



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství

Posouzení transportu vody v systému půda-zdivo barokního kostela

Assesment of water transport in soil-masonry system of the baroque church

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Inženýrství životního prostředí

Vedoucí práce: Doc. Ing. Michal Sněhota, Ph.D.

Bc. Anna Chalupová

Praha 2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Chalupová	Jméno: Anna	Osobní číslo: 362038
Zadávací katedra: Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Inženýrství životního prostředí		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Posouzení transportu vody v systému voda-zdivo barokního kostela

Název diplomové práce anglicky: Assessment of water transport in soil-masonry system of the baroque church

Pokyny pro vypracování:
Zpracujte detailní rešerši zaměřenou na problematiku pohybu vody v podzákladové zemině a základovém zdivu historických staveb. Proveďte podrobnou analýzu dat vlhkostí a vodních potenciálů ve zdivu a v půdě získaných z monitorovacího systému sledujícího barokní kostel Všech svatých, v Heřmánkovcích. Zjistěte retenční charakteristiky půdy z bezprostřední blízkosti kostela a retenční čáru pískovce z kostelního zdiva. Navrhněte a ověřte pracovní hypotézy cest transportu vody do kostelního zdiva. Výsledky diskutujte. Na základě provedné analýzy doporučte postup pro nápravu nevyhovujícího stavu.

Seznam doporučené literatury:
Časopisy z databáze Web of Science a SCOPUS

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc. Ing. Michal Sněhota Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 1.3.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

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 nutné 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“.

1.3.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracovala samostatně s pomocí odborného vedení doc. Ing. Michala Sněhoty, Ph.D. a s pomocí odborné literatury a dalších pramenů, které jsou v závěru práce uvedeny.

Poděkování

Ráda bych poděkovala doc. Ing. Michalu Sněhotovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě této práce a ochotu v průběhu jejího zpracovávání. Děkuji také dalším učitelům a studentům Fakulty stavební, ČVUT v Praze zapojeným do projektu za jejich části odvedené práce, které mi byly podkladem a za jimi poskytnutý vhled do dalších úhlů problematiky prezentovaný na společné schůzce. Dík patří i rodině a nejbližším přátelům za podporu během celého studia.

Tato práce vznikla v rámci projektu Ministerstva kultury České republiky NAKI DG16P02R049 (2016-2020) "Zhodnocení stabilitního a stavebně technického stavu Broumovské skupiny kostelů a návrh opatření k zachování tohoto jedinečného evropského kulturního dědictví".

Abstrakt

Tato práce je jednou ze součástí mnohooborového průzkumu barokních kostelů z takzvané Broumovské skupiny, vytvořené na základě návrhů stavitelů a architektů Kryštofa a Kiliána Ignáce Dientzenhofera. Práce zkoumá transport vody ve zdivu kostela Všech svatých v Heřmánkovicích a v okolní zemině. Součástí je rešerše dostupných studií vztahujících se k tématu a dále širší popis zkoumané lokality a objektu. V místě byla provedena měření vlhkostí, tlakových výšek a potenciálů soustavou čidel umístěných v severní, vlhkostí nejohroženější stěně kostela a v zemině v blízkosti této stěny. Další měření byla prováděna v laboratoři, kde byly zjišťovány základní charakteristiky a retenční čáry odebraných vzorků zeminy a zdiva. Z naměřených hodnot bylo zjištěno několik konkrétních projevů souvislosti změn vlhkosti ve zdivu se změnami v okolním prostředí. Dále bylo zjištěno především stále silné zamokření zeminy v blízkosti obvodové zdi, které pravděpodobně způsobuje dlouhodobé zvlhčení této zdi. Proto bylo jako řešení nevyhovujícího stavu doporučeno vytvoření drénu odvádějícího vodu z nejproblematictějších míst v těsné blízkosti severní stěny stavby a zajištění odvodu srážkové vody ze střechy kostela.

Abstract

This work is part of a multidisciplinary investigation of baroque churches from the so-called Broumov group, built on the basis of designs by builders and architects Kryštof and Kilián Ignác Dientzenhofer. The work explores the water transport in the masonry of the All Saints Church in Heřmánkovice and in the surrounding soil. Part of this thesis is a review of available studies related to the subject and a broader description of the explored site and object. The measurements of water contents and water potentials was carried out at the site by system of sensors located in the north, the most threatened wall of the church by the humidity, and in the soil near this wall. Further measurements was performed in the laboratory, where the basic characteristics and retention curves of the collected soil and masonry samples was characterized. Several concrete manifestations of the connection between the changes in moisture in the masonry with changes in the surrounding environment has been found in the measured values. Further, it has been shown that soil in the vicinity of the wall was substantially and permanently wet which is likely the reason for increased wetness of the wall. Therefore, as a solution of this unsatisfactory condition, it has been recommended to build a water drainage system from the most problematic sites near the northern wall of the building and solve the current suboptimal management of storm water.

Klíčová slova

Půda, pískovec, měření vlhkosti, měření potenciálu, historická budova

Keywords

Soil, sandstone, moisture measurement, water potential measurement, historical building

Obsah

1. Úvod	9
2. Cíl práce.....	10
3. Teoretická část	11
3.1. Charakteristiky pórovitého prostředí	11
3.2. Voda v pórovitém prostředí, hydrostatika	11
3.2.1. Retenční křivka.....	13
3.3. Proudění vody v porézním prostředí.....	14
3.3.1. Proudění vody v nasyceném prostředí.....	14
3.3.2. Infiltrace	15
3.3.3. Proudění vody v nenasyčeném prostředí.....	15
4. Rešerše.....	17
4.1. Problematika vlhkosti ve stavebních konstrukcích	17
4.1.1. Rizika vlhkosti ve stavebních materiálech	17
4.1.2. Metody měření vlhkosti a jejich aplikace.....	18
4.1.3. Zdroje vlhkosti ve stavbách	21
4.1.4. Odstraňování vlhkosti ze stavebních konstrukcí.....	22
4.2. Měření vlhkosti v půdě.....	22
4.2.1. TDR (Time domain reflectometry)	22
4.2.2. Měření vlhkovostního potenciálu	23
4.3. Materiálové charakteristiky pískovce	24
5. Metody a materiál	26
5.1. Popis řešeného objektu.....	26
5.1.1. Lokalita, přírodní podmínky	26
5.1.2. Půdní charakteristiky	27
5.1.3. Kostel Všech svatých	28
5.2. Metodika měření.....	31
5.2.1. Monitorovací systém v místě.....	31
5.2.2. Charakteristiky použitých čidel	34
5.2.3. Měření srážek.....	36
5.2.4. Retenční charakteristiky půdy a zdiva.....	38
6. Výsledky měření a diskuse.....	41
6.1. Retenční čáry půdy a zdiva	41
6.2. Měření srážek.....	45
6.3. Výsledky monitoringu v místě.....	47

6.3.1.	Teploty	47
6.3.2.	Čidla vlhkosti	50
6.3.3.	Zásoba vody	52
6.3.4.	Tenzometry	55
6.3.5.	Čidla potenciálu	57
7.	Hodnocení a návrh řešení	59
8.	Závěr	62
9.	Seznam použitých zdrojů	63
9.1.	Odborná literatura a skripta	63
9.2.	Odborné články	63
9.3.	Další zdroje	64
9.4.	Zdroje použitých obrázků:	64
10.	Přílohy	66

1. Úvod

V České republice se nalézají velké množství historických staveb z různých období. Právě kvůli jejich množství je problematické zajistit pro všechny dostatečnou průběžnou údržbu. Zvláště při jejich zanedbání pak vyvstává potřeba zásadnějších rekonstrukcí a záchranných prací na objektech.

Tyto práce, jejichž cílem je zásadní zlepšení stavu památek, bývají velmi finančně nákladné. Pokud se však provádějí na základě návrhů, které nejsou dostatečně podloženy detailní analýzou současného stavu a diagnostikou příčin problémů, není zajištěna jejich účinnost a skutečné zlepšení stavu po jejich provedení.

Právě z těchto důvodů je postupně prováděn mnohooborový průzkum souboru barokních kostelů v okolí Broumovského kláštera, na kterém spolupracuje tým pracovníků a studentů Stavební fakulty Českého vysokého učení technického v Praze v rámci projektu financovaného Ministerstvem kultury České republiky. Tato práce je jednou z jeho součástí a hodnotí stav kostela Věch svatých v obci Heřmánkovice z pohledu transportu vody do zdiva z okolí kostela.

2. Cíl práce

Cílem této práce je zhodnocení pohybu vody ve zdivu barokního kostela a v zemině v nejbližším okolí stavby. Dílčími cíli pak jsou provedení rešerše dostupných zdrojů zabývajících se tímto fenoménem, provedení měření hydraulických charakteristik potřebných pro posouzení vodního režimu ve zkoumané lokalitě, vyhodnocení výsledků monitoringu v lokalitě a navržení možných řešení nevyhovujícího stavu objektu.

3. Teoretická část

První kapitola si klade za cíl stručně představit problematiku přítomnosti a pohybu vody v pórovitém prostředí. Informace byly čerpány především ze skript Císlarová a kol., 2008 a Kutílek a kol., 2000 a dále z multimediální učebnice Bářková a kol. (2013).

3.1. Charakteristiky pórovitého prostředí

Půda obecně je pórovitým materiálem, který je tvořen pevnými minerálními částicemi, prostoupenými vzájemně propojenými póry. Stejně tak většina stavebních materiálů, včetně zdiva, je porézních, tvořených pevnou kostrou a póry. Velký význam pro vlastnosti materiálu má jak celkový objem pórů, tak jejich velikost, tvar a vzájemné propojení. Podíl objemu pórů na celkovém objemu porézního vzorku se vyjadřuje pórovitostí n [-]:

$$n = \frac{V_p}{V}$$

kde V_p je objem pórů a V je celkový objem vzorku. Póry v materiálu jsou zcela vyplněny tekutými fázemi - plyny a kapalinami. Množství kapaliny (vody) v porézním materiálu se vyjadřuje vlhkostí. Lze určit buď objemovou vlhkost θ [-]

$$\theta = \frac{V_w}{V}$$

vyjadřující poměr objemu vody k celkovému objemu půdy, nebo hmotnostní vlhkost w [-]

$$w = \frac{m_w}{m_z}$$

vyjádřenou poměrem hmotnosti vody ke hmotnosti pevné fáze materiálu. V případě, že jsou všechny póry v materiálu zaplněny vodou, je objemová vlhkost rovna pórovitosti a mluvíme o nasyceném prostředí. Pokud je vodou naplněna jen část celkového objemu pórů, označujeme prostředí jako nenasyčené.

3.2. Voda v pórovitém prostředí, hydrostatika

Podle fyzikálních podmínek můžeme řadit vodu v pórovitém prostředí do následujících kategorií:

Adsorpční voda (také označovaná jako hygroskopická) je silně vázána k povrchu jednotlivých pevných částic adsorpčními silami. K jejímu navázání (adsorpci) dochází, když suchý materiál přijde do styku se vzduchem obsahujícím vodní páry. Dál se tato voda pohybuje opět pouze v plynném stavu (při desorpci), v kapalném není pohyblivá.

Kapilární voda je vázána v pórech kapilárními silami (adhezí a kohezí). V důsledku vytvoření konkávního menisku v kapiláře s povrchovým tlakem nižším, než je povrchový tlak volné

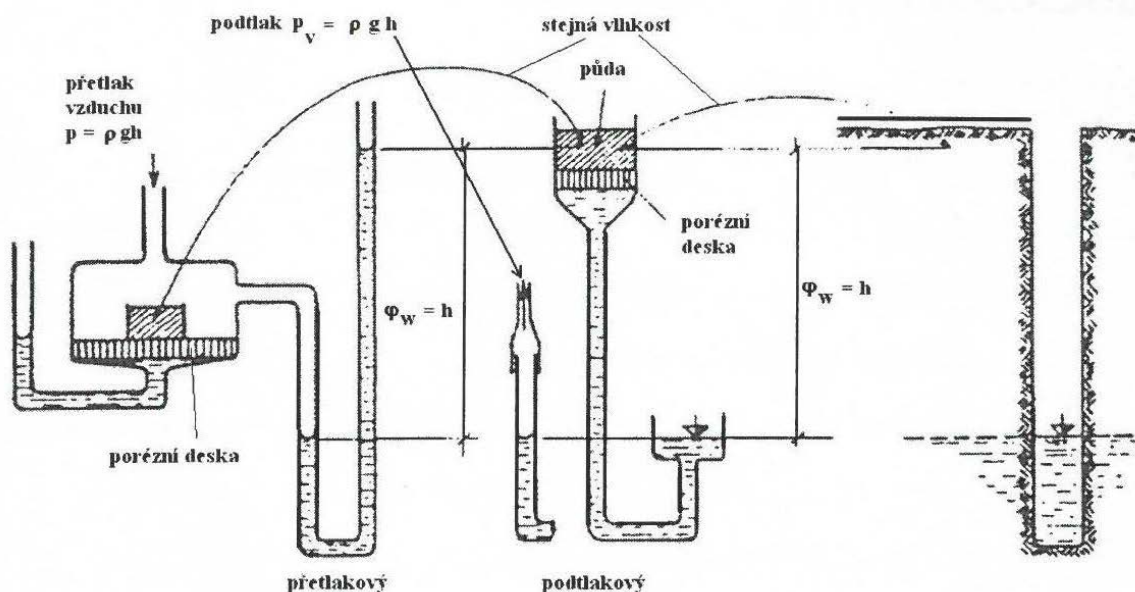
hladiny, dochází v kapiláře ke vzlínání vody až do momentu, kdy rozdíl povrchových tlaků je roven síle tíže vystoupané vody. Se vzrůstající výškou rychlost vzlínání klesá.

U gravitační vody převládá působení zemské gravitace, díky které voda prosakuje materiálem až k hladině (podzemní) vody. Jde tedy o tzv. volnou vodu, která není pevně vázána k pevným částicím. Má také významný vliv při transportu látek v prostředí.

U vody v pórovitém prostředí určujeme její potenciál – jde o množství práce, které bylo třeba dodat k přemístění částičky vody z místa s nulovým potenciálem (srovnávací roviny, hladiny podzemní vody) na konkrétní místo v půdě. Voda vyskytující se v prostředí nad touto srovnávací rovinou má záporné množství energie – čím výše se vyskytuje, tím větší práce do ní musela být vložena. Rozdíl hodnoty potenciálů v různých bodech je pak hnací silou pohybu vody v prostředí.

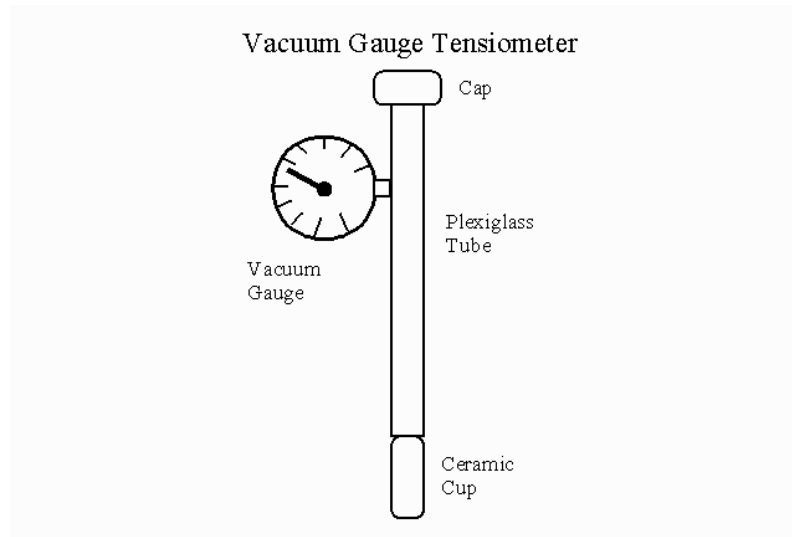
Potenciál vyjadřujeme jako energii vztaženou na jednotku vody – buď na jednotkovou hmotnost (J/kg), nebo na jednotkový objem (Pa = N/m²) – pro tuto jednotku se také používá termín tlak (sací tlak). Dále se vyjadřuje tlaková výška h [m] jako hodnota vodního sloupce potřebná k odsátí vody z půdy (k dosažení rovnovážného stavu).

Vlhkostní potenciál v materiálu je možné určit při zachování hydraulické spojitosti mezi vzorkem a srovnávací hladinou volné vody. V laboratoři se používají podtlakové a přetlakové přístroje, ve kterých se umísťují vzorky na porézní desku, pod kterou navazuje připojení hadicích zaplněnou vodou k volné vodní hladině. U podtlakového aparátu pak tlakovou výšku působící na vzorek odečítáme jako rozdíl výšky vzorku od hladiny volné vody. U přetlakového aparátu, který se používá pro vyšší tlaky, naopak používáme přetlak vzduchu nad vzorkem na porézní desce, umístěné v tlakové nádobě. Princip popsanych přístrojů zobrazuje obrázek 1.



Obrázek 1 - schéma podtlakového a přetlakového přístroje (Kutílek a kol., 2000)

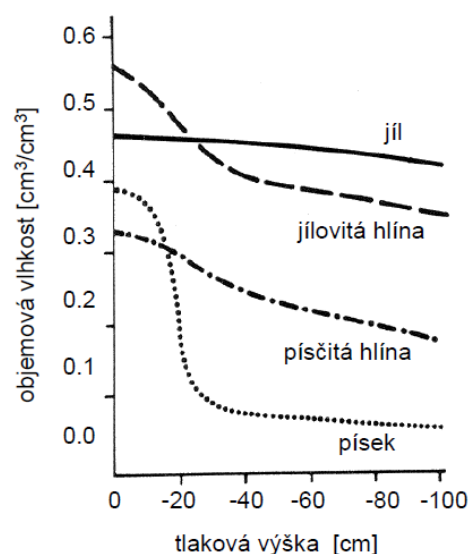
V terénu se běžně měří vlhkostní potenciál půdy pomocí tenzometru (obrázek 2). V tomto přístroji je hydraulické spojení se zkoumaným materiálem zajištěno porézní keramickou nádobkou, která přenáší tlaky vyskytující se v půdní vodě skrz vodní sloupec do nanometru (tlakového čidla).



Obrázek 2 - schéma tenzometru (Smajstrla, Pitts , 1997)

3.2.1. Retenční křivka

Důležitou hydraulickou charakteristikou pórovitého prostředí je retenční čára, která popisuje vztah mezi vlhkostním potenciálem a objemovou vlhkostí půdy, udává tedy schopnost půdy zadržet množství vody při různých tlakových podmínkách. Typický průběh retenční křivky pro některé typy půd je zobrazen na obrázek 3. Rozdíly v průběhu křivky pro jednotlivé materiály jsou způsobeny závislostí na struktuře půdy, zrnitostním a mineralogickém složení, fyzikálně chemických charakteristikách a na obsahu humusu.



Obrázek 3 - Typické retenční křivky pro různé typy půd (Císlerová, Vogel, 2008)

Vzhledem k rozsahu hodnot vlhkostního potenciálu se retenční křivka často zobrazuje v semilogaritmickém měřítku, kdy je potenciál vyjádřen logaritmem sacího tlaku označeném pF , z čehož pak plyne označení pro retenční čáru „ pF křivka“.

V laboratoři se retenční křivka zjišťuje postupným popisováním několika rovnovážných stavů vlhkosti při odpovídajících tlakových výškách. K dosahování těchto rovnovážných stavů lze použít popsané podtlakové a přetlakové přístroje.

3.3. Proudění vody v porézním prostředí

Pohyb vody v půdě probíhá ve směru záporného gradientu potenciálu. Realita pohybu vody skrz pórovité prostředí je velmi složitá, proto se při jejím popisu používá mnoho zjednodušení. Mimo jiné se reálné nestacionární (neustálené) proudění, kdy se průtok mění v čase, často nahrazuje prouděním stacionárním (ustáleným). Zde zmíněné popisy jsou odvozeny pro kapilárně pórovité prostředí, ve kterém jsou jednotlivé póry vzájemně propojeny a díky jejich malým rozměrům zde převládají kapilární síly. Dále se předpokládá stejnorodé půdní prostředí a zanedbává se vliv teploty.

Matematické popisy proudění vody vycházejí z rovnice kontinuity, která představuje zákon zachování hmotnosti. V aplikaci na proudění vody v prostředí říká, že změna objemu vody v posuzovaném vzorku materiálu je rovna rozdílu množství vody přitéklé do této oblasti a vody vyteklé z oblasti ven. Obecný trojrozměrný tvar rovnice kontinuity je pak vyjádřen vztahem:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} + \frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$$

kde q_x , q_y a q_z vyjadřují složky vektoru proudění vody a θ je objemová vlhkost.

3.3.1. Proudění vody v nasyceném prostředí

Henry Darcy na základě pozorování průtoku vody definovaným objemem nasyceného porézního prostředí stanovil jeho přímou úměru k rozdílu hydrostatických tlaků na začátku a na konci řešené oblasti ΔH , k průřezu zvodnělého profilu S a nepřímou úměru k délce profilu L . Zjištěný vztah mezi proměnnými lze definovat rovnicí:

$$Q = K_s \times S \times \frac{\Delta H}{L}$$

Posledním prvkem rovnice je nasycená hydraulická vodivost K_s , která charakterizuje schopnost konkrétního nasyceného porézního prostředí vést vodu. Tento součinitel má rozměr rychlosti, běžně se udává v m/s nebo m/den.

Při zobecnění Darcyho zákona pro jednorozměrné vertikální proudění dostaneme tvar:

$$q = -K_s \times grad H$$

kde q je objemový tok a $grad H$ hydraulický gradient.

3.3.2. Infiltrace

Infiltrace je proces vstupu vody do půdy, ke kterému může docházet ze zemského povrchu za deště, tání sněhu nebo ze závlahy, nebo například břehovou infiltrací z vodních toků. Proces infiltrace z povrchu snižuje povrchový odtok. Tento proces je řízen gravitačními a kapilárními silami. Průběh infiltrace závisí na počáteční vlhkosti, struktuře půdy a její hydraulické vodivosti a dále na době trvání. Rychlost infiltrace (množství vsakované vody za jednotku času) totiž postupně klesá se stoupajícím nasycením půdy vodou.

3.3.3. Proudění vody v nenasyceném prostředí

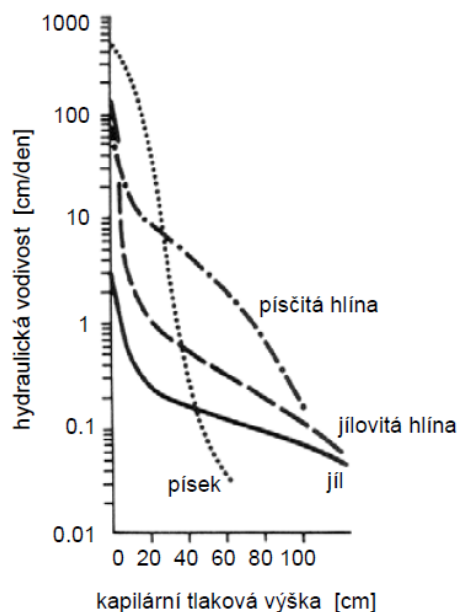
Pro proudění vody v nenasyceném materiálu platí podobné zásady jako pro nasycené proudění, proces je však složitější o to, že část pórů vyplněná vzduchem se může při proudění dosycovat vodou, nebo naopak se póry mohou odvodňovat.

Pro ustálené proudění se odvozuje modifikace Darcyho zákona, tzv. Darcy-Buckinghamův zákon:

$$q = -K(\theta) \times grad H$$

kde místo nasycené figuruje nenasycená hydraulická vodivost $K(\theta)$, která je závislá na momentální vlhkosti, tedy již není konstantní, ale mění se se změnou vlhkosti v čase.

Na obrázku 4 je vidět změna nenasycené hydraulické vodivosti pro některé typické půdy v závislosti na tlakové výšce, od které se dá přes retenční křivku odvodit závislost na vlhkosti.



Obrázek 4 - Závislost hydraulické vodivosti na tlakové výšce (Císlarová, Vogel, 2008)

Neustálené proudění v nenasyčeném prostředí (tedy vyvíjející se v čase) je popsáno Richardsovou rovnicí, nazývanou také řídicí rovnice proudění, která vznikne dosazením Darcy–Buckinghamova zákona do rovnice kontinuity. Jednosměrná Richardsova rovnice ve svislém směru je popsána vztahem:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial h}{\partial z} + K \right)$$

kde θ je vlhkost, t je čas, h je tlaková výška a K je nenasyčená hydraulická vodivost.

Řešením Richardsovy rovnice získáme informace o časoprostorovém vývoji všech uvažovaných stavových veličin (vlhkost, tlak, rychlost) uvnitř zvolené oblasti proudění. Rovnice popisuje proudění v reálném pórovitém prostředí s těmito zjednodušujícími podmínkami: prostředí je nehybné a nedeformovatelné, tlak vzduchu v pórech je konstantní a proudící voda je nestlačitelná.

4. Rešerše

4.1. Problematika vlhkosti ve stavebních konstrukcích

Všechny studie zabývající se z některého úhlu vlhkostí ve stavebních materiálech ji uvozují jako hlavní, nebo jeden z hlavních problémů ohrožujících stavby, a to jak historické, tak současné. Představují ji jako původce nebo alespoň přispěvatele ke všem rozkladným procesům ve stavebních materiálech. Nalezneme proto řadu studií hodnotících stav konkrétních historických staveb se zahrnutím transportu vlhkosti, rozpustných solí a dalších problematických vlivů na stavební konstrukce (například Sandrolini a kol. (2007), Lourenço (2006), D'Agostino (2013)).

Na základě tohoto pojetí vlhkosti jako zásadní vlastnosti pro vývoj kvality konstrukce (materiálu) vzniká velké množství metod k co nejpřesnějšímu měření vlhkosti a dalších problematických vlastností stavebních materiálů, které lze aplikovat pro rozličné případy v laboratoři i v terénu (Sandrolini a Franzoni (2006)). Další skupina prací se zabývá snahou o přesný matematický popis pohybu vlhkosti přímo ve zdících materiálech. Často je ale zkoumán pohyb právě jen přímo ve zdivu, aniž by bylo bráno v potaz, jakým způsobem se v praxi vlhkost do tohoto materiálu může dostávat (Franzoni a kol. (2014)). Studie, které se zabývají i prostupem vlhkosti do materiálu z okolního prostředí, pak nezahrnují vždy všechny její zdroje, kdy opomíjená bývá právě půdní vlhkost (Tariku a kol. (2010), Menghao (2011)). Dalším velmi hojně zpracovávaným tématem v literatuře je problematika odstraňování vlhkosti ze zdiva.

4.1.1. Rizika vlhkosti ve stavebních materiálech

Studie Bergera a kol. (2015) shrnuje typy možných poškození způsobených nadměrnou hladinou vlhkosti ve stavebních konstrukcích a určuje klíčové faktory vedoucí k jednotlivým těmto problémům. Poruchy třídí do čtyř kategorií a hledá indikátory dostatečně relevantní k posouzení možnosti konkrétního poškození, a zároveň dostatečně jednoduché k možnému začlenění do simulačních nástrojů. Mají tedy být prvotním ukazatelem, následovaným podrobnějším výzkumem v oblastech, kde zjistily riziko.

Prvním popisovaným typem je poškození přímým vlivem vlhkosti. Do něj spadá změna mechanických vlastností (snížení mechanické odolnosti při zvýšení vlhkosti), které je přiřazen indikační faktor $R(w)$ (mechanická odolnost, závislá na obsahu vlhkosti), s kritériem R_{crit} , při němž je ohrožena pevnost. Též je sem řazena změna tepelných vlastností, ke které dochází při zaplnění pórů vodou, jež má 25krát vyšší teplotní vodivost než vzduch, a dále přenosem latentního tepla. Indikátorem je koeficient přestupu tepla $U(w)$ závislý na vlhkosti s kritickou hodnotou U_{crit} , při jejímž překročení dochází k ovlivnění energetické efektivity budovy. Posledním zástupcem je změna objemu materiálu (bobtnání a smršťování), kdy voda v pórech tvoří kapilární tlak na pevnou složku, který způsobuje poruchy materiálu. Přiřazeným

indikačním faktorem je napětí $\sigma(w)$ závislé na vlhkosti a kritickou hodnotu představuje pevnost v tahu R_{tens} .

Jako druhý typ autoři představují poškození aktivované vlhkostí jako vektorem, tzn. gradientem vlhkosti ve zdivu a její dynamickou změnou. Sem autoři řadí poškození mrazem, kdy mrznoucí voda zvětšuje svůj objem a při nedostatku prostoru může tlak ledu poškodit materiál. Autoři zmiňují roli velikosti a distribuce pórů v míře poškození mrazem. Pro účely této studie ale určují jednoduchý přístup, kde klíčovým faktorem stanovují pouze teplotu (T), která nesmí překročit kritickou hodnotu bodu mrazu T_{frez} .

Dalším představeným typem jsou poškození objevující se ve vlhkém prostředí. Objevují se biologická poškození způsobená různými organismy: bakteriemi, plísňovými houbami, řasami a lišejníky, která mohou být toxická pro obyvatele a zároveň rozvíjejí další zde zmiňované problémy. Riziko biodegradace autor vyjadřuje indikátorem M s kritickou hodnotou 1, převzatým z empirického modelu VTT autorů Vereecken a kol. (2012), závislým na teplotě, relativní vlhkosti, citlivosti materiálu na růst plísní a kvalitě povrchu. Do tohoto typu je řazena ještě koroze, ke které dochází, když povrchová teplota kovu dosáhne hodnotu rosného bodu, což způsobí kondenzaci páry a obklopení kovu vodním povlakem. Autor tedy korozi indikuje pomocí teploty na povrchu kovu $T_{s,\text{met}}$ s kritickou hodnotou T_{dew} , tedy rosným bodem.

Poslední popisovanou skupinou problémů je zhoršení vnitřního klimatu. Vlhkost jednak přímo ovlivňuje hydrotermální komfort v místnosti, a tedy pohodu obyvatel. Zde autor přejímá Fangerův experimentální model a jeho indikátor PMV (Predicted Mean Vote), závislý na vnitřní teplotě vzduchu, relativní vlhkosti, rychlosti vzduchu, tělesné metabolické produkci a indexu oblečení. Za druhé vlhkost nepřímo ovlivňuje kvalitu vzduchu, kdy relativní vlhkost vzduchu uvnitř místnosti ovlivňuje znečištění bakteriemi, viry, těkavými organickými látkami (VOC) nebo roztoči, s vlivy na lidské zdraví. Klíčovým faktorem je zde tedy relativní vlhkost vzduchu, pro níž jsou vstupními daty teplota vzduchu a tlak vodní páry, a která by se pro zachování dobrých podmínek měla pohybovat v intervalu 40 – 60%.

4.1.2. Metody měření vlhkosti a jejich aplikace

Jedna z prací zabývajících se metodologií měření vlhkosti ve zdivu je představena v článku Sandrolini a Franzoni (2006) a její výhodou má být možnost použití pro periodická měření v delších časových úsecích.

Článek zároveň shrnuje a hodnotí hlavní typy známých metod zkoumání obsahu vlhkosti ve zdivu. Z nepřímých metod zmiňuje infračervenou termografii, která rozeznává vlhké oblasti od suchých podle rozdílné teploty a lze ji dobře použít pro prostudování celé stavby, nedává však možnost kvantitativního měření a především je možné posoudit pouze tenké vrstvy na povrchu, které jsou zároveň nejvíce ovlivňovány okolními atmosférickými podmínkami a můžou se podstatněji lišit od vnitřních vrstev materiálu. Dále je zmíněno měření elektrického odporu porézního materiálu (odporová metoda), který klesá s obsahem vody a jeho měření je

snadné a levné. Podle autorů ale nepřináší relevantní výsledky, protože odpor je ovlivňován velkým množstvím dalších faktorů kromě vlhkosti (teplota, obsah solí,...) a měření opět posuzuje jen tenkou svrchní vrstvu materiálu. Při měření mikrovlnnou technikou měříme útlum vln způsobený vlhkostí, vliv koncentrace solí na měření lze zmenšit použitím velmi vysoké frekvence. Radarovým měřením lze zkoumat přenos rychlosti elektromagnetických impulsů skrz vlhké zdivo. Posledními dvěma metodami však opět nezískáme kvantitativní výsledky bez důkladné kalibrace podmíněné odběrem vzorků ze zkoumaného objektu a instalováním senzorů na místě. Metody neutronového rozptylu a nukleární magnetické rezonance jsou dosti náročné na provedení, první kvůli bezpečnostním nárokům a druhá kvůli velikosti potřebných přístrojů. Poslední zmíněnou nepřímou metodou je měření relativní vlhkosti vzduchu v rovnovážných podmínkách buď v uzavřené dutině uvnitř materiálu, nebo v nádobě s vloženým vzorkem materiálu. Při tomto přístupu je ale nutné měřit zároveň teplotu, protože výsledky jsou na ní závislé, a zároveň je třeba posoudit kvantitativní vztah mezi měřenou vlhkostí vzduchu a hledanou vlhkostí materiálu pro každý případ zvlášť.

Z přímých metod umožňujících kvantitativní stanovení vlhkosti se používá metoda karbidu vápníku (reakce mezi rozdrobeným vzorkem a známým množstvím karbidu v tlakové nádobě, nutná je kalibrace pro daný materiál). Ta může být provedena v terénu, při tom ovšem může dojít ke ztrátám vlhkosti, které vedou k výsledku podceněnému v jednotkách procent. K chybě způsobené při získávání a manipulaci se vzorky může dojít i při často používané gravimetrické metodě. Tu lze také provést jak v laboratoři, tak v terénu pomocí přenosných tepelných vah. Práce s touto pomůckou ale není snadná a opět zvyšuje riziko chyb měření.

Na základě přehledu známých metod stanovují autoři požadavky pro dosažení co největší přesnosti a vypovídající schopnosti měření a z nich vyvozují svoji metodu. Prvním požadavkem je přesnost a spolehlivost získaných dat, které lze podle autorů dosáhnout pouze gravimetrickou metodou. Druhou podmínkou je odběr vhodných reprezentativních vzorků z vnitřku materiálu a jejich pečlivé uchování do laboratorního měření. Navrhuje se měření v několika místech v různé výšce nad zemí až do výšky tzv. rovnovážné linie, vždy ve stejné hloubce v materiálu. Jako podmínku stanovení relevantních dat kladou autoři možnost dlouhodobého opakovaného měření ve stejné cihle (nebo odpovídající jednotce materiálu). To je nutné z důvodu velké rozdílnosti v mikrostruktuře těchto jednotek (cihel), která je značná právě u historických staveb vzhledem k jejich špatnému řemeslnému zpracování, a dále pak u přírodních stavebních materiálů. Poslední podmínkou je zabránění ovlivnění vlhkostních podmínek ve zdivu samotným měřením, kvůli čemuž autoři považují za nutné pečlivě uzavírat vzorkovací otvory a tím zabránit vysušování skrz tyto dutiny.

Pro ověření metody byly vytvořeny dva laboratorní modely složené ze v současnosti vyráběných cihel. V nich byly vytvořeny stálé vzorkovací body vyvrtáním dutin hlubokých 9 cm o průměru 1,5 cm a vyvrtané kousky cihel byly vloženy zpět do dutin, vždy právě do cihly, ze které byly získány. Dutiny byly poté uzavřeny gumovými záložkami a plastelínou. Modely byly udržovány v dvoucentimetrové vrstvě vody do doby dosažení ustáleného stavu, který nastal přibližně po dvou měsících a byl zjištěn opakovaným vážením vzorků

uchovávaných v dutinách. Poté byla zjištěna vlhkost všech součástí modelů po jejich vysušení a porovnání hmotností a dále změřena teplota a relativní vlhkost vzduchu uvnitř dutin, rozdělení velikosti pórů ve vzorcích a obsah rozpustných solí.

Materiál modelu 1 vykazoval nižší porozitu (39.1%) než model 2 (46.1%). Tím se vysvětlují znatelně vyšší naměřené hodnoty vlhkosti u druhého modelu (29.39% ve spodním dílu až 24.33% ve vrchním) než u prvního (20.78 až 15.67). Naměřená vlhkost cihelného prášku vzniklého při vrtání byla výrazně vyšší (kolem 30 až 45 procent) než u uchovaných dílků, i dosti malých (0.2 – 0.7 g), vkládaných do dutin, což je přičítáno vyššímu specifickému povrchu a vylučuje to použití prášku jako reprezentativního vzorku. Malý rozptyl hodnot naměřených pro různě velké fragmenty i pro celou (vyvrtanou) cihlu naopak ukazuje dobrou reprezentativnost těchto vzorků.

Na základě zkušeností autoři doporučují vyjmutí a změření fragmentů z dutin až po dosažení rovnovážného stavu s okolním materiálem, tedy minimálně po měsíci od vložení fragmentu. Dále doporučují vytvoření vzorkovacích bodů minimálně ve třech výškách: 20-30 cm nad zemí, druhý ve vlhké zóně a třetí v suché zóně nad linií vystoupení vlhkosti. Pro historické budovy doporučuje otvory s průměrem 15-20 mm a hloubkou 15-20 cm.

Studie Franzoni a kol. (2014) pomocí vylepšení předchozí metody měření zkoumá především vliv vrstev malty mezi jednotlivými zdíciými prvky na kapilární vztlínání vody a s ním spojený transport solí a elektrokinetické efekty ve zdivu jako celku. Výzkum byl prováděn v laboratoři na třech jednotkách tvořených cihlami spojenými různými druhy pojiv, kterými byly hydraulická vápenná malta, cementová malta a vápenná malta s cihlovým prachem. Stejná měřicí metoda byla poté testována při ročním měření v terénu, v paláci z 16. století v italské Bologni. Na objektech v laboratoři i v terénu byla po ustálení měřena vlhkost a obsah solí na vzorcích získaných metodou trvalých vzorkovacích bodů (viz studie Sandrolini a Franzoni (2006)). Zároveň byl měřen elektrický potenciál pomocí elektrod zavedených do materiálu.

U vzorků v laboratoři vystoupala vlhkost nejnižší u vzorku s cementovou maltou, o málo výše u vápenné malty a podstatně výše u malty s cihelným prachem, kde dosáhla téměř k vrcholu vzorku. Výsledky jsou dány do souvislosti jednak s porozitou, která je nejvyšší u cihel, jen o málo nižší u malty s cihelným prachem a výrazněji nižší u vápenné a ještě více u cementové malty, ale také s průměrem pórů, který má u zkoumaných materiálů podobný vývoj a ovlivňuje nejen celkové množství absorbované vody, ale i rychlost vztlínání. K výraznému omezení vztlínající vlhkosti skrz vrstvy malty má přispívat také samotná existence rozhraní mezi materiály, kdy nenavazují pórové systémy, a může docházet k nedokonalému kontaktu mezi prvky. Při měření v historické budově byly v měřicích místech v interiéru zjištěny hodnoty vlhkosti od 15 až 20 % při povrchu země do 7 až 8 % ve 2 metrech nad zemí; v exteriéru pak u země dosahovala vlhkost hodnot kolem 12%, s výškou rychle klesala a ve 2 metrech byla už téměř nulová, to vše podle předpokladů díky vyššímu výparu. V průběhu roku se však hodnoty nijak výrazně neměnily.

Studie D'Agostino (2013) se zabývá pohybem vlhkosti v historickém zdivu katedrály v Lecce v jižní Itálii. Stavba, autory myšleně rozdělená na podzemní kryptu a vrchní stavbu katedrály, je konstruována z místního materiálu – porézního jemnozrného vápence. Studie se snaží vystihnout základní rysy chování vlhkosti ve zdivu bez použití složitých numerických metod, které vyžadují rozsáhlá data a měření. Pohyb vody v monolitických blocích i v celé struktuře zdiva počítá s použitím teorie „sharp front“, jež nahrazuje pozvolný přechod vlhké a suché oblasti materiálu ostrou hranicí. Model má být dobře využitelný v případě složité geometrie i struktur tvořených více materiály. Studie odvozuje a aplikuje vztah pro přímé a nepřímé měření vypařování vody z materiálu, jehož vstupními parametry jsou dostupné meteorologické záznamy (teplota, relativní vlhkost, rychlost větru a solární radiace).

U stavebního materiálu byla zjištěna schopnost rychlé absorpce vody a zároveň pomalé vysychání. Autorka na základě měření považuje příspěvek vody do zdiva ze základové půdy za významný pouze ve srážkově bohatých měsících, zatímco v letních měsících je zanedbatelný. Je ale třeba připomenout, že zkoumaný objekt se nachází v oblasti středozemního klimatu s horkým suchým létem a mírnou zimou bohatou na srážky. Mezi další zdroje vlhkosti uvádí autorka infiltraci, mycí vody, úniky z potrubí a kanalizace. Vliv půdní vlhkosti zaznamenala autorka ve stavbě jen ve spodní kryptě, která tak proti ní „ochraňuje“ vrchní kostel.

4.1.3. Zdroje vlhkosti ve stavbách

V literatuře lze nalézt i studie snažící se kromě pohybu vlhkosti už přítomné v materiálu zahrnout i zdroje vlhkosti (a dalších vlivů) vstupující z exteriéru do stavby. Ty ale často podzákladovou zeminu jako zdroj ignorují. Například ve studii autorů Tariku a kol. (2010), kde je popisován přenos vlhkosti a tepla do stavebního materiálu, jsou jako zatížení budovy zahrnuty pouze povětrnostní podmínky (větrem unášený déšť a solární radiace) a vnitřní zdroje tepla a vlhkosti (vytápění nebo chlazení a ventilace).

Také v práci Q. Menghao a kol. (2011) je řešen vliv prostředí na budovu a prostup teploty a vlhkosti „obálkou“ budovy a vzájemné ovlivnění s vnitřním klimatem v budově. Opět jsou ale brány v potaz pouze vlastnosti vzduchu ovlivňující stavební materiál jak zvenku, tak z vnitřního prostředí, a vliv interakce s podložím je v této práci ignorován.

Studie autorů Dos Santos a Mendes (2006) si klade za cíl popsat společný prostup tepla a vlhkosti ze zeminy skrz stavební konstrukci až do vnitřní atmosféry budovy pro posouzení teplotních parametrů budovy ve smyslu energetické efektivity. Její příspěvek má být právě v zahrnutí vlivu vlhkosti do modelů prostupu tepla, kdy vlhkost přítomná v nenasycených pórech se vypařuje za absorpce latentního tepla výparu a naopak na chladnější straně kondenzuje za výdeje tohoto tepla.

Popis pohybu tepla a vlhkosti v zemině autoři zakládají na teoriích Philipa a De Vriese (1957), vedoucí rovnice odvozuji pomocí metody konečného objemu a třídídimenzionálního

modelu pro popis prostupu tepla a vlhkosti nenasycenou, vlhkou zeminou a spodní částí stavby, a docházejí k výsledkům teploty a relativní vlhkosti v místnosti.

Pomocí analýz byl nakonec zjištěn jen velmi nepatrný vliv započtení vlivu vlhkosti na pokojovou teplotu, což je přisuzováno tomu, že na tu měly ve výsledku výrazně větší vliv solární zisky skrz střechu a zdi, než prostup tepla ze země, do kterého byl vliv vlhkosti připočten. Větší vliv započtení vlhkosti proto autoři předpokládají u jiného modelu budovy, s větší podzemní částí v kontaktu se zeminou, kde už by vliv solární radiace nepřevládal. Autoři však stále považují vlhkostranné modely za důležité i kvůli dalším efektům vnitřní vlhkosti – na trvanlivost materiálů nebo na zdraví obyvatel.

4.1.4. Odstraňování vlhkosti ze stavebních konstrukcí

Shrnutí současných poznatků k problematice vztlínající vlhkosti ve zdivu historických budov, především co se týče technologií k jejímu odstraňování, provedla Franzoni (2014). Užívané či zkoumané způsoby odstraňování vztlínající vlhkosti seskupuje podle jejich principu: redukce přístupu vody, redukce sorptivity zdi (snižováním porozity, smáčivosti nebo zmenšováním průřezu), zvyšování míry evaporace, nebo využití elektrokinetických efektů. Na základě popisu procesu vztlínání vlhkosti považuje autorka za zcela nevhodnou dříve užívanou metodu překrývání povrchu zdiva vodotěsnou vrstvou, která naopak vede k dalšímu vzestupu vlhkosti. Z ostatních představených metod neoznačuje žádnou za ideální a řešící všechny existující případy a zdůrazňuje nutnost zhodnocení vlastností zdiva, budovy a prostředí pro volbu funkční metody nebo jejich kombinace.

4.2. Měření vlhkosti v půdě

Stejně jako u zdiva, lze i u pórovitého materiálu půd považovat za nejpřesnější metodu stanovení vlhkosti metodu gravimetrickou, za dodržení pečlivého postupu při manipulaci se vzorky. Jak již bylo zmíněno, tato metoda však vyžaduje odběr vzorků a jejich následné zkoumání v laboratoři, a také proto se využívá i řada jiných metod. Využívané nepřímé metody mají kromě nedestruktivnosti i další výhody: především umožňují opakované měření v jednom místě, nebo dlouhodobé kontinuální měření v tomto místě. Jedna z těchto metod je představena níže na základě shrnující studie Noborio (2001).

4.2.1. TDR (Time domain reflectometry)

Metoda reflektometrie časové domény byla původně vyvinuta pro detekci míst poruch a zkratů telefonních a televizních kabelů, od konce 70. let 20. století se však používá také pro stanovení vlhkosti půdy.

Senzory TDR pracují pomocí vodivých jehel (obvykle z nerezové oceli, nebo mosazi) zapíchnutých v půdě. Do těchto jehel je vyslán elektrický impuls, který určitou rychlostí doputuje na konec vodiče a odrazí se zpět. Z této rychlosti lze odvodit dielektrickou konstantu

(relativní permitivitu) prostředí obklopujícího vodiče, když čas, za který impuls dorazí ze začátku na konec sondy lze vyjádřit následovně:

$$t = \frac{2L\kappa^{0,5}}{c}$$

kde L je délka sondy [m], κ je dielektrická konstanta [-] a c je rychlost šíření elektromagnetického vlnění ve vakuu ($c=3 \cdot 10^8$), Pro dielektrickou konstantu pak byla empiricky stanovena závislost s objemovou vlhkostí půdy. Vycházíme zde z toho, že dielektrická konstanta vody je významně vyšší, než všech ostatních složek půdy.

Čidla se dají považovat za málo citlivá na změny teploty, pokud jde o teploty nad bodem mrazu, při nižší teplotě ale nastává problém, protože dielektrická konstanta ledu má podobné hodnoty jako suché půdy, jak je vidět v tabulce 1.

Materiál	Dielektrická konstanta	Pozn.
vzduch	1	
voda	80	při 20°C
led	3	při -5°C
čedič	12	
žula	7 - 9	
pískovec	9 - 11	
suchá hlína	3,5	
suchý písek	2,5	

Tabulka 1 - Dielektrická konstanta pro hlavní složky půdy

4.2.2. Měření vlhkostního potenciálu

Kromě objemové vlhkosti je další důležitou charakteristikou k určení vlhkostní potenciál půdy. Nejběžněji se v terénu zjišťuje za použití tenzometrů, které fungují na principu měření kladných a záporných tlaků ve vodní nádržce propojené hydraulicky s půdou skrze porézní médium. Tenzometry jsou ale rozsahem omezené pouze na vlhčí půdy, pro nižší potenciály je proto zapotřebí hledat jiná zařízení, z nichž dvě popisuje práce Nolze a kol. (2013).

Autoři porovnávali dva senzory: Watermark sensor (Irrometer Co., California, USA) a čidlo MPS-1 (Decagon Devices, Washington, USA). První zmíněný měří elektrický odpor porézního média, které je v rovnováze s okolním půdním prostředím. Jeho rozsah měřeného potenciálu je udáván cca -10 kPa až -200 kPa a jeho výhodami jsou nízká cena a jednoduchá instalace a údržba. Druhé zkoumané čidlo měří objemovou vlhkost ve dvou keramických discích, které jsou opět v rovnováze s prostředím a jejichž retenční charakteristiky jsou známy a je tedy možný převod vlhkosti na vlhkostní potenciál. Rozsah čidla má být od -10 kPa do -

500 kPa, autoři mu ale přisuzují větší nepřesnost a nutnost dodatečné kalibrace pro jednotlivé exempláře senzorů.

Při testech byly zjištěny vyšší než očekávané rozsahy senzorů – u čidla Watermark autoři dosáhli tlaků 620 kPa zatímco čidla MPS-1 detekovala hodnoty až 1200 kPa. Druhá jmenovaná čidla reagovala rychleji, naopak první vykazovala při výstupu naměřených hodnot nad 130 kPa časovou prodlevu, kvůli které byl další jimi zjištěný potenciál podhodnocený.

4.3. Materiálové charakteristiky pískovce

Studie Pavlíka a kol.(2008) se zabývá spojeným transportem a ukládáním vody a solí v mšenském pískovci, jemnozrnném kalcitově-jílovitém materiálu získávaném v lomu Mšené-lázně v severozápadních Čechách. Studie využívá difuzně-advekční model, který bere v úvahu vliv toku vody na transport solí a také vliv solí vázaných ve stěnách pórů. Jako parametry pohybu vody pojímá vlhkostní vodivost a koeficient difuze vodní páry a jako parametry ukládání vlhkosti bere sorpční izotermu a křivku vodní retence – vlastnosti, které lze standardně určit v laboratoři buď ze vzorků přímo z dotčeného objektu, případně z původního lomu, což je případ této studie.

Ze základních charakteristik materiálu byly zjištěny objemová hmotnost 1850-1930 kg m⁻³ a porozita 26,25 – 29,67 %. Měřením retenční křivky bylo zjištěno, že při tlakové výšce do 3 bar se vlhkost udržuje v hodnotách blízkých nasycené vlhkosti, a zdaleka nejvýznamnější pokles vlhkosti byl zaznamenán v rozmezí tlaků 3 – 5 bar (z hodnoty vlhkosti přibližně 0,16 na přibližně 0,01). Na základě tohoto zjištění autoři očekávají velikost většiny pórů v odpovídající hodnotě 0.5 – 0.3 μm.

Jako nejvýznamnější ze zjištěných charakteristik označili autoři velmi rychlou schopnost transportu vody, která má ovšem dvojaký účinek v ohledu poškozování materiálu - umožňuje sice rychlou redistribuci vody ze zamokřeného místa, zároveň ale snadný transport vody do zdiva z podkladové zeminy. Byla zjištěna také snadná prostupnost pro vodní páru, kterou autoři považují za kladnou vlastnost z důvodu umožnění odpařování, tedy bránění kondenzace v interiérech.

Zkoumaný typ materiálu byl však podle autorů využíván spíše na ozdobné, nenosné konstrukce a díla (ornamenty, sochy), kdy na nosné konstrukce byl používán spíše křemičitý, hrubě zrnitý pískovec.

Záleská a kol. (2014) měřili za použití přetlakového aparátu retenční čáry sedmi typů pískovce z lomů v České republice. Konkrétně byly zkoumány materiály z následujících lokalit: Božanov, Hořice, Kocbeře, Libná, Úpice, Mšené a Těšín. Kromě dvou posledních jmenovaných jde o lokality v severovýchodních Čechách. Vzorky byly nejdříve vysušeny pro zjištění hmotnosti, poté nasyceny a následně v přetlakovém aparátu vystaveny tlakům 1, 3, 5, 10 a 15 bar. Dále byl pomocí vážení nasyceného vzorku a vzorku ponořeného do vody

zjištěn objem vzorku a objemová hustota, zjišťována byla také otevřená porozita materiálů. Pro jednotlivé hodnoty tlaků byly z naměřených hmotností spočteny hodnoty objemové vlhkosti a z těchto bodů byly sestrojeny retenční křivky.

Pro vzorky z jednotlivých oblastí byly zjištěny poměrně různorodé hodnoty objemové hmotnosti od 1845 kg/m^3 u mšenského pískovce po 2490 kg/m^3 u pískovce z Těšína, odpovídající značným rozdílům v pórovitosti materiálů (Těšín 5,8%, Mšené 30,6%). U naměřených retenčních křivek dochází k nejvýraznějšímu poklesu vlhkosti při snižování tlaku do 3 bar, zde se míra poklesu vlhkosti výrazně zmenšuje. U některých vzorků (Hořice, Těšín) dochází k narovnání křivky už v bodě s hodnotou tlaku 1 bar. Zjištěné průběhy retenčních křivek indikují přítomnost především pórů s většími rozměry a poměrně zanedbatelné množství menších pórů. Extrémy se projevují ve shodě se zjištěnými hodnotami hustoty (pórovitosti), kdy největší průměrný sklon křivky má mšenský pískovec (s nejvyšší hodnotou nasycené vlhkosti ze všech vzorků cca 27% a naopak nejnižší ze všech při tlaku 15 bar) a nejmenší sklon pozorujeme u těšínského pískovce (s nejnižší nasycenou vlhkostí cca 7% ze zkoumaných vzorků).

5. Metody a materiál

5.1. Popis řešeného objektu

V práci je zkoumán kostel Všech svatých v obci Heřmánkovice na Broumovsku v severovýchodních Čechách. Rámcové umístění je zřejmé z obrázku 5, níže následuje všeobecný popis lokality. Obecné části popisu byly čerpány zejména z publikace Prokop a kol., 2007.



Obrázek 5 - Umístění zkoumané lokality v rámci České republiky (podklad: Mapy.cz)

5.1.1. Lokalita, přírodní podmínky

Broumovsko je severovýchodním výběžkem Královehradeckého kraje, obklopeným ze tří stran Polskem. Dle geomorfologického členění tato oblast přísluší k Broumovské vrchovině, což je celek spadající do Krkonošsko-jesenické soustavy České vysočiny. Typologicky je pak zájmové území řazeno mezi krajiny členitých pahorkatin a vrchovin Hercynica. Po období křídly v mladších druhohorách, kdy bylo území zalito mořem, zde zbyla nejmocnější souvrství pískovců v Čechách, která pak byla všemi druhy zvětrávání upravována až do dnešní podoby.

Celé území je chráněno v rámci Chráněné krajinné oblasti Broumovsko, konkrétní lokalita kostela spadá do III. zóny ochrany. Broumovsko spadá do povodí řeky Odry, voda odtud tedy odtéká do Baltského moře. Konkrétně obec Heřmánkovice a její okolí je odvodňováno Heřmánkovickým potokem.

Broumovsko spadá v rámci republiky do chladné klimatické oblasti, středně bohaté na srážky, převažují zde západní větry. Dlouhodobá průměrná denní teplota vzduchu měřená na meteorologické stanici Broumov v období let 2006-2015 je 7,8 °C, dlouhodobý roční úhrn srážek měřený tamtéž za stejné období je 620 mm.

Kostel všech svatých stojí na mírném návrší nad obcí Heřmánkovice, v nadmořské výšce cca 460 m n. m. Kostel je obklopen hřbitovem, který je nepravidelně a velmi řídko pokryt

osamělými nízkými dřevinami, kolem hřbitovních zdí se pak vyskytují dřeviny vysoké (viz ortofotografický snímek - obrázek 6).

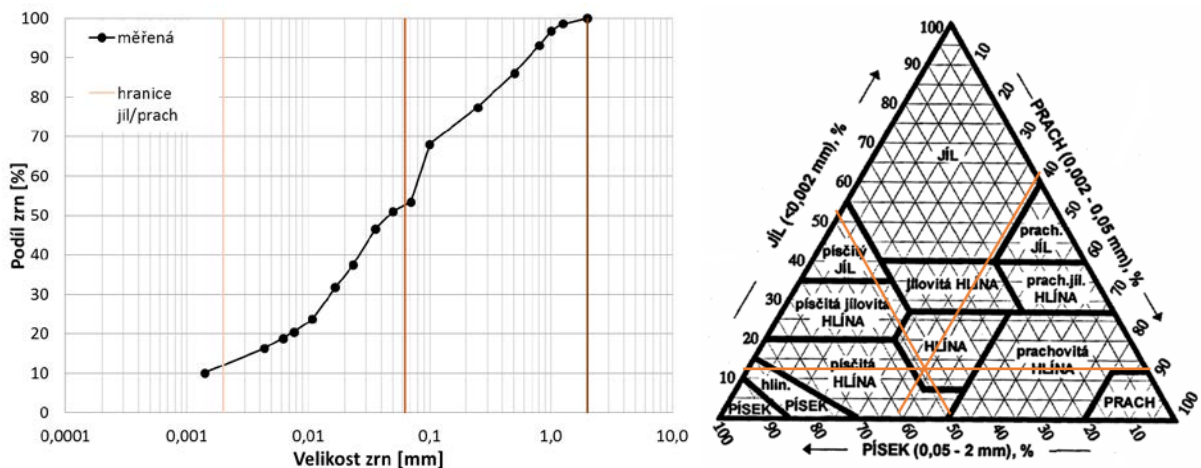


Obrázek 6 - Umístění kostela Všech svatých, ortofotografický snímek (Mapy.cz)

5.1.2. Půdní charakteristiky

Podle půdní mapy ČR byla ve zkoumané lokalitě zjištěna hnědá kyselá půda na permokarbonských lupcích. Půdě v lokalitě byl dle mapy přiřazen kód BPEJ 8.34.41, na základě kterého ji lze zařadit do mírně chladného, vlhkého regionu a přiřadit hlavní půdní jednotku kambizemě dystrické, podzoly, kryptopodzoly. Tato půdní jednotka je charakterizována jako lehká až středně těžká půda, mírně pórovitá (pórovitost 40 – 44 %), středně až silně vododržná (VUMOP, v.v.i). Poslední část kódu BPEJ hovoří o půdě středně hluboké až hluboké, bezskeletovité až středně skeletovité, středního sklonu (7 – 12 %) a jižní expozice.

Na severní straně kostela, kde bylo navrženo měření zpracovávané v této práci, byly již předem odebrány vzorky půdy pro zjištění základních charakteristik, přičemž především byly zjišťovány podíly zrn podle velikostí. Pro charakteristický vzorek byla vynesena čára zrnitosti a na jejím základě byl vzorek zatříděn dle Nováka jako hlinitopísčité půda (odpovídá 10 – 20 % zrn I. kategorie). Dále byla půda dle procentuálního obsahu frakcí písku, prachu a jílu zatříděna do trojúhelníkového diagramu do kategorie hlína. Zjištěná čára zrnitosti a zatřídění do trojúhelníkového diagramu je zobrazeno na obrázku 7.



Obrázek 7 - Čára zrnitosti a trojúhelníkový diagram zkoumané půdy (určeno pracovníky KHMKI FSv ČVUT)

5.1.3. Kostel Všech svatých

Kostel Všech svatých v obci Heřmánkovice, který je zkoumán v této práci, je součástí takzvané Broumovské skupiny kostelů. Pod tímto označením se skrývá jedinečná skupina venkovských kostelů vybudovaných za působení opata Othomara Zinka v břevnovsko-broumovském klášteře. Kvůli nevyhovujícímu stavu stávajících dřevěných kostelů ve správě klášteře bylo v opatství vybudováno v krátkém časovém rozmezí v 1. třetině 18. století 9 kostelů, všechny jako dílo rodiny Dientzenhoferů, a navíc byl zároveň přebudován právě broumovský klášter.



Obrázek 8 - kostel Všech svatých v Heřmánkovicích

Pod vedením Kryštofa Dientzenhofera byly nejprve realizovány kostely ve Verneřovicích (1719 – 20) a Ruprechticích (1720 – 30). Podle jeho plánů vystavěl pak jeho syn, Kilián Ignác Dientzenhofer, kostel v Otovicích (1725 – 26). Ten potom podle svých plánů postavil další kostely: v Heřmánkovicích (1722 – 24), ve Vižňově (1724 – 25), v Bezděkově (1724 – 27), v Šonově (1726) a v Božanově (1735 – 43). Jako poslední bývá k souboru staveb řazena kaple Panny Marie na Hvězdě (1732 – 33). Na celé skupině je unikátní její propojenost – jak vzájemná, tak s krajinou celého panství.



Obrázek 9 - stropní freska v kostele Věech svatých

Obec Heřmánkovice lemuje v délce více než 5 km stejnojmenný potok. Zdejší kostel realizovali, stejně jako okolní kostely, lokální zedniční mistři pod dohledem Kiliána Ignáce Dientzenhofera. Po dokončení hrubé stavby a vysvěcení v roce 1723 pokračovaly do roku 1726 práce v interiéru, roku 1727 byl kostel vybaven oltářem a 1736 stropní freskou, která byla r. 1865 přemalována.

Stavba je netradičně orientována k západu, a to kvůli působivosti v konkrétním místě v krajině. Půdorysem je protáhlý osmiúhelník a stěny jsou zvlněny pro dosažení rozpořhybovaného, monumentálního dojmu. Na jednolodní prostor navazuje úzké kněžiště a obdélná sakristie. Vstupní fasádu nahrazuje vysoká věž kontrastující s rozvlněnou stavbou. Stavba má klasickou plochou dřevěnou klenbu.

Kostel je vyzděn převážně z lomového kamene – červeného a šedého pískovce, doplněného na některých místech (především v klenbách) cihlami; interiér je vydlážděn pískovcovou dlažbou.

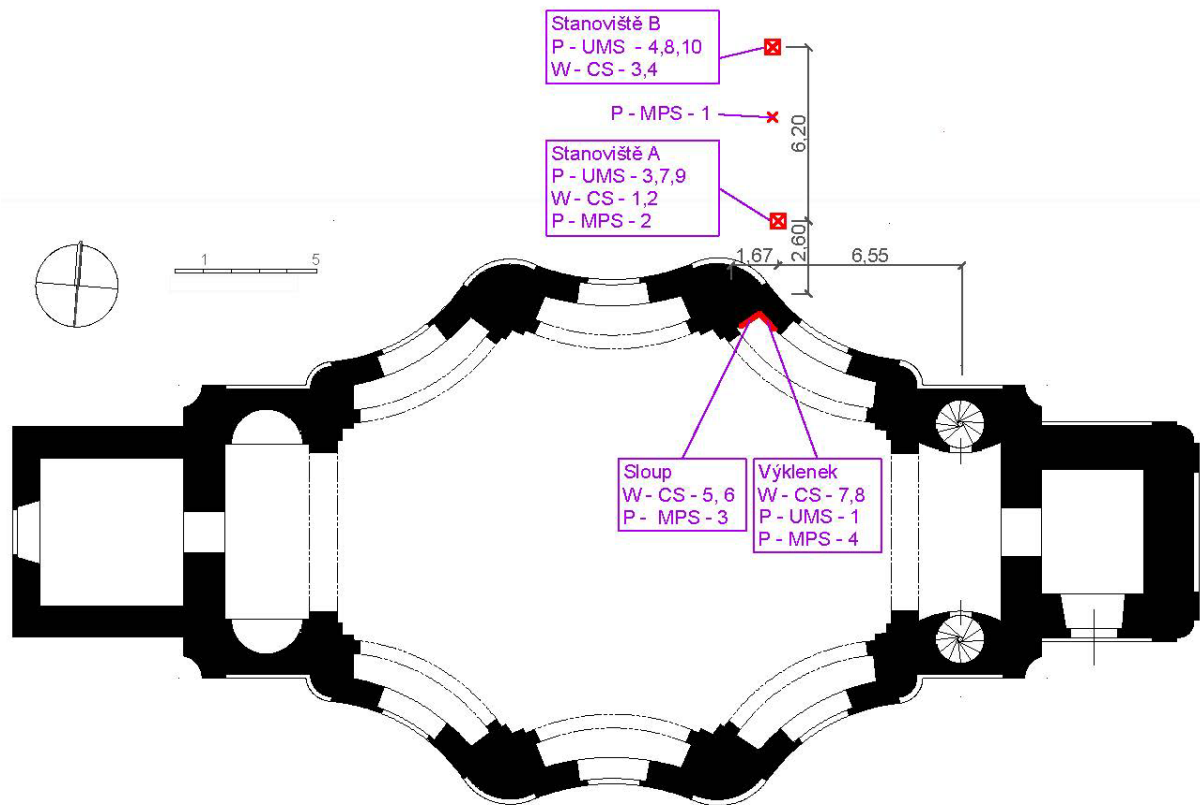
V roce 2013 byl opraven krov a osazena nová střešní krytina, v ostatních ohledech je ale stavba v dosti špatném stavu a je na ní na první pohled vidět značné zanedbání údržby. Venkovní omítky jsou většinou opadané, z části vzaly za své i vnitřní omítky, na čemž má velký podíl působení vlhkosti ve stěnách. Vlhkostí je podmíněn také výskyt řas na stěnách v interiéru, který je pozorován do výšky cca 1 m především v severní stěně. Právě vlhkost v konstrukci kostela, jako vlastnost silně ovlivňující všechny další charakteristiky a zhoršující možné problémy, je dále zkoumána v této práci.

5.2. Metodika měření

Pro posouzení transportu vody v půdě a kostelním zdivu bylo na místě provedeno dlouhodobé měření v objektu kostela a jeho blízkém okolí. V laboratoři pak byly zjišťovány retenční charakteristiky vzorků půdy a zdiva odebraných na místě.

5.2.1. Monitorovací systém v místě

V kostele Všech svatých a jeho bezprostřední blízkosti byl v září 2016 instalován monitorovací systém pro sledování vlhkostí a vodních potenciálů ve zdivu a v půdě. V exteriéru je tvořen čidly ve dvou měřicích stanovištích severně od kostela, v interiéru čidly ve zdivu severní stěny. Orientačně je monitorovací systém znázorněn na situaci (obrázek 10), kde jsou čidla označena podle měřené veličiny (vlhkost – W, potenciál/tlak – P).



Obrázek 10 - Situace monitorovacího systému. Vzdálenosti jsou orientační. Schéma ukazuje polohu čidel měřících vlhkost (W – čidla CS) a tlak (P – čidla MPS a tenzometry UMS) umístěných ve zdi a v půdě

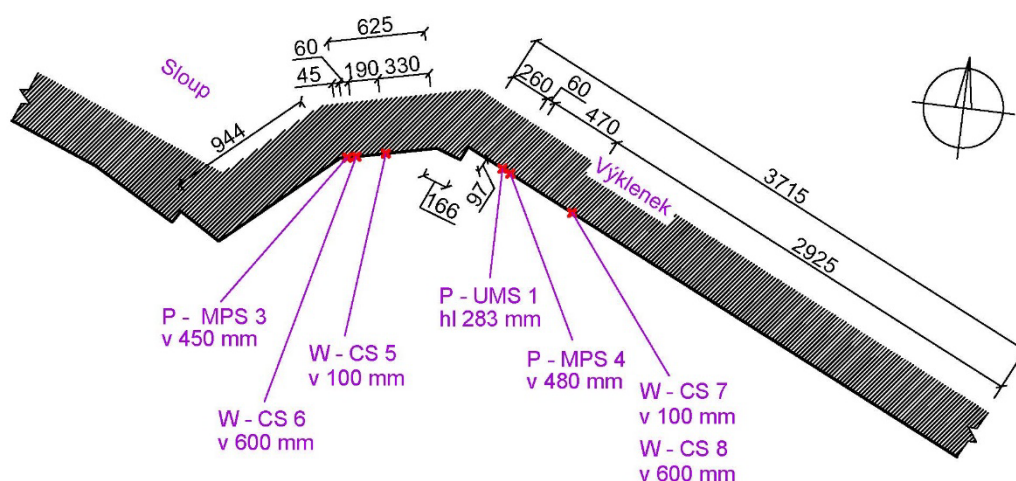
Venkovní měřicí stanoviště jsou umístěna ve svahu nad severní stěnou kostela, ve vzdálenostech přibližně 2,6 m a 8,8 m od budovy, kde povrch půdy je v těchto místech 0,39 m a 1,1 m nad podlahou uvnitř kostela. Měřicí stanoviště jsou tvořena šachtami hloubky přibližně 50 cm. V každé šachtě jsou v různých hloubkách umístěna dvě čidla vlhkosti Campbell scientific CS 650 a tři tenzometry UMS T8. V šachtě A (blíže kostelu, viz obrázek 10) je dále umístěno čidlo potenciálu Decagon MPS-6, další shodné čidlo potenciálu je

umístěno mezi stanovišti A a B ve vzdálenosti přibližně 6,3 m od budovy kostela 10 cm pod povrchem země, který je v tomto místě cca 0,82 m nad povrchem podlahy v kostele. V půdě jsou všechna čidla daného typu umisťována se shodnou orientací: vlhkosní čidla a čidla potenciálu proti svahu, tenzometry kolmo na směr svahu. Umístění čidel v šachtě je vidět na obrázku 11 a hloubky umístění jejich aktivní části jsou vyznačeny v obrázku 15.



Obrázek 11 - Detail šachty po instalaci čidel (vlevo) a po „vystrojení“ (vpravo)

Čidla v interiéru jsou umístěna v severní stěně kostela, přibližně v prodloužení přímky procházející venkovními měřicími stanovišti. Rozmístění jednotlivých čidel je patrné z obrázku 12. Jsou rozmístěna ve dvou skupinách, v částech konstrukce, které zde označujeme jako sloup a výklenek. Situace sloupu a výklenku je patrná z obrázku 13.



Obrázek 12 - Situace umístění čidel v interiéru (W – měření vlhkosti, P – měření tlaku/potenciálu), včetně výšky aktivní části čidla nad úrovní podlahy (v) nebo hloubky (hl) pod ní

Ve sloupu i ve výklenku je umístěno po dvou čidlech vlhkosti Campbell scientific CS 650, a to ve výškách 10 cm a 60 cm nad podlahou kostela a dále po jednom čidle potenciálu Decagon MPS-6 (ve sloupu ve výšce 45 cm, ve výklenku ve výšce 48 cm). Ve stěně pod

výklenkem je dále zaveden tenzometr UMS T8, jehož hloubka měřicí části dosahuje 28,3 cm pod podlahou. Konkrétní umístění čidel ukazuje také obrázek 14.

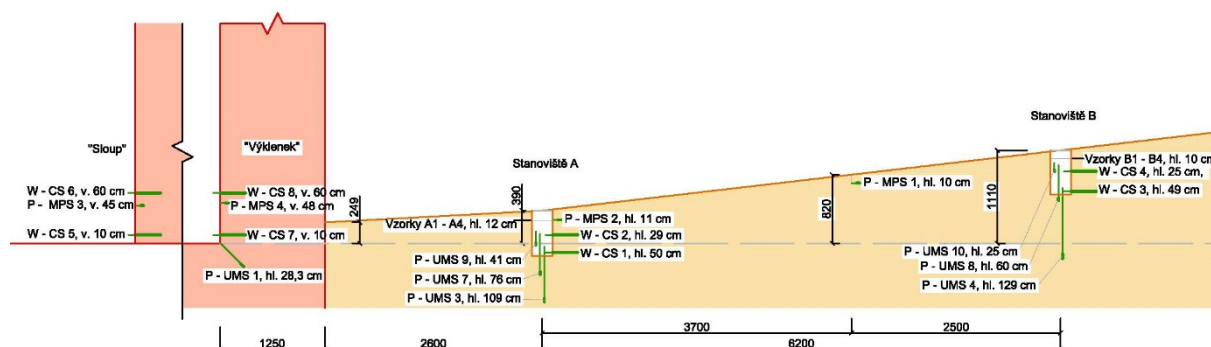


Obrázek 13 – Umístění měřícího stanoviště v interiéru



Obrázek 14 - Detail umístění čidel v interiéru

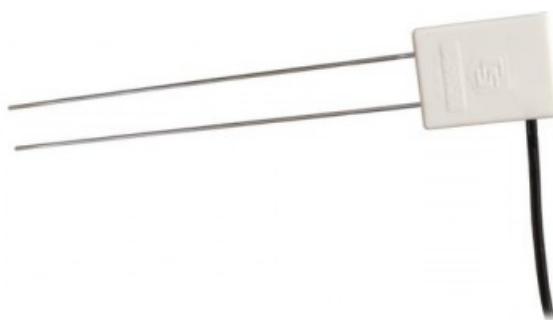
Celý monitorovací systém včetně rozměrů je v řezu znázorněn v obrázku 15, který je dále ve větším rozlišení umístěn v příloze 1. Poslední součástí systému je datalogger (řídící záznamová jednotka) Campbell Scientific CR 1000, umístěný v interiéru kostela v prostoru vnitřního točitého schodiště. Na tuto jednotku byly po celou dobu měření ukládány naměřené hodnoty ze všech popsaných čidel v časovém kroku 30 minut.



Obrázek 15 - Monitorovací systém – řez, ve větším měřítku umístěn v příloze 1

5.2.2. Charakteristiky použitých čidel

K měření vlhkosti byla použita čidla Campbell scientific CS 650, pracující na principu TDR (time domain reflectometry) popsaném v kapitole 4.2.1. Čidla, tvořená dvěma 30-centimetrovými jehlami z nerezové oceli monitorují objemovou vlhkost materiálu, jeho elektrickou vodivost a teplotu. Jehly jsou připojeny k tištěnému spoji uzavřenému v epoxidovém pouzdře. Senzor ukazuje obrázek 16.



Obrázek 16 - Vlhkostní čidlo CS 650 (www.campbellsci.com/cs650)

Výrobce udává snímaný objem materiálu 7800 cm³. Teplota je ale měřena u povrchu epoxidového pouzdra, nedává tedy informaci o teplotě uvnitř materiálu. Udávaná přesnost měření je pro objemovou vlhkost $\pm 3\%$, rozsah měření potom 5% - 50%. Pro teplotu je udáván rozsah měření -10 °C – 70 °C při přesnosti měření $\pm 0,5$ °C (Campbell scientific, 2014) Jak je

již zmíněno v kapitole 4.2.1, čidla nejsou schopna dávat relevantní data při poklesu teplot v měřeném prostředí pod bod mrazu, kdy se obsažená voda mění v led.

Vlhkostní potenciál byl měřen čidly MPS-6 od výrobce Decagon Devices, Inc. (obrázek 17). Dřívější verze těchto čidel je popsána a hodnocena v kapitole 4.2.2, použitá verze se dle výrobce vyznačuje výrazně vyšší přesností díky důkladnější kalibraci a dále přidáním měření teploty. Jde tedy o čidla určující pomocí měření dielektrické permitivity obsah vlhkosti ve dvou porézních keramických discích, které jsou v rovnováze s okolním prostředím. Hodnoty vlhkosti jsou pak převáděny na vlhlostní potenciál s použitím známé retenční křivky keramického materiálu.



Obrázek 17 - čidla potenciálu MPS-6 (Decagon Devices, 2016)

Výrobce udává rozsah měřeného potenciálu -9 až -100 000 kPa s rozlišením 0,1 kPa a přesností $\pm 10\%$ čtení + 2kPa, při hodnotách pod -100 kPa pak připouští nižší přesnost. Rozsah měřené teploty je udáván $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rozlišením 0,1 $^{\circ}\text{C}$ a přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Provozní teplota je 0 – $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, při teplotě pod bodem mrazu nemůže být změřena hodnota potenciálu opět kvůli zásadně rozdílné permitivitě vody a ledu (viz tabulka 1). Zmrazující a rozmrazovací cykly by ale na keramické disky neměly mít negativní vliv. (Decagon Devices, 2016)



Obrázek 18 - tenzometr UMS T8 (www.ums-muc.de/en/products/soil-water/tensiometer/t8)

Dále byly v měřících místech umístěny tenzometry UMS T8, které pomocí piezoelektrického tlakového senzoru měří tlak vody v půdě proti referenčnímu atmosférickému tlaku připojenému skrz vodotěsnou membránu. K přenosu tlaku z prostředí do čidla používají propustnou keramickou čepičku vyplněnou vodou. Rozsah měřených tlaků je od +100 kPa do - 85 kPa, deklarovaná přesnost zjištěného tlaku je $\pm 0,5$ kPa. Zároveň je uvnitř prostoru v čepičce umístěno i teplotní čidlo, měřící v rozsahu od -30 °C do 70 °C. Přesnost naměřené teploty výrobce udává $\pm 0,2$ K v rozmezí (-10°C – +30°C) až $\pm 0,4$ K v krajních oblastech. Výrobce udává, že čidla mohou být ponechána na místě přes zimu a jsou chráněna před poškozením mrazem při uložení keramické čepičky v hloubce alespoň 20 cm. Měřená hodnota by měla při zamrznutí „skočit“ a zůstat po dobu zamrznutí konstantní, po rozmrznutí by měl tenzometr pokračovat v měření (UMC, 2011). Použitý tenzometr vidíme na obrázku 18.

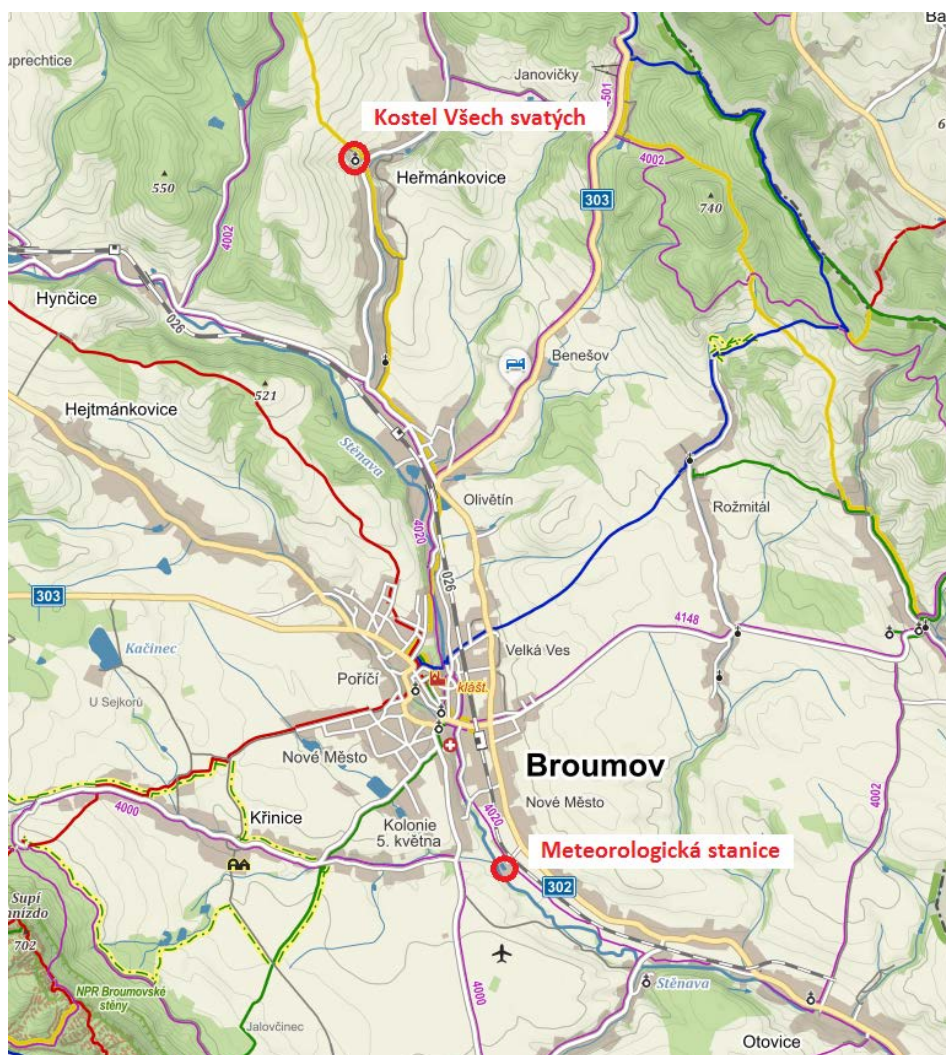
5.2.3. Měření srážek

V prostoru hřbitova přilehlého ke kostelu byl pro průběžné měření srážek v místě instalován v říjnu 2016 člunkový srážkoměr. Byl použit srážkoměr Fiedler SR02/V s rozlišením 0,2 mm/puls, a sběrnou plochou 200 cm², včetně korunky (ornitologického sedáku); vzhledem k dlouhodobému měření včetně zimního období byl použit srážkoměr vytápěný. Srážkoměr byl umístěn na volné ploše v dostatečné vzdálenosti od nejbližších stromků a dalších potenciálních překážek, ve vzdálenosti přibližně 60 m severozápadním směrem od objektu kostela (obrázek 19). Naměřená data ze srážkoměru byla rovněž sbírána dataloggerem Campbell Scientific CR 1000 uvnitř kostela a zapisována v časovém kroku 30 minut.



Obrázek 19 - Umístění srážkoměru v prostoru hřbitova (podklad: Mapy.cz)

Srážkoměr byl instalován o jeden měsíc později, než ostatní popsaná čidla. Pro doplnění informací o srážkách za dobu měření před instalací srážkoměru byla použita data Českého hydrometeorologického ústavu z meteorologické stanice Broumov v období hydrologického roku 2016 (1. 11. 2015 - 31. 10. 2016). Jde o automatizovanou klimatologickou stanici umístěnou na jižním konci města Broumov, tedy přibližně 7,1 km jižním směrem od kostela Všech svatých v Heřmánkovicích. Poloha stanice vzhledem k poloze kostela je vyznačena v obrázku 20. Pro další srovnání je plánován nákup dat z této stanice i za hydrologický rok 2017.



Obrázek 20 - Poloha klimatologické stanice v Broumově (podklad: Mapy.cz)

5.2.4. Retenční charakteristiky půdy a zdiva

V místě měření byly odebrány vzorky půdy v bezprostřední blízkosti kostela a vzorky kostelního zdiva, obojí pro měření retenčních čar.

Vzorky půdy byly odebrány v místech výkopu šachet pro měřicí stanoviště popsaná v předchozím oddíle. V každém z těchto dvou stanovišť byly odebrány 4 neporušené půdní vzorky pomocí Kopeckého válečků o objemu 100 cm³. Ze stanoviště A (blíže kostelu) byly odebrány vzorky z hloubky 12 cm, ze stanoviště B z hloubky 10 cm. Místa odběru vzorků jsou zakreslena v řezu - obrázek 15.

Vzorky zdiva byly odebrány z vrtu vedeného přes základové zdivo stavby, které je tvořeno červeným permským pískovcem. Použité vzorky byly odebrány z blíže neurčené hloubky v intervalu 0 – 3 m.

Se získanými vzorky bylo dále pracováno v laboratoři. Nejprve byly všechny vzorky plně nasyceny v nádobě s destilovanou vodou. Plně nasycené vzorky byly zváženy a vloženy na pískový tank. Na pískovém tanku byly postupně nastavovány záporné tlakové výšky s rostoucí absolutní hodnotou, po nastavení nové výšky bylo vždy vyčkáno dosažení rovnovážného stavu, poté byl vzorek vždy zvážen a nastavena nová (v absolutní hodnotě vyšší) hodnota podtlaku. Vzorky půdy byly posuzovány při hodnotách tlakové výšky v řadě - 1,0 cm, -3,0 cm, -5,0 cm, -10,0 cm, -30,0 cm a -51,8 cm; u vzorků zdiva byly zjišťovány hmotnosti při tlakových výškách -3,0 cm, -10,0 cm, -30,0 cm a -50,0 cm.



Obrázek 21 - Měření na pískovém tanku

Pro měření při vyšších tlakových výškách byly vzorky přesunuty na přetlakový aparát (obrázek 22). Zde byly ustalovány vzorky při dalších tlakových výškách – vzorky půdy při - 100 cm, - 300 cm a -1000 cm, vzorky zdiva při -100 cm a -380 cm.

Pískový tank pracuje na principu podtlakového přístroje, použitý přetlakový aparát na principu přetlakového přístroje, oba jsou popsány v kapitole 3.2.



Obrázek 22 - Přetlakový aparát a uložení vzorků půdy v něm

Jelikož odebrané vzorky zdiva měly na rozdíl od vzorků zeminy v Kopeckého válečcích velmi nepravidelný tvar, bylo třeba zajistit jejich dobré propojení s porézními deskami v obou používaných aparátech vhodným porézním médiem. Při měření na pískovém tanku byly proto tyto vzorky lehce zatlačeny do pískového materiálu. Při měření v přetlakovém aparátu byly vzorky položeny na lože zhotovené z jemnozrnného písku používaného v pískovém tanku, které bylo stejně jako keramická deska pod ním dopředu plně nasycené vodou (obrázek 23).



Obrázek 23 - Příprava pískového lože na keramické desce a uložení vzorku na něj

Po dokončení měření při uvedených tlakových výškách byly vzorky zdiva vloženy do sušárny a zcela vysušeny při teplotě 105 °C. Po vysušení byly zjištěny hmotnosti suchých vzorků.

Poté byly vzorky znovu plně nasyceny a byl zjišťován jejich objem. Použitá metoda zjišťování objemu je modifikací metody tzv. Archimedova vážení (např. ČVUT v Praze, FSv, k123), kdy je nasycený vzorek vážen na vzduchu a poté zvážen za ponoření do vody a objem vzorku je poté vypočten na základě výpočtu vztlakové síly. V našem případě byla vážena nádoba s vodou, do které byl následně vzorek ponořen stejným způsobem (v závěsu, bez dotyku dna a stěn nádoby) a byla odečtena změna váhy. Jelikož změna na váze Δm odpovídá přidané vztlakové síle při ponoření vzorku do vody:

$$\Delta m \times g = F_{vz} = V_p \times \rho_v \times g$$

kde $V_p [cm^3]$ je objem vzorku pískovce, $\rho_v [gcm^{-3}]$ je hustota vody a $g [ms^{-2}]$ je tíhové zrychlení, byl objem vzorku určen jako podíl změny na váze a hustoty vody ($\rho_v = 1 gcm^{-3}$):

$$V_{vz} = \frac{\Delta m}{\rho_v}$$

Z naměřených hodnot byly posléze získány a vyneseny retenční čáry zkoumaných vzorků zdiva (kapitola 6). Změřené body retenční čáry byly proloženy křivkou v programu RETC. K proložení byl použit model Van Genutchena, charakterizovaný vztahem

$$\theta_E = \frac{1}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m}$$

kde h je tlaková výška a α , n a m jsou optimalizační parametry, přičemž pro m platí

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Jelikož u vzorků půdy bylo pro další postup celého projektu stavební fakulty potřeba dále pokračovat v měření na přetlakovém aparátu při vyšších tlakových výškách, nemohly být vzorky vysušeny a nemohly tak být vypočteny hodnoty jejich vlhkostí při již zkoumaných tlakových výškách. U těchto vzorků proto byly stanoveny jen průběžné odhady retenčních čar, při odhadované nasycené vlhkosti 50%.

6. Výsledky měření a diskuse

6.1. Retenční čáry půdy a zdiva

Postupem popsaným v předchozí kapitole byly změřeny a vypočteny některé základní charakteristiky vzorků. Zjištěné vlastnosti odebraných vzorků základového zdiva jsou uvedeny v tabulce 2.

č. vzorku	objem vzorku	hm. po nasycení	hm. po vysušení	objemová hmotnost	objem vody při nasycení	nasyčená objemová vlhkost
	V	m_{sat}	$m_{\text{suš}}$	$\rho_{\text{suš}}$	$V_{\text{w,sat}}$	θ_{sat}
	cm^3	g	g	g/cm^3	cm^3	%
1	90,93	218,99	208,50	2,29	10,49	11,54
2	106,43	244,86	224,48	2,11	20,38	19,15
3	146,11	352,17	336,96	2,31	15,21	10,41

Tabulka 2- zjištěné charakteristiky vzorků základového zdiva

Vypočtené objemové hmotnosti se nevymykají běžným hodnotám pro pískovec, zjištěným v rešerši. Od dvou ostatních vzorků se jak objemovou hmotností, tak nasycenou objemovou vlhkostí mírně odlišuje vzorek 2, jehož mírná odlišnost je znatelná i vizuálně - včetně výrazně tmavší barvy (obrázek 24). Z nižší objemové hmotnosti a naopak vyšší θ_{sat} lze soudit na větší podíl pórů v tomto vzorku.



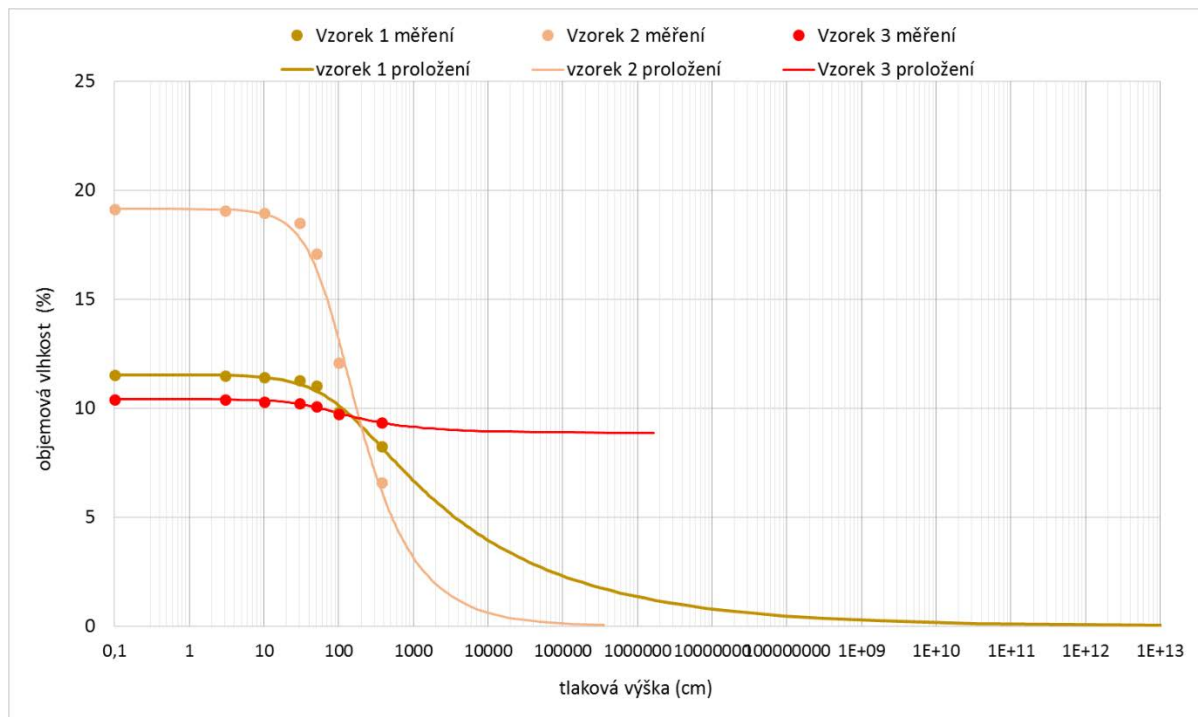
Obrázek 24 - zkoumané vzorky zdiva, v pořadí zleva doprava vzorek 1, 2, 3

Pro vzorky zdiva byly změřeny body retenčních čar v rozsahu od plného nasycení po tlakovou výšku -380 cm. Naměřené body byly v programu RETC proloženy křivkou za použití modelu Van Genutchena a při ukotvení hodnot naměřených nasycených vlhkostí.

Zjištěné retenční čáry vzorků jsou vyneseny v obrázku 25. Ukazují, že při hodnotách tlakové výšky do zhruba 30 cm zůstává ve vzorcích objemová vlhkost blízká nasycené. Při dalším vzrůstu tlakové výšky je zřejmý pokles především u vymykajícího se vzorku 2, u ostatních dvou vzorků se křivka láme spíše pozvolna. U vzorku 1 vlhkost poměrně rovnoměrně klesá mezi tlakovými výškami 100 cm (0,1 bar) a 100 000 cm (100 bar). U vzorku 3 naměřené body ani proložená křivka nevykazují žádný výraznější pokles, to však souvisí s malým množstvím

naměřených dat. Měřením zde nebyl zachycen větší pokles vlhkosti, dá se však očekávat při vyšších tlakových výškách, a je proto možné usuzovat na větší obsah pórů s menšími rozměry.

Výsledky vzorku 2 se poměrně dobře shodují s charakteristikami naměřenými na pískovcích ve studii Záleské a kol. (2014), kde největší poklesy vlhkosti byly zaznamenány do tlakových výšek 1 bar, případně 3 bar.



Obrázek 25 - Naměřené retenčních čar pískovce (naměřené body proložené křivkami dle metody Van Genutchena)

V tabulce 3 jsou uvedeny parametry retenčních křivek zkoumaných vzorků. U nasycené vlhkosti θ_s byly použity naměřené hodnoty, ostatní parametry byly vypočteny programem RETC. Pro srovnání jsou v tabulce uvedeny hodnoty přiřazené databázi programu RETC pro písčiny jílu. Z databáze půdních typů použitého programu se tyto hodnoty nejlépe shodovaly v optimalizačních parametrech s hodnotami vypočtenými pro zkoumané vzorky.

	θ_s	θ_R	α	n
	%	%	m^{-1}	-
A1	11,5	0,0	0,0099	1,2332
A2	19,2	0,0	0,0126	1,0848
A3	10,4	8,9	0,0215	1,5698
písčiny jílu	38,0	1,0	0,0270	1,2300

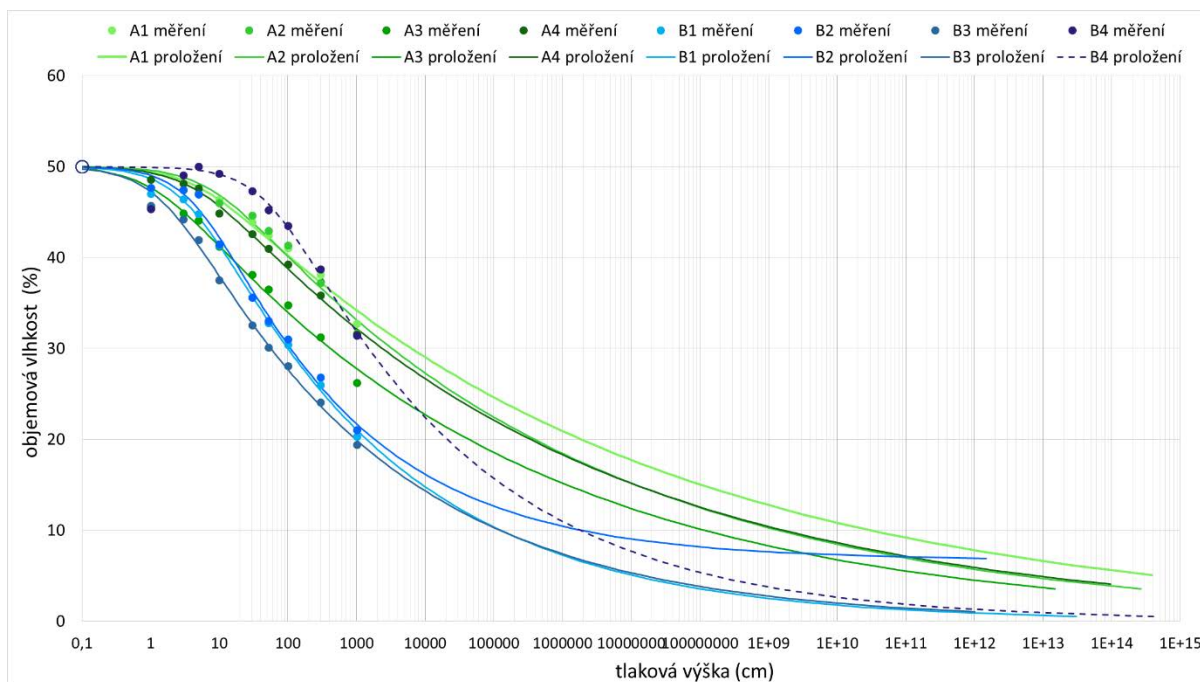
Tabulka 3 - parametry retenčních křivek vzorků zdiva

Při zkoumání vzorků půdy nebyly kvůli velké časové náročnosti měření v přetlakovém aparátu v termínu vyhotovení práce doměřeny hodnoty pro všechny tlaky, které přetlakový aparát umožňuje, a vzorky proto prozatím nebyly vysušovány. Nemohly tak být zjištěny všechny charakteristiky jako u vzorků zdiva ani stanoveny průběhy retenčních čar. V tabulce 4 jsou proto vyneseny pouze naměřené hmotnosti nasycených vzorků včetně Kopeckého válečků o objemu 100 cm³, ve kterých jsou uchovávány.

č. válečku	označení	hloubka	hm. po nasycení
		cm	g
85	A1	12	344,06
114	A2		346,12
662	A3		400,63
639	A4		399,96
118	B1	10	315,02
95	B2		318,67
98	B3		313,26
631	B4		286,67

Tabulka 4 - zjištěné charakteristiky vzorků půdy

Retenční čáry byly pro všechny vzorky odhadnuty na základě odhadu nasycené objemové vlhkosti materiálu (odhadnuto $\theta_s = 50\%$) v závislosti na zatřídění půdy v kapitole 5.1.2. Od této hodnoty byly dále odečítány naměřené úbytky hmotnosti, resp. vlhkosti. Odhad průběhu retenčních čar byl vynesen do obrázku 26. Naměřené body do tlakové výšky 1000 cm (1 bar) byly opět proloženy dle vztahu Van Genutchena.



Obrázek 26 - průběžný odhad retenčních čar půdy pro $\theta_s = 50\%$ (naměřené body proložené křivkami dle metody Van Genutchena)

Z obrázku vidíme poměrně pozvolný pokles retenčních čar u všech vzorků, jejich sklon se až na výjimky zvyšuje také pozvolna, bez výrazných předělů a změn. Dále pozorujeme, že u vzorků odebraných na stanovišti A, tedy blíže ke kostelu, klesá objemová vlhkost s poklesem tlakové výšky mírněji, než u vzorků ze vzdálenějšího stanoviště.

Všem očekávaným trendům se vymyká vzorek s označením B4 (v grafu znázorněn přerušovanou čarou), především když jeho hmotnost ze začátku stoupá při zvyšování tlakové výšky. Na vzorku se v průběhu měření objevily výrůstky (obrázek 27), na základě kterých bylo vyhodnoceno, že byl zřejmě odebrán vzorek s živočichem (žížalou) uvnitř, jejíž aktivitou došlo také k nárůstu objemu a tím i hmotnosti vlhkého vzorku. Vzorek byl ale dále použit a zaznamenán v měření, protože po skončení tohoto trendu (po úhynu žížaly) se chování vzorku začalo velmi blížit ostatním vzorkům.



Obrázek 27 - poškozený vzorek s označením B4

V tabulce 5 jsou opět vyneseny zjištěné parametry retenčních čar, hodnota θ_s je odhadnutá. Při srovnání s parametry modelem přisouzenými hlíně vidíme relativně odpovídající parametr α , ale výrazně odlišný parametr n . Nulové hodnoty reziduální vlhkosti θ_R byly modelem přisuzovány při zjištění hodnoty nižší než 0,1 %.

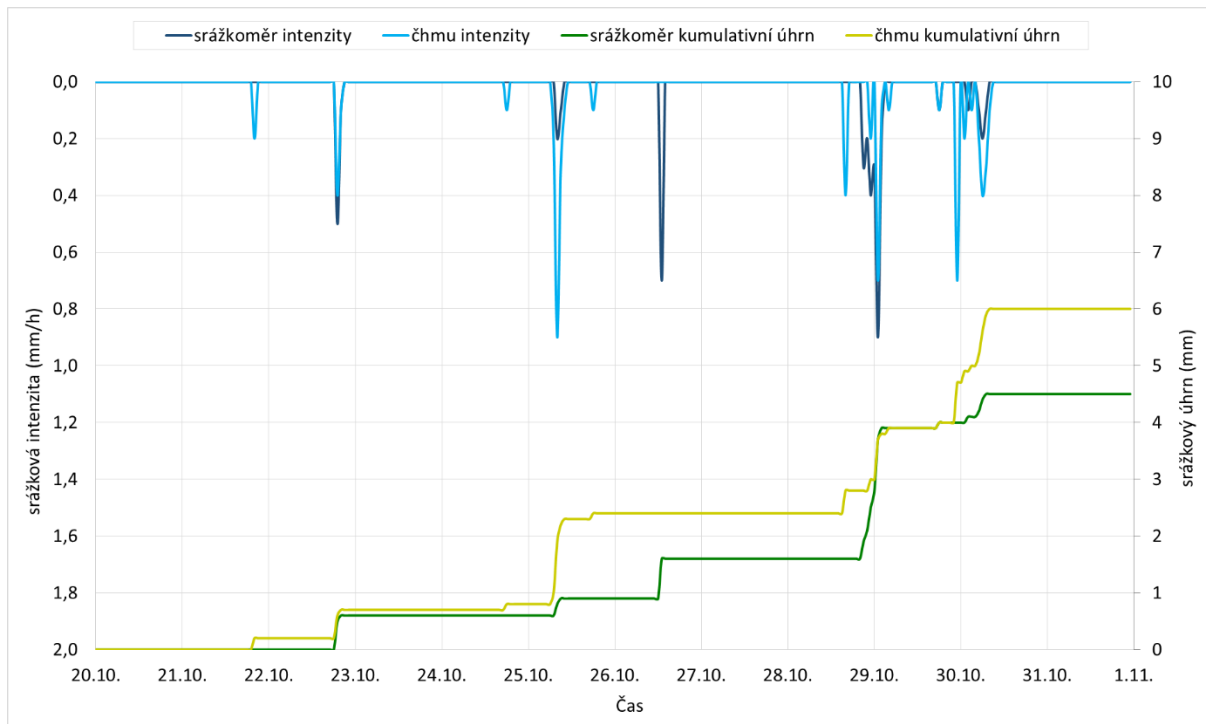
	θ_s	θ_R	α	n
	%	%	m^{-1}	-
A1	50,0	0,0	0,2046	1,0713
A2	50,0	0,0	0,1273	1,0848
A3	50,0	0,0	0,8225	1,0876
A4	50,0	0,0	0,2192	1,0817
B1	50,0	0,0	0,2718	1,1542
B2	50,0	6,7	0,1989	1,1999
B3	50,0	0,0	0,6170	1,1433
B4	50,0	0,0	0,0176	0,1550
hlína	43	7,8	0,036	1,56

Tabulka 5 - parametry retenčních křivek půdy, u θ_s jde o odhad

6.2. Měření srážek

Pro celou dobu měření vlhkostních charakteristik zdiva a půdy (22. 10. 2016 – 12. 5. 2017) byly zjištěny úhrny srážek v místě. Jelikož srážkoměr byl do prostoru hřbitova instalován až 19. 10., byla pro předchozí období použita data ČHMÚ z meteorologické stanice Broumov (7,1 km jižně od zkoumané lokality). Srážkové intenzity naměřené srážkoměrem v místě byly zapisovány v časovém kroku 30 minut, dodatečně pak byly převedeny na hodinové hodnoty. Od ČHMÚ byly získány přímo hodinové hodnoty srážkových intenzit. Zjištěná data jsou vynesena v příloze 2 (hodnoty poskytnuté ČHMÚ jsou vyznačeny světlejší barvou).

Kromě hodinových intenzit byla vynesena také čára kumulativního úhrnu srážek za celé období, ze kterého je lépe vidět celkový význam jednotlivých srážkových událostí a je odtud možné odečíst úhrn pro tato jednotlivá období. Nejvýraznější srážkovou událost vidíme hned v začátku měřeného období, mezi daty 2. 10. – 6. 10., další významné srážky najdeme například v obdobích 30. 11. – 1. 12., nebo ke konci měření 26. 4. – 28. 4. Vynesená data jsou v další kapitole porovnávána s dalšími naměřenými hodnotami.

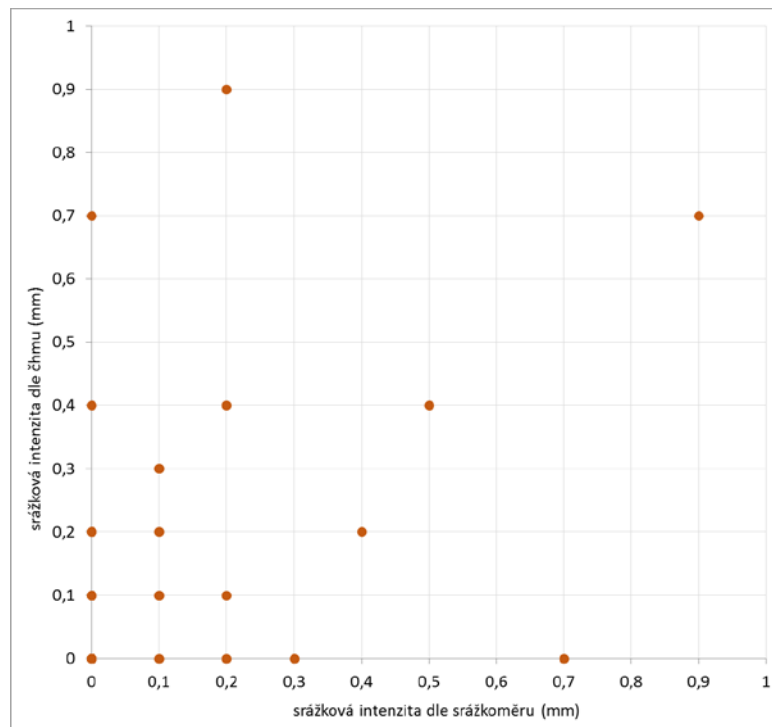


Obrázek 28 - hodinové srážkové intenzity a kumulativní srážkové úhrny naměřené srážkoměrem v místě a poskytnuté ČHMÚ

Pro posouzení relevance dat z meteorologické stanice Broumov byla do jednoho grafu vynesena srážková data z obou zdrojů pro období, kdy byly obě možnosti k dispozici. Vzhledem k tomu, že srážkoměr v místě poskytoval relevantní data od 20. 10. a data od ČHMÚ byla odebrána za hydrologický rok, tedy do 31. 10., jedná se o níže zobrazené období 11 dní. Z obrázku 28 je zřejmé, že v celkovém úhrnu za delší období nebude významný rozdíl mezi jednotlivými zdroji dat (součtové čáry z obou zdrojů se místy liší, ale nakonec se vždy v

celkovém úhrnu srážek přibližně shodují). Rozdíl ale může být v časovém posunu některých konkrétních srážek, jak je vidět z grafu intenzit (obrázek 28).

Dále byl pro porovnání dat sestaven korelační diagram (scatter plot), do kterého byla proti sobě vynesena data z obou zdrojů (obrázek 29). Z výsledného grafu nevidíme výraznější závislost mezi daty. Pro dobré statistické posouzení ale nemáme k dispozici dostatek dat. Podrobnější porovnání bude možné provést po dodávce meteorologických dat ČHMÚ na podzim roku 2017.



Obrázek 29 - korelační diagram dat získaných od ČHMÚ a naměřených srážkoměrem v místě

6.3. Výsledky monitoringu v místě

V následující kapitole jsou představena data naměřená monitorovacím systémem popsaným v kapitole 5.2.1 v období 22. 9. 2016 – 12. 5. 2017. Grafy s vynesením hodnot za celé období jsou z důvodu velikosti zařazeny v přílohách. Pro konkrétní popis některých charakteristik průběhů jsou v textu vyneseny detaily z těchto grafů z podzimního období (22. 9. – 20. 10. 2016) a z jarního období (17. 4. - 1. 5. 2017). První interval pro detailní zobrazení byl vybrán pro popis výraznějších změn v naměřených hodnotách, které trvaly přibližně měsíc od počátku měření. Druhý interval byl vybrán jako charakteristický úsek pro ustálenější období měření na jaře i na podzim, především proto, že v těchto 14 dnech můžeme pozorovat intenzivnější i slabší srážky.

Při vynášení grafů byl použit jednotný systém rozlišení míst měření. Měřící stanoviště jsou rozlišena barvami vynášecích čar: venkovním stanovištím byly přiřazeny odstíny zelené pro stanoviště A (blíže kostelu) a modré pro stanoviště B. Data z čidel uvnitř kostela jsou vynášena v odstínech červené (výklenek) a okrové (sloup). U venkovních stanovišť je pak sytostí rozlišena hloubka uložení čidel, respektive jejich aktivní části, kdy data z větších hloubek jsou vynesena tmavší barvou než data blíže povrchu země. V legendě jsou data z čidel vlhkosti označována V, data získaná čidly potenciálu P a data z tenzometrů T.

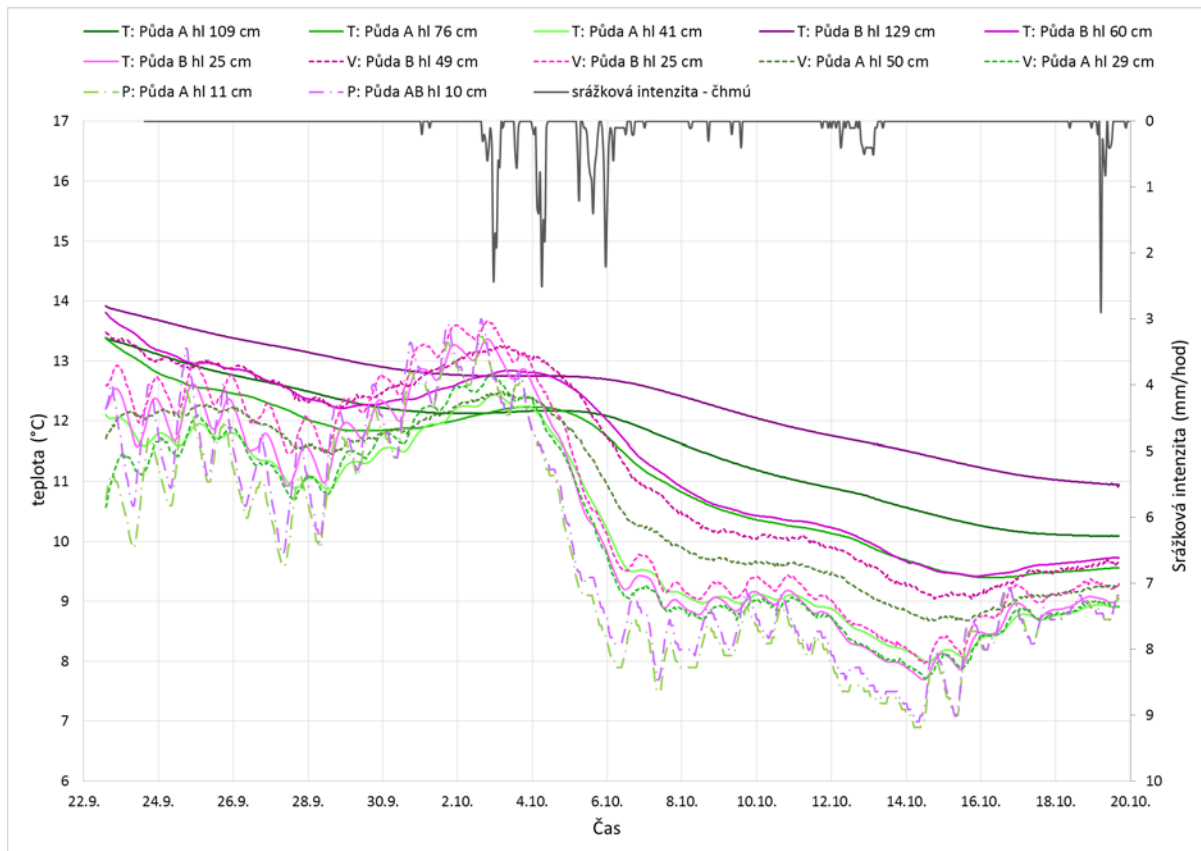
6.3.1. Teploty

Před hodnocením naměřených hodnot vlhkosti a potenciálu je dobré věnovat pozornost odečtům teplot. Všechna použitá čidla měří zároveň teplotu, každé ale v jiném místě. U vlhkostních čidel CS 650 je senzor teploty umístěn u povrchu pouzdra v blízkosti vývodu jehel, neměří tak teplotu uvnitř materiálu, ale na jeho povrchu. U čidel potenciálu společnosti Decagon je teplota měřena také na povrchu pouzdra, toto čidlo je ale celé umístěno uvnitř materiálu a hodnota teploty bude relevantnější (detail umístění čidel ve zdivu viz obrázek 30, umístění v půdě je vidět na obrázku 11). Nejlepší situace je u tenzometrů, kde je teplotní senzor umístěn přímo uvnitř keramické čepičky.

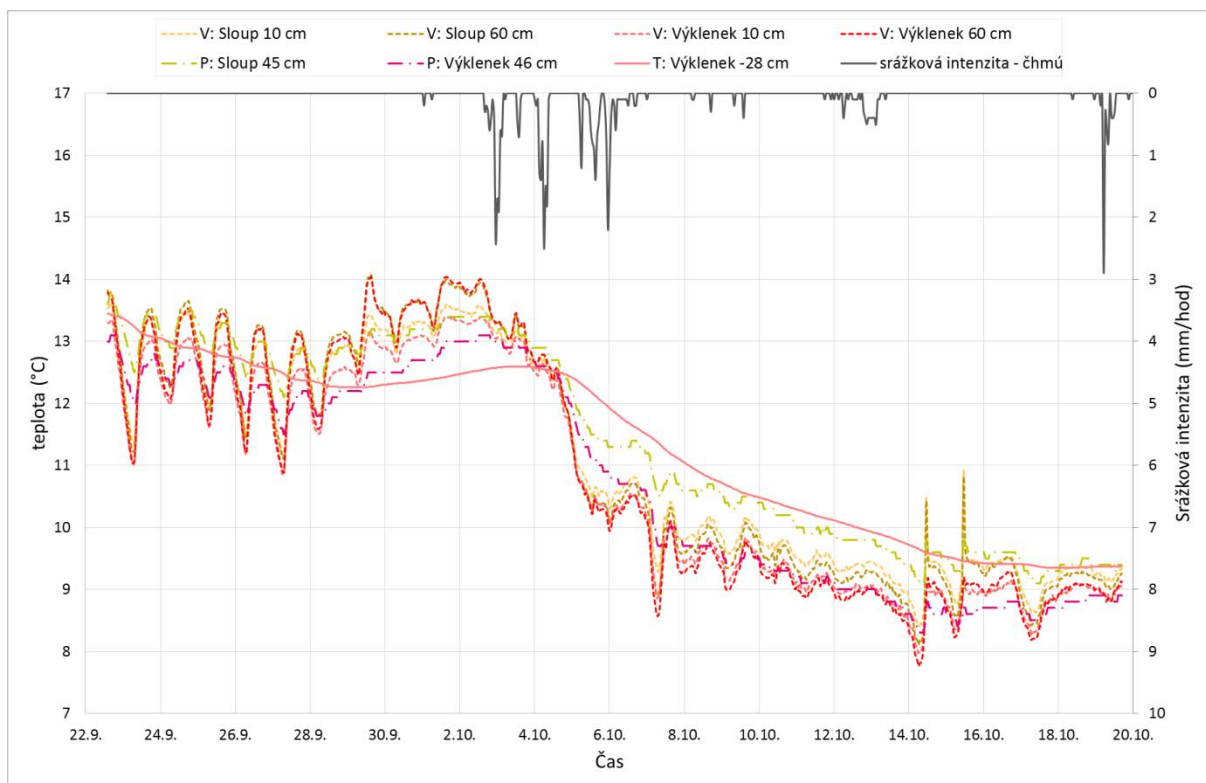


Obrázek 30 - detail umístění ve zdivu: čidlo vlhkosti CS 650 (vlevo), čidlo potenciálu MPS-6 (vpravo)

Teploty naměřené čidly v období 22. 9. – 20. 10. 2016 jsou vyneseny v grafech na obrázku 31 (exteriér) a na obrázku 32 (interiér).



Obrázek 31- průběh teplot na čidlech v exteriéru v podzimmím úseku měření



Obrázek 32 - průběh teplot na čidlech v interiéru v podzimmím úseku měření

Důležitou informací viditelnou na grafu z exteriéru je, že u odpovídajících (typem, hloubkou) čidel z jednoho a druhého stanoviště je vždy naměřena nižší teplota ve stanovišti A. Toto je dobře vidět například u čidel potenciálu v hloubce 49 cm (B) a 50 cm (A), které mají téměř totožný průběh při stálém odstupu cca 0,5 °C. V grafu z celého období v příloze 3 je nejlépe zřejmé rozvrstvení fialových odstínů čidel ze stanoviště B nad zelenými ze stanoviště A v poslední, jarní části období. Zřejmým důvodem pozorování je fakt, že stanoviště blíže kostelu je zastíněno po větší část dne než stanoviště vzdálenější, jelikož se nacházíme na severní straně stavby. Z tohoto lze dále očekávat menší možnost výparu v blízkosti stavby a tedy větší hromadění vlhkosti.

Další viditelné charakteristiky se shodují s očekáváním: v půdě vidíme, že výrazně více kolísají hodnoty měřené čidly blíže u povrchu země, s hloubkou kolísavost klesá. Ve zdivu vidíme nejrozkolísanější hodnoty u čidel vlhkosti, která měří na povrchu zdiva, menší rozkolísanost u čidel potenciálu v povrchové vrstvě zdiva a zdaleka nejhladší průběh dává tenzometr, zavedený šikmo do základu do hloubky 28 cm pod podlahu.

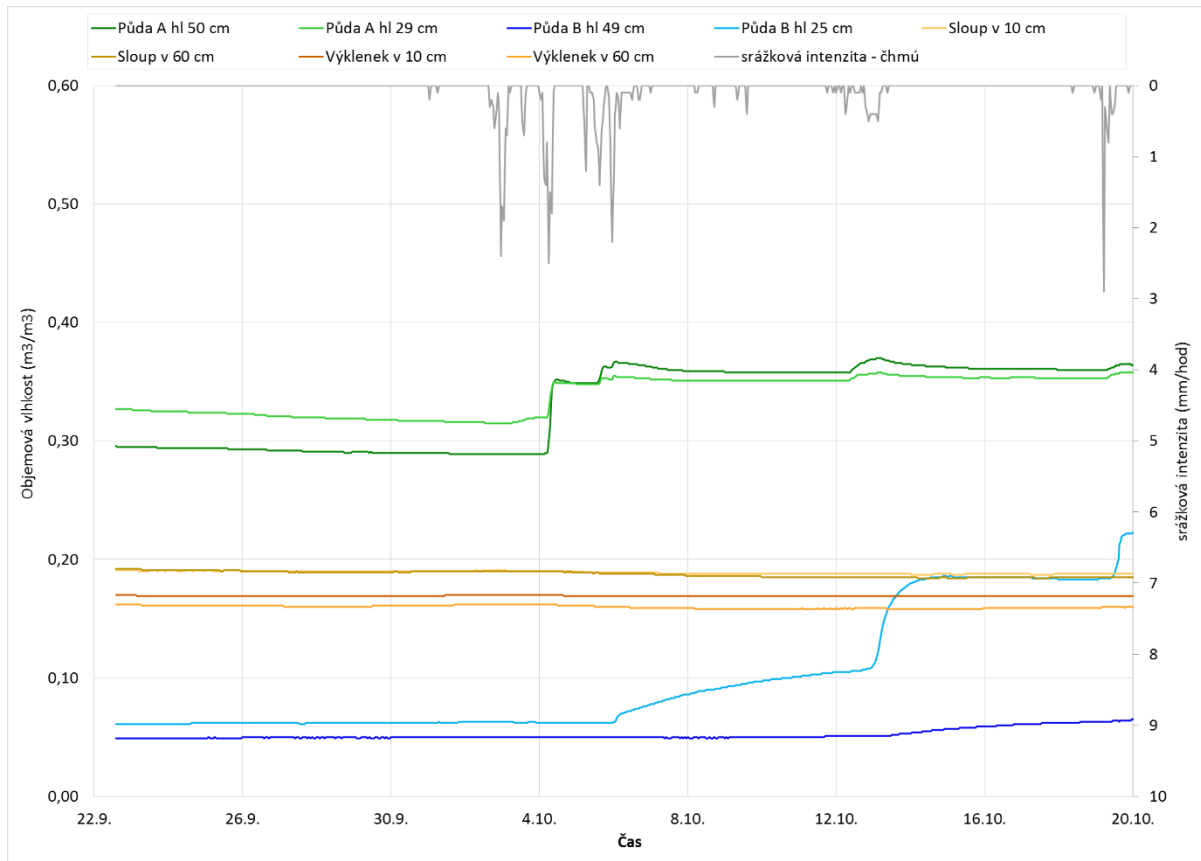
Můžeme pozorovat také souvislost se srážkami, kdy po výrazné srážkové události z 2. – 6. 10. teplota prudce klesá. Nejrychlejší reakci pozorujeme v nejmělkých čidlech, kde jsou v rámci poklesu i zcela vynechány standardní denní oscilace.

V grafech za celé období lze vyčíst důležitou informaci o překročení bodu mrazu, pod kterým je problematické fungování všech použitých čidel. U čidel v půdě teplota po celou dobu měření neklesla pod 0°C kromě drobných výjimek u čidel potenciálu umístěných jen mělce pod zemí. Hodnoty naměřené těmito čidly by tak měly být relevantní. V kostele teplota v čidlech klesá pod bod mrazu zejména v období 30. 12. – 26. 2., zde tedy lze očekávat problematické výsledky měření. Jediným z čidel v interiéru, jež zůstává po celou dobu v „bezproblémových“ teplotách nad bodem mrazu, je tenzometr.

V rámci projektu nebyla měřena teplota vzduchu v kostele ani v exteriéru. Pro alespoň přibližnou orientaci byla do grafu v příloze 4 vynesena alespoň teplota měřená v přístrojové skřínce, která by měla teplotě vzduchu v kostele nejvíce odpovídat.

6.3.2. Čidla vlhkosti

V příloze 5 je vynesena průběh vlhkostí naměřených příslušnými čidly, ve srovnání se zjištěnými srážkovými intenzitami. Zde si můžeme prohlédnout detail z podzimního úseku měření (22. 9. – 20. 10. 2016, obrázek 33).

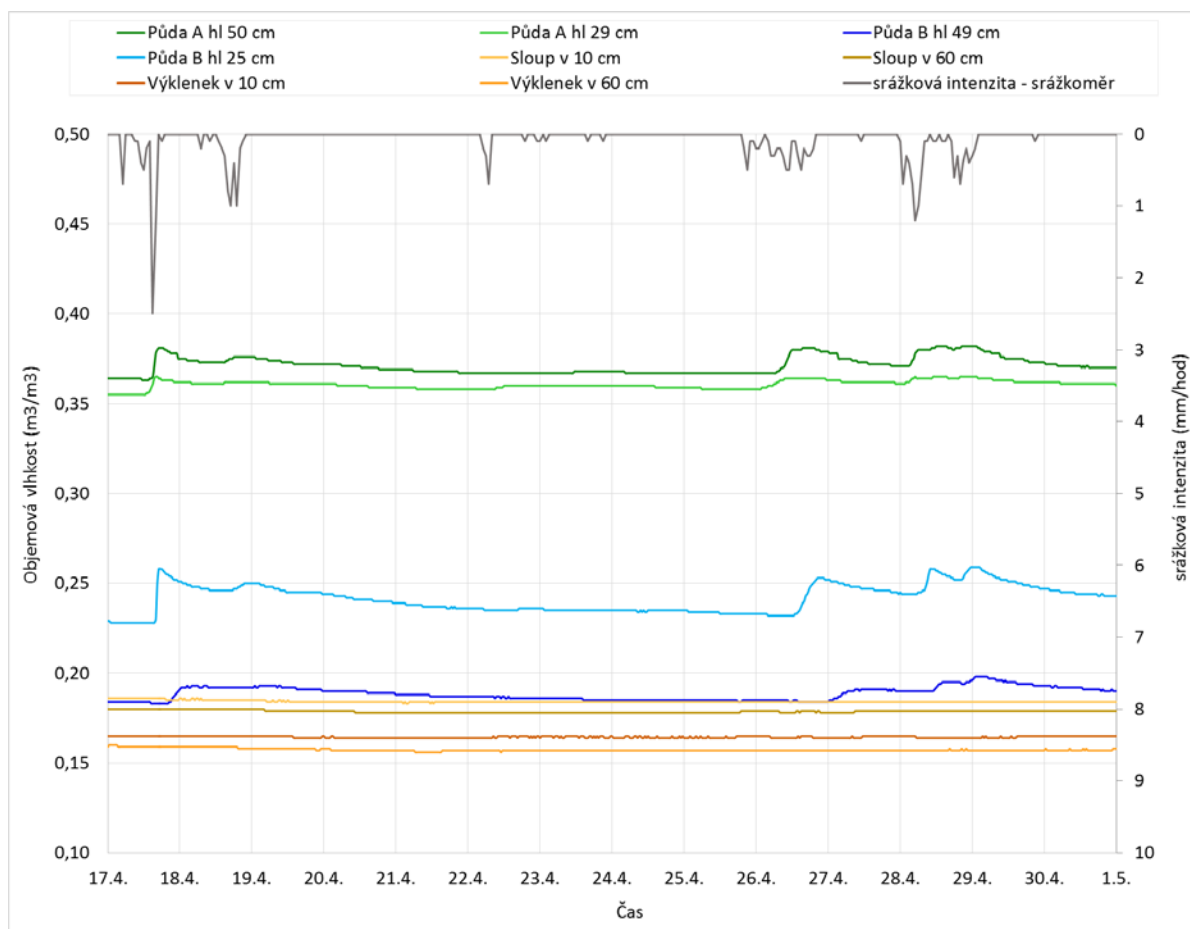


Obrázek 33 - průběh naměřených hodnot vlhkosti a srážkových intenzit (detail)

V prvním období měření pozorujeme sycení jednotlivých vrstev půdy významnou srážkovou událostí z období 2. 10. – 6.10. Na stanovišti A pozorujeme velmi rychlou reakci a prudký skok vlhkosti až k hodnotám, ve kterých se pak měřená vlhkost pohybuje po větší část celého následujícího měření. Na stanovišti B dochází k sycení výrazně pozvolněji, nejdříve pozorujeme postupné zvyšování vlhkosti v oblasti měřícího čidla, kde pak 13. 10. dochází za vlivu další, menší srážky k většímu propojení a skokovému vzrůstu. Od této chvíle se zvyšuje vlhkost i v hlubší vrstvě a analogicky se propojuje po srážce 7. 11. Po tomto počátečním zvlhčení se hodnoty každého z čidel pohybují kolem stejných hodnot. V reakci na každou následně zaznamenanou výraznější srážku (19. 11., 1. 12., 25. 12.) vidíme u všech čidel rychlý vzrůst a následný pokles ke stejné hodnotě. Takto reaguje především oblast stanoviště B, a to logicky především její vrchní vrstva, která se vždy rychle zvlhčí a následně odtud voda snadno odtéká. V oblasti stanoviště A má voda tendenci se akumulovat, a půda zůstává téměř nasycená.

Od přelomu prosince a ledna ustávají reakce na srážky, protože teploty vzduchu klesly pod bod mrazu a srážky přešly do sněhového skupenství. Bez dotací kapalných srážek vlhkost

půdy ve všech čidlech velmi pozvolna klesá. Po opětovném zvýšení teplot do kladných hodnot na konci února a začátku dubna se hodnoty vlhkostí postupně vracejí na již dříve pozorované hodnoty a ve zbytku období reagují na srážky podobně jako v období podzimním.



Obrázek 34 - průběh naměřených hodnot vlhkosti a srážkových intenzit (detail 2)

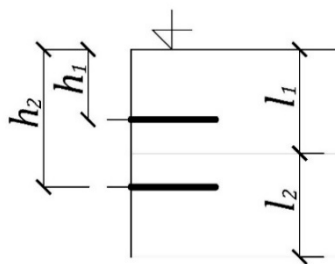
Podrobně to vidíme na obrázku 34 z konce období měření. Opět pozorujeme výraznější reakce u stanoviště B a to u všech zaznamenaných srážek (17. 4., 18. 4., 26. 4., 28. a 29.4.). Mělká vrstva v tomto místě reaguje nejrychleji a s největší intenzitou ze všech měřených bodů – u srážky 17. 4. pozorujeme zlom na křivce naměřených vlhkostí hned v nejbližším měřeném půlhodinovém kroku poté, co je naměřena nejvyšší intenzita srážky (0,4 mm). S mírným zpožděním a viditelně menší intenzitou pozorujeme změny vlhkosti v hlubší vrstvě ve stanovišti B. Změny vlhkosti následující po všech popsanych srážkách pozorujeme i ve stanovišti A. Přicházejí podobně rychle, ale s viditelně menší intenzitou, a také následný pokles vlhkosti zpět k jakési ustálené hodnotě je pomalejší. Větší změny zde vidíme na rozdíl od stanoviště B u čidla umístěného ve větší hloubce.

U čidel vlhkosti umístěných ve zdivu nepozorujeme v podzimním období žádné hodnotitelné pohyby měřených hodnot. V zimním období pozorujeme výrazný pokles hodnot, který ale souvisí s nefunkčností čidel při poklesu teplot pod bod mrazu, již zmíněnou v předchozích kapitolách. Pokles hodnot vlhkosti časově souhlasí s překročením bodu mrazu viditelném v příloze 6 po dni 6. 1. 2017. Po opětovném vzrůstu teplot do kladných hodnot v prvních

březnových dnech nastoupají zpět i měřené hodnoty vlhkosti. Na každé naměřené křivce je v tomto období viditelný zlom, který lze interpretovat jako opětovný začátek měření relevantních hodnot. Po tomto zlomu čidla ve sloupu i ve výklenku ve výšce 10 cm nad podlahou opět zůstávají na přibližně stejné hodnotě. V čidlech umístěných ve výšce 60 cm ve sloupu i ve výklenku ale vidíme stálý pozvolný vzrůst hodnot. Ty za následující období 35 – 40 dnů vzrostou asi o 1,5 % a až následně se ustálí. Zdá se tedy, že se s jarním táním dostává o něco více vlhkosti do vyšších vrstev zdiva. Na obrázku 34 vidíme už ustálené hodnoty vlhkosti, o něco nižší vlhkost byla naměřena ve výklenku než ve sloupu. V obou stanovištích v souladu s očekáváním pozorujeme vyšší vlhkost v čidle umístěném níže nad podlahou.

6.3.3. Zásoba vody

Z naměřených hodnot vlhkosti byly vypočteny a vyneseny hodnoty zásoby vody v půdě. To bylo třeba pro možnost číselného porovnání měřených změn vlhkosti s pozorovanými srážkami – tedy zjištění, jestli zvýšení vlhkosti odpovídá množství vody dodanému srážkou. Každému z dvou čidel umístěných pod sebou v hloubce h_1 a h_2 byla přiřazena vrstva půdy o mocnosti l_i , podle obrázku 35.



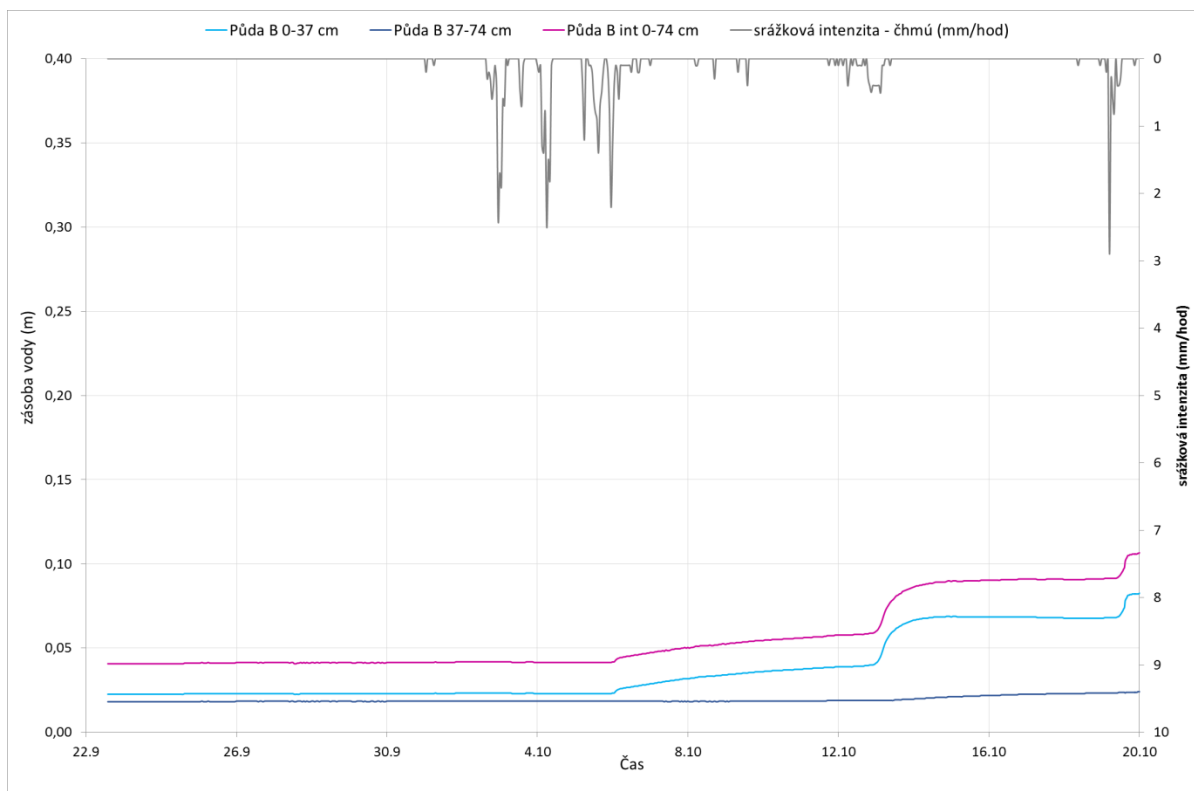
Obrázek 35 - schématické přiřazení vrstev půdy čidlům vlhkosti

Ve stanovišti A byly čidlům v hloubce $h_1 = 29$ cm a $h_2 = 50$ cm přiřazeny vrstvy půdy o mocnosti l_1 a $l_2 = 39,5$ cm, ve stanovišti B pro čidla v hloubce $h_1 = 25$ cm a $h_2 = 49$ cm mocnosti vrstev l_1 a $l_2 = 37$ cm. Pro porovnání obou stanovišť pak byly přepočteny hodnoty zásob vody ve stanovišti A na vrstvy o mocnostech l_1 a $l_2 = 37$ cm shodných se stanovištěm B.

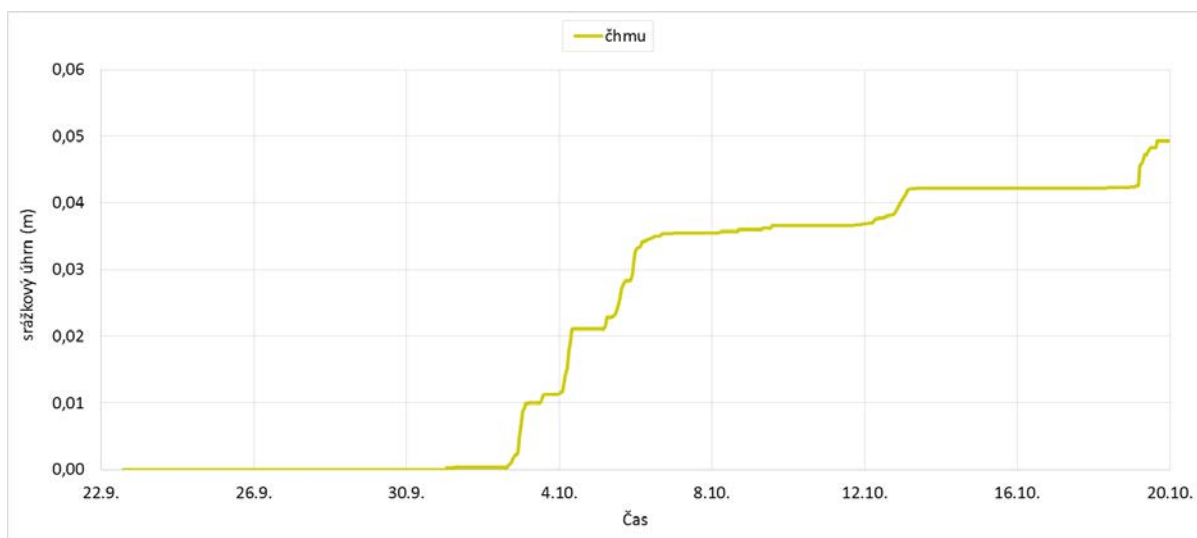
Zásoba vody v těchto vrstvách byla vypočtena podle následujícího vzorce jako násobek vlhkosti a přiřazené mocnosti vrstvy:

$$Z_i = l_i \times \theta_i$$

Zjištěné hodnoty zásoby vody pro přiřazené vrstvy i pro jejich součet jsou vyneseny v příloze 7 a 8. Detail z podzimního období je v obrázku 36 a 38, na obrázku 37 jsou pro srovnání vyneseny kumulativní srážkové úhrny.



Obrázek 36 - hodnoty zásoby vody v půdě na stanovišti B (detail)

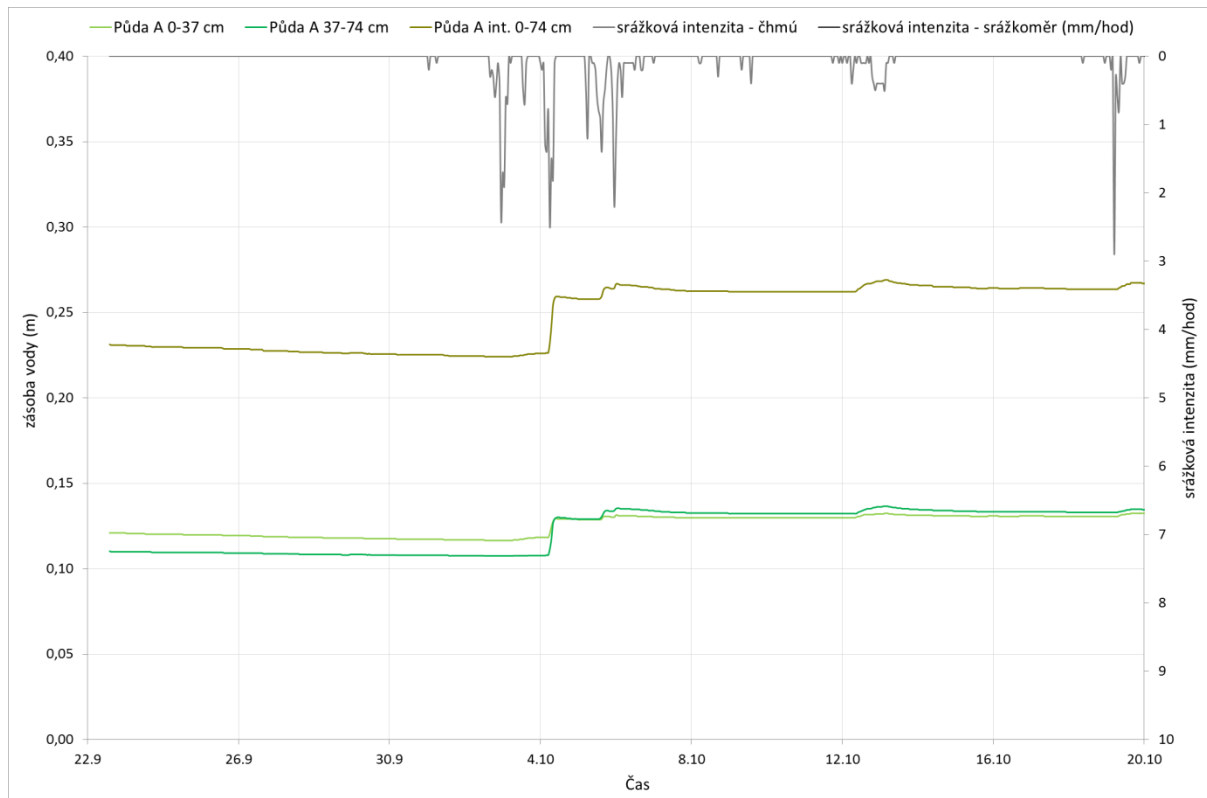


Obrázek 37 - kumulativní srážkové úhrny (detail)

U stanoviště B můžeme zhodnotit již popisované dění na začátku měření, kdy vlhkost u čidla nejdříve stoupá jen pomalu, protože voda za srážky z 2. – 6. 10. se prozatím vyskytuje především v povrchové vrstvě. Postupným pomalým zvlhčováním se ale půda stává vodivější a proto při další srážce 13. 10. se voda z ní už dostane i k čidlu. Vzrůst zásoby vody dne 13. 10. je proto zdánlivě větší, než odpovídá srážce, což je ale způsobeno právě tím, že se do hlubšího horizontu půdy dostává voda z předchozí srážky. Jelikož k dalšímu takovému jevu dochází ještě 20. 10., je smysluplné porovnávat až sumy hodnot za období 2. 10. – 20. 10. Zde

vidíme, že tyto sumy u srážky i u vzrůstu zásoby vody jsou přibližně 0,05 m. Můžeme tedy tvrdit, že v tomto období všechna voda ze srážky pronikla pouze do horní uvažované vrstvy (0 – 37 cm), čemuž odpovídá i velmi nevýrazný vrůst vlhkosti ve vrstvě spodnější. Z toho odvozujeme, že podíl povrchového odtoku na odvodu srážkové vody zde byl zanedbatelný.

Při porovnávání hodnot dalších srážek se změnami zásoby vody ve stanovišti B jsou opět hodnoty strmého nárůstu zásoby po výraznějších srážkách vyšší než hodnoty těchto srážek samotných. Odpovídají opět spíše součtu těchto okamžitých srážek a redistribuci vody ze srážek v mezidobí, které jsou samy o sobě nevýrazné.

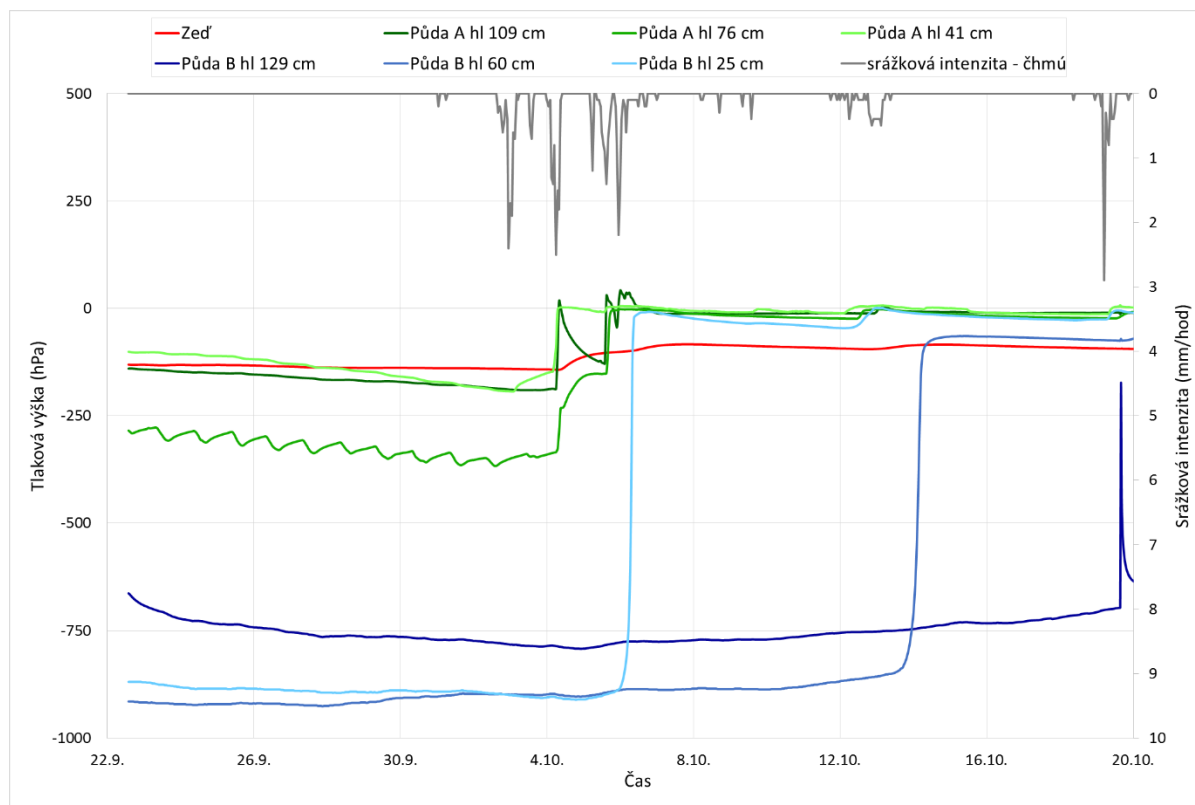


Obrázek 38 - hodnoty zásoby vody v půdě na stanovišti A (detail)

U stanoviště A je dvěma postupnými skoky ve dnech 4. 10. a 5. 10. (obrázek 38) zvýšena zásoba vody v půdě o hodnotu odpovídající celé srážkové události (přibližně 0,04 m). Z dalšího průběhu hodnot ve stanovišti A se dá usoudit, že půda okolo čidel je zde poměrně blízko nasycení (pozorujeme objemové vlhkosti 35 – 40 %). Půda zde rychle reaguje na srážku, hodnoty změny zásoby vody víceméně odpovídají úhrnu srážky a poté vlhkost opět klesá na hodnotu před srážkou.

6.3.4. Tenzometry

V příloze 9 jsou vyneseny naměřené hodnoty tlakové výšky. Kvůli velkému rozsahu měřených hodnot jsou zobrazeny ještě v příloze 10 v detailu (rozsah -280 až +200 hPa). Zde v textu opět následuje detailní pohled na počáteční období.



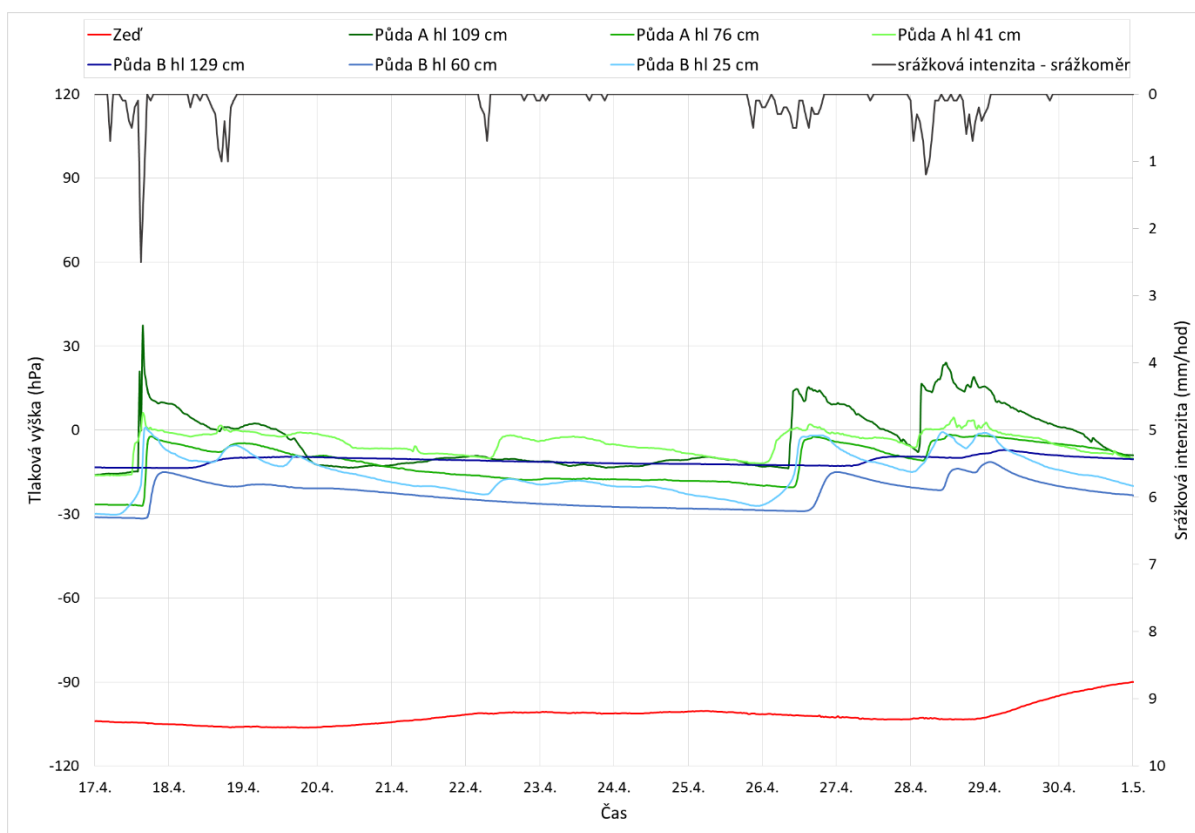
Obrázek 39 - průběh hodnot tlakové výšky v porovnání se srážkovými intenzitami (detail)

Na začátku období měření zde opět pozorujeme postupné sycení půdy do hloubky. Zejména u stanoviště B vidíme reakce v jednotlivých hloubkách v rozmezí několika dní až téměř dvou měsíců v případě nejhlubšího čidla. Nutno ale podotknout, že hodnoty naměřené ve stanovišti v úvodu měření se pohybují poblíž výrobcem deklarované hranice rozsahu měření, která je 850 hPa. Uskočení hodnot u nejhlubšího čidla (hloubka aktivní části 129 cm) s následným návratem do předchozího trendu jistě souvisí s manipulací s čidly, která zde tento den probíhala. Ve stanovišti A pak vidíme v reakci na výraznou srážkovou událost velmi rychlý vzrůst hodnot ve všech hloubkách až k hodnotám jen těsně pod nulou. Podstatně rychlejší reakci v tomto stanovišti pravděpodobně napomáhá větší nasycení (výrazně vyšší naměřená vlhkost) před srážkou. Vzhledem k míře rozdílu s druhým stanovištěm se ale dají očekávat ještě další vlivy. Může jít o stékání vody do této oblasti z vyšších míst (ve stanovišti B se ale povrchový odtok nepotvrdil), nebo o to, že kostel zde může dobře fungovat jako „zarážka“ v odtoku.

Při porovnání se zjištěným sklonem retenční čáry ale zjistíme, že naměřené změny tlakových výšek (z -300 až -100 hPa k hodnotě blízké nule u stanoviště A a z hodnot kolem 800 hPa k obdobným hodnotám) neodpovídají zjištěným změnám objemové vlhkosti, respektive

odpovídaly by podstatně vyšším změnám vlhkosti. Můžeme proto předpokládat, že v těchto počátečních změnách hrálo roli také ustalování tenzometrů v půdě.

Po ustálení měřených hodnot ve vyšších hodnotách tlakových výšek už můžeme pozorovat rychlou reakci tenzometrů následující vždy po méně i více významných srážkách. Na srážky reagují dle předpokladů nejrychleji i s nejvyšší mírou mělce umístěná čidla, zatímco u nejhlubších se reakce projevují jen málo. Toto platí ve stanovišti B pro všechny srážkové události. U stanoviště A ale popsání chování pozorujeme jen u srážek menšího objemu. Naopak na nejvýraznější srážkové události zde zdaleka nejvýraznější reakci vykazuje čidlo umístěné v hloubce 109 cm. To by odpovídalo rychlému propojení povrchu s místem měření čidla v tomto místě, které se ukazuje i na dalších již popsání jevech. Popsání reakce pozorujeme až do přechodu srážek ve sněhové a opět i po oteplení v jarním období.



Obrázek 40 - průběh hodnot tlakové výšky v porovnání se srážkovými intenzitami (detail 2)

Právě na úseku z jarního období na obrázku 40 lze výše uvedené dobře popsat konkrétně. Zmiňované výraznější srážky zde pozorujeme zejména 17. 4., 26. 4. a 28. a 29. 4. U nich pozorujeme ve stanovišti A nejvýraznější změny v nejhlubším tenzometru, jímž naměřené tlakové výšky pokaždé prudce stoupají do kladných hodnot. Čidla umístěná ve střední a mělčí poloze reagují s nižší intenzitou. Naopak při drobné srážce ze dne 22. 4. a jejím nevýrazném doznění v noci na 23. 4. zůstává hodnota naměřená v nejhlubším místě téměř beze změny. Ani ve střední poloze nepozorujeme výrazný pohyb. Změna tlakové výšky v nejmělčím čidle je ale dosti znatelná. Ve stanovišti B závislost způsobu reakce na intenzitě srážky nepozorujeme. U více i méně výrazných popsání srážek vidíme nejvýraznější reakci u

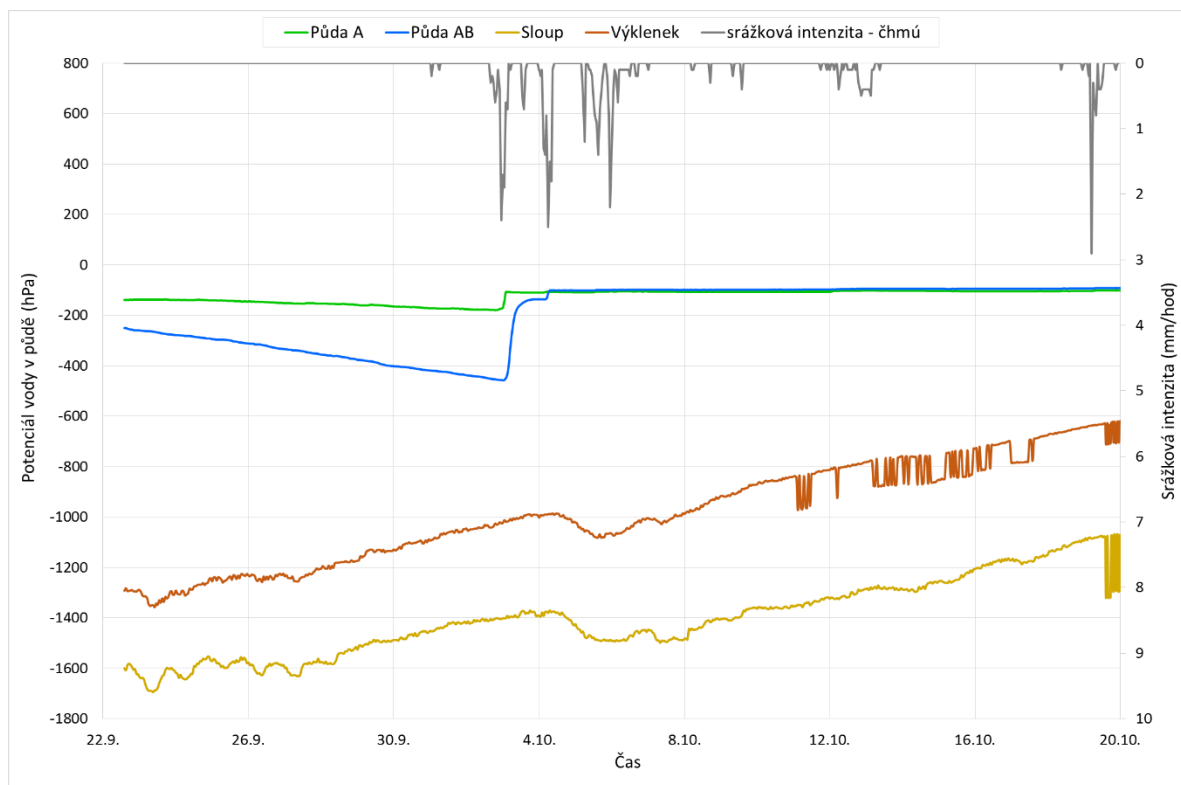
nejměleji zavedeného tenzometru a u tenzometru v hloubce 129 cm naopak po srážkách vidíme jen velmi malé změny tlaku.

V zimním období většina čidel vykazuje ustálené hodnoty. Vymyká se pouze čidlo v hloubce 25 cm ve stanovišti B, u něhož se naměřená teplota pohybuje zdaleka nejbližší bodu mrazu. Je tedy možné, je tímto faktem měření negativně ovlivněno (tedy že čidlo už nepracuje zcela správně).

Také u zdi pozorujeme na počátku po proběhnuté srážkové události výrazný vzestup hodnot. Další vzestup pozorujeme okolo 13. 10. po další významnější srážce. Poté zde tlaková výška velmi pozvolna klesá, další vzestup vidíme 13. 12., tedy dva dny po srážce z 11. 12., může ale jít i o dodatečnou reakci na událost z 1. 12. s větším úhrnem. Naměřené hodnoty tlakové výšky výrazně klesají v zimním období, nemělo by však jít o změny způsobené zamrznutím, protože teplota vykazovaná čidlem se celou dobu drží těsně nad bodem mrazu. Na přelomu února a března se měření opět dostává k dřívějším hodnotám a pozorujeme opět mírné reakce na nejvýraznější srážky, podobné těm z podzimního období. Konkrétně můžeme na obrázku 40 vyzorovat změny tlakové výšky po 20. 4. v reakci na srážku ze 17. 4. a od 29. 4. další vzestup po srážkách od 26. 4. dále.

6.3.5. Čidla potenciálu

V příloze 11 můžeme zkoumat hodnoty naměřené čidly potenciálu ve všech stanovištích, na obrázku 41 vidíme detail z počátečního období. Měření čidel vykazovaná v kPa byla převedena na hPa pro možnost porovnání s měřeními na tenzometrech.



Obrázek 41 - průběh hodnot potenciálu půdní vody v porovnání se srážkovými intenzitami (detail)

V půdě čteme měření na čidle ve stanovišti A v hloubce 11 cm a mezi stanovišti A a B v hloubce 10 cm. U čidla A počáteční hodnota poměrně dobře odpovídá hodnotám naměřeným tenzometry, vidíme i podobný průběh počátečního mírného poklesu a prudkého vzrůstu po srážkové události. Čidlo mezi stanovišti nelze dobře srovnávat se žádným z tenzometrů, a výraznější klesání v počátku jeho měření lze dobře připisovat ustalování čidla. Klesáním se dostává přibližně k hodnotám odpovídajícím interpolaci hodnot tenzometrů ze stanovišť A a B. Po srážce se pak jím měřené hodnoty rychle dostávají k hodnotám z druhého čidla. Další průběh čtení na čidlech už nedává nijak zajímavé informace. Protože se (také dle čtení na tenzometrech) pohybujeme v prostředí blízko nasycení, použitá čidla určená do suchého prostředí nereagují smysluplně. Výrobce udává rozsah čidla -90 až -1 000 000 hPa a navíc výrazně nižší přesnost měření připouští i v hodnotách nad -1000 hPa.

Jedinou další informací z hodnot naměřených těmito čidly v půdě tak je jejich chování při poklesu teploty k bodu mrazu. Chování čidel v půdě i ve zdivu v závislosti na teplotě můžeme pozorovat v příloze 12. Vzhledem k tomu, že výrobce deklaruje nefunkčnost čidel při teplotě pod 0°C z důvodu rozdílné permitivity vody a ledu, jde vlastně jen o ověření této informace. Zároveň je ověřen i fakt, že po rozmrznutí prostředí čidla opět normálně fungují. V příloze 12 vidíme, že u čidel v půdě, kde teplota klesla a zůstávala 1-2 stupně pod bodem mrazu také okamžitě kleslo čtení potenciálu na jakousi hraniční hodnotu, kde zůstalo až do rozmrznutí. V půdě teplota po celé zimní období oscilovala těsně kolem bodu mrazu a měřená hodnota potenciálu v závislosti na této oscilaci vykazovala tendence klesat mimo reálné hodnoty a zase se k nim vracet.

Čidla umístěná ve zdivu vykazují pohyby hodnot v podzimním i v jarním období. Z těchto pohybů lze hodnotit především počáteční dlouhodobý (cca 40 dní) nárůst hodnot, který pravděpodobně souvisí s růstem vlhkosti po extrémně suchém létu 2016. Vzhledem k tomu, že v kostele nebyla měřena relativní vlhkost vzduchu, nelze ale určit, zda se vlhkost do zdiva dostává spíše difuzí vodních par ze vzduchu, nebo vztlínáním z podzákladové zeminy. Další pohyby hodnot už jsou méně výrazné a je nutné je posuzovat v kontextu rozsahu měření čidel. Při výrobcem udávaném rozsahu -90 až -1 000 000 hPa je i rozdíl mezi extrémy v celém podzimním období (cca 1000 hPa pro každé čidlo) pouhou tisícinou tohoto rozsahu. V tomto kontextu jsou pak změny potenciálu v řádech desítek hPa zanedbatelné. Z tohoto posouzení dále plyne, že ani pozorované oscilace mezi různými hodnotami v podzimním (11. 10. – 9. 11., resp. 20. 10. – 28. 11.) i v jarním období (od 30. 3., resp. 2. 4. po zbytek období) není třeba brát jako závažnou chybu měření, vzhledem k jejich rozsahům do 200 hPa, který je opět oproti rozsahu čidla zanedbatelný. Relevantním výsledkem měření čidel potenciálu je tak hodnota potenciálu po ustálení kolem 600 hPa ve výklenku ve výšce 48 cm nad podlahou a 1000 hPa ve sloupu ve výšce 45 cm v podzimním období, v jarním období pak kolem 400 hPa ve výklenku a 600 hPa ve sloupu.

7. Hodnocení a návrh řešení

V práci byly zjišťovány základní charakteristiky pískovcového materiálu zdiva kostela Všech svatých v Heřmánkovicích. Změřené a vypočtené hodnoty objemové hmotnosti i pórovitosti se dobře shodují s hodnotami běžně udávanými pro pískovec. Konkrétně najdeme shodu i s hodnotami zjištěnými ve studii Záleské a kol. (2014), a to zejména s materiály ze stejné (severovýchodní) oblasti České republiky, které vykazují vyšší objemovou hmotnost a nižší porozitu než materiál ze severozápadu Čech zkoumaný ve stejné studii i v práci Pavlíka a kol. (2008). Zařídění zeminy v okolí stavby do hlinitého půdního typu by mohlo být potvrzeno naměřenými charakteristikami včetně retenční křivky, měření však kvůli velké časové náročnosti zatím nebylo dokončeno a některé hodnoty byly proto odhadnuty.

Na základě výsledků měření v kostele Všech svatých a jeho nejbližším okolí představených v předchozí kapitole lze nalézt několik souvislostí mezi změnami stavu vlhkosti ve zdivu kostela a změnami vlhkosti v okolní zemině. Nejzřejmější souvislosti s okolím byly pozorovány v hodnotách tlakové výšky naměřených tenzometrem umístěným pod obvodovým zdivem kostela v hloubce 28 cm pod úroveň podlahy. Zde byly přímo pozorovány vzrůsty hodnot tlakové výšky následující po nejvýraznějších srážkách. Vzhledem k tomu, že čidlo tenzometru měřilo v oblasti pod povrchem země, je logické, že zde pozorujeme největší návaznost na venkovní situaci ze všech čidel umístěných v interiéru.

V čidlech umístěných ve stěně kostela ve výškách v rozmezí 10 cm až 60 cm nad podlahou už nebyly pozorovány příliš významné změny stavu v průběhu celé doby měření. Výjimkou je pozorování velmi mírného, ale poměrně dlouhodobého vzestupu vlhkosti ve výšce 60 cm nad podlahou v období jarního tání, která byla dána do souvislosti s výrazným nárůstem objemu vlhkosti v zemině v tomto období. Ve stejných čidlech ve výšce 10 cm nad podlahou změna pozorována nebyla.

Při měření v půdě bylo ovšem zjištěno, že ve větší blízkosti kostela také nedochází k velkým změnám vlhkovní situace. Jak u naměřených vlhkostí, tak u tlakových výšek byly výrazně větší výkyvy pozorovány ve stanovišti vzdálenějším od kostelní zdi než v přiléhajícím stanovišti. V místě bližším kostelu bylo pozorováno spíše dlouhodobé zadržování vody a ustálený stav blízký nasycení půdy vodou.

Na základě výše uvedeného je zřejmé, že sice nelze nalézt mnoho konkrétních projevů závislosti změn stavu vlhkosti ve zdivu na těchto změnách v půdě, nicméně lze pozorovat souvislost poměrně neměnného stavu vysoké vlhkosti blízko stavby s taktéž málo proměnlivou vlhkostí ve stěně.

Hodnoty potenciálu, kolem kterých dlouhodobě oscilovaly výsledky měření v půdě, odpovídají hodnotě polní vodní kapacity, v blízkosti kostela ji spíše přesahují. I hodnoty tlakové výšky měřené tenzometrem 28 cm pod obvodovou zdí odpovídají nasycení velkých pórů o poloměru cca 15 μm . Potenciály zjištěné ve zdivu půl metru nad podlahou pak odpovídají nasycení pórů do ekvivalentního poloměru kolem 1 μm . I zde se pohybuje vysoko nad bodem vadnutí, což je zřejmé i ze značného výskytu řas na stěnách, pro které je

ve zdivu dostatek dostupné vody. Naměřené vlhkosti ve sloupu i výklenku jsou srovnatelné s hodnotami naměřenými v podobných výškách nad zemí v historických budovách v Itálii ve studiích Sandrolini a kol. (2007) nebo Franzoni a kol. (2013).

Vlhkost se v zemině přiléhající ke kostelu kumuluje na základě průběžné dotace srážkami a především kvůli velmi omezeným možnostem dalšího pohybu kamkoliv dále z tohoto místa. Tyto možnosti jsou omezeny pravděpodobně především přerušením dráhy podpovrchového půdního odtoku budovou kostela a také nízkou možností výparu v často zastíněném chladném místě za severní stěnou poměrně vysoké stavby.

Při terénním průzkumu byly zjištěny další zdroje dotací vody do těsného okolí obvodového zdiva z nevhodně řešených odtoků z okapů. Samotné odvodnění střechy do okapů je sice poměrně dobře vyřešeno v rámci nedávné rekonstrukce střechy, svod ale končí těsně nad zemí a zcela chybí odvod dešťové vody od stavby. Ukázkou těchto zásadních nedostatků potvrzuje obrázek 42, kde vidíme vývod vody z okapu do volného prostoru na povrchu země těsně u stavby nebo pokus o nouzové řešení přistavením sudu, jímž zachycený objem bude ale zandebatelný.



Obrázek 42 – ukázky současného řešení odtoku z okapů

Z výše uvedených zdrojů problémů lze vyvodit potřebné zásahy pro zlepšení situace. Především je třeba odvést vodu kumulující se v těsné blízkosti severní stěny kostela v půdě. Z porovnání vývoje vlhkosti ve stanovišti bližším a vzdálenějším od obvodové zdi je možné vyvodit, že problematickým místem je pouze těsné okolí kostela, a tedy odvedení vody z

tohoto místa do jiné části svahu by nemělo způsobit problém v místě vývodu. Odvedení vody z oblasti přiléhající ze severu ke kostelu by bylo možné provést realizací drénu kopírujícího celou severní stranu kostela, v přiměřeném sklonu cca 1% od nejvyššího místa nad středem severní stěny. Vzhledem k tvaru kostela a potřebě kopírování tohoto tvaru by bylo vhodné drén zhotovit z ohebného potrubí z PVC nebo PE (například viz Callida, s.r.o.), o průměru minimálně 100 mm se štěrkovým obsypem dle doporučení výrobce. Vzhledem ke vzdálenosti stanoviště, ve kterém bylo pozorováno trvalé zamokření 2,6 m od stavby, by bylo vhodné umístit drén přibližně v průběžné vzdálenosti 2 m od obvodové zdi. Jelikož nejčastěji bylo pozorováno překročení nulové tlakové výšky, tedy plné nasycení v měřeném bodě v hloubce 109 cm, bylo by vhodné umístit drén do odpovídající hloubky cca 1 m, čímž by zároveň bylo splněno umístění v nezámrazné hloubce.

Vývody drenáže na východním i západním konci by bylo vhodné dovést do bezpečné vzdálenosti pod objekt. Výusti by bylo možné pohodlně umístit do svahu pod objektem, který není využíván, je pouze zatravněn. Je zde dostatečný prostor pro vyhloubení podzemní zasakovací rýhy včetně revizní šachty. Jediný objekt v tomto prostoru, kterému je třeba se vyhnout, je budova bývalé márnice, jak vidíme na obrázku 43.



Obrázek 43 - prostor pod kostelem

Zároveň je třeba vyřešit nadbytečné dotace vlhkosti do půdy z výše popsaných problematických zakončení okapů. Odvody vody z okapů by bylo možné buď zaústit přímo do uvažované drenážní trubky, nebo svěst nepropustným povrchovým kanálem a vyústit do společné zasakovací rýhy v prostoru pod kostelem.

8. Závěr

V této práci byl zkoumán pohyb vody v obvodové zdi barokního kostela a v okolní zemině. Byla provedena měření na reprezentativních vzorcích materiálů odebraných ve zkoumané lokalitě. U těchto vzorků byly zjištěny základní charakteristiky a byly vyneseny retenční čáry (pro vzorky zdiva) a průběžné odhady retenčních čar (pro vzorky půdy, jejichž měření nemohlo být v termínu vyhotovení práce zcela dokončeno). Pro materiál zdiva byly naměřeny charakteristiky běžné pro pískovce z této oblasti (objemové hnotnosti $2,11 - 2,31 \text{ g/cm}^3$), avšak poměrně různorodé hodnoty pórovitosti ($10,41 - 19,15 \%$) a taktéž různorodé průběhy retenční křivky.

Dále byly získány hodnoty naměřené soustavou čidel umístěných ve zkoumané lokalitě za období 22. 9. 2016 – 12. 5. 2016. Na základě těchto dat byl zhodnocen stav a vývoj vlhkosti v konstrukci kostela a jeho okolí v posuzovaném období. Především bylo zjištěno neustávající zamokření půdy v blízkosti kostela (2,6 od obvodové zdi), kde jsou jen velmi omezené možnosti odvodu vody z místa. Ve vzdálenosti 8,8 m od obvodové zdi byla zjištěna podstatně lepší situace, tedy nižší vlhkost půdy a její výraznější úbytky následující po nasycení srážkou. Ve zdivu byla do měřené výšky 60 cm nad podlahou zjištěna ustálená vlhkost lehce pod hodnotou 20 %. V oblasti pod obvodovou zdí byly pozorovány změny v měřených hodnotách tlakové výšky v závislosti na srážkové situaci. Ve zdivu nad úrovní podlahy byly pozorovány viditelné změny vlhkosti a potenciálu pouze v reakci na znatelné zvýšení vlhkosti prostředí po extrémně suchém létu a v reakci na jarní tání. Při běžných srážkách nebyly změny vlhkosti ani potenciálu vody v této úrovni pozorovány.

Z důvodu nevyhovujícího stavu byla na základě výše popsaného postupu doporučena opatření ke zlepšení vlhkostních poměrů v lokalitě. Doporučen byl odvod vody z oblasti těsně přiléhající k severní stěně kostela pomocí drénu zaústěného do zasakovací rýhy v prostoru svahu pod kostelem. Zároveň bylo doporučeno do této rýhy odvést dešťové vody sebrané okapovým systémem ze střechy.

Představené výsledky měření charakteristik půdy a zdiva a stavu a vývoje vlhkosti v lokalitě jsou nezbytným podkladem pro modelování pohybu půdní vody. To by bylo třeba provést pro detailní návrh způsobu odvodnění zkoumaného místa.

9. Seznam použitých zdrojů

9.1. Odborná literatura a skripta

Císlarová M. Vogel T. a kol. (2008). Transportní procesy ve vadózní zóně. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, KHMKI, KHH.

Kutílek, M. a kol. (2000). *Hydropedologie 10*. Vydavatelství ČVUT, Praha

9.2. Odborné články

Berger J. a kol. (2015). Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation. *Journal of Building Engineering* 3, 1–15.

D'Agostino D. (2013). Moisture dynamics in an historical masonry structure: the Cathedral of Lecce (South Italy). *Building and Environment* 63, 122–133.

Dos Santos G.H., Mendes N. (2006). Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation. *Energy and Buildings* 38, 303–314.

Franzoni E. (2014). Rising damp removal from historical masonries: a still open challenge. *Construction and Building Materials* 54, 123–136.

Franzoni E. a kol. (2014). Rising moisture, salts and electrokinetic effects in ancient masonries: from laboratory testing to on-site monitoring. *Journal of Cultural Heritage* 15, 112–120.

Lourenço, P.B. a kol. (2006). Defects and moisture problems in buildings from historical city centres: a case study in Portugal. *Building and Environment* 41, 223–234.

Menghao Q. a kol. (2011). Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates. *Energy Conversion and Management* 52, 1470–1478.

Noborio, K. (2001). Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 31, 213–237

Nolz, R. a kol. (2013). Calibrated soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. *Agricultural water management* 116, 12–20.

Pavlík Z. a kol. (2008). Water and salt transport and storage properties of Mšené sandstone. *Construction and Building Materials* 22, 1736–1748.

Philip, J.R., de Vries, D.A. (1957). Moisture movement in porous media under temperature gradients. *Transactions of the American Geophysical Union* 38, 222–232.

Sandrolini F., Franzoni E. (2006). An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings. *Building and Environment* 41, 1372–1380.

Sandrolini, F a kol. (2007). Materials decay and environmental attack in the Pio Palace at Carpi: a holistic approach for historical architectural surfaces conservation. *Building and Environment* 42, 1966–1974.

Tariku F. a kol. (2010). Integrated analysis of whole building heat, air and moisture transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 3111–3120.

Vereecken, E., Roels, S. (2012). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment* 51, 296–310.

Záleská, M. a kol. (2014). Retention curves of different types of sandstone. *Advanced Materials Research* 982, 44-48.

9.3. Další zdroje

Bát'ková K., a kol. (2013). Multimediální učebnice hydroopedologických terénních měření. 2. doplněné vydání. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha. Dostupné z: <http://hydroopedologie.agrobiologie.cz>.

Campbell Scientific (2014). CS560 and CS655 Soil Water Content Reflectometers. Campbell Scientific, Inc.

CENIA, česká informační agentura životního prostředí. Národní geoportál INSPIRE. Dostupné z: <http://geoportal.gov.cz>.

Callida, s.r.o. Ceníky stavebních materiálů. Flexibilní drenážní trubky s geotextilií. Dostupné z: <http://www.stavebni-cenik.cz/47-informace/informace/130-flexibilni-drenazni-trubky-s-geotextili>

Česká geologická služba. Půdní mapa 1:50 000, list 04-31 Meziměstí.

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra materiálového inženýrství a chemie. 123 TVVM – Základní materiálové parametry, dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/zaklad.pdf>

Decagon Devices (2016). MPS-2 & MPS-6 Dielectric Water Potential Sensors – Operator's Manual. Decagon Devices Inc.

Prokop, B. a kol. (2007). Broumovská skupina kostelů. Průvodce školou českého baroka v kraji pískovcových skal. Verněřovice: Modrý anděl.

Státní pozemkový úřad. Bonitované půdně-ekologické jednotky. Dostupné z: <http://www.spucr.cz/bpej>.

UMC (2011). T8 Long-term Monitoring Tensiometer, User Manual. UMS GmbH München.

Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i. eKatalog BPEJ. Dostupné z: <http://bpej.vumop.cz/>

9.4. Zdroje použitých obrázků:

Campbell scientific CS650, 30 cm Soil Water Content Reflectometer. Dostupné z: <https://www.campbellsci.com/cs650>.

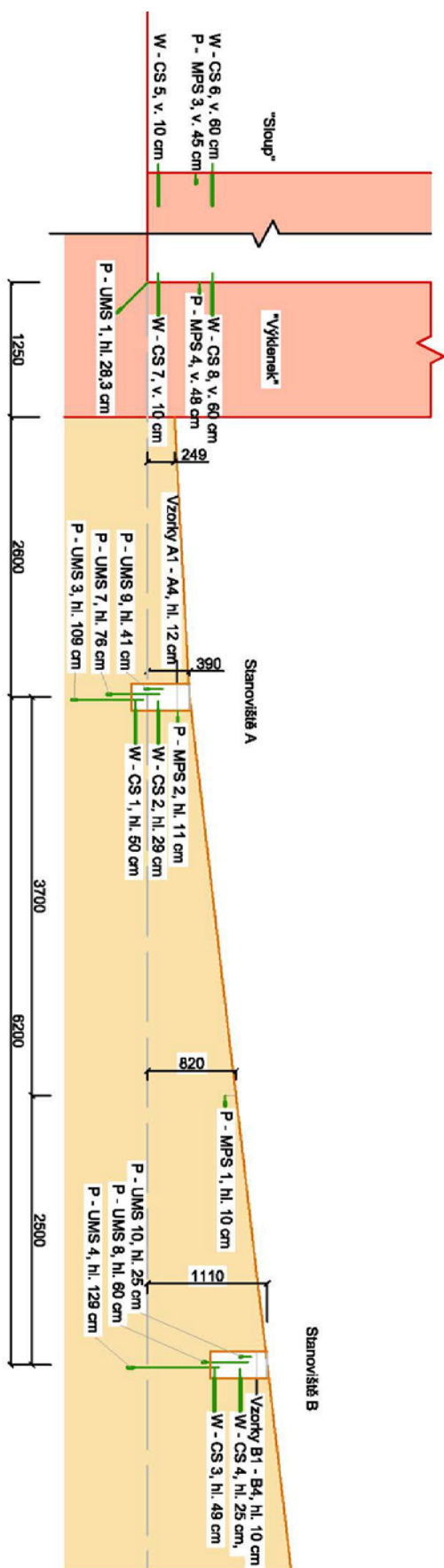
Mapy.cz (2015). Základní mapa, Letecká mapa. Dostupné z: <https://mapy.cz/>.

Smajstrla A.G., Pitts D.J. (1997). Tensiometer Service, Testing and Calibration. Bulletin 319, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Dostupné z:

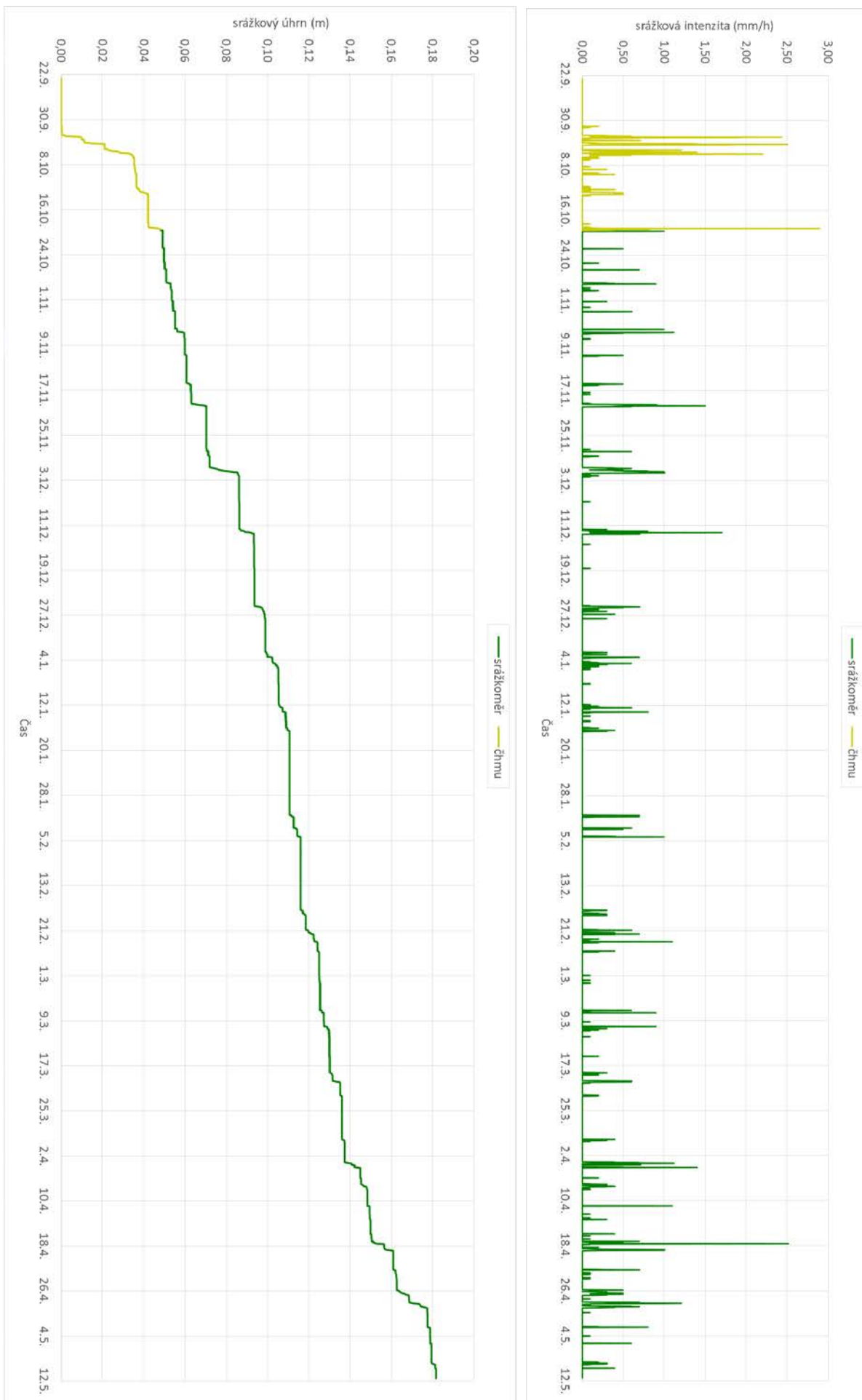
http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Tensiometro_de_Manometro/Tensiometer%20Service,%20Testing%20and%20Calibration.htm.

UMS T8, The specialist for long-term monitoring. Dostupné z: <http://www.ums-muc.de/en/products/soil-water/tensiometer/t8/>.

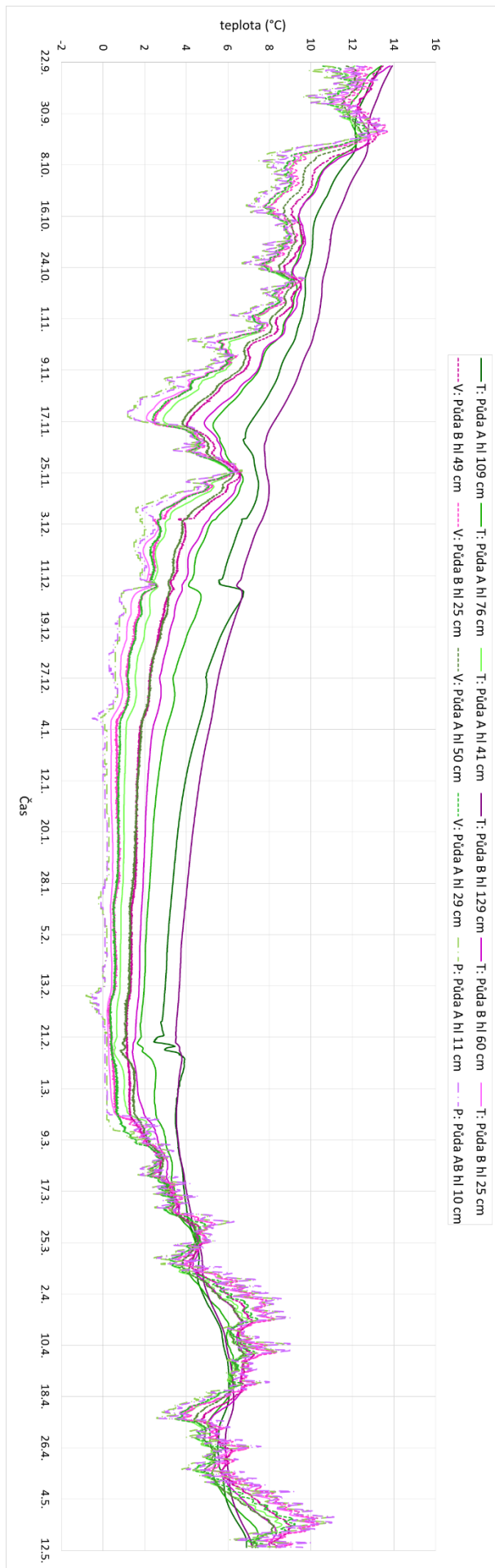
10. Přílohy



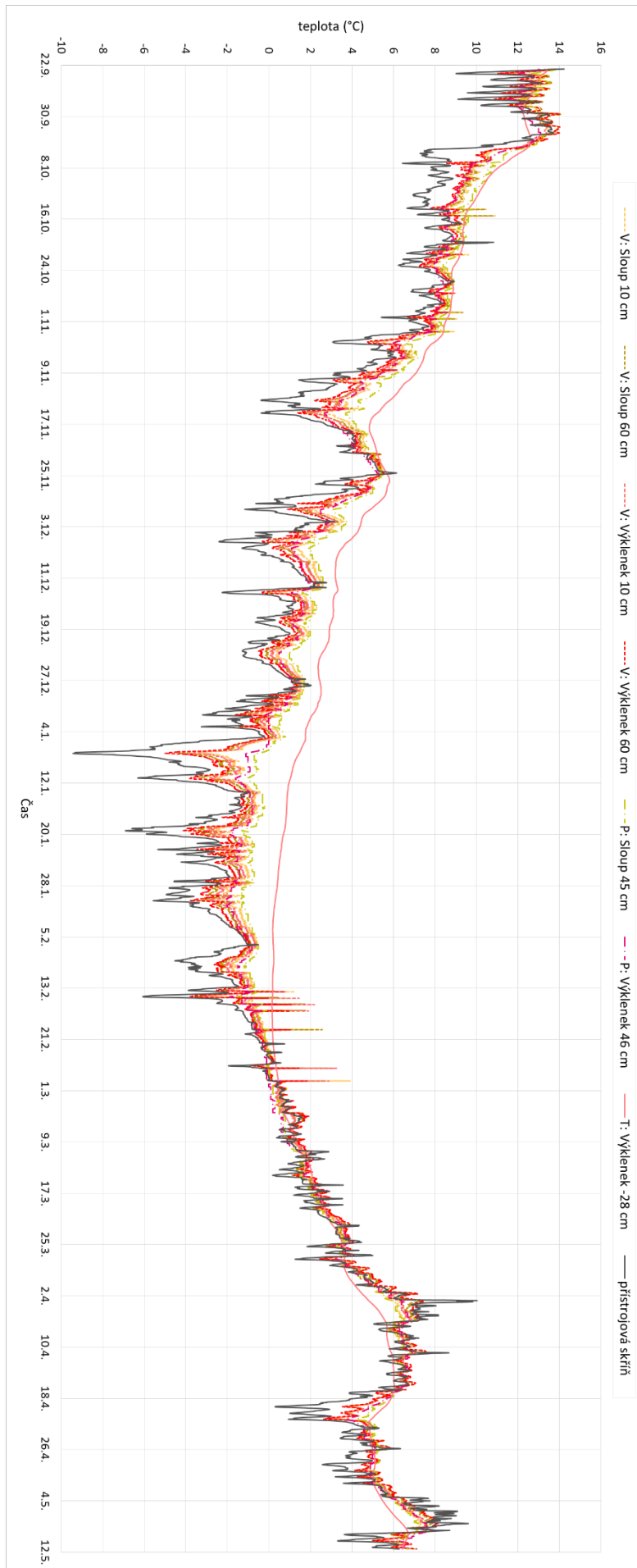
Příloha 1 - řez monitorovacím systémem



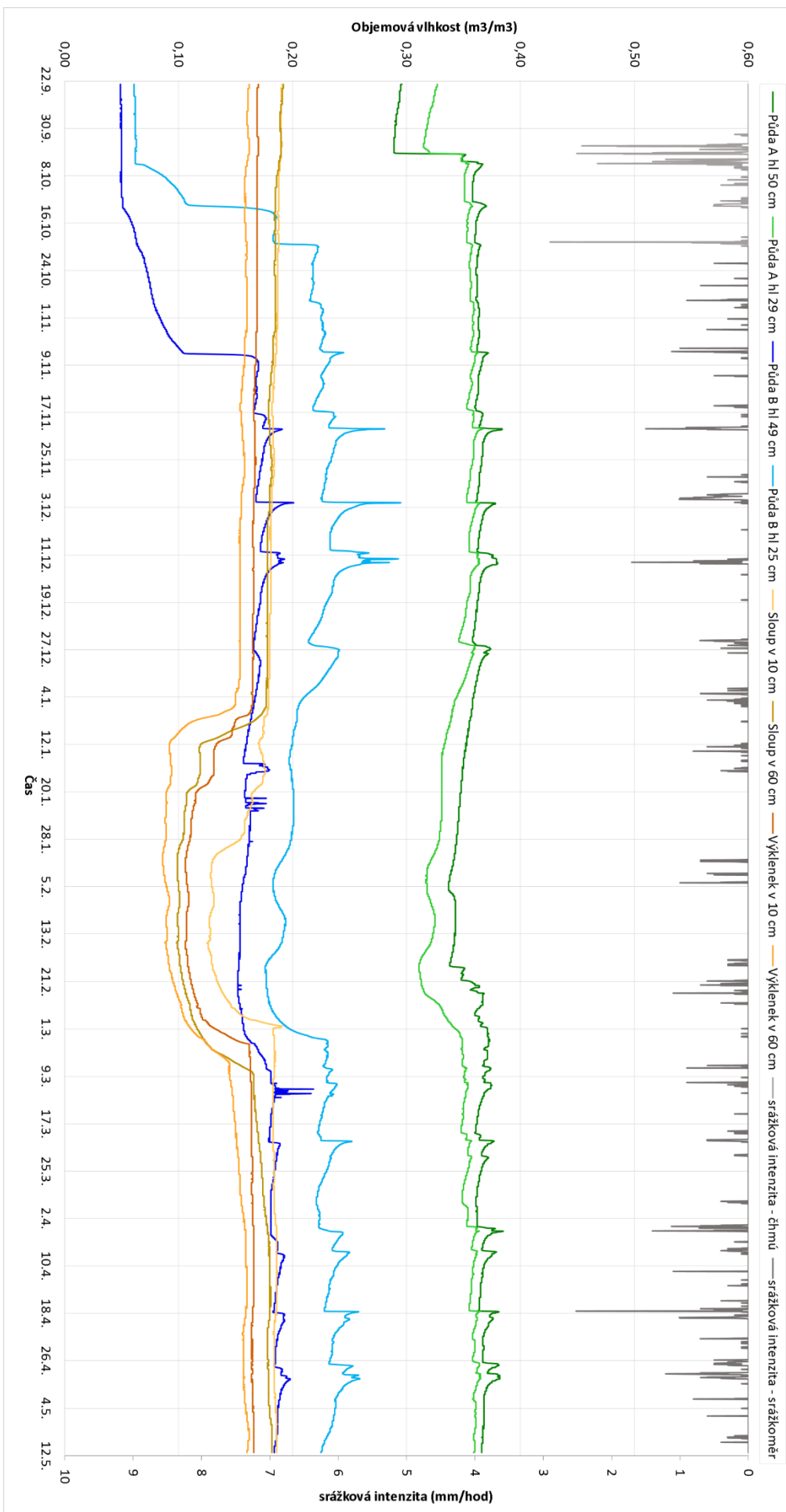
Příloha 2 - hodinové srážkové intenzity a kumulativní srážkové úhrny



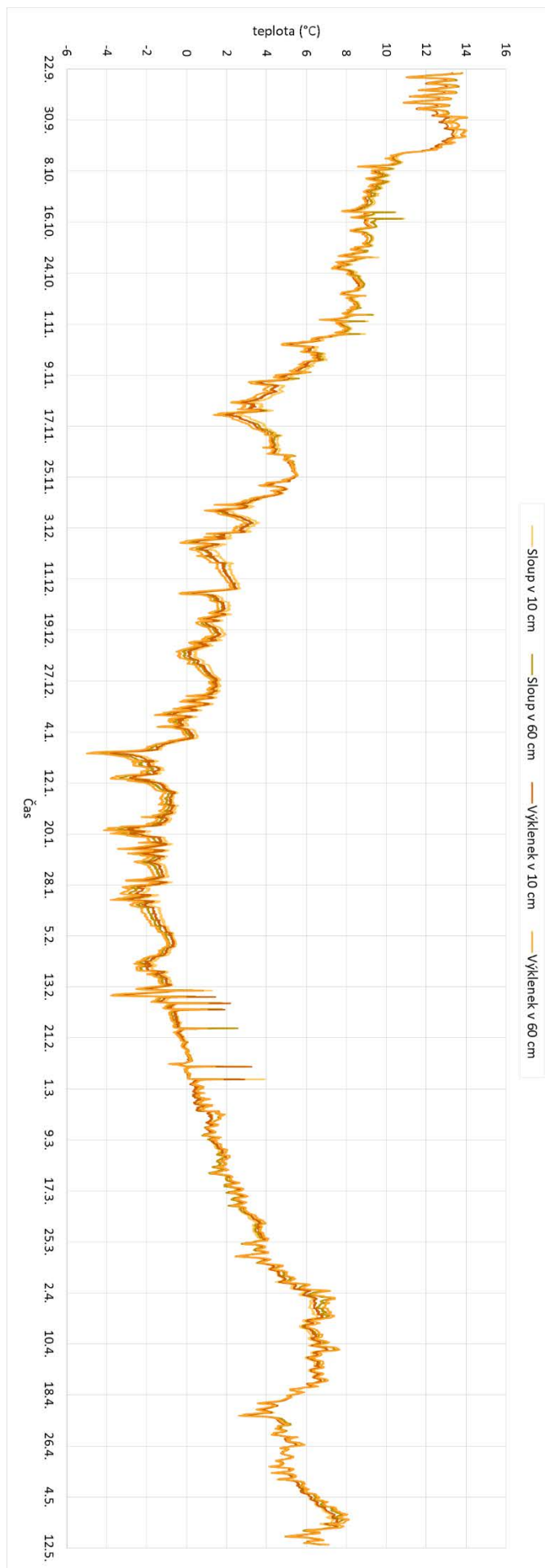
Příloha 3 - průběh teplot ve všech čidlech v exteriéru



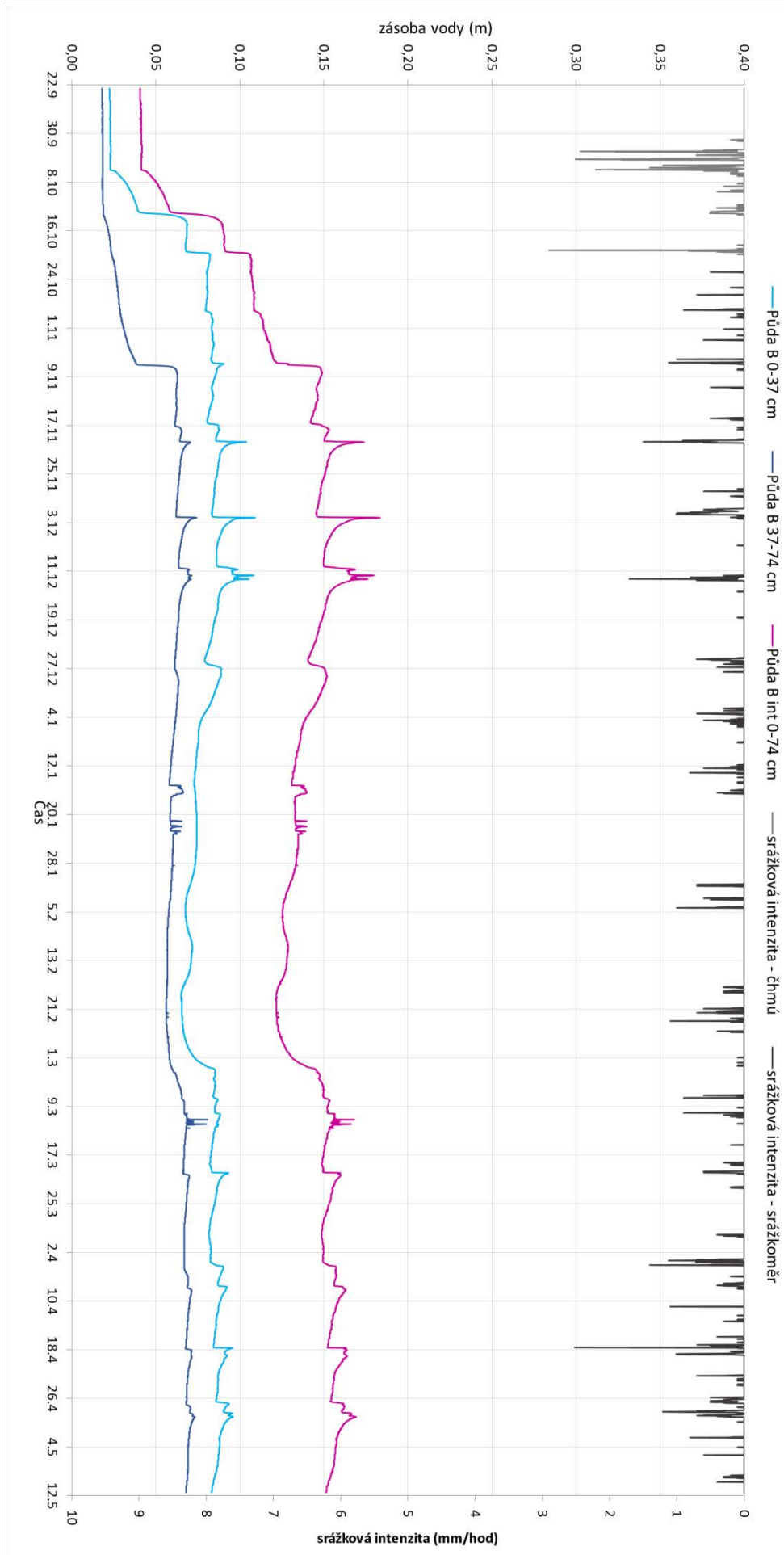
Příloha 4 - průběh teplot ve všech čidlech v interiéru



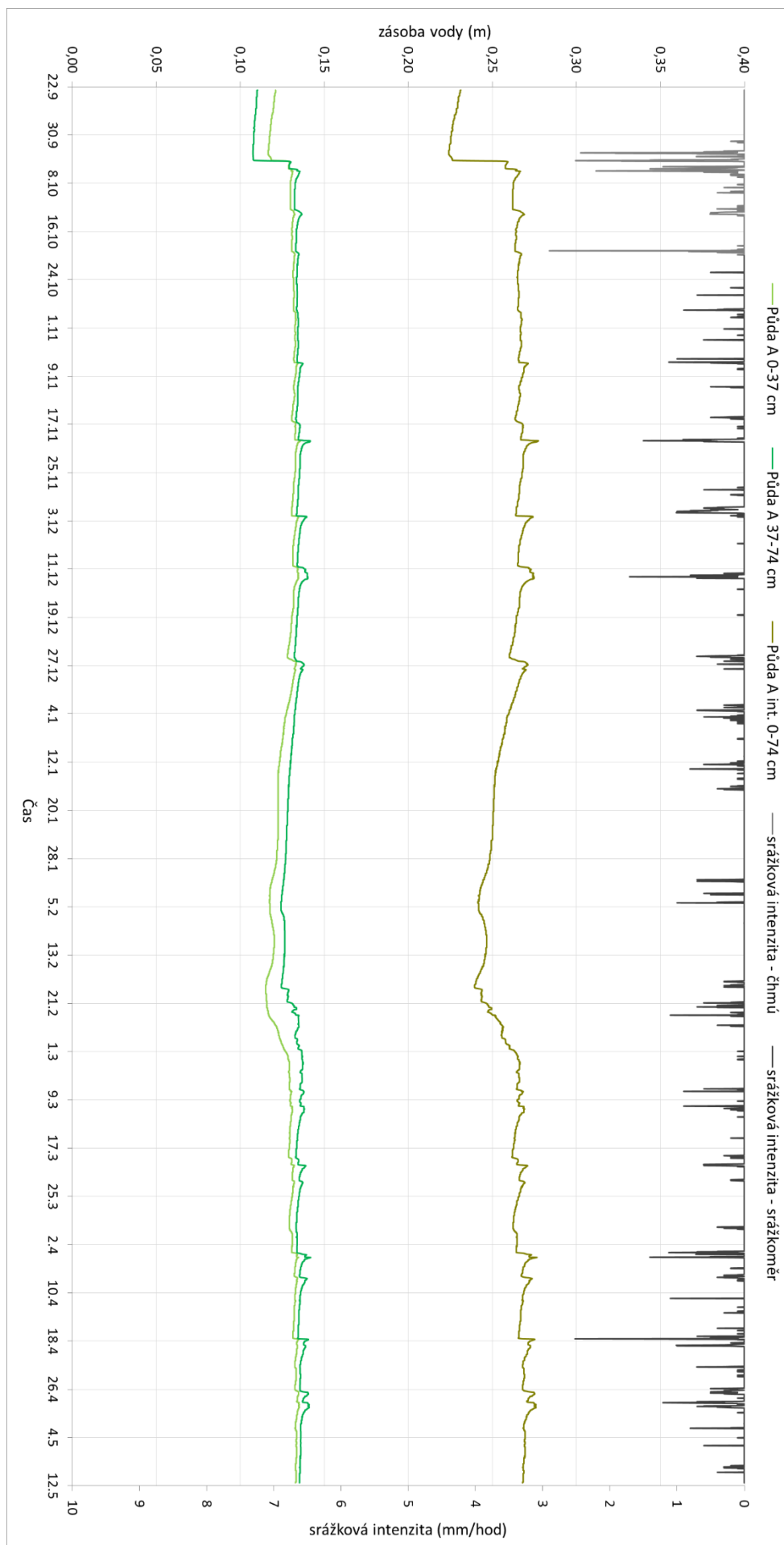
Příloha 5 - průběh naměřených hodnot vlhkosti v porovnání se srážkovými intenzitami



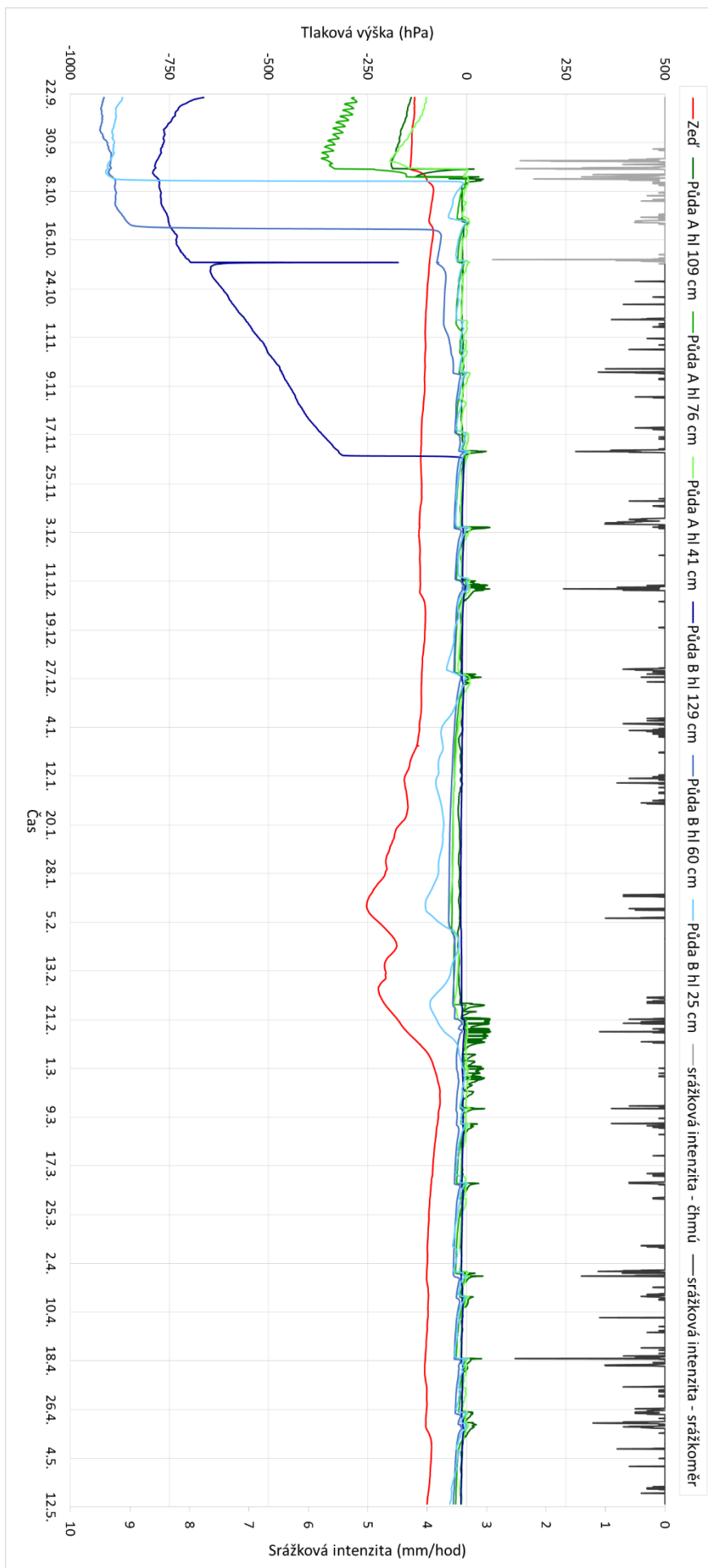
Příloha 6 - teploty naměřené čidly vlhkosti ve zdivu



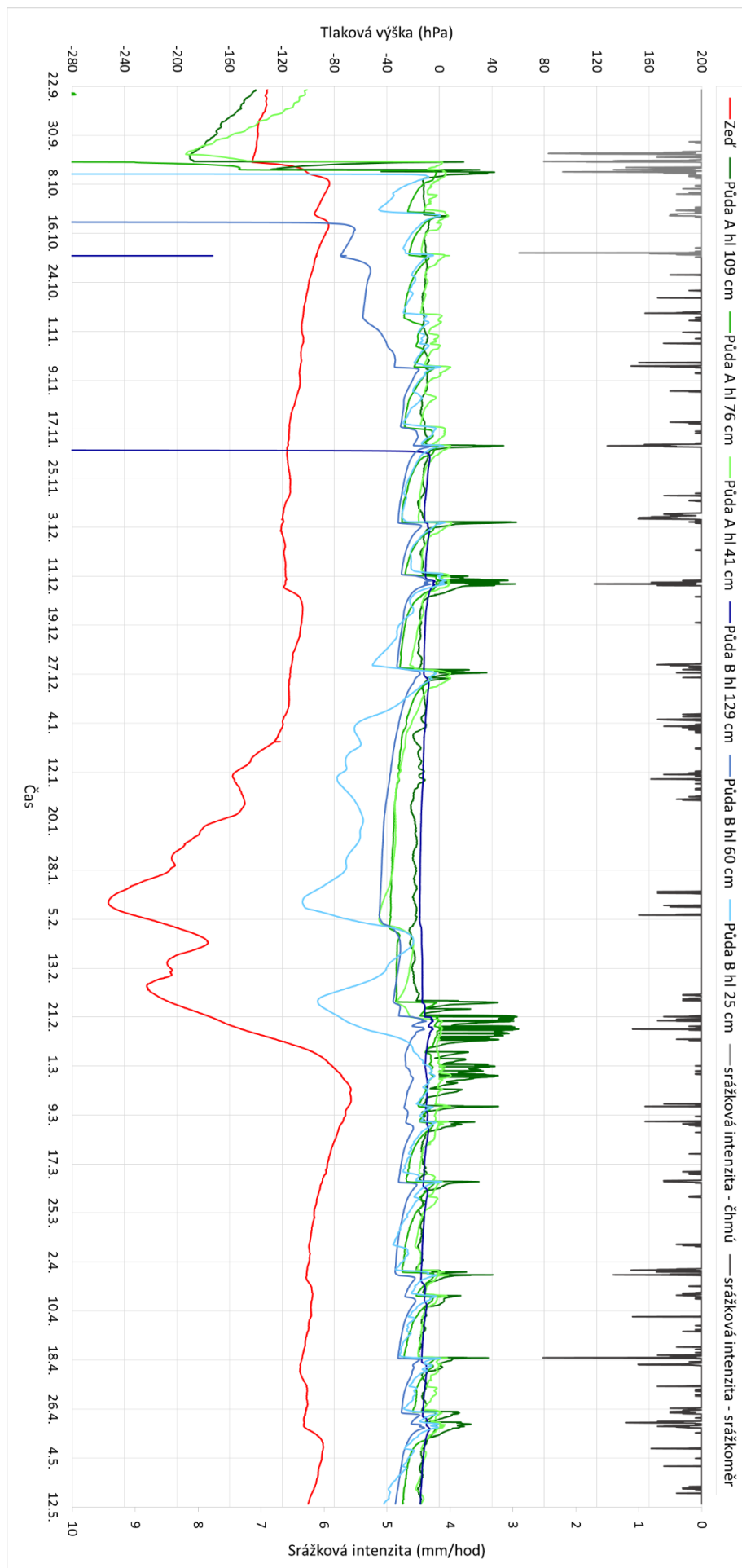
Příloha 7 - hodnoty zásoby vody v půdě na stanovišti B v porovnání se srážkovými intenzitami



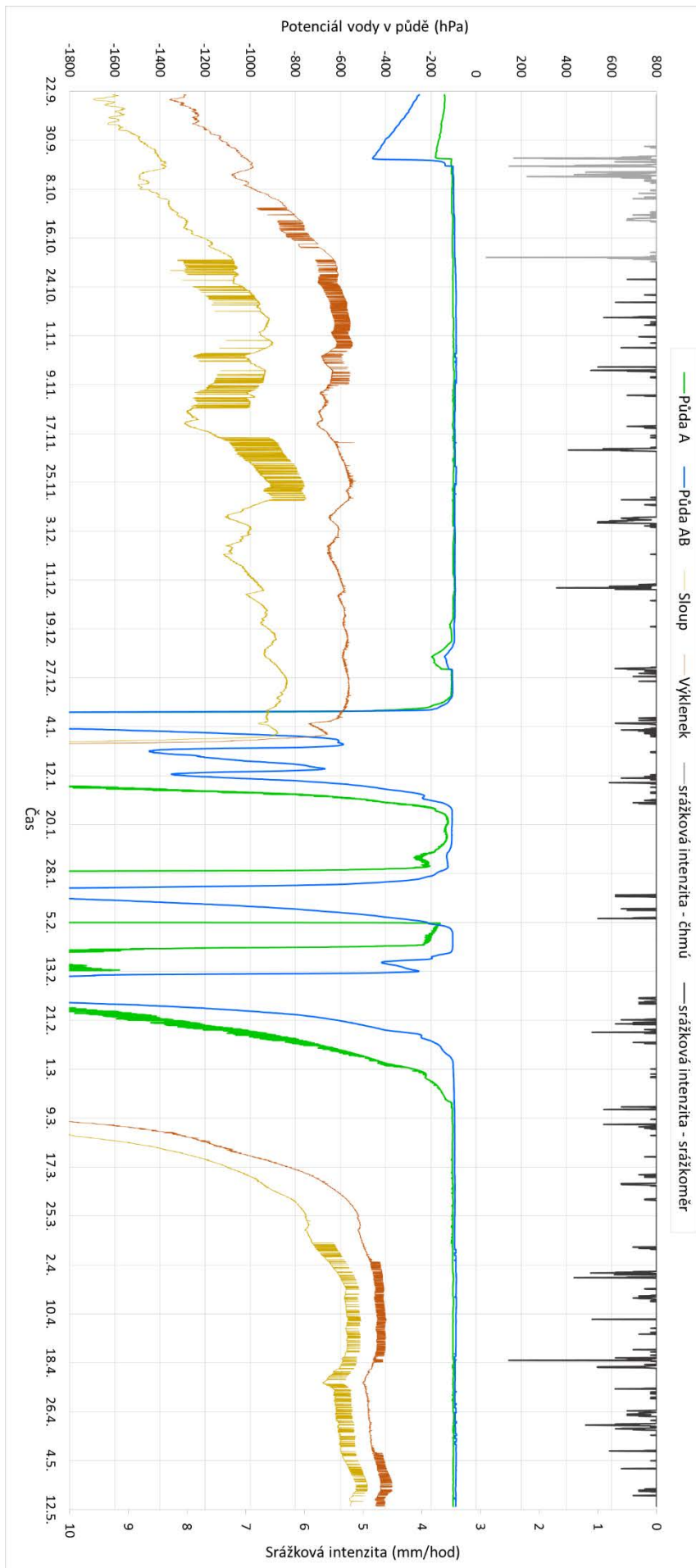
Příloha 8 - hodnoty zásoby vody v půdě na stanovišti A v porovnání se srážkovými intenzitami



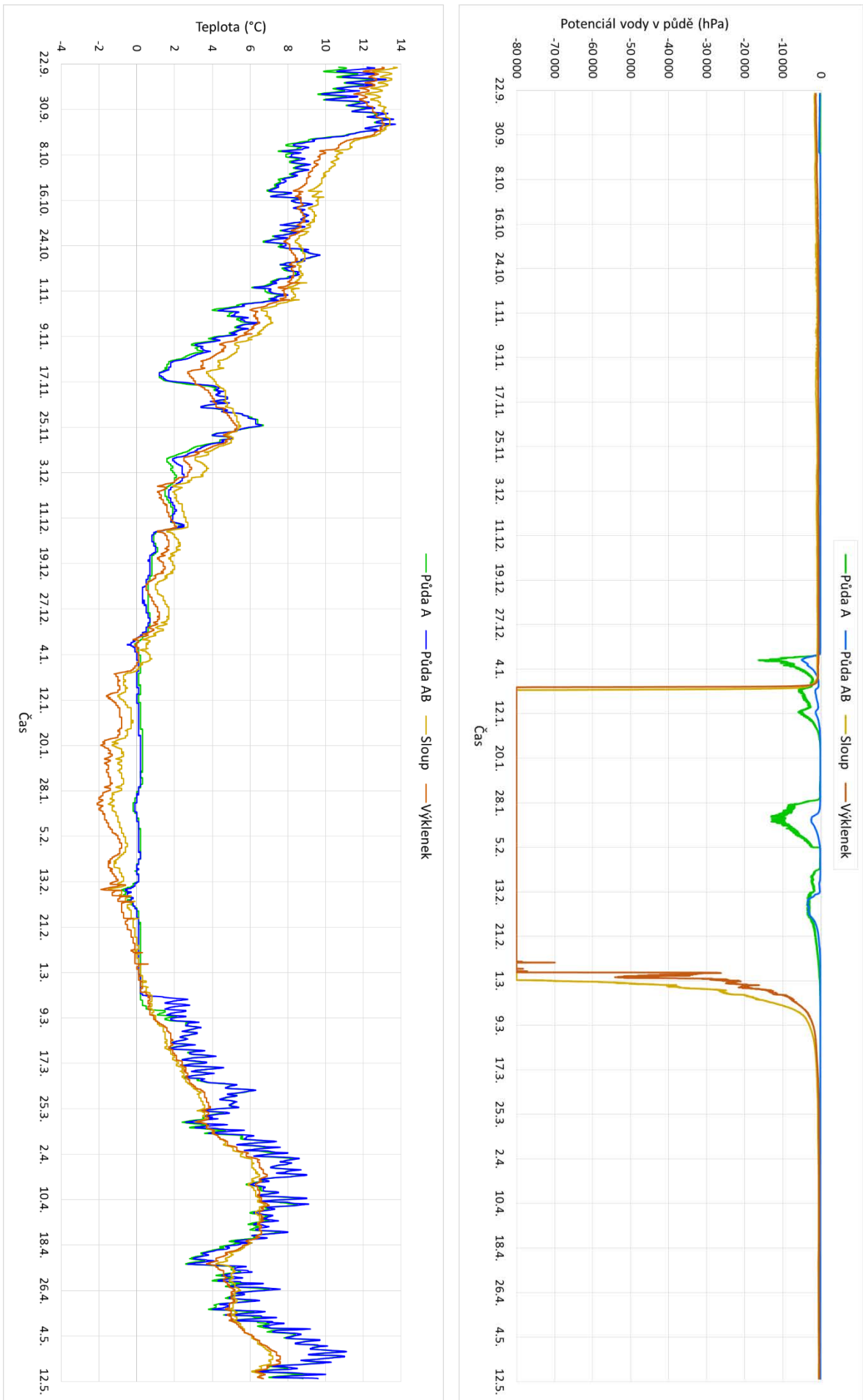
Příloha 9 - průběh hodnot tlakové výšky v porovnání se srážkovými intenzitami



Příloha 10 - průběh hodnot tlakové výšky v porovnání se srážkovými intenzitami – detail



Příloha 11 - průběh hodnot potenciálu půdní vody v porovnání se srážkovými intenzitami



Příloha 12 - průběh chování čidel potenciálu v porovnání s teplotou čidel