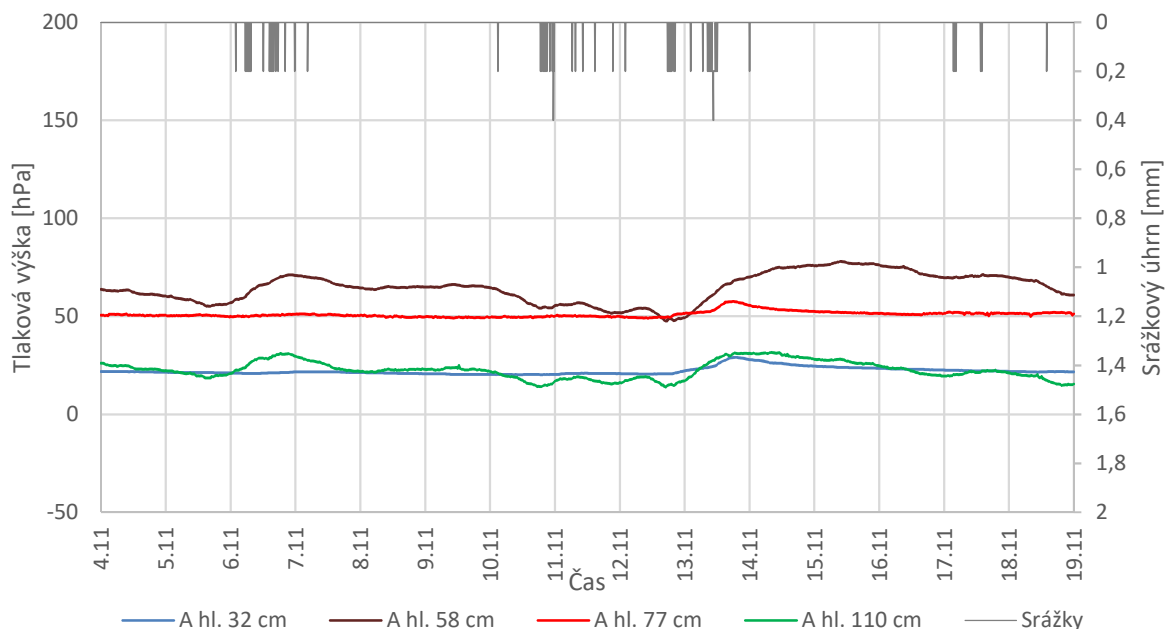
Poslední vrstva izolantu, kterou lze detekovat se nachází přibližně v hloubce 150 cm. Po této vrstvě do místa měření opět přitéká voda, která, jak již bylo zmíněno při interpretaci teplot, sem proudí ze svrchních vrstev půdy v blízkém okolí. Toto tvrzení potvrzuje i čidlo potenciálu v hloubce 117 cm, jež zaznamenalo nárůst vlhkosti v řádu několika hodin po srážce shodný s nárůstem v čidle v hloubce 73 cm.

Z grafu celkového potenciálu pak lze vyvodit, že voda ze stanoviště B vyskytující se nad izolantem v hloubce 80-100 cm proudí do stanoviště A. Toto lze tvrdit na základě shodných průběhů celkového potenciálu u čidel B hl. 73 cm, A hl. 58 cm a A hl. 110 cm. K určení přesné podoby podloží je však nezbytné provést v území vrty, jak již bylo zmíněno. Přibližná představa o podobě podloží v oblasti je zobrazena na náčrtku v bodě 6.3.6 (viz obr. 62).



Obr. 54 Celkový potenciál ve stanovištích A a B- letní období

Podzimní období



Obr. 55 Tenzometry ve stanovišti A- podzimní období

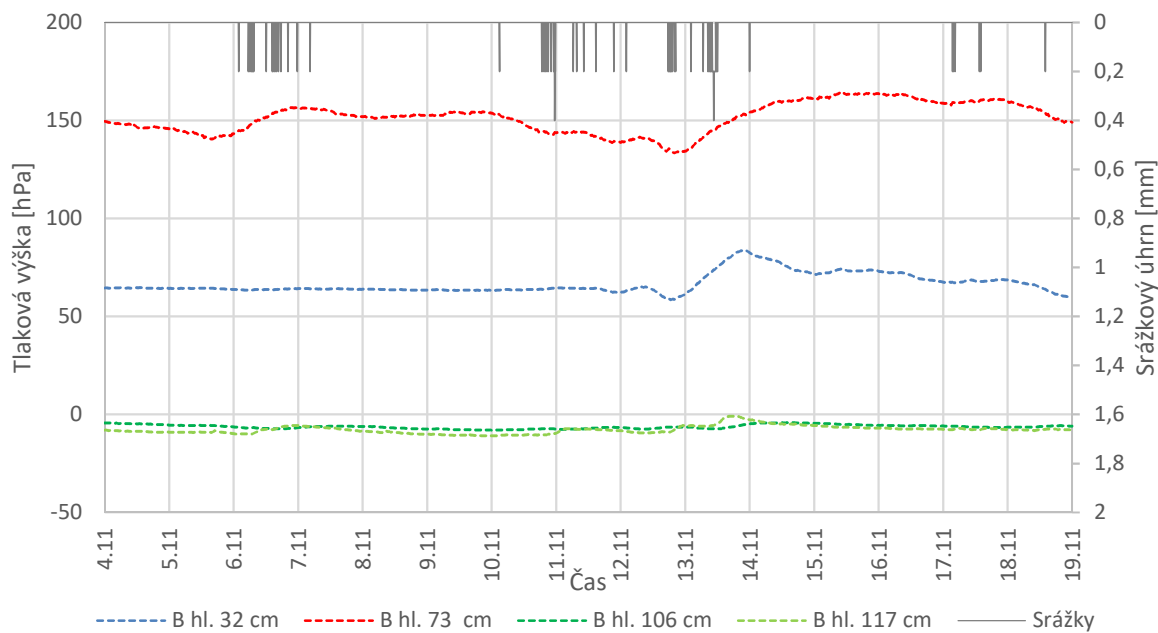
V podzimním období lze ve stanovišti A opět vidět stejný průběh tlakových výšek v hloubkách 58 a 110 cm. V grafu celkového potenciálu pak, stejně jako v letním období, lze pozorovat shodný průběh tlakových výšek také ve stanovišti B v hloubce 73 cm. Rovněž je z tohoto grafu patrné, že v hloubce 58 cm je přítomna tlaková voda během téměř celého sledovaného období. Ve všech zmiňovaných horizontech (A hl. 58 cm, A hl. 110 cm a B hl. 73 cm) dochází po srážkách k akumulaci vody.

Podobný průběh v hloubkách 32 a 77 cm je způsoben tím, že dochází k infiltraci vody do málo propustné vrstvy. Proto nejsou na průběhu tlakových výšek patrné výkyvy při menších srážkách.

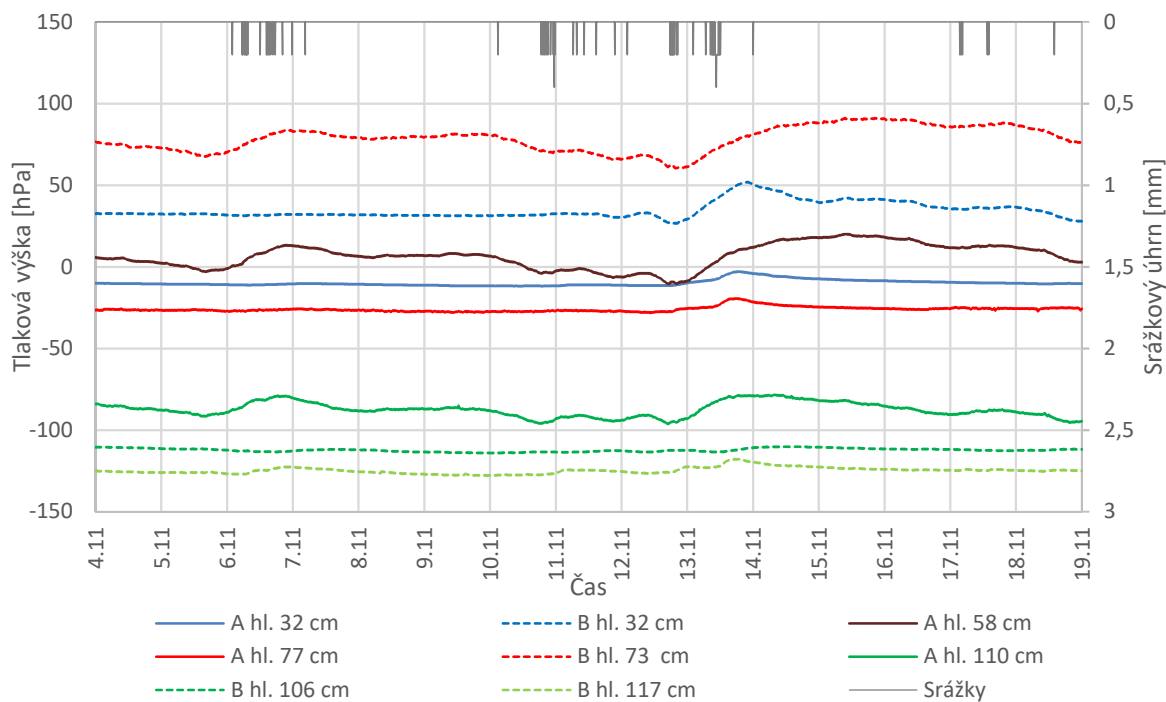
Ve stanovišti B je možné pozorovat podobný průběh tlakových výšek v hloubkách 106 a 117 cm, kdy čidla prakticky nereagují na srážky s výjimkou dne 13.11. Na tuto srážku reaguje čidlo v hloubce 117 cm, kam přitéká voda z pozemku nad kostelem.

V hloubce 73 cm opět dochází k výraznému hromadění vody po srážce 13.11., stejně jako v případě hloubek 58 a 110 cm ve stanovišti A.

Jak lze vyčíst z grafu celkového potenciálu, v horních dvou horizontech pak je přítomna tlaková voda během celého sledovaného období.



Obr. 56 Tenzometry ve stanovišti B- zimní období



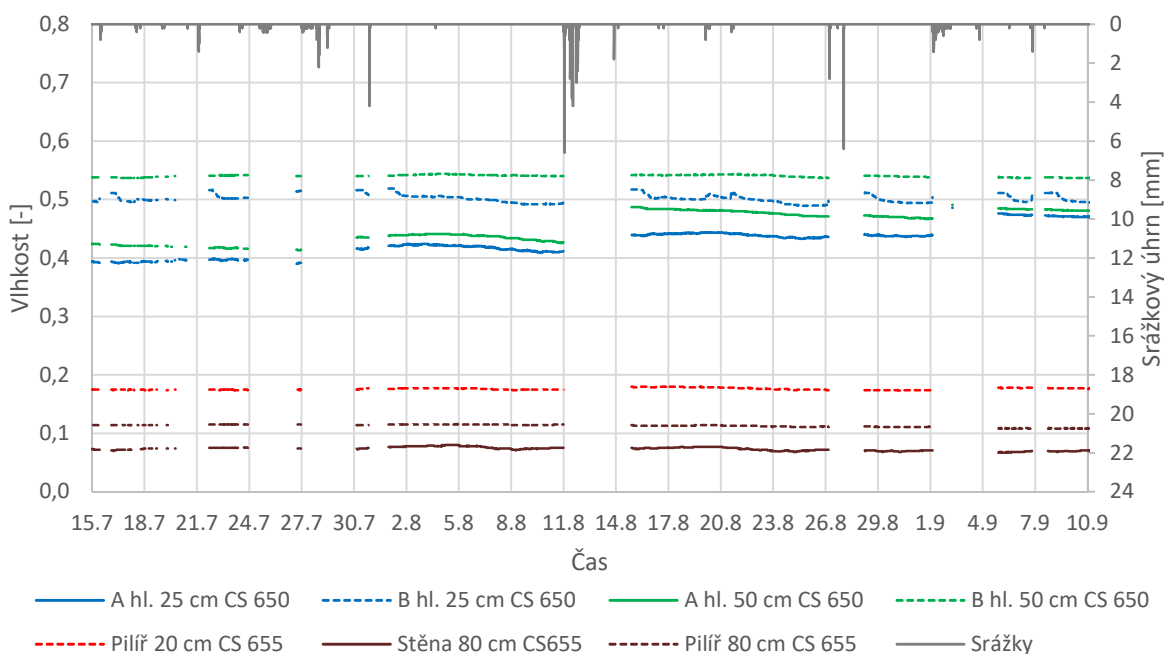
Obr. 57 Celkový potenciál ve stanovištích A a B- zimní období

6.3.3. Čidla vlhkosti

Pro interpretaci dat z čidel vlhkosti bylo vybráno delší období přibližně dvou měsíců od 15. 7. do 10. 9. Celé časové období je opět možné najít v příloze č. 5. V měření bohužel docházelo během celého období k výpadkům, pravděpodobně z důvodu zatápění stanoviště A jak lze vidět na obrázku 35 v kapitole 5.6.

Do grafu byly zaneseny výsledky měření čidel CS 655 umístěných uvnitř kostela a CS 650 umístěných ve stanovištích A a B.

Jak bylo uvedeno již na začátku kapitoly, u čidla CS 655 umístěného ve stěně ve výšce 22 cm nedocházelo ke čtení dat a hodnoty tak nejsou k dispozici.



Obr. 58 Čidla vlhkosti CS 650 a CS 655

Z grafu je patrné, že ve stanovišti B je půda vlhčí než ve stanovišti A, a to v obou horizontech. Rovněž lze pozorovat, že v horních horizontech obou stanovišť je půda vlhčí než ve spodních. Ve stanovišti B pak lze pozorovat v hloubce 25 cm výraznější reakce na srážky, než je tomu ve stanovišti A. Naopak v hloubce 50 cm stanoviště B nedochází prakticky k žádné reakci na srážky, což lze vysvětlit tím, že se čidlo nachází ve vrstvě izolantu. Ve stanovišti A lze v této hloubce pozorovat výrazný nárůst vlhkosti po srážce 11.8. Tento nárůst je způsoben umístěním čidla, jež se nachází ve vrstvě mezi izolanty, do které přitéká voda ze stanoviště B. Z grafu celkového potenciálu tenzometrů v letním období lze vyčíst, že v době zmíněné srážky došlo k prudkému nárůstu tlakových potenciálů oblasti. Zároveň se však v době srážky nachází hladina podzemní vody až pod tenzometrem v hloubce 58 cm, a tak lze po začátku srážky a s tím spojeném stoupání hladiny podzemní vody sledovat nárůst vlhkosti v čidle v hloubce 50 cm. Na konci srážky je z dat měřených tenzometry patrné, že se hladina podzemní vody vyskytuje až nad

čidlem v hloubce 50 cm a hodnota vlhkosti v nejvyšším bodě, jež bohužel v důsledku výpadku měření není zobrazen, odpovídá hodnotě vlhkosti při plném nasycení a pohybuje se přibližně okolo 50 %. Čidlo ve stanovišti A v hloubce 25 cm je významně ovlivňováno zatápěním šachtice a strouhy, což má za následek zvyšování hodnoty vlhkosti po srážce také až do hodnoty plného nasycení. Vzhledem k velkému nasycení půdy během celého období však nejsou v průběhu vlhkostí patrné výrazné nárůsty a poklesy.

V grafu zobrazujícím celé monitorované období (příloha č. 5) lze pozorovat, že na začátku období bylo stanoviště A především v horním horizontu ve srovnání se zbylými měsíci poměrně suché. Toto potvrzuje i měření tenzometru T8 v hloubce 32 cm. Na základě tohoto pozorování lze vyvodit, že údaje o srážkách ze stanice v Broumově nesouhlasí se srážkami ve Vižňově, neboť srážkoměr v Broumově měřil v tomto období srážky o vysoké intenzitě.

Hodnoty měřené uvnitř kostela ukazují, že nejvýznamnější kontakt mezi interiérem a exteriérem se děje u základu stěny.

Poměrně vysoká hodnota vlhkosti zdiva v pilíři, kdy se vlhkost v celém období pohybuje okolo 17%, dokazuje, že dochází k výraznému vzlínání vody z prostoru pod základy. Vzhledem k výpadku čidla CS 655 ve stěně nejsou bohužel k dispozici hodnoty vlhkosti v tomto místě, opticky je však stěna ještě vlhčí než pilíř (viz obr. 26 v kapitole 5.3.2). Jednou z příčin vyšší vlhkosti zdiva je vypadávání pískovcových kvádrů (viz obr. 12 v kapitole 5.1.4) z venkovní strany budovy, což má za následek odhalení povrchu zdiva, zvětrávání malty a zdiva, a především je usnadněn kontakt mezi zdívkou a půdou, potažmo srážkovou vodou. Dalším jevem, který zvyšuje vlhkost stěny, je přítomnost tlakové vody pod jejím základem, jak je možné pozorovat na grafech celkového potenciálu z měření tenzometrů.

6.3.4. Zásoba vody

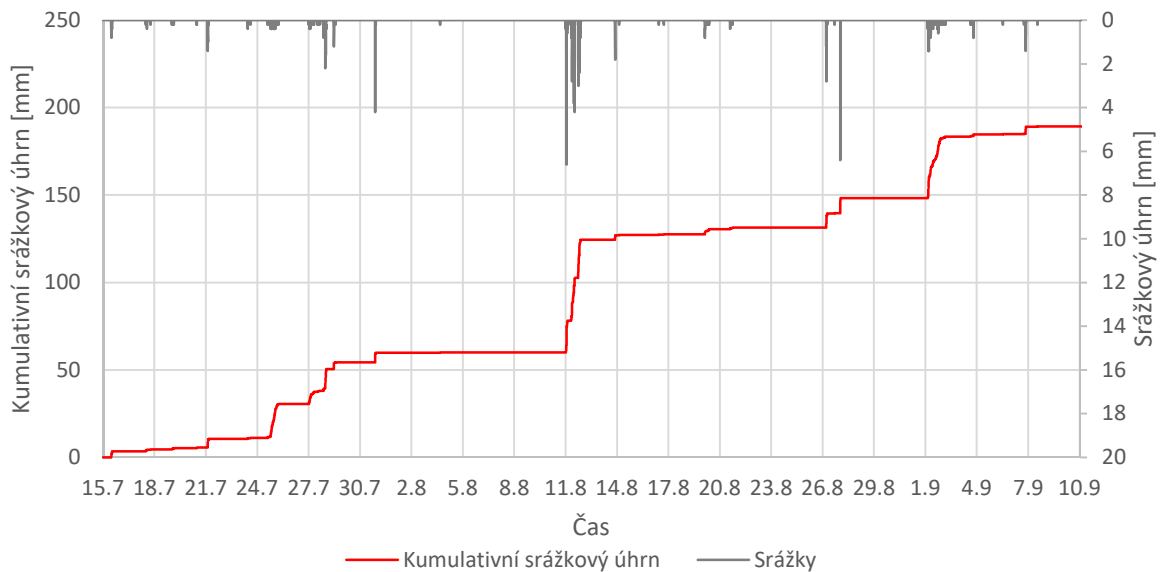
Z výsledků měření vlhkosti byla v půdě vypočtena zásoba vody, jež byla následně porovnána s kumulativním srážkovým úhrnem. Tímto způsobem bylo určeno, jak ovlivní srážka množství vody v půdním profilu.

Pro výpočet zásoby vody v půdě byla každému čidlu vlhkosti v obou stanovištích přiřazena vrstva půdy určité mocnosti. Pro čidlo v hloubce 25 cm byla zvolena vrstva 0 – 35 cm pod terénem. Čidlu v hloubce 50 cm byla přiřazena vrstva 35 – 75 cm pod terénem. Zásoba vody pro jednotlivé vrstvy pak byla vypočtena vzorcem:

$$Z_i = \theta_i \cdot d_i \quad [47]$$

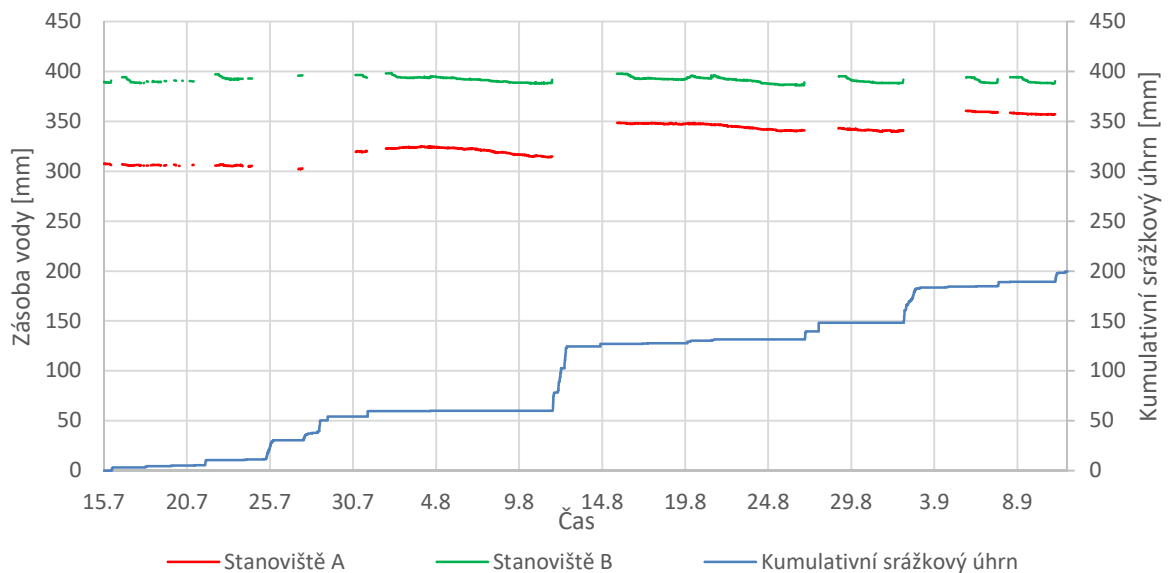
kde Z je zásoba vody, θ vlhkost změřená čidlem CS 650 a d mocnost vrstvy.

Pro výpočet zásoby vody bylo zvoleno období od 15. 7. do 10.9. z důvodu nejvýraznější změny vlhkosti v půdě za celé monitorované období. Zároveň lze v tomto období pozorovat nejintenzivnější srážky.



Obr. 59 Kumulativní srážkový úhrn

V následujícím grafu je pak zobrazeno porovnání kumulativního srážkového úhrnu se zásobou vody v půdě ve stanovištích A a B.



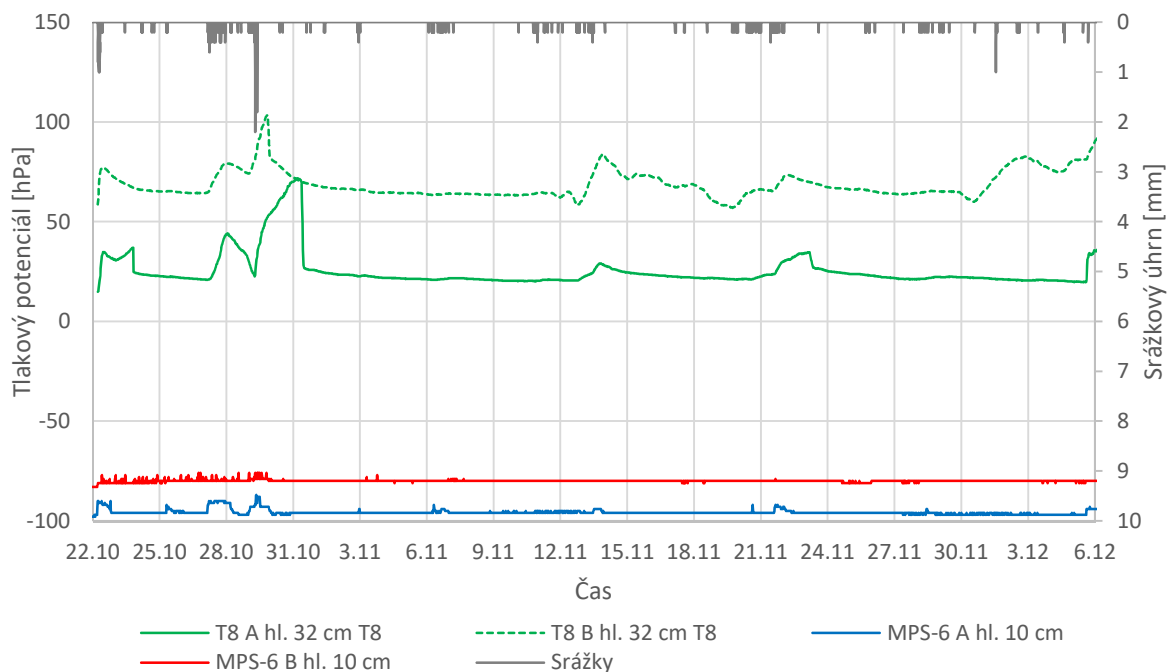
Obr. 60 Zásoba vody

Výpočet zásoby vody v půdě byl ovlivněn výpadky měření čidel CS 650. Z tohoto důvodu nelze pozorovat plynulý nárůst zásoby vody po začátku srážky a mírný pokles po skončení srážky, kdy voda z půdního profilu odtéká.

Přestože během důležitých období – při výskytu srážek – nejsou k dispozici naměřená data, lze z průběhu grafu vyvodit, že je půdní profil v obou stanovištích prakticky zcela nasycen vodou. Ve stanovišti B je tento jev více patrný. U stanoviště A přece jen lze pozorovat zvýšení zásoby vody alespoň o přibližně 50 mm. Při porovnání s hodnotou kumulativního srážkového úhrnu o hodnotě téměř 200 mm však lze vidět, že většina vody z profilu odtéká.

6.3.5. MPS-6

Čidla MPS-6 byla do monitorovací sestavy přidána až během podzimu, záznam z letních měsíců tak není k dispozici. Stejně jako v případě tenzometrů došlo k výpadku měření. Čidla MPS-6 však přestala měřit o 4 dny dříve a následně pak začala měřit o 6 dní dříve než tenzometry T8.



Obr. 61 Tlakový potenciál ve stanovištích A a B

Rozsah měření čidel MPS-6 je -9 kPa až -100 kPa. Tato čidla jsou využívána především pro suchá období. V obou venkovních stanovištích však neklesla hodnota tlakového potenciálu v hloubce 32 cm ani do záporných hodnot, což znamená, že se během celého monitorovaného období nevyskytovala čidla MPS-6 ve svém rozsahu měření. V grafu pak lze vidět, že hodnota tlakového potenciálu se pohybuje okolo -90 hPa, což ale znamená jen to, že se tlakový potenciál pohybuje v neměřitelných hodnotách pro čidla MPS-6.

Data měřená čidly uvnitř kostela mají nestandardní průběh, jež je způsoben chybou, jež prozatím nebyla identifikována. V datech měření teplot i potenciálů se objevují výrazné skoky.

Po komunikaci s výrobcem čidel byl jako pravděpodobný původce chyb v měření označen přímo program ovládající měření dataloggeru Campbell Scientific, respektive možná chyba při konverzi textového řetězce na číselnou hodnotu. Tato hypotéza bude ověřena, avšak kvůli časové náročnosti budou výsledky známy až po dokončení práce.

6.3.6. Odhad zvrstvení půdního profilu

Na základě měření teplot, tlaků a vlhkostí je možné přibližně určit dráhu pohybu vody, s čímž souvisí také pravděpodobná podoba podloží. Hypotézy složení podloží a pohybu vody byly již formulovány v předešlých bodech. V tomto bodě bude prezentován náčrtek pravděpodobné podoby podloží a doplněny některé další důkazy, jež podporují tyto hypotézy. Samozřejmě se jedná pouze o jedno z mnoha možných uspořádání. K určení přesnější podoby podloží by musely v oblasti být provedeny průzkumné vrty, jak bylo již zmíněno v předešlých kapitolách.

V náčrtku jsou znázorněny hloubky umístění jednotlivých čidel. Jejich poloha však není přesně zachycena. Čidla CS 650 a MPS-6 nejsou umístěna v šachtici, ale v půdě vedle šachtice. Rovněž tenzometry jsou zjednodušeně znázorněny jen hloubkou umístění čepičky, směr vedení znázorněn není.

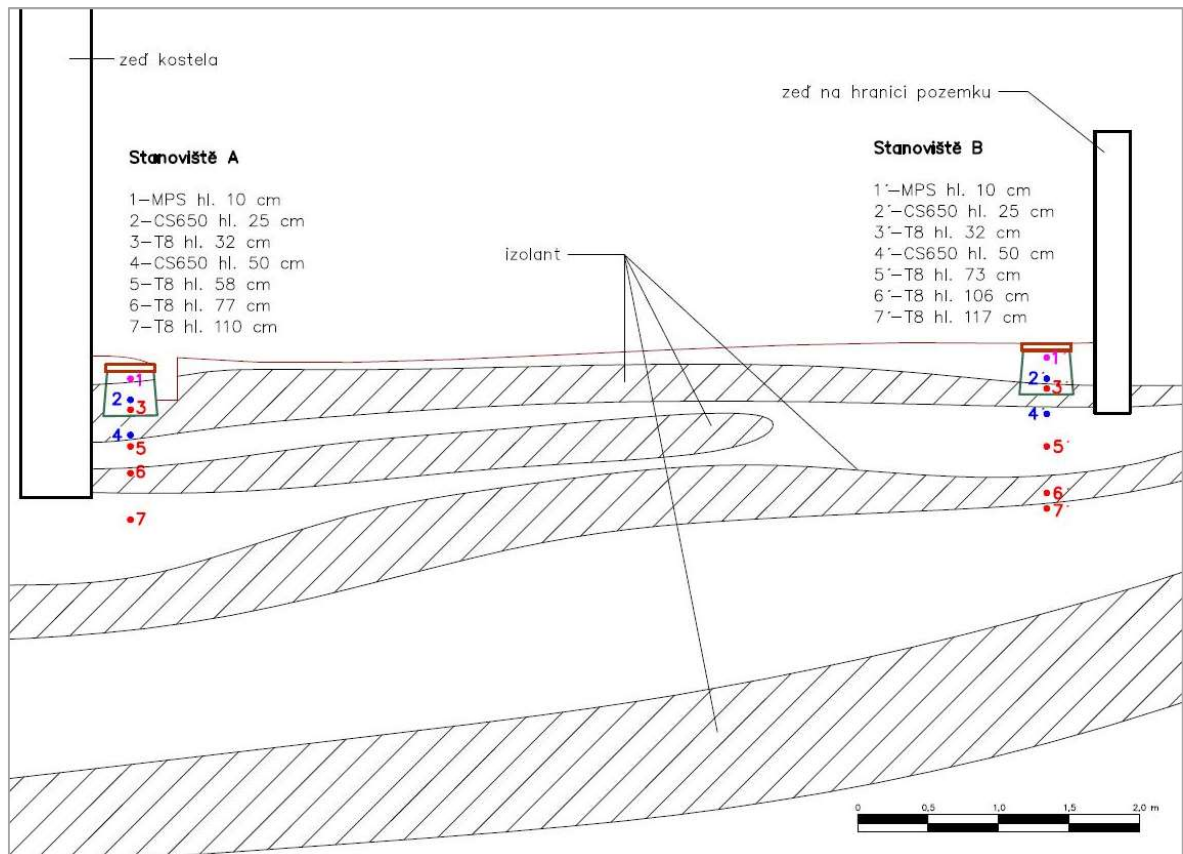
Indikátorem přítomnosti málo propustných vrstev a jejich přibližné mocnosti může být zatápní šachtic (viz obr. 35 a obr. 36 v kapitole 5.6.). Rozdíl mezi stanovišti je v hloubce vody v šachtici při zatopení. Do šachtic se samozřejmě dostává i voda, která stéká podél stěny šachtice a dnem natéká dovnitř. K zatápní šachtice A však nejvíce přispívá akumulace vody ve strouze, která se nachází přímo u šachtice. Akumulace vody ve strouze a pomalé odtékání vody z šachtice je způsobeno přítomností málo propustné vrstvy půdy v hloubce 30 cm.

Stejný průběh grafů vlhkosti ve stanovišti A v hloubkách 25 a 50 cm potvrzuje, že je tato oblast tvořena jednou vrstvou zeminy, v tomto případě izolantu.

Na vrstvu izolantu ve stanovišti B v rozmezí hloubek přibližně 25 až 40 cm ukazuje průběh vlhkostí v hloubce 25 cm, kde lze vidět reakce na srážky, což značí, že v této hloubce ještě izolant není přítomen. Naopak hodnota vlhkosti v hloubce 50 cm zůstává téměř konstantní, což pravděpodobně znamená plné nasycení. Trvalou přítomnost podzemní vody v této oblasti potvrzuje i měření tenzometru T8 v hloubce 58 cm. Opožděnou reakci na velké srážky pak ukazuje i tenzometr T8 v hloubce 32 cm. Několikahodinové zpoždění maximální hodnoty tlaku proti výskytu srážky ukazuje na přítomnost izolantu v této hloubce, který zpomaluje infiltraci vody. Vysoké hodnoty tlaku měřeným v této hloubce pak lze vysvětlit šířením tlaku ze zvodně s tlakovou vodou nacházející se pod tímto izolantem.

Stejný průběh tlaku v hloubkách 58 a 110 cm ve stanovišti A a 73 cm ve stanovišti B ukazuje na to, že jsou tato čidla v jedné zvodni, nebo jsou nějak propojena. Alternativou k situaci uvedené v náčrtku může být podoba podloží, kdy jsou horní dva izolanty v místě mezi stanovišti propojeny a v níže umístěném izolantu je přítomna porucha, kterou do vrstvy nad tímto izolantem proudí tlaková voda.

Potvrzení nebo vyvrácení této představy o zvrstvení půdního profilu v pozemku u kostela, nebo k určení přesnější podoby půdního profilu by musely v oblasti být provedeny průzkumné vrty nebo kopané sondy, jak bylo již zmíněno v předešlých kapitolách.



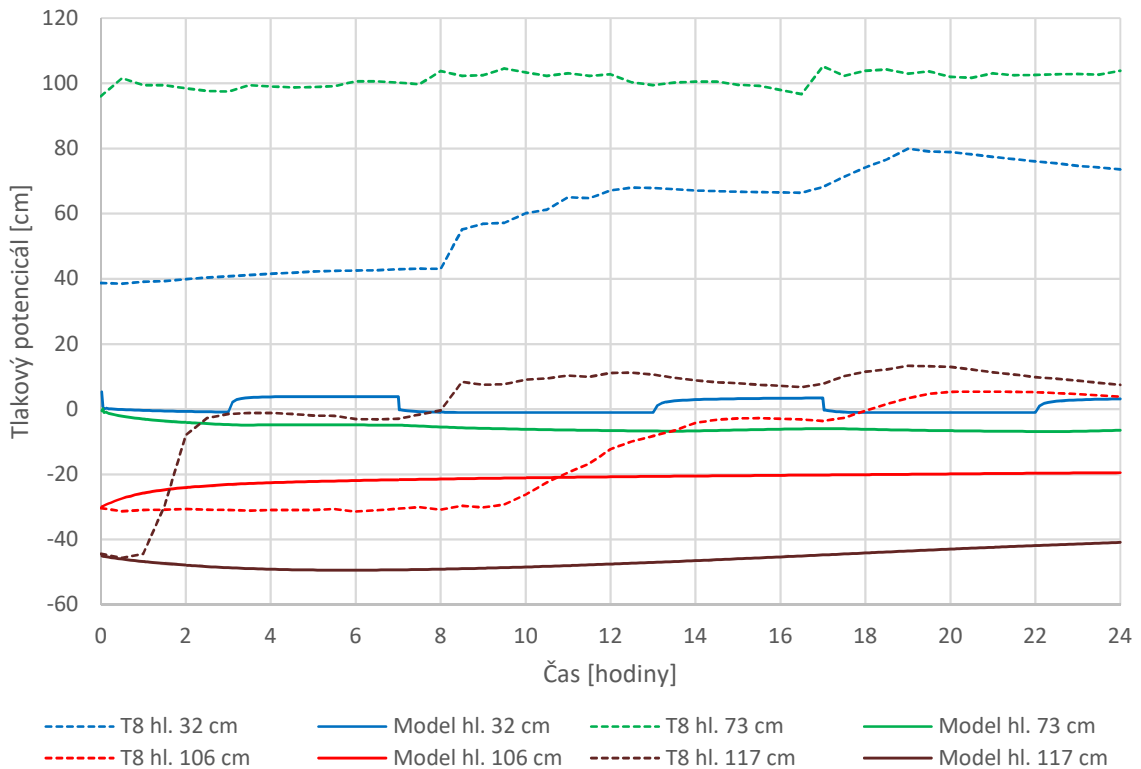
Obr. 62 Náčrtek možné podoby zvrstvení půdního profilu

6.4. Výsledky matematického modelování

V rámci této diplomové práce byla provedena simulace 1D modelem, neboť 2D model by byl svým rozsahem úkolem spíše pro samostatnou diplomovou práci. Vzhledem k velmi malému sklonu území bylo předpokládáno, že by pro popis proudění v půdě měl být jednorozměrný model dostačující.

Vstupní data, jako jsou srážky nebo výpar jsou podrobně uvedeny již v kapitole 5.5. Stejně tak jsou v této kapitole popsány počáteční a okrajové podmínky zadávané do modelu. Rovněž je zde uveden rozsah modelovaného období.

V následujícím grafu jsou prezentovány výsledky modelování 24 hodin dne 11.8.2017 ve stanovišti B, jež jsou porovnány s reálnými hodnotami měřenými tenzometry T8.



Obr. 63 Porovnání matematického modelu se skutečností

V grafu lze vidět naprosto odlišný průběh tlakového potenciálu simulovaného modelem v porovnání se skutečným stavem. To je způsobeno přítokem vody do oblasti přes boční hranici a také pravděpodobným výskytem izolantů, jež způsobují u čidla v hloubce 73 cm výskyt tlakové vody.

Kalibrace modelu například úpravou podoby zvrstvení půdního profilu tak, aby se v horizontech v hloubce 32 a 73 cm vyskytovala tlaková voda po infiltraci srážky, rovněž není možná. Umístění vrstev izolantů do modelu by z důvodu modelování proudění pouze ve svislém směru způsobilo jen to, že by voda již vůbec nezasakovala do hlubších horizontů a průběh tlaků by stále neodpovídal skutečnosti.

Průběh tlakového potenciálu v jednotlivých horizontech je tak nejvíce ovlivněn přítokem vody přes boční hranice modelu, a to jak v případě prezentovaného stanoviště B, tak i stanoviště A.

Závěrem plynoucím z výsledků matematického modelu tak je skutečnost, že popis proudění v oblasti je problém dvourozměrný či trojrozměrný a 1D model tak v tomto případě použít nelze. V případě sestavování vícerozměrného modelu by pak bylo zapotřebí provést průzkumné vrty či kopané sondy, které pomohou přesněji popsat

podobu podloží. Dále by pak bylo nezbytné stanovit množství vody přitékající do hlubších vrstev přes boční hranice oblasti.

6.5. Návrh opatření

Na základě rozborů půdy v oblasti, měření vlhkostí a tlakových potenciálů je patrné, že ke zlepšení stávající situace bude nezbytné provést několik opatření.

Nejprve bude nutné vybudování drenáže podél severní strany kostela, což by mělo vést k snížení hladiny podzemní vody v okolí základů zdiva. Po alespoň částečném vyschnutí zdiva, ideálně po letním období, bude nutné zasadit zpět vypadané kamenné bloky, jež budou vyspárovány nepropustnou maltou, čímž by mělo dojít k omezení zatékání srážkové vody do kostelního zdiva z povrchového horizontu půdy. Vzhledem k vysoké vlhkosti zdiva by bylo vhodné zvážit také možnost vybudování systému odvětrání základů zdiva, jež je popsán v kapitole 4.4 (Franzoni, 2014). Snížením hladiny podzemní vody v kombinaci se zvýšením výparu ze zdiva vlivem odvodu vlhkého vzduchu od základů by mohlo vést k významnému zlepšení stávajícího stavu zdiva.

Umístění drenáže a podoba celého systému má několik omezujících podmínek. Vzhledem ke skutečnosti, že by se drenážní systém nacházel na pozemku hřbitova, bude nutné umístit na pozemku pouze jedno potrubí plnicí funkci sběrného i svodného drénu. Této skutečnosti bude muset být přizpůsobena dimenze drenážního potrubí a dále také sklon potrubí, který však bude alespoň 0,5%. Další omezující podmínkou je pak přítomnost studny na pozemku. V tomto případě bude muset být rozhodnuto, jak velké snížení hladiny vody ve studny je přípustné a podle toho pak může být navržena hloubka drenáže.

Optimální hloubka drenáže by měla být stanovena po provedení průzkumných vrtů na pozemku a po stanovení maximálního přípustného ovlivnění studny. Průzkumné vrty jsou nezbytné ke stanovení polohy izolantů. Jak lze vidět při porovnání tlakových potenciálů tenzometru ve stanovišti A v hloubce 110 cm a tenzometru pod stěnou kostela, obě tato čidla se nacházejí v jedné zvodni, která pravděpodobně napájí již zmiňovanou studnu. Při významném odběru vody ze studny pak dochází k prudkému poklesu tlaku v těchto stanovištích. Tohoto výsledku by mělo být dosaženo také drenáží, jež by měla odvádět vodu právě z této zvodně a tím zabránit výskytu tlakové vody pod stěnou kostela.

Vzhledem k charakteristice půdy, která je celkově málo propustná a vyskytují se zde vrstvy izolantů, bude muset být drenáž řešena jako dvouetážová. Principem této drenáže je vyhloubení příkopu v málo propustné zemině, na jehož dno je položeno drenážní potrubí. Výplň příkopu je pak dělena do dvou vrstev (etáží). Svrchní vrstva mocnosti 10-15 cm bude tvořena lépe propustnou zeminou a bude ohumusena a oseta, spodní vrstva pak bude tvořena šterkem, čímž bude dosaženo rychlého transportu srážkové vody do drenážního potrubí. Šířka realizované svrchní vrstvy s propustnější zeminou by měla být alespoň 1-2 m, čímž bude zajištěno lepší odvádění srážkové vody k odvodňovacímu

kanálku. Široký pás pak není možný z důvodu realizace odvodnění na hřbitově. Dimenze potrubí bude záviset na návrhové srážce a na stanovení maximálního povoleného kolísání hladiny podzemní vody v území.



Obr. 64 Náčrtek možné podoby drenážního systému

Drenáž by měla být vedena podél severní stěny, případně lze drenáž protáhnout ještě kolem stěny západní. Trasa je dána především přítomností hrobů na pozemku a samotným kostelem. Potrubí by mělo být vedeno přibližně v polovině vzdálenosti mezi kostelem a kostelní zdí. Drenážní systém lze vyústit do Dobrohorského potoka, jež vede podél silnice pod svahem, na kterém je kostel postaven (viz obr. 65).

Penetrované potrubí by pak mělo být ukončeno na hranici pozemku kostela, odkud povede podél příjezdové cesty klasické potrubí až k recipientu. Před napojením do recipientu bude nezbytné realizovat protlak pod hlavní silnicí vedoucí do Meziměstí.

Jiná řešení odvodu vody z drenážního systému, jako například odvod vody do zasakovací rýhy, nejsou vhodná vzhledem k povaze podloží.



Obr. 65 Možné napojení drenážního systému na recipient (ČUZK, 2017a)

7. Závěr

V práci byl analyzován pohyb vody ve zdivu kostela sv. Anny ve Vižňově a v půdě na přilehlém pozemku. Monitorovací systém je složen z čidel vlhkosti CS 650 a CS 655, tenzometrů UMS T8, tenzometrů UMS T5 a čidel MPS-6. Měřící čidla jsou umístěna v interiéru kostela ve zdi a v pilíři a dále pak ve dvou stanovištích v areálu kostela.

Během celého období docházelo ke krátkým výpadkům měření vlhkostními čidly CS 650 a CS 655, jež byly způsobeny zatápěním jednoho ze stanovišť během srážek. K desetidennímu výpadku pak došlo také u tenzometrů T8, přičemž tento výpadek nelze s určitostí vysvětlit.

Z výsledků měření lze odhadnout přibližnou podobu podloží, kde jsou pravděpodobně přítomny vrstvy izolantů, mezi kterými se nacházejí zvodně. V některých místech se pak vyskytuje tlaková voda. Zvodeň s tlakovou vodou je pak možné identifikovat také pod stěnou kostela. Tato zvodeň je pak nejspíše hydraulicky propojena s oběma stanovišti na pozemku u kostela a je nejspíše jednou z příčin významného zamokření kostela vodou přitékající ze svahu na severní straně kostela.

Z výsledků měření vlhkostních čidel CS 650 a tenzometrů UMS T8 je pak možné vyzorovat přímý hydraulický kontakt mezi půdou pod základy a vodou v horním horizontu půdy (do hloubky asi 30 cm). Čidlo CS 655 umístěné v pilíři ve výšce 22 cm nad podlahou pak ukazuje hodnotu vlhkosti zdiva okolo 17% během celého pozorovaného období. Obdobně vysokou vlhkost zdiva pak lze očekávat také u stěny, odkud však není měření k dispozici z důvodu výpadku čidla. Vlhkost měřenou čidlem CS 655 lze porovnat se vzorkem zdiva č. 873, jež je tvořen směsí omítky a pískovce. Vzhledem k délce hrotu čidla 12 cm, lze předpokládat že zde také probíhá měření vlhkosti částečně v omítce a částečně v pískovci. Nasycená vlhkost tohoto vzorku má hodnotu 21% a je tedy možné se domnívat, že měřená vlhkost v pilíři ve výšce 20 cm by se v některých obdobích mohla blížit téměř hodnotě plného nasycení.

Při instalaci čidel byly odebrány vzorky zdiva i půdy. U vzorků půdy byly stanoveny zrnitostní čáry a retenční křivky. Z výsledků vyplývá, že půdy jsou v této oblasti jemnozrnné s vysokým zastoupením jílovitých a prachovitých částic. Vzorky zdiva pak byly odebrány pouze pro stanovení retenčních křivek. Neporušené vzorky se však podařilo odebrat pouze z pilíře, odkud byly odebrány tři vzorky omítky, jeden vzorek pískovce a jeden vzorek směsi pískovce a omítky. Z výsledků pak vyplývá, že omítka je velmi pórovitá (až 34%) a nasákavá. Naopak pórovitost pískovce má hodnotu 8% a materiál je velmi málo nasákavý. Vzhledem ke stanovení hydraulických charakteristik pouze na jednom vzorku pískovce však nelze s jistotou říci, zda je tento vzorek pískovce reprezentativní pro celé zdivo.

Data měřená tenzometry byla interpretována pomocí jednorozměrného matematického modelu. Nebylo však dosaženo shody mezi hodnotami dat modelovaných a měřených na místě, a to nejspíše především z důvodu vícerozměrného proudění, ke kterému v území

dochází, neboť do oblasti přitéká voda přes boční hranice. Vícerozměrný model však již není předmětem této práce. Hlavním závěrem vyplývajícím z matematického modelu tak je potvrzení, že podzemní voda v území je více ovlivněna vodou přitékající z okolí než vodou infiltrovanou ze srážek přímo na pozemku kostela.

Jako nejproblematictější místo stavby byla určena stěna kostela, jejíž zdivo je velmi degradované. Pod stěnou se pak velmi často vyskytuje tlaková voda, jak je patrné z měření tenzometru UMS T8.

Při srovnání kostela sv. Anny ve Vižňově s nedalekým kostelem Všech svatých v Heřmánkovicích, kde byl výzkum transportu vody v půdě a zdivu proveden Annou Chalupovou (2017) taktéž v diplomové práci, lze pozorovat určité odlišnosti. Oba kostely jsou velmi vlhké, stav kostela ve Vižňově je však výrazně horší. Rovněž vlhkosti půdy jsou v Heřmánkovicích vysoké pouze v těsném okolí kostela a se zvětšující se vzdáleností od kostela se vlhkost snižuje, na rozdíl od kostela ve Vižňově, kde je vysoká vlhkost měřená na celém pozemku na severní straně kostela. Jak bylo uvedeno v práci Anny Chalupové, k vysoké vlhkosti půdy v okolí kostela významně přispívá nefunkční okapový systém. V případě Vižňova je sice vlhkost v blízkosti kostela ovlivňována nefunkční strouhou, kde dochází k vzdouvání vody při srážkách, významnější vliv na vlhkost však má proudění podzemní vody do oblasti ze svahu severně od kostela. Další odlišností je pak zrnitost půdy. Půda je ve Vižňově jemnozrnější, což má za následek omezení při provádění drenáže v lokalitě.

Před provedením sanace stěny pak je doporučeno zajistit snížení hladiny podzemní vody v oblasti realizací dvouetážové drenáže. Při návrhu odvodnění pak je nezbytné respektovat některé omezující podmínky. Z hlediska podoby systému je zásadní skutečnost, že je odvodnění realizováno na hřbitově. Nelze tak budovat rozsáhlý drenážní systém a drenáž se tak bude nejspíše skládat pouze z jednoho potrubí plnicí úlohu sběrného i svodného drénu. Rovněž směrové vedení je touto skutečností ovlivněno, neboť drenážní potrubí bude muset být vedeno v prostoru mezi kostelem a hroby, který pozemkem nevede přímo, ale stáčí se. Dvouetážová drenáž je pak zvolena vzhledem k nízké propustnosti půd v území. Horní etáž, jež bude tvořena osetou propustnější zeminou, bude mít šíři přibližně 2 metry.

Hypotéza o podobě zvrstvení půdy může být potvrzena či vyvrácena provedením průzkumných vrtů či kopaných sond na pozemku. Dále je pro upřesnění představy o hydraulických vlastnostech pískovcového zdiva nezbytné provést další vrty a jejich laboratorní vyhodnocení. Během zimního období na přelomu roků 2017/2018 budou v rámci řešeného projektu provedeny šikmé vrty přes základy kostela, odkud budou odebrány vzorky základového pískovce, jež pak budou dále analyzovány a lze je pak porovnat se vzorkem pískovce vyhodnoceným v této práci.

8. Použitá literatura

AOPK (2017). *Klimatické poměry* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://broumovsko.ochranaprirody.cz/charakteristika-oblasti/klimaticke-pomery/>

Berger, J., Guernouti, S., Woloszyn, M., Buhe, C. (2015). *Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation*. Journal of Building Engineering 3, str. 1-15. ISSN 2352-7102.

Brooks, R. H., Corey, A. T. (1964). *Hydraulic properties in porous Media*. Hydrol. Pap. 3. Colorado State University. Fort Collins.

Campbell scientific (2017a). *Instruction manual* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs650.pdf>

Campbell scientific (2017b). *CS 650* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: https://www.campbellsci.com/cs650#images_

Císlerová, M., Vogel, T. (1998). *Transportní procesy*. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-01866-0.

Chalupová, A. (2017). *Posouzení transportu vody v systému půda-zdivo barokního kostela*. Praha: ČVUT.

CHMI (2017). *Odtokový proces* [online]. [cit. 3.11.2017]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/navmenu.php_tab_1_page_4.1.0.htm

Choi, H. I., Kumar, P., Liang, X. Z. (2007). *Three-dimensional volume-averaged soil moisture transport model with a scalable parameterization of subgrid topographic variability*. Water Resour. Res. 43.

Collegium pro arte antiqua (2017). *Památky broumovska* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://www.collegium.cz/index.php?menu=broumovsko/pamatky&page=kostely/viznov>

Česká geologická služba (2017). *Geologická mapa 1:50 000* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_50/?center=-684700,-1087300&scale=15000

ČUZK (2017a). *Zabaged* [online]. [cit. 20.12.2017]. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/#ipsQueue>

ČUZK (2017b). *Ortofoto* [online]. [cit. 20.12.2017]. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/#ipsQueue>

ČVUT k143 (2017a). *Laboratorní cvičení z hydropedologie* [online]. [cit. 6.11.2017]. Dostupné z: http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/PED/CviceniPED/Navod%20PEDPEDO_lab1.pdf

ČVUT k123 (2017b). *Základní materiálové parametry* [online]. [cit. 6.11.2017]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/43924290-Katedra-materialoveho-inzenyrstvi-a-chemie-123main-zakladni-materialove-parametry.html>

D'Agostino, D. (2013). *Moisture dynamics in an historical masonry structure: The Cathedral of Lecce (South Italy)*. *Building and Environment* 63, str. 122-133. ISSN 0360-1323.

Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Dalmont. Paris.

Decagon (2017a). *Operator's manual* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: http://manuals.decagon.com/Manuals/13755_MPS-2and6_Web.pdf

Decagon (2017b). *MPS-6* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <https://www.decagon.com/en/soils/water-potential/mps-6-calibrated-water-potential-sensor/>

Dreyer, J. (2005). *Thermal treatment of moisture damaged construction*. *Structural studies, repairs and maintenance of heritage architecture* IX 83, str. 473-482. ISBN: 978-1-84564-021-7

Franzoni, E. (2014). *Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge*. *Construction and Building Materials* 54, str. 123-136. ISSN 0950-0618.

Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R. (1976). *Constitutive relations for volume change in unsaturated soils*. *Canadian Geotechnical Journal* 13. str. 261-276.

van Genuchten, M.Th. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44. str. 892-898.

Hradecký deník (2016). *Kraj podpoří zápis broumovských kostelů na seznam UNESCO* [online]. [cit. 5.1.2018]. Dostupné z: <https://hradecky.denik.cz/z-regionu/kraj-podpori-zapis-broumovskych-kostelu-na-seznam-unesco-20160515.html>

ITRAS (2017). *Galerie-broumovská skupina kostelů* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://itras.cz/broumovska-skupina-kostelu/galerie/17179/#foto>

Ivliev, E. A. (2007). *Electroosmotic drying of building walls and basements*. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry* 43, str. 291–296.

- Klášter Broumov (2017). *Broumovská skupina kostelů* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://www.klasterbroumov.cz/cs/broumovska-skupina-kostelu>
- Klípa, V., Sněhota, M., Dohnal, M. (2015). *New automatic minidisk infiltrometer: Design and testing*. Journal of Hydrology and Hydromechanics 63. str. 110-116.
- Kutílek, M. (1984). *Vlhkost pórovitých materiálů*. Praha: ČVUT.
- Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M. (1994). *Hydropedologie* 10. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-00956-4.
- Lamboj, L., Štěpánek, Z. (2005). *Mechanika zemin a zakládání staveb*. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-03094-6.
- Meteogram (2018). *Východ a západ slunce* [online]. [cit. 18.12.2017]. Dostupné z: <http://www.meteogram.cz/vychod-zapad-slunce/>
- Mls, J. (1988). *Hydraulika podzemní vody*. Praha: ČVUT.
- Mol, L., Viles, H. (2013). *Exposing drying patterns: using electrical resistivity tomography to monitor capillary rise in sandstone under varying drying conditions*. Environmental Earth Science 68, str. 1647-1659.
- Omnium (2017). *Kostel sv. Anny ve Vižňově* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://omniumos.cz/cz/detail-projektu/31>
- Roels, S., Moonen, P., De Proft, K., Carmeliet, J. (2006). *A coupled discrete-continuum approach to simulate moisture effects on damage processes in porous materials*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 195. str. 7139-7153. ISSN 0045-7825.
- Sandrolini, F., Franzoni, E. (2006). *An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings*. Building and Environment 41, str.1372-1380. ISSN 0360-1323.
- dos Santos, G. H., Mendes, N. (2006). *Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation*. Energy and Buildings 38, str. 303-314. ISSN 0378-7788.
- Slavík, M., Bruthans, J., Kobrlová, A., Vorlíček, P., Paděra, M. (2017). *Hydraulic properties of biologically initiated rock crust on sandstone*. Geoscience Research Reports 50, str. 117–123.

- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M. Th. (2009). *The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media*. California. Department of environmental sciences, University of California Riverside.
- Tariku, F., Kumaran, K., Fazio, P. (2010). *Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer*. International Journal of Heat and Mass Transfer 53, str. 3111-3120. ISSN 0017-9310.
- Torres, M. I., de Freitas, V. P. (2007). *Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation*. Building and Environment 42, str. 424-435. ISSN 0360-1323.
- UMS (2009). *User manual T5* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://www.ums-muc.de/assets-ums/00E43.pdf>
- UMS (2012). *User manual T8* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://www.ums-muc.de/assets-ums/00E41.pdf>
- UMS (2017a). *Products-T8* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://www.ums-muc.de/en/products/soil-water/tensiometer/t8/>
- UMS (2017b). *Products-T5* [online]. [cit. 9.11.2017]. Dostupné z: <http://www.ums-muc.de/en/products/soil-water/tensiometer/t5-18/>
- Urbancová, L., Lacková, E. (2015). *Pedologie, výuková skripta*. Ostrava: VŠB-TUO. ISBN 978-80-248-3705-5.
- Valentová, J. (1998). *Hydraulika podzemní vody*. Praha: ČVUT. ISBN: 80-01-02404-0.
- Vogel, T. (1990). *Numerické modelování pohybu vody v nehomogenním půdním profilu*. Praha. Disertační. FSv ČVUT.
- VUMOP (2017,a). *Skupiny půdních typů* [online]. [cit. 5. 1. 2018]. Dostupné z: <http://mapy.vumop.cz/>
- VUMOP (2017,b). *Skeletovitost* [online]. [cit. 5. 1. 2018]. Dostupné z: <http://mapy.vumop.cz/>
- VUMOP (2017,c). *Klimatické regiony* [online]. [cit. 5. 1. 2018]. Dostupné z: <http://mapy.vumop.cz/>
- Ward Wilson, G., Fredlund, D. G., Barbour, S. L. (1993). *Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation*. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan. Saskatoon.

Záleská, M., Pavlíková, M., Pavlík, Z., Černý, R. (2014). *Retention curves of different types of sandstone*. Advanced Materials Research 982, str. 44-48.

9. Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Umístění čidel	46
Tabulka č. 2 Měrná hmotnost	65
Tabulka č. 3 Zatřídění vzorků zemin.....	66
Tabulka č.4 van Genuchtenovy parametry retenčních křivek zeminy	67
Tabulka č. 5 Hmotnost vzorků zdiva	70
Tabulka č. 6 Stanovení objemu vzorků	71
Tabulka č. 7 Objemová hmotnost vzorků	71
Tabulka č. 8 van Genuchtenovy parametry retenčních křivek zdiva	72

10. Seznam obrázků

Obr. 1 Trojúhelníkový diagram zrnitosti půd – NRSC USDA.....	13
Obr. 2 Retenční křivky různých typů půd	16
Obr. 3 Hystereze retenční křivky.....	16
Obr. 4 Průběh nenasycené hydraulické vodivosti různých materiálů.....	17
Obr. 5 Mapa lokality, ortofoto	32
Obr. 6 Půdní typy	33
Obr. 7 Skeletovitost.....	33
Obr. 8 Klimatické regiony.....	34
Obr. 9 Kostel sv. Anny	35
Obr. 10 Freska na klenbě za kněžištěm.....	36
Obr. 11 Půdorys kostela sv. Anny ve Vižňově	36
Obr. 12 Poškození stěn kostela v exteriéru.....	37
Obr. 13 Sycení vzorků.....	40
Obr. 14 Pískový tank	40
Obr. 15 Přetlakový aparát.....	41
Obr. 16 Vzorky zdiva	42
Obr. 17 Archimédovo vážení.....	43
Obr. 18 Umístění vzorků zdiva v přetlakovém aparátu.....	44
Obr. 19 Stanoviště uvnitř kostela.....	45
Obr. 20 Venkovní stanoviště	45

Obr. 21 Náčrtek umístění čidel	46
Obr. 22 Tenzometr UMS T8	47
Obr. 23 UMS T5	48
Obr. 24 CS 650.....	49
Obr. 25 MPS-6	49
Obr. 26 Umístění měření uvnitř kostela.....	50
Obr. 27 Stanoviště A.....	51
Obr. 28 Stanoviště B.....	52
Obr. 29 srážkoměr ve Vižňově	52
Obr. 30 Porovnání dat srážkoměrů.....	53
Obr. 31 Srážkové úhrny.....	54
Obr. 32 Vstupní hodnoty srážek a výparu vstupující do modelu	56
Obr. 33 Měření hydraulické vodivosti půdy.....	56
Obr. 34 Půdní profil ve stanovištích A a B.....	63
Obr. 35 Stav strouhy a šachtice po dešti.....	64
Obr. 36 Kontrola území prováděná v prosinci	64
Obr. 37 Čáry zrnitosti	66
Obr. 38 Retenční křivky vzorků půdy ve stanovišti A.....	68
Obr. 39 Retenční křivky vzorků půdy ve stanovišti B	68
Obr. 40 Poškozené vzorky zeminy	69
Obr. 41 Výsledné retenční křivky půdy	69
Obr. 42 Retenční křivky zdiva kostela	73
Obr. 43 Teploty měřené tenzometry T8 ve stanovišti A	75
Obr. 44 Teploty měřené tenzometry T8 ve stanovišti B	76
Obr. 45 Teploty měřené čidly CS 650 a MPS-6 ve venkovních stanovištích	76
Obr. 46 Porovnání teplot měřených čidly v půdě s teplotou vzduchu měřenou v Broumově	77
Obr. 47 Porovnání teplot v základu kostela a stanovišti A.....	78
Obr. 48 Tenzometry uvnitř kostela- letní období.....	79
Obr. 49 Graf celkového potenciálu letní období, vnitřní čidla.....	81
Obr. 50 Tenzometry uvnitř kostela- podzimní období.....	81
Obr. 51 Graf celkového potenciálu podzimní období, vnitřní čidla	82
Obr. 52 Tenzometry ve stanovišti A- letní období	83
Obr. 53 Tenzometry ve stanovišti B- letní období	84
Obr. 54 Celkový potenciál ve stanovištích A a B- letní období	85
Obr. 55 Tenzometry ve stanovišti A- podzimní období.....	86

Obr. 56 Tenzometry ve stanovišti B- zimní období	87
Obr. 57 Celkový potenciál ve stanovištích A a B- zimní období	87
Obr. 58 Čidla vlhkosti CS 650 a CS 655	88
Obr. 59 Kumulativní srážkový úhrn	90
Obr. 60 Zásoba vody	90
Obr. 61 Tlakový potenciál ve stanovištích A a B	91
Obr. 62 Náčrtek možné podoby zvrstvení půdního profilu	93
Obr. 63 Porovnání matematického modelu se skutečností	94
Obr. 64 Náčrtek možné podoby drenážního systému	96
Obr. 65 Možné napojení drenážního systému na recipient	96

11. Seznam příloh

Příloha 1 Výpočet výparu	107
Příloha 2 Tenzometry T8, stanoviště A	
Příloha 3 Tenzometry T8, stanoviště B	
Příloha 4 Tenzometry T5 a T8 instalované uvnitř kostela	
Příloha 5 Čidla vlhkosti CS 650 a CS 655	
Příloha 6 Teploty měřené tenzometry ve stanovištích A a B	
Příloha 7 Porovnání teplot měřených vlhkostními čidly CS 650 a Tenzometry T8 v kostele	

12. Přílohy

T	uz	r	i	Pvs (T)	Pvs (T+ΔT)	δ	Pv	Pd	pd	pv	pa	ra	λ	la	E
°C	m/s	%	mm/h	Pa	Pa	Pa/K	Pa	Pa	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	s/m	KJ/kg	-	mm/h
16,6	1,1	100,0	0,0	1888	1900	121	1888	99412	1,195	0,014	1,209	256	2462	55,1	0,08
17,3	1,5	100,0	0,0	1968	1980	125	1968	99332	1,192	0,015	1,206	187	2460	53,9	0,08
17,8	1,7	100,0	0,8	2027	2040	129	2027	99273	1,189	0,015	1,204	164	2459	53,6	0,00
18,6	1,4	99,5	3,4	2132	2145	135	2121	99179	1,185	0,016	1,200	200	2457	56,3	0,00
18,9	0,9	98,0	6,4	2177	2191	137	2133	99167	1,183	0,016	1,199	319	2456	59,9	0,00
19,2	0,8	98,3	4,0	2218	2232	140	2181	99119	1,181	0,016	1,198	353	2456	60,5	0,00
19,7	1,4	95,5	5,4	2294	2308	144	2191	99109	1,179	0,016	1,195	195	2454	60,0	0,00
21,7	1,8	85,8	4,4	2595	2611	161	2227	99073	1,171	0,016	1,187	151	2450	69,0	0,00
24,0	1,9	75,0	0,0	2987	3005	182	2240	99060	1,162	0,016	1,178	150	2444	81,3	0,12
24,2	1,4	73,0	0,0	3017	3036	184	2203	99097	1,161	0,016	1,177	205	2444	80,0	0,12
22,8	1,5	84,0	0,0	2779	2796	171	2334	98966	1,165	0,017	1,182	181	2447	71,6	0,11
19,6	1,9	94,0	0,0	2277	2291	143	2141	99159	1,180	0,016	1,196	144	2455	59,5	0,09
16,2	2,0	97,0	7,0	1836	1848	118	1781	99519	1,198	0,013	1,212	136	2463	52,0	0,00
16,3	1,5	98,8	5,8	1842	1854	118	1820	99480	1,198	0,014	1,211	181	2463	52,9	0,00
15,9	0,6	99,5	7,2	1805	1817	116	1796	99504	1,199	0,013	1,213	449	2463	56,9	0,00
15,6	1,1	99,2	1,4	1770	1782	114	1756	99544	1,201	0,013	1,214	260	2464	54,2	0,00

Příloha č. 1 Výpočet výparu