

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Hydrologie a hydrogeologie



Bc. Kateřina Kalianková

Metody měření vlhkosti v historickém zdivu archeologického areálu pod III. nádvořím
Pražského hradu

Methods of moisture measurement in the historical masonry of archaeological site
under the III. courtyard of Prague Castle

Diplomová práce

Vedoucí práce: Mgr. Tomáš Weiss

Praha, 2022

Prohlášení

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

V Praze 2. 5. 2022

Podpis

Poděkování

Poděkování patří samozřejmě vedoucímu práce Mgr. Tomášovi Weissovi za jeho cenné rady, obrovskou trpělivost a skvělý přístup. Jsem velmi vděčná za možnost zkusit si psaní odborného článku, což považuji za cennou zkušenost. Ráda bych také poděkovala Mgr. Martinovi Slavíkovi Ph.D. a Mgr. Jakubovi Marešovi za pomoc a rady při měření a příjemné týmové prostředí. Díky patří také RNDr. Ivě Herichové, Mgr. Janě Maříkové Kubkové Ph.D. a kolegům z ÚTAM Ing. Janu Válkovi Ph.D. a jeho týmu za spolupráci. Díky patří také rodině, která mě podporovala po celou dobu mého studia a za všech okolností stála za mnou.

Abstrakt

Tato práce se zabývá stanovováním vlhkosti historického zdiva v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu. Areál je ohrožen zejména solným zvětráváním, které je podporováno zvýšenou vlhkostí zdiva. Vlhkost opukového zdiva byla stanovována na lokalitě raně novověkého mostního pilíře a na dalších vybraných zdech v archeologickém areálu. Cílem práce je analyzovat vybrané metody měření vlhkosti v historických stavebních materiálech a zhodnotit jejich přednosti a nedostatky. Hodnocena je také vhodnost metod pro aplikaci na historicky cenné materiály a stavby. Dalším cílem této práce je analyzovat stav vlhkosti na sledovaných lokalitách a určení zdroje vlhkosti v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu a na základě výsledků navrhnout postup při sledování budoucího vývoje vlhkosti.

Pro sledování vlhkosti byly zvoleny neinvazivní metody: infračervené snímkování povrchu, elektromagnetická metoda a odporová metoda, a z invazivních metod bylo zvoleno podpovrchové měření odporu, TDR a sonda využívající reaktivní barvivo. Souběžně s měřením vlhkosti byly měřeny teploty vzduchu a zdiva a také relativní vlhkost vzduchu, měření bylo doplněno o sledování hladiny podzemní vody, měření objemu skapu z krápníků, sledování konduktivity vody a jejího pH. U metody podpovrchového měření odporu, TDR a měření teploty bylo využito automatické měření a zbylá měření byla prováděna ručně. Na lokalitě raně novověkého mostního pilíře bylo vytyčeno 6 bodů měření, které tvoří vertikální linii, u vybraných zdí v areálu bylo měřeno ve čtvercové síti.

Ze získaných výsledků vyplývá, že vlhkost zdiva mostního pilíře je dlouhodobě stagnující. Velmi dobré výsledky poskytla elektromagnetická metoda MOIST, která je neinvazivní a proto je vhodná pro historicky cenné materiály. Jako zdroj vlhkosti byly identifikovány srážky, které se infiltrují do areálu skrze strop, přes železobetonovou konstrukci nesoucí III. nádvoří. Z hlediska vlivu vlhkosti na zvětrávání materiálů doporučuji omezit průnik vody do areálu technickým zákrokem v podobě obnovení spárování dlažby na III. nádvoří. Pokračující monitoring vlhkosti by mohl podložit účinnost takového opatření.

Klíčová slova: měření vlhkosti zdiva; Pražský hrad; vlhkost; metody měření vlhkosti

Abstract

This work deals with determining the humidity of historical masonry in the archeological area under III. courtyard of Prague Castle. The area is endangered especially by salt weathering, which is supported by increased humidity of the masonry. The moisture content of marl masonry was determined at the site of the early modern bridge pillar and at other selected walls in the archeological area. The aim of this work is to analyze selected methods of measuring moisture in historic building materials and evaluate their advantages and cons. The suitability of methods for application to historically valuable materials and buildings is also evaluated. Another goal of this work is to analyze the state of humidity in the monitored localities and to determine the source of humidity in the archeological area under III. courtyard of Prague Castle and based on the results propose a procedure for monitoring the future development of humidity.

Non-invasive methods of infrared surface imaging, electromagnetic method (MOIST 210B and EM 100), and resistance method (GMR 110) were chosen for humidity monitoring, subsurface resistance measurement, electromagnetic method (TDR), and uranine-probe was chosen from invasive methods of humidity monitoring. Simultaneously with the measurement of humidity, air and masonry temperatures as well as relative humidity were measured, the measurement was supplemented by monitoring the groundwater level, measuring the volume of dripping from stalactites, and monitoring the conductivity of water and its pH. For the method of subsurface resistance measurement, TDR, and temperature measurement were used automatic measurement and the remaining measurements were performed manually. At the site of the early modern bridge pillar, 6 measurement points were marked, which form a vertical line, and the selected walls in the area were measured in a square network.

The obtained results show that the humidity of the masonry of the bridge pillar has been stagnant for a long time. The MOIST electromagnetic method, which is non-invasive and therefore suitable for historically valuable materials, has provided very good results. Rainfall has been identified as a source of moisture, which infiltrates the area through the ceiling, through a reinforced concrete structure bearing III. courtyard. From the point of view of the influence of humidity on the weathering of materials, I recommend limiting the penetration of water into the area by a technical intervention in the form of restoring the grouting of the paving to III. courtyard. Continued humidity monitoring could substantiate the effectiveness of such a measure.

Key words: masonry moisture measurement; Prague Castle, humidity; humidity measurement methods

Obsah

1 ÚVOD	1
2 TEORETICKÁ ČÁST	3
2.1 Historické stavební materiály	3
2.2 Vlhkost.....	4
2.3 Vlivy vlhkosti na stavební materiály	5
2.3.1 Mrazové zvětrávání.....	5
2.3.2 Zvětrávání vlivem krystalizace solí	6
2.3.3 Zvětrávání vlivem činnosti mikroorganismů	9
2.4 Metody měření vlhkosti v materiálech	10
2.4.1 Infračervená tomografie (termometrie, termografie)	10
2.4.2 Metoda tepelných pulsů	11
2.4.3 Elektromagnetické metody	12
2.4.4 Odporové metody.....	14
2.4.5 Tenzometrie	16
2.4.6 Sonda využívající reaktivní barvivo (Uranine-probe)	18
2.4.7 Další metody pro měření vlhkosti.....	19
PRAKTICKÁ ČÁST	21
3 METODIKA.....	21
3.1 Popis lokality	21
3.2 Měření.....	26
3.3 Kalibrace metod.....	31
3.3.1 Kalibrace měření podpovrchového odporu.....	32
3.3.2 Kalibrace měření povrchového odporu.....	34
3.3.3 Kalibrace elektromagnetické metody MOIST	35
3.3.4 Kalibrace elektromagnetické metody TDR	37
4 VÝSLEDKY	38
4.1 Odporová metoda	38
4.1.1 Podpovrchové měření odporu	38
4.1.2 Povrchové měření odporu GMR 110.....	41
4.2 Metoda TDR	42
4.3 Sonda využívající reaktivní barvivo	43
4.4 Elektromagnetická metoda	44
4.5 Infračervené snímkování	47

4.6 Měření vlhkosti vybraných zdí v archeologickém areálu.....	49
4.6.1 Měření elektromagnetickou metodou EM 100	50
4.6.2 Měření odporovou metodou GMR 110.....	51
4.6.3 Měření elektromagnetickou metodou MOIST 0-15	53
4.7 Další měření.....	54
4.7.1 Relativní vlhkost vzduchu a teplota na lokalitě mostního pilíře	54
4.7.2 Měření konduktivity.....	56
4.7.3 Měření pH	60
4.7.4 Měření hladiny podzemní vody a hladiny v kalužích	61
4.7.5 Měření objemu skapu.....	63
4.8 Meteorologická data	63
5 DISKUZE.....	70
5.1 Rozbor výsledků	70
5.1.1 Vlhkostní situace pilíře raně novověkého mostu	70
5.1.2 Vlhkostní situace vybraných zdí	78
5.2 Srovnání použitých metod z hlediska jejich vhodnosti aplikace na historické zdivo	79
5.3 Zdroj vlhkosti pod III. nádvořím Pražského hradu.....	82
5.4 Doporučení pro další sledování vývoje vlhkosti	84
6 ZÁVĚR.....	86
7 LITERATURA.....	88
7.1 Internetové zdroje	94
8 Seznam obrázků	94
9 Seznam tabulek	95
PŘÍLOHY.....	96

1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá problematikou vlhkosti v historických stavebních materiálech, vlivy vlhkosti na stavební materiály a také metodami stanovení vlhkosti ve stavebních materiálech. Na tuto problematiku existuje mnoho pohledů, o vlhkost ve stavebních materiálech se zajímají zejména odborníci na stavebnictví a o historické materiály se zajímají zejména památkáři. Samotné měření vlhkosti je pak spíše doménou přírodovědných a technických oborů výzkumu. Na výzkumu archeologického areálu pod Pražským hradem se kromě týmu z Přírodovědecké univerzity podílel také Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky a Archeologický ústav Akademie věd České republiky. Tato diplomová práce je součástí řešení projektu Technologické agentury ČR *“Skryto pod povrchem. Archeologické terény Pražského hradu, jejich ochrana a prezentace v moderním světě”*, na kterém se podílí všechny zmíněné instituce. O části zde prezentovaného výzkumu byl publikován článek (Weiss et al., 2022), který je součástí příloh (příloha 9). Na psaní článku jsem se aktivně podílela, zejména na jeho teoretické části. V diplomové práci jsou prezentována data za delší období oproti článku a zároveň je zde zařazeno měření dalších vybraných zdí v archeologickém areálu a doplňující měření.

Archeologický areál se potýká dlouhodobě se zvýšenou vlhkostí zdiva v některých lokalitách. V návaznosti na zvýšenou vlhkost je historické zdivo ohrožováno solným zvětráváním a zvětráváním vlivem činnosti mikroorganismů. Z důvodu ochrany lokality a možnosti budoucích opatření památkové péče považuji za důležité odhalit zdroj vlhkosti zdiva, aby mohlo být zamezeno zvětrávacím procesům. Srovnávání výsledků různých metod, jejich výhod a nevýhod, by mělo pomoci při rozhodování archeologů a památkářů, kteří potřebují na různých lokalitách měřit vlhkost hornin a stavebních materiálů. K problematice výběru vhodné metody měření vlhkosti sice existuje zahraniční literatura, ale mnohdy nenabízí informace o míře invazivnosti měření. Literatura v českém jazyce by mohla pomoci přiblížit tuto problematiku širší české archeologické a památkářské komunitě, což se týká zejména publikovaného článku.

Cílem této práce je analyzovat vybrané metody měření vlhkosti v historických stavebních materiálech, zhodnotit jejich přednosti a nedostatky a jejich vhodnost pro aplikaci na historicky cenné materiály a stavby. Praktickým cílem této práce je pak analyzovat stav a zdroj vlhkosti v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu a následně navrhnout doporučení postupu při sledování dalšího vývoje vlhkosti. Výzkumná hypotéza

předpokládá, že obsah vlhkosti ve zdivu bude reagovat na chod ročních období, tedy zejména na změny teplot vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu. Další hypotézou je, že primárním zdrojem vlhkosti jsou srážky dopadající na III. nádvoří Pražského hradu.

V oblasti měření vlhkosti již bylo provedeno mnoho výzkumných prací. Část použitých metod byla původně konstruována pro účely měření vlhkosti v půdě, jejich aplikace na horniny není zejména v posledních třech dekáдах ojedinělá, ovšem měření vlhkosti v historickém zdivu má svá specifika, nároky jsou kladeny zejména na neinvazivnost měření. Principy a postupy měření vlhkosti v historickém zdivu jsou známy, například pro pískovcové či cihlové zdivo. Opuka je specifická hornina střední Evropy, práce spolu s publikovaným článkem přispívá k rozšíření znalostí o měření vlhkosti v tomto materiálu a poskytuje přehled dostupných nepřímých metod aplikovatelných na historické kamenné materiály. Využita byla také nová metoda měření hloubky výparové fronty vyvinutá na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy, která byla pro výzkum vlhkosti na historickém zdivu použita poprvé.

Pro měření byly využity nepřímé metody stanovení vlhkosti a přímá gravimetrická metoda pro kalibraci metod. Z nepřímých metod byly využity invazivní metody a to podpovrchové měření odporu, TDR a sonda využívající reaktivní barvivo, z neinvazivních metod bylo použito infračervené snímkování elektromagnetická metoda a odporová metoda. Zároveň byly měřeny teploty vzduchu a zdiva, relativní vlhkost vzduchu a další doplňková měření.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Historické stavební materiály

Pojem historické stavební materiály zahrnuje velké množství materiálů. Typickými stavebními materiály jsou dřevo a kámen, zejména horniny pískovec, granit, mramor či vápenec. Ze jmenovaných materiálů je hojně využívaným stavebním kamenem pískovec. Tato sedimentární hornina byla využita při stavbě katedrály sv. Víta na Pražském hradě, Karlova mostu, Národního divadla a dalších významných historických staveb. Pískovec je dobře opracovatelný kámen použitelný jako zdící materiál, ale také je vhodný pro účely sochařské. Tato hornina je porézní a voda snadno vniká do jejího pórového prostoru, což může vést k narušování pískovcového materiálu. Šrámek (2009) studoval provenienci pískovců použitých při budování staveb v areálu Pražského hradu. Došel k závěru, že převažují zápské a nehvizdské pískovce, které byly na místo stavby dováženy. Pískovec byl na Pražském hradě využíván zejména v období gotiky a v románském období (Šrámek, 2009).

Granit neboli žula nebyl pro historické stavby využíván tak hojně jako pískovec, opuka a vápenec. Příkladem využití této vyvřelé horniny je obelisk na III. nádvoří Pražského hradu, který je tvořen mrákotínskou žulou. Granit díky své tvrdosti a náročnosti na opracování byl častěji využíván až od 18. století. Oproti pískovci a opuce je granit odolnější vůči povětrnostním vlivům (Netopilová, 2004). Granity byly využívány pro zdící práce, ale také jako obkladové materiály vnitřních a vnějších prostor budov.

Krystalický vápenec, tedy mramor byl využíván ve vnitřních i venkovních prostorech zejména jako obkladový a sochařský materiál. Jedná se o metamorfovanou horninu. Hlavní uplatnění vápence jako stavebního materiálu je pro výrobu pojiv, například malty a jako zdící materiál (Netopilová, 2004).

Pro tuto diplomovou práci je stěžejní materiál využitý při stavbě raně novověkého mostu a dalších staveb a fragmentů nacházejících se pod III. nádvořím Pražského hradu. Tímto materiálem je zejména opuka. Opuka je místní název pro horninu petrograficky popsanou jako jílovito-vápenatý silicit (Přikryl et al., 2017). Název opuka vychází z charakteristické vlastnosti tohoto materiálu a to pukání a odlupování vrstev. Jedná se o jemnozrnnou, sedimentární horninu z období svrchní křídy (Přikryl et al., 2003; Přikryl et al. 2017; Slížková et al., 2021). Tento kámen byl hojně využíván při stavbě pražských památek,

Pražský hrad nevyjímaje. Opuka těžená v Praze a jejím blízkém okolí má nazlátlou barvu a běžně se označuje jako Pražská opuka.

Opukový kámen je díky svým vlastnostem poměrně náchylný k erozi, která je ovlivněna zejména vysokou porozitou (Příkryl et al., 2017; Slížková et al. 2021). Do pórů vniká voda, která pak hraje zásadní roli nejen při mrazovém zvětrávání, ale také je pórový prostor opuky často postižen krystalizací rozpuštěných solí, která vede k degradaci materiálu (Příkryl et al., 2017; Slížková et al. 2021). Krystalizace solí v pórech vede k takzvanému druhotnému cementování (Příkryl et al., 2017), což je proces, při kterém dochází ke krystalizaci nových fází minerálů, např. sádrovce (Příkryl et al., 2017), které mají vliv na mechanické vlastnosti stavebního kamene v mikroměřítku a vedou také k vzniku mikrotrhlin na kontaktu zasolené a nezasolené oblasti (Slížková et al. 2021).

Výše zmíněný proces vzniku mikrotrhlin nemusí souviset pouze s druhotným cementováním, ale jak zmiňují Příkryl et al. (2017), je podpořen také hydrotermálním napětím, které vzniká při rychlých změnách relativní vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu.

Chemické a fyzikální vlastnosti opukového kamene, jehož vlhkost je v praktické části této práce zkoumána, analyzovali Slížková et al. (2021) a publikovali ve výzkumné zprávě. Autoři se také pokusili odhalit původ opuky využitě pod III. nádvořím, na základě porovnání fyzikálních vlastností kamene. Z jejich výsledků se zdá jako pravděpodobné, že kámen byl těžen v lokalitě na pražském Strahově a na Bílé Hoře v Motole. Nicméně tyto závěry nelze jednoznačně potvrdit, zejména kvůli absenci referenčních vzorků, z jmenovaných historických lomů. Tyto lomy jsou již zaniklé a není tedy možné odebrat čerstvé vzorky kamene pro srovnání.

Kromě kamenných stavebních materiálů se používalo hojně dřevo. V archeologickém areálu pod III. nádvořím nacházejí fragmenty dřevěných částí stavebních konstrukcí. V rámci této diplomové práce jsem se nezaměřovala na biologicky rozložitelné materiály a na dřevěných fragmentech jsem neprováděla žádná měření ani pokusy, proto jejich bližší popis do práce není začleněn.

2.2 Vlhkost

U anorganických stavebních materiálů se voda vyskytuje v pórovém prostoru, na povrchu materiálu, nebo vázaná na obsažené minerály a může se vyskytnout v kapalném, plynném nebo pevném skupenství. Transport vody materiálem se řídí kapilárními jevy. Díky kapilárním silám se může voda do určité míry zdivem pohybovat vzhůru navzdory gravitaci.

Voda v kapilárním prostoru působí jako transportní médium, napomáhá například transportu solí, nebo mikroorganismů. Přítomnost vlhkosti ve stavebním materiálu do velké míry souvisí s fyzikálním a chemickým rozrušováním materiálu a napomáhá procesům, které k poškození vedou. Mnohdy přítomnost vody degradační procesy eskaluje. Procesům degradace stavebních materiálů vlivem přítomnosti vlhkosti je věnována následující část textu.

2.3 Vlivy vlhkosti na stavební materiály

Vlhkost ve stavebním materiálu je problematická, protože může vést k jeho znehodnocení. Hraje větší či menší roli v následujících procesech zvětrávání materiálu:

- a) mrazové zvětrávání
- b) zvětrávání vlivem krystalizace solí
- c) zvětrávání vlivem činnosti mikroorganismů

V podmínkách archeologického areálu pod III. nádvořím Pražského hradu, nebyla po dobu měření naměřená teplota klesající pod bod mrazu, nicméně nelze vyloučit, že k vystavení mrazu došlo počátkem 20. století, kdy byl archeologický areál odkryt. Druhá zmíněná možnost, tedy krystalizace solí se zkoumané lokality týká výrazněji. Činnost mikroorganismů je ve sledované lokalitě také možná.

2.3.1 Mrazové zvětrávání

Porušení materiálu v důsledku mrazového zvětrávání způsobují dva hlavní děje a to objemová expanze ledu a segregace ledu (Matsuoka a Murton, 2008). Při mrznutí vody dochází ke změně jejího objemu o 9 % (Matsuoka a Murton, 2008; Hall a Hoff, 2012). Nárůst objemu při zmrznutí má za následek nárůst hydrostatického tlaku, který působí na materiál zevnitř a dochází k narušení struktury materiálu. V porézních materiálech obvykle nejprve zamrzá voda ve velkých pórech a postupně zamrzají i střední a malé póry. Některé malé póry a mikropóry nemusí zamrznout vůbec, díky tlaku, který je na ně vyvíjen, voda je tedy pouze podchlazená (Matsuoka a Murton, 2008; Hall a Hoff, 2012). Když kapalná voda migruje pórovým prostorem, může dojít k segregaci ledu, za předpokladu, že mrznutí probíhá pomalu, například při dlouhodobých teplotách lehce pod bodem mrazu. Při tomto procesu voda migruje k již zmrzlým oblastem materiálu v důsledku teplotního gradientu a vzniklého sání. Voda se tedy hromadí ve velkých pórech a vznikají ledové čočky (Hall a Hoff, 2012). Segregace ledu v pórovém prostoru je považována za velmi podstatný faktor mrazového

zvětrávání, napomáhá tvorbě a pozdější progradaci trhlin (Matsuoka a Murton, 2008; Hall a Hoff, 2012).

Ne vždy platí, že voda zmrzne ve všech velkých pórech, může dojít k uzavření vody ve větším póru, přičemž okolní středně velké póry zmrznou, ale voda ve velkém póru ne. Dojde k nárůstu tlaku na vodu v nezamrzlém póru což má za následek pokles teploty, při které voda zmrzne. Vlivem tlaku může dojít až k praskání materiálu, vznikají takzvané hydrofraktury, které při opakovaných cyklech zamrzání a rozmrzání dále progradují (Matsuoka a Murton, 2008; Hall a Hoff, 2012). Hall a Hoff (2012) dodávají, že k nejvýraznějšímu poškození materiálu dochází v zóně, která zamrzá jako poslední. U různých staveb proto nemusí být poškození na první pohled patrné. Řídicím faktorem je obsah vody, pokud by v kamenné zdi byl obsah vody nejvyšší při povrchu, kde by zároveň mohla voda zmrznout rychle v místě, kde se zrovna nachází, pak by poškození materiálu zdi bylo největší právě při povrchu (Matsuoka a Murton, 2008).

Proces mrazového zvětrávání, který běžně probíhá u přírodních a stavebních materiálů vystavených povětrnostním vlivům, byl studován v terénu i v laboratorních podmínkách (Přikryl et al., 2003; Bruthans et al., 2017). V přírodě a v exteriérech staveb probíhají tyto procesy cyklicky po mnoho let, v laboratořích jsou urychleny opakovaným zmrazováním a rozmrazováním vzorků. Vliv mrazových procesů na zvětrávání byl studován například na opuce, na přírodním pískovci a na dalších horninách v horských i nížinných oblastech (Přikryl et al., 2003; Matsuoka a Murton, 2008; Bruthans et al., 2017). V laboratorních studiích byly vzorky rozmrazovány ve vodní lázni. Mezi jednotlivými cykly byly vzorky váženy, případně je lze podrobit dílčím zkouškám pevnosti, či pórovitosti (Přikryl et al., 2003; Bruthans et al., 2017). Mrazové zkoušky mohou být prováděny i se zatížením vzorků při samotném testu (Bruthans et al. 2017). Drobná nepřesnost pokusů oproti reálnému prostředí tkví v tom, že v reálném prostředí materiál obvykle zamrzá jen z jedné strany, pokud se nejedná o volně stojící sochu či sloup. Při pokusech se používá všesměrné zmrazení, které by se u materiálu užitého například pro stavbu zdi nenastalo (Hall a Hoff, 2012).

2.3.2 Zvětrávání vlivem krystalizace solí

Solné zvětrávání je velice komplexní problematika, která zahrnuje zkoumání jednotlivých solí, synergické působení solí, transposport solí, vznik sekundárních fází a nedílnou součástí výzkumu je také vliv solí na stavební materiály (Charola, 2000; Huinink et al., 2004; Frazen a Mirwald, 2009; Hall a Hoff, 2012; Bruthans et al., 2017; Přikryl et al.

2017). Solné zvětrávání bylo zkoumáno laboratorně, ale i v případových studiích z terénu (Přikryl et al., 2017). Laboratorní studie jsou někdy omezeny na konkrétní soli, ovšem v reálném prostředí pozorujeme synergické působení mnoha solí.

Soli se do roztoku dostávají vyluhováním ze samotného stavebního materiálu, vyluhování z vrstvy prachu usazené na povrchu stavebního materiálu, z podzemních vod, jsou obsažené ve vzduchu, případně také v atmosférických srážkách (Frazen a Mirwald, 2009; Hall a Hoff, 2012). Obvykle jsou soli v materiálu transportovány v roztoku, některé soli se mohou šířit materiálem i spolu se vzdušnou vlhkostí, ve které jsou obsaženy (Charola, 2000; Frazen a Mirwald, 2009; Hall a Hoff, 2012). Kromě přirozených cest, je přísun solí do materiálu ovlivněn také lidskou činností, například znečištěním ovzduší, nebo z posypových solí (Charola, 2000). Pokud je relativní vlhkost vzduchu vyšší než rovnovážná relativní vlhkost soli (tabulka 1), může dojít k vázání vlhkosti do soli, tato schopnost se nazývá hygroskopicitá. Jedná se o fyzikální navázání vlhkosti ze vzduchu na sůl, nikoli chemické navázání (Diaz Gonçalves et al. (2006); Oguchi a Yu, 2021).

Tabulka 1. Přehled rovnovážných relativních vlhkostí vybraných solí při 20 °C. Převzato z Diaz Gonçalves et al. (2006)

Sůl	RH _{eq} při 20°C (%)
NaCl	75,47
KCl	85,11
NaNO ₃	75,36
KNO ₃	94,62
K ₂ SO ₄	97,59
K ₂ CO ₃	43,16
Na ₂ SO ₄ . 10H ₂ O	93,6
Na ₂ CO ₃	91,6
CaSO ₄ . 2H ₂ O	99,6

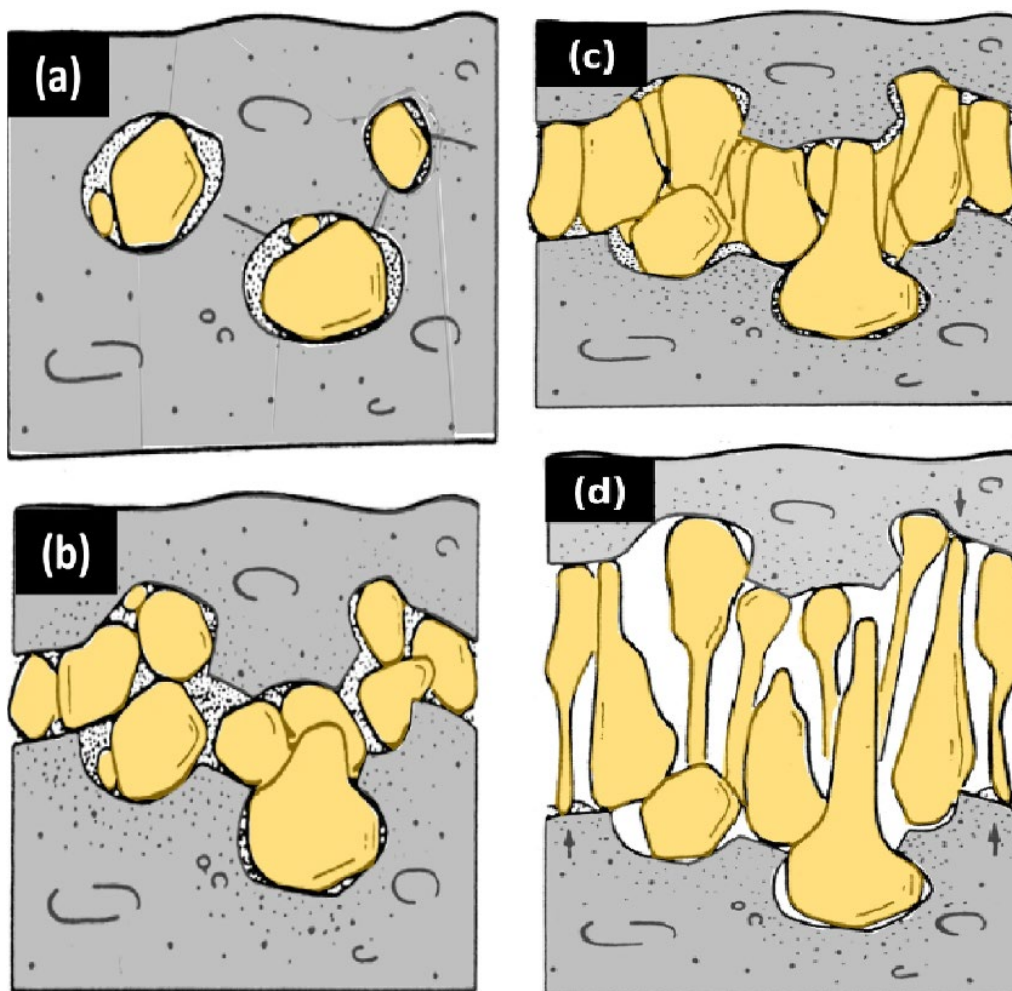
Samotné soli v roztoku materiál nepoškozují, k tomu dochází až při jejich krystalizaci nebo při jejich hydrataci. Frazen a Mirwald (2009) ve své práci poukázali na to, že různé soli, krystalizují při různých hodnotách relativní vlhkosti vzduchu, což činí celou problematiku solného zvětrávání ještě komplexnější.

Ke krystalizaci dochází zejména při vysoušení materiálu, kdy se voda odpařuje z pórů a dochází k tvorbě agregátů a krust (Obr. 1a), při růstu krystalů solí dochází k mechanickému narušování horniny a progradaci puklin (Obr. 1b, 1c, 1d). Soli se usazují pod povrchem, obvykle v místech, kam dosahuje takzvaná výparová fronta (Hall a Hoff, 2012). Výparová fronta je oblast pod povrchem materiálu kde probíhá podpovrchový výpar. Odděluje zónu obsahující kapilární vlhkost (kapalnou vodu) a suchou zónu při povrchu (Weiss et al., 2020). Výparová fronta může v některých případech dosáhnout až k povrchu a sůl se v takovém případě objevuje na povrchu ve formě takzvaných efflorescencí. Sůl vykrystalizovaná na povrchu může díky svým hygroskopickým vlastnostem pohlcovat vzdušnou vlhkost a tím se zvyšuje přísun vody do materiálu. Na základě tohoto procesu může docházet ke gradaci procesu a dalšímu zasolování stavebního materiálu, což má za následek rozsáhlejší poškození (Charola, 2000; Hall a Hoff, 2012). Obecně je však problematičtější krystalizace solí uvnitř materiálu, kdy je materiál mechanicky poškozován krystalizací, krystalizace na povrchu vede spíše k zachytávání vlhkosti než ke zvětrávání jako takovému. Huinink et al. (2004) ve své studii zjistili, že krystalizace probíhá ve větší míře tam, kde je výpar pozvolnější, než v místech kde se vlhkost z materiálu vypaří rychle. Ze studie také vyplývá přímo úměrná závislost množství nahromaděné soli v místech, kde dochází k výparu na množství odpařené vody. Množství odpařené vody pak závisí na rychlosti výparu. Svou roli hrají pravděpodobně také cyklické změny relativní vlhkosti vzduchu, které mohou vést k cyklické krystalizaci a rozpouštění solí (Frazen a Mirwald, 2009; Oguchi a Yu, 2021).

K poškození stavebního materiálu může dojít také hydratací krystalů solí. Při hydrataci dochází k rozpínání roztoku při změně skupenství, což způsobuje tlak, který může vést až k porušení materiálu (Charola, 2000).

Pro stanovení konkrétních fází solí, tedy rozpuštěných i pevných forem lze využít více metod, například rentgenovou difrakci či kvantitativní analýzu množství celkových rozpuštěných látek (Bruthas et al., 2017). Určení konkrétní fáze soli může napomoci při určování procesů probíhajících v materiálu.

Vlivem solného zvětrávání dochází k tvorbě solných výkvětů a krust na povrchu materiálu. Výše popsané procesy mění jak estetickou tak fyzikální kvalitu materiálu, dochází zejména k tvorbě šupinek na povrchu a jejich odlupování, případně k drolení materiálu (Charola, 2000).



Obr. 1. Model procesu rozrušení materiálu vlivem krystalizace solí (převzato a upraveno z Zehnder a Arnold 1989).

2.3.3 Zvětrávání vlivem činnosti mikroorganismů

Přítomnost vody může podporovat činnost mikroorganismů, které se podílí na zvětrávání stavebního materiálu. V některých případech se nemusí jednat pouze o mikroorganismy, ale například také o řasy, houby, mechy či lišejníky porůstající vzdušnou část zdiva. Dle Bellinzoni et al. (2013) je pro růst řas na povrchu stavebního zdiva limitujícím faktorem přítomnost vody, ovšem pro růst vyšších rostlin je více limitujícím faktorem vzdušná vlhkost. Nicméně i pro vyšší rostliny je určitá míra vlhkosti ve zdivu nutná.

Organismy na zdivu způsobují biodeteriaci, tedy nechtěnou změnu vlastností stavebního materiálu. Typická je změna barvy povrchu, která je problematická u historického zdiva nejen z estetického hlediska, ale také protože se jedná o počáteční fázi vzniku biofilmu a později může dojít až k vzniku krusty na povrchu materiálu (Warscheid a Braams, 2000). Pokud na povrchu materiálu vznikne biofilm, může ovlivnit vstup a výstup vody z kapilárního

prostředí stavebního materiálu, což může v důsledku vést k zvlhčení a zasolování materiálu a také k dalšímu růstu organismů (Warscheid a Braams, 2000). Se změnou barvy souvisí také změna albeda povrchu, tedy schopnosti odrážet sluneční záření a to v případě, že dojde ke ztmavnutí povrchu stavebního materiálu. Změna albeda pak vede ke změně prohřívání a tedy i změně ve vysoušení materiálu, tato změna je podstatná na osluněných površích.

Mikroorganismy také mohou cyklicky bobtnat a smršťovat se. Pokud k tomuto jevu dochází v pórovém prostoru, může to přispět k mechanickému narušení stavebního materiálu (Warscheid a Braams, 2000).

2.4 Metody měření vlhkosti v materiálech

Metody měření vlhkosti vody ve stavebních materiálech, lze rozdělit podle způsobu stanovení obsahu vody na přímé a nepřímé metody (Hall a Hoff, 2012). Přímé metody se využívají přímo ke stanovení vlhkosti, oproti tomu nepřímými metodami se měří fyzikální vlastnosti materiálu. Měří se takové vlastnosti, které jsou proměnlivé v závislosti na vlhkosti. Nepřímé metody obvykle vyžadují kalibraci. K nakalibrování nepřímých metod jsou využívány metody přímé, které jsou přesnější (Hall a Hoff, 2012).

2.4.1 Infračervená tomografie (termometrie, termografie)

Jedná se o nedestruktivní metodu, která měří tepelné vyzařování materiálu (Avdelidis a Moropoulou, 2003; Phillipson et al., 2007, Grinzato et al., 2011), zkráceně IRT. Ke změně skupenství vody z kapalného na plynné a případně naopak, je nutná energie. Přenos této energie se projevuje snížením teploty. Touto metodou lze studovat zejména povrch materiálu. Lze zjistit, zda je povrch vlhký a zda dochází k výparu (Grinzato et al., 2011). Pokud k výparu z povrchu materiálu opravdu dochází, pak platí, že čím blíže k povrchu materiálu je vlhkost tím chladnější se povrch jeví ve výsledcích metody IRT. Změny teploty jsou pomalejší ve vlhčím prostředí oproti suchému prostředí. Tento jev je způsoben vysokou měrnou tepelnou kapacitou vody (Avdelidis a Moropoulou, 2003). Hodnota tepelné difuzivity je nepřímo úměrná frekvenci. Pokud jsou použity přístroje s infračervenými paprsky o vysoké frekvenci, pak je analýza prováděna v blízkosti povrchu materiálu. Nízkofrekvenční infračervené vlny se šíří hlouběji do materiálu (Avdelidis a Moropoulou, 2003).

Tuto metodu lze aplikovat pasivním, nebo aktivním způsobem (Grinzato et al., 2011). Při pasivním způsobu měření lze odhalit odchylky ve vedení tepla materiálem. Tyto odchylky poukazují na přítomnost vody. Vlhká místa se jeví jako chladnější, což je způsobeno

přenosem tepla při výparu, jak bylo zmíněno dříve. Pokud je využit aktivní způsob měření, pak dochází k ohřevu materiálu, nebo k jeho ochlazení na předem zvolenou teplotu. Následně je možné porovnat změny na snímcích před a po cílené změně teploty. Pomocí těchto výsledků pak lze lokalizovat vlhkost na měřeném povrchu. Grinzato et al. (2011) zmiňují další možnost aktivního měření a to za použití ventilátoru. Při využití ventilátoru se porovnávají snímky před a po použití ventilátoru a lze odhalit vlhké partie zkoumaného materiálu.

Infračervená tomografie je vhodná pro odhalení přítomnosti vlhkosti. Nicméně, není příliš přínosná pro kvantitativní stanovení vlhkosti v materiálu. (Phillipson et al., 2007; Grinzato et al., 2011).

2.4.2 Metoda tepelných pulsů

Metoda tepelných pulsů, anglicky *heat-pulse method*, využívá k stanovení vlhkosti teplo. Teplo je dodáno materiálu a následně je měřena změna teploty. Tato metoda využívá vlivu vlhkosti na tepelné vlastnosti materiálu. Řízený tepelný puls je vysílán sondou, takzvaným ohřívačem. Přístroj je obvykle vybaven kromě vysílací sondy také jednou až dvěma měřicími sondami, které měří změnu teploty materiálu - termistory (Lekshmi et al., 2014; He et al., 2018). Během měření jsou sondy zavedeny do materiálu, což činí tuto metodu částečně destruktivní. Naměřené hodnoty lze poté využít k zjištění vlhkosti zkoumaného materiálu.

Metodu tepelných pulsů lze podle He et al. (2018) aplikovat v třech možných variantách a to:

- a) SPHP - Metoda SPHP (*single probe heat pulse*) využívá jeden ohřívač a jednu teplotní sondu, které jsou umístěny společně v jedné sondě.
- b) DPHP - Metoda DPHP (*dual probe heat pulse*) využívá také ohřívač a tepelné čidlo, ovšem umístěné odděleně ve dvou sondách. U této aplikace metody tepelného pulsu je využíván krátkodobý tepelný puls. Tato metoda se dle He et al. (2018) jeví jako přesnější než SPHP.
- c) Termo TDR - Tato metoda představuje spojení TDR a tepelného pulsu do jednoho přístroje. Termo TDR je vybaven třemi sondami, kde je v prostřední sondě umístěn ohřívač a také čidlo TDR, postranní sondy slouží jako teplotní senzory a zároveň pro TDR jako zemní elektrody. Tato kombinace metod není dle He et al. (2018) vhodná pro jílovité materiály a pro materiály s vysokým obsahem biologické složky.

Ve vlhkém materiálu se mohou objevovat soli. Kladem metody tepelných pulsů je, že přítomnost solí nemá výrazný vliv na přesnost měření (Lekshmi et al., 2014). Nicméně Lekshmi et al. (2014) dodávají, že tato metoda může být ovlivněna okolním mikroklimatem. Na potenciální zdroje chyb či nejistot upozorňují také Philipson et al. (2007) a He et al. (2018), kteří kromě vlivu mikroklimatu zmiňují také vliv případných nehomogenit nacházejících se mezi sondami měřícími teplotu. Sakai et al. (2011) dodávají, že rozlišení této metody lze ovlivnit vzdáleností sond měřících teplotu. Jedná se o metodu aplikovatelnou in-situ a laboratorně (Lekshmi et al., 2014).

2.4.3 Elektromagnetické metody

Elektromagnetické metody, někdy nazývané kapacitní metody, využívají k určení vlhkosti fyzikální veličinu - relativní permitivitu (také označovaná jako dielektrická konstanta). Tato veličina vyjadřuje míru odporu studovaného materiálu při vytváření elektrického pole. Voda má vysokou relativní permitivitu, vyšší než minerály či vzduch, díky vysokému kontrastu této fyzikální veličiny je její měření vhodné pro stanovení obsahu vody v materiálu (Tab. 2.).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad \text{rovnice 1}$$

Relativní permitivita se vypočítá na základě rovnice (rovnice 1). Kde ε_r značí relativní permitivitu, ε značí permitivitu materiálu a ε_0 udává permitivitu vakua. Relativní permitivita je bezrozměrná veličina (Kotlík et al., 2003).

Hodnota relativní permitivity může být ovlivněna přítomností rozpuštěných solí (Hall a Hoff, 2012). Při měření obvykle dvojice elektrod utváří kondenzátor, kde dielektrikem mezi elektrodami je měřený materiál do kterého jsou vysílány elektromagnetické vlny (Lekshmi et al. 2014) a tím je polarizován. Elektrody tvoří s dielektrikem (měřený materiál) elektrický obvod a změna vlhkosti pak vede ke změně kapacity (Lekshmi et al., 2014). K vyhodnocení kapacitních měření se využívají kalibrační křivky, které se liší podle materiálu (Pazderka a Hájková, 2014).

Tab. 2. Hodnoty relativní permitivity u vybraných látek, převzato z Vosoughi et al. (2017).

Materiál	Relativní permitivita (ϵ_r)
Vzduch	1
Půdní minerály	3-7
Organické materiály	2-5
Beton	4-5
Led	5
Voda (20 °C)	80

Na tomto principu fungují ruční kapacitní měřiče vlhkosti. Pazderka a Hájková (2014) uvádějí, že přesnost těchto přístrojů je dobrá v méně vlhkých materiálech, ovšem s narůstající vlhkostí se jejich přesnost snižuje. U ručních přístrojů probíhá měření spíše v přípovrchové vrstvě, cirká v hloubce 10 - 25 mm (Pazderka a Hájková, 2014)

Příkladem elektromagnetických metod je elektrická impedance (angl. - *electrical impedance sensor*). Pomocí oscilátoru je pak měřena amplituda dopadajících a odražených signálů. Amplituda závisí na dielektrické permitivitě, která je závislá na obsahu vody v materiálu. (Lekshmi et al., 2014).

Také radarové metody využívají pro měření elektromagnetické spektrum. Jednou z radarových metod je GPR (*Ground Penetrating Radar*). Principem této metody je odraz vysokofrekvenčního elektromagnetického záření (1 MHz až 1 GHz). Elektromagnetické vlny putují od zdroje k anténě, která je přijímá, přes svrchní vrstvu materiálu. Poskytuje informace o permitivitě materiálu v přípovrchové zóně. Výhodou je, že metoda má poměrně dobré rozlišení a je neinvazivní. Nevýhodou je náročná interpretace dat a špatné výsledky ve velmi zasolených materiálech (Lekshmi et al., 2014).

2.4.3.1 Metoda TDR

TDR neboli *Time Domain Reflectometry* je nepřímá metoda stanovení vlhkosti porézních materiálů, využitelná například v půdě či ve zdivu (Hokett et al. 1992; Lekshmi et al. 2014). Pomocí této metody lze za pomoci šíření elektromagnetického impulsu, generovaného sondou, změřit objemovou dielektrickou konstantu daného materiálu. Měří se čas šíření elektromagnetického signálu, a čas příchodu odraženého signálu. Sondy v půdě tvoří dielektrikum, tedy látku se schopností polarizace mající obvykle izolační vlastnost.

Následně se ze zjištěných hodnot stanovuje dielektrická konstanta. Dielektrickou konstantu neboli permitivitu, lze převést na objemovou vlhkost materiálu pomocí Toppovy rovnice (Topp et al, 1980). Na základě hodnoty dielektrické konstanty lze odvodit vlhkost materiálu pomocí permitivity a elektrické vodivosti materiálu (Lekshmi et al. 2014; Suchorab et al. 2017). Hodnoty objemové vlhkosti materiálu, která je touto metodou měřena, mohou být zajímavé pro zemědělské účely, jedná-li se o měření půdní vlhkosti (Calamita et al. 2012). Při měření vlhkosti hornin lze poznatky využít pro posuzování stability budov, a také pro sledování zvětrávacích procesů hornin (Lekshmi et al 2014; Vogel et al. 2020).

Výhodou této metody je možnost opakovaného měření in-situ. Lze využít také možnost automatického, kontinuálního měření. Další výhodou je fakt, že není omezena strukturou materiálu. TDR lze využít také při mírném zasolení zkoumaného materiálu, ovšem při vysoké míře zasolení mohou soli výrazně ovlivnit kvalitu měření (Lekshmi et al 2014).

Sondy se obvykle vyrábějí z nerezové oceli a jsou doplněny o zdroj elektromagnetických impulsů. Pro automatizaci měření lze připojit i počítač. Pro správné fungování je vhodné zajistit kontakt sond s materiálem tak, aby prostor nebyl vyplněn vzduchovými kapsami. Hokett et al. (1992) uvádí, že pro zlepšení kontaktu sondy s horninou jeho tým vyvrtal poddimenzované otvory, a sondy byly následně do otvorů zatlučeny. Pro sondy mohou být vyvrtány i větší otvory, do kterých je sonda vsunuta. Zajímavou alternativu představují Cacciotti et al. (2018), kteří do vyvrtaných otvorů vloží sondu a pro zlepšení jejího kontaktu se zdívkou zalijí její okolí směsí pryskyřice a grafitu čímž vznikne vodivý materiál.

Na podobném principu jako TDR funguje metoda FDR, tedy Frequency Domain Reflectometry, která má za cíl určit dielektrickou konstantu materiálu, ze které lze odvodit vlhkost materiálu. Tato metoda pracuje s několika frekvencemi elektromagnetických signálů.

2.4.4 Odporové metody

Odporové metody spočívají v pouštění elektrického proudu do prostředí a měření jeho odporu, který je nepřímo závislý na vlhkosti (Hall a Hoff, 2012; Mol a Viles, 2013; Lekshmi et al., 2014; Pazderka a Hájková 2014). Suché stavební materiály, například kámen či cihly mají vysoké hodnoty elektrického odporu, pokud je v materiálu obsažena voda, způsobí snížení odporu (Hall a Hoff, 2012). Se zvyšujícím se rozstupem mezi elektrodami proudí elektřina hlouběji v materiálu, z čehož lze následně vypočítat prostorové rozložení odporu prostředí. U těchto metod je zásadní zajistit dobrý kontakt mezi materiálem a sondou. Sonda by měla na materiál těsně přiléhat (Philipson et al., 2007; Hall a Hoff, 2012). Dobrý kontakt

je možné podpořit aplikací různých vodivých past vhodných pro tyto účely (Mol a Viles, 2013; Pazderka a Hájková, 2014). Není vhodné umísťovat senzory do míst, kde by mohla být jejich činnost narušena přítomností dalších vodivých materiálů, například hřebíků a dalších kovových komponent (Phillipson et al., 2007).

Odporové měření může být prováděno lokálně – protimetrem nebo v řezu – elektrodami, které se vyhodnocují elektrickou rezistivní tomografií (ERT). U sond, které se vkládají do vyvrtaných otvorů ve zdivu je co do hloubkového dosahu limitující délka sond (Pazderka a Hájková, 2014). Je možné využít jednu sondu, nebo dvě sondy a měřit elektrický odpor mezi nimi (Lekshmi et al., 2014). Důležitým parametrem je vzdálenost elektrod, čím jsou elektrody k sobě blíže tím nižší je hloubkový dosah a naopak s větší roztečí elektrod pronikne elektrický proud hlouběji do materiálu (Sass a Viles, 2010). Tento typ aplikace - gradientové pole umožňuje profilování mezi dvěma elektrodami a poskytuje výsledky ve formě 2D profilů. Další možností využívající dvě elektrody je dipólové pole, tedy konfigurace dipól-dipól. Sass a Viles (2010) uvádějí, že pole dipól-dipól má přesnější rozlišení v horizontálním směru, ovšem hloubkový dosah je oproti gradientovému poli nižší. Konfigurace, při které se proměří materiál s určitou vzdáleností elektrod a následně je rozteč mezi elektrodami zvětšována a měření se opakuje, se nazývá Wennerovo pole. U měření Wennerovým polem se udává hloubkový dosah jako $\frac{1}{4}$ rozteče elektrod (Sass a Viles, 2010). Možných konfigurací je však celá řada, pól-dipól, pól-pól a další.

V současné době odporové metody umožňují vizualizaci vlhkostních režimů (od hloubek jednotek centimetrů do desítek metrů) bez potřeby invazivních sond. Další výhodou je možnost dlouhodobého měření. Pazderka a Hájková uvádějí, že odporové metody jsou přesnější než kapacitní měření, za předpokladu, že měříme relativně suché materiály do 6% objemové vlhkosti, při vyšších vlhkostech jsou odporové metody méně přesné.

Nevýhodou odporových metod je ovlivňování měření dalšími faktory, jako jsou rozpuštěné soli, které snižují odpor, oproti roztokům o nízké mineralizaci (Hall a Hoff, 2012; Pazderka, Hájková, 2014). Zároveň je vhodné měření kalibrovat pro každý materiál dle jeho vlastností (Hall a Hoff, 2012; Lekshmi et al., 2014; Pazderka a Hájková, 2014).

2.4.4.1 ERT (Elektrická rezistivní tomografie)

Elektrická odporová tomografie je metoda principiálně spadající pod odporové metody. Mezi alespoň dvěma elektrodami prochází materiálem elektrický proud. Vlhkost materiálu je odvozena od získaných hodnot elektrického odporu materiálu. Obecně s rostoucím obsahem vlhkosti klesá měrný elektrický odpor (Lekshmi et al. 2014).

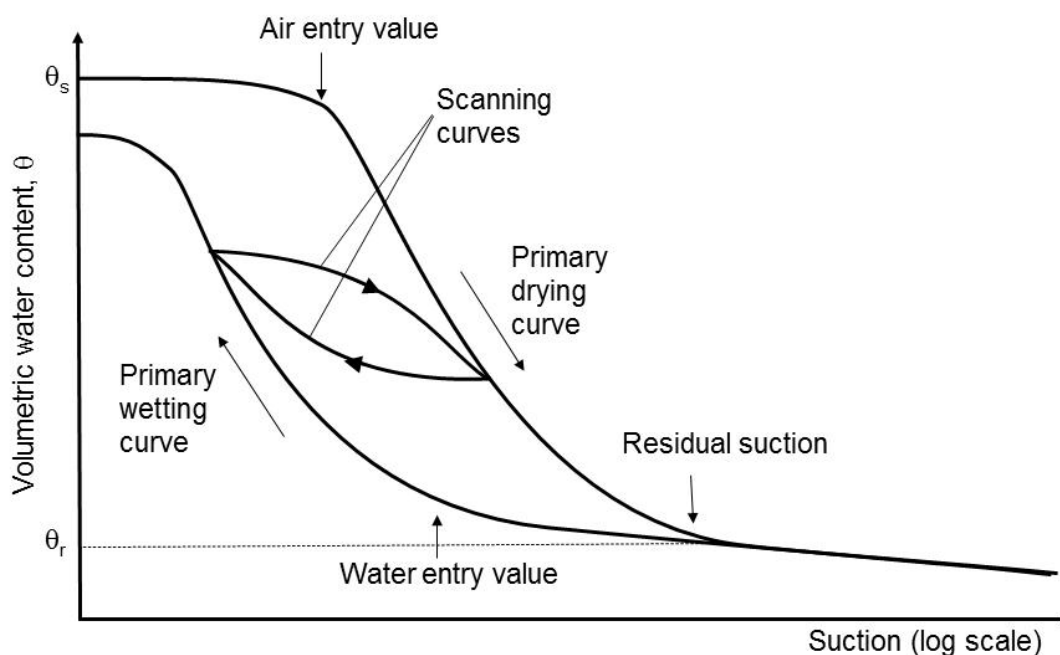
Tato metoda umožňuje sledování pohybu vlhkosti v materiálu v hlubší vrstvě. To ukazuje studie Mol a Viles (2013), kde byla metoda ERT využita pro sledování kapilárního vztlínání v bloku pískovce. Obecně má metoda ERT větší hloubkový dosah než odporové měření a jednou nebo dvěma elektrodami.

Výhodou odporových metod je poměrně nízká cena, ale také možnost dlouhodobého měření. Nevýhodou této metody je nepřesnost měření v silně zasolených materiálech. Zároveň je vhodné měření kalibrovat pro požadovaný materiál podle jeho vlastností (Hall a Hoff, 2012; Lekshmi et. al. 2014).

2.4.5 Tenzometrie

Tenzometrie je nepřímá metoda sloužící ke stanovení vlhkosti, pomocí sacího tlaku materiálu. Tato metoda je využívána pro zemědělské účely, ale principiálně je aplikovatelná na jakékoli porézní materiály. Tenzometrická sonda je vybavena na svém spodním konci porézní čepičkou, dále trubicí a v horní části tlakoměrem. Trubice je naplněna kapalinou (Wormald a Brich, 1969; Lekshmi et al. 2014). Sonda měří sací tlak materiálu, což je síla určující transport roztoků v materiálu. Pokud je porézní materiál vodou zcela nasycen, sací tlak je nulový, při vysoušení materiálu sací tlak stoupá. Z tenzometru při sušení voda proudí skrze porézní čepičku do materiálu, tím vzniká podtlak v trubičce tenzometru. Na základě měření vzniklého podtlaku lze určit hodnotu sacího tlaku. Při znalosti tzv. retenční křivky materiálu lze z výsledných tlaků odvodit vlhkost materiálu. Průběh retenční křivky je pro každý materiál specifický (Hall a Hoff, 2012). Graf retenční křivky udává vztah obsahu vody a sacího potenciálu (tlaku) daného materiálu (Obr. 2) (Toll et al., 2015). Při vysoušení materiálu z nasyceného stavu θ_s , křivka klesá k hodnotě θ_r , která udává hodnotu takzvané zbytkové vody (Obr. 2). Zbytková voda je taková voda, která je pevně vázána na minerály či v pórech. Když se křivka přibližuje hodnotě θ_r , zplošťuje se a zároveň roste sací tlak materiálu. Při saturaci materiálu je průběh křivky opačný, tedy má stoupající tendenci směrem od θ_r k θ_s , přičemž zpočátku je sací tlak vysoký a později se snižuje, při dosažení plného nasycení je hodnota sacího tlaku nulová. Křivka saturace může mít nižší hodnotu θ_s než křivka sušení. K takovému jevu dochází, pokud se pórový prostor naplní při sušení vzduchem, který tvoří bubliny, které zůstanou při saturaci zachyceny v pórovém prostoru, případně může dojít k nevratnému smrštění půdy (Toll et al., 2015). Jelikož se jedná o dynamický systém, může u retenčních křivek sušení a saturace dojít k hysterezi (angl.

Scanning curves). Fáze sušení může přejít ve fázi saturace a naopak fáze saturace může přejít ve fázi sušení.



Obr. 2. Příklad retenční křivky, Toll et al. 2012 v Toll, 2015.

Sonda se vpraví do materiálu, přičemž hloubka měření je limitována délkou sondy (Lekshmi et al., 2014). Kapalina v trubici (obvykle voda) prosakuje skrze porézní čepičku sondy. Díky sacímu tlaku proniká voda skrze čepičku do materiálu do chvíle, než je dosaženo rovnováhy tlaků, případně dokud není dosaženo limitu metody (Wormald a Brich, 1969; Lekshmi et al. 2014). Limit metody je -1 atm, trubice je plněna vodou při atmosférickém tlaku, tedy při vytváření podtlaku nelze vytvořit větší podtlak než je právě podtlak jedné atmosféry (Lekshmi et al., 2014). Wormald a Brich (1969) udávají, že tato metoda není využitelná, pokud je vlhkost materiálu nižší než 10% u porézního materiálu. Obecně lze říci, že čím je materiál sušší, tím hůře je tenzometrie použitelná.

Nevýhodou této metody je právě její fyzikální omezení, tedy možnost měřit do podtlaku -1 atm. Ne vždy je totiž tato hodnota dostačující. V některých případech, tedy tato metoda nepostihne vlhkost v materiálu, pokud je příliš suchý. Nevýhodou je také destruktivnost této metody, jelikož již z principu jejího fungování je patrné, že sonda musí být vpravena do materiálu.

Využití této metody pro sledování vlhkosti ve zdivu je spíše okrajové. Příkladem jejího fungování v praxi je studie Bruthanse et al. (2017), kde byl využit malý tenzometr pro měření

sacího tlaku v pískovcovém převisu. Tato studie ukazuje, že tenzometrie je dobře aplikovatelná v terénu na lokalitách s vyšší vlhkostí.

2.4.6 Sonda využívající reaktivní barvivo (Uranine-probe)

Jedná se o poměrně novou metodu měření vlhkosti ve zdivu, která byla vyvinuta na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy. Pomocí této metody lze detekovat polohu výparové fronty v materiálu a zároveň umožňuje detekovat přítomnost kapilární vody v materiálu, což může výrazně pomoci při interpretaci výsledků získaných jinými metodami (Weiss et al., 2020).

Tato metoda využívá reaktivní barvivo sodný fluorescein (uranin), jehož reakce s vodou vede ke změně jeho barvy. Barvivo je nanášeno na jehlu, která je vložena do vyvrtaného otvoru, kde je ponechána několik minut, aby barvivo mohlo zreagovat. Poté je sonda vyjmuta a vizuálně je detekována změna barvy (Weiss et al., 2020).

Barvivo je k sondě přichycené lepidlem na bázi polyuretanu, které nezpůsobuje změnu barvy fluoresceinu. Samotné barvivo fluorescein, je derivátem fluoresceinu, jeho výhodou je zdravotní nezávadnost, technickou výhodou je pak dobrý barevný kontrast mezi nezreagovaným a zreagovaným barvivem (Weiss et al., 2020).

Přestože metoda vyžaduje vyvrtání otvoru, postačuje otvor s poměrně malým průměrem a to alespoň 3 mm. Weiss et al. (2020) a Phillipson et al. (2007) doporučují obezřetnost při vrtání otvoru. Vrtání by mělo být pokud možno pomalé s nízkým počtem otáček za jednotku času, případně s přestávkami, přehřátí materiálu by totiž mohlo vést ke změně obsahu vlhkosti, což platí pro všechny metody, které vyžadují vyvrtání otvoru před měřením. Také je třeba dbát na čistotu vyvrtaného otvoru a před měřením vyfouknutím odstranit jemné částice vzniklé vrtáním. Oproti dalším zmíněným metodám je měření sondou s reaktivním barvivem poměrně levné. Jednou vyvrtané otvory, lze pro měření využívat opakovaně s požadovaným časovým odstupem a je možné sledovat změny obsahu vody v čase.

Nevýhodou je, že tato metoda je citlivá na vysokou relativní vlhkost vzduchu v prostoru, která ovlivňuje kvalitu měření. Weiss et al. (2020) uvádějí hodnotu 73 % a vyšší relativní vzdušné vlhkosti jako hodnotu, která by již mohla vést k reakci s fluoresceinem a tím vést k nepřesnosti měření. Weiss et al. (2020) také uvádějí, že nepřesnosti se v takovém případě pohybují v řádech několika mm. I pro tuto metodu je problematická přítomnost rozpustných solí a může vést k dalším nepřesnostem v měření, či k neprůkaznému měření. Drobnou nevýhodou sondy využívající reaktivní barvivo, je fakt, že v místě měření, tedy přímo ve vyvrtaném otvoru dojde k částečnému obarvení měřeného materiálu.

Detekce výparové fronty může být poměrně důležitá pro vyhodnocení zvětrávacích procesů a odhalení oblasti, kde dochází ke srážení rozpuštěných solí, také je užitečná pro lepší porozumění výparovým procesům v materiálu. Tato metodu využili Slavík et al. (2020) pro detekci hloubky výparové fronty v přírodním pískovci, při hodnocení výparu z pískovcového povrchu a hodnocení jeho eroze.

2.4.7 Další metody pro měření vlhkosti

Metod pro měření vlhkosti v porézních materiálech je celá řada. Některé metody umožňují měření v terénu, jiné jsou čistě laboratorní.

Velmi často používanou metodou je gravimetrie. Jedná se o přímou metodu stanovení vlhkosti materiálu, kterou lze využít v terénu, ale častěji se provádí v laboratoři. Je hojně využívána pro svou přesnost, zároveň se využívá ke kalibraci neřímých metod (Hall a Hoff, 2012). Gravimetrii lze aplikovat na různé porézní materiály od půd (Robinson et al., 2008; Lekshmi et al., 2014), až po materiály relevantní pro tuto práci, tedy stavební materiály jako kámen či cihly (Gizzi et al., 2007; Phillipson et al., 2007; Hall a Hoff, 2012). Princip gravimetrického stanovení vlhkosti v materiálu spočívá v odebrání vzorku, který je zvážen. Poté je vzorek sušen při 105 °C a to tak dlouho, dokud se hmotnost vzorku mění. Následně je zvážen vysušený vzorek a rozdílem hmotnosti vlhkého a suchého vzorku získáme hmotnost vody, kterou vzorek obsahoval (Gizzi et al., 2007; Phillipson et al., 2007; Robinson et al., 2008; Hall a Hoff, 2012; Lekshmi et al., 2014). Významnou výhodou této metody je její vysoká přesnost, jedná se o jednorázovou metodu, kterou lze provádět opakovaně. Hlavní nevýhodou je její destruktivita, tedy nutnost odebrat vzorek materiálu.

Další možností je chemická analýza, při které se provádí chemické stanovení vlhkosti ve vzorku, například pomocí karbidu vápenatého (CaC_2). Tato metoda využívá reakce karbidu vápenatého s vodou. Produktem této reakce je plyn ethyn (C_2H_2). Měří se tlak vzniklého ethynu (Phillipson et al., 2007; Hall a Hoff, 2012; Lekshmi et al., 2014). Výhodou této metody je, že je využitelná v laboratoři a také v terénu. Hall a Hoff (2012) uvádějí, že pro tuto metodu je vhodné, aby byl vzorek v práškovém stavu, ovšem při mletí může vlivem zahřátí dojít k úbytku vlhkosti. Jak bylo již naznačeno, jedná se o destruktivní metodu.

Celou skupinu metod představují neutronové a gama metody, které využívají radioaktivní nebo vysokoenergetické paprsky ke stanovení vlhkosti ve vzorku. Příkladem takové metody je NMR neboli nukleární magnetická rezonance, která je aplikovatelná v mnoha oborech výzkumu. Atomy materiálu jsou vystaveny silnému magnetickému poli.

Atomová jádra některých prvků se chovají jako slabé magnety, například izotopy ^1H , ^{15}N , ^{19}F a další. Díky působení silného magnetického pole na jádra atomů dojde k otočení jejich polarity, při návratu ozářených jader k původní polaritě je vyzařována energie a ta je poté zaznamenávána ve formě spektrálního záznamu (Hall a Hoff, 2012). Principem stanovení vlhkosti pomocí NMR je detekce atomů vodíku. Jako zjednodušení je uvažováno, že všechny atomy vodíku jsou součástí molekuly vody (Phillipson et al. 2007). Výhodou této metody je, že dokáže odhalit vodu v jakémkoli fyzikálním stavu a to chemicky vázanou, fyzikálně vázanou a volnou vodu. Jedná se o laboratorní destruktivní metodu, pro kterou je nutné odebrat vzorek materiálu (Hall a Hoff, 2012).

Neutronová radiografie, někdy se nazývá jako metoda rozptylu paprsků, je metoda využívající paprsek vysokoenergetických neutronů. Tyto neutrony jsou vyzařovány radioaktivním zdrojem. Pokud vysokoenergetický neutron vzniklý radioaktivní přeměnou interaguje s atomem vodíku, dojde ke snížení energie neutronu. Toto zeslabení neutronového paprsku je zaznamenáno na detektoru (Phillipson et al., 2007; Hall a Hoff, 2012; Lekshmi et al., 2014). Podobně jako u NMR i zde jsou detekovány atomy vodíku a předpokládá se, že tyto atomy jsou součástí molekuly vody (Phillipson et al., 2007). Výhodou neutronového zobrazování je vysoká přesnost (Hall a Hoff, 2012). Naopak nevýhodou je nutnost pracovat s radioaktivním zářičem, což vyžaduje nejen opatrnost, ale také patřičná oprávnění.

Pro stanovení obsahu vody ve vzorku je možné využít také gama záření, konkrétním příkladem je gama denziometrická metoda, která slouží k přesnému stanovení hustoty vzorku (Phillipson et al., 2007; Hall a Hoff, 2012; Lekshmi et al., 2014). Metoda gama útlumu je založena na předpokladu, že při průniku gama paprsku materiálem dochází k zeslabení energie tohoto paprsku a čím je materiál hustší, tím výraznější je zeslabení paprsku (Davis et al. 1992; Lekshmi et al., 2014). U vzorku je změřena hustota v nasyceném stavu a poté ve vysušeném stavu a porovnáním změny hustoty lze stanovit obsah vlhkosti, přičemž je možné měřit pouze bodově ve směru paprsku, nebo vzorek naskenovat 3D tomografií (Phillipson et al., 2007). Výhodou této metody je měření přímo v terénu. Při správné kalibraci dosahuje tato metoda velice přesných výsledků ve velkém rozlišení. Nevýhodou je nutnost pracovat se zdrojem radioaktivního záření a také potřeba odebrání vzorku pro měření, tedy destruktivnost metody (Davis et al., 1992; Phillipson et al. 2007; Lekshmi et al., 2014).

Další užívanou skupinou metod jsou rentgenové metody, angl. *x-ray tomography*. Tato metoda využívá rentgenové paprsky. Při průniku rentgenového paprsku materiálem dochází k jeho zeslabení (Roels a Carmeliet, 2006). Výsledkem jsou informace o hustotě materiálu. Pokud je tedy změřen vzorek v nasyceném stavu a poté v nenasyčeném stavu, lze porovnat

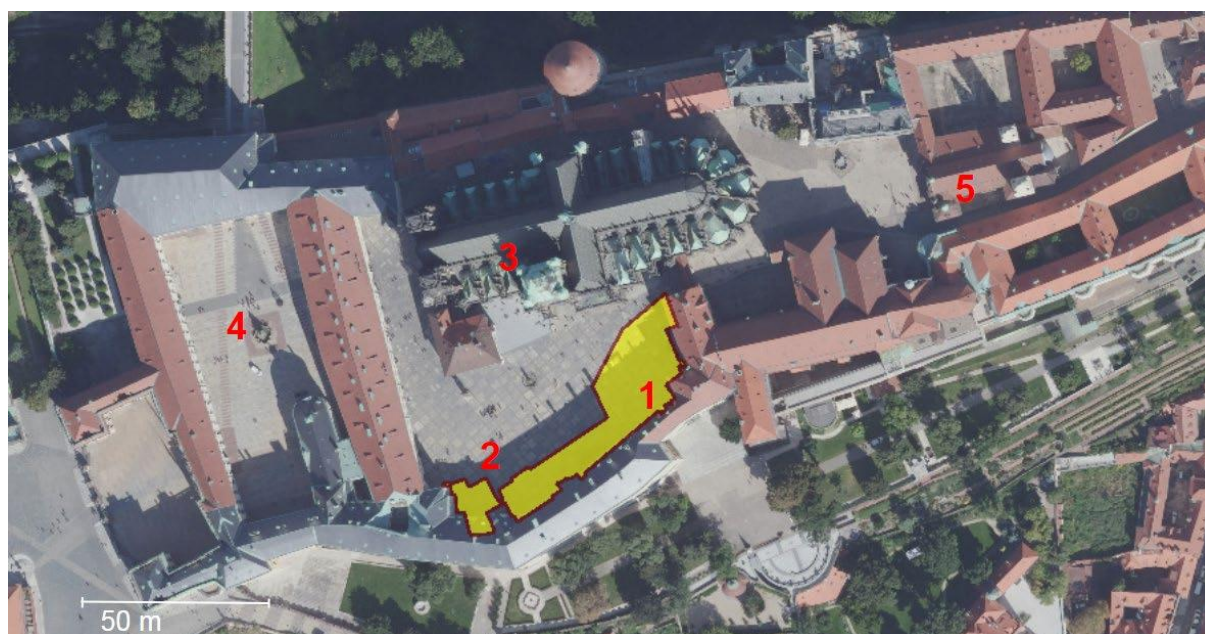
hodnoty hustoty a na jejich základě vypočítat obsah vlhkosti ve vzorku. Měření probíhá bodově, případně je možné provést měření v řezu a získat tak 2D obraz distribuce vlhkosti (Roels a Carmeliet, 2006). Při spojení této metody s metodou počítačové tomografie lze dosáhnout 3D zobrazení distribuce vlhkosti v materiálech (Roels a Carmeliet, 2006). Metoda je destruktivní, protože vyžaduje odběr vzorku, samotné měření pak vzorek nepoškozuje. Rozlišení rentgenové tomografie je závislé na tloušťce vzorku, přičemž vhodná tloušťka se může u různých materiálů lišit (Roels a Carmeliet, 2006).

PRAKTICKÁ ČÁST

3 METODIKA

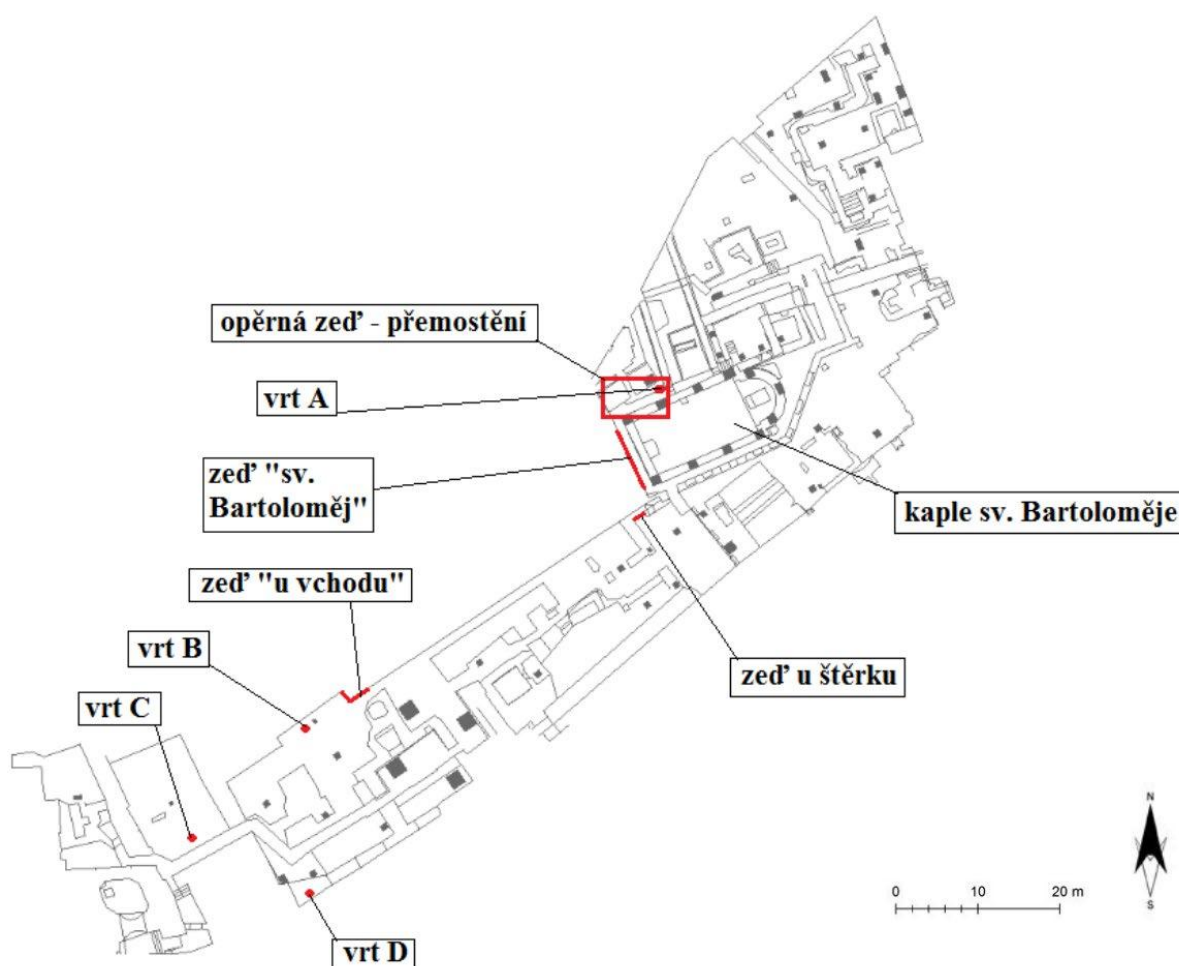
3.1 Popis lokality

Archeologický areál, ve kterém byla prováděna praktická část této práce, tedy měření vlhkosti, se nachází pod III. nádvořím Pražského hradu (Obr. 3), na mapce je vyznačen žlutě.



Obr. 3. Lokalizace archeologického areálu v rámci areálu Pražského hradu, 1 - žlutě vyznačen archeologický areál pod III. nádvořím, 2 - III. nádvoří Pražského hradu, 3 - Katedrála sv. Víta, 4 - II. nádvoří Pražského hradu, 5 - Bazilika sv. Jiří; Převzato a upraveno z projektu Calcarius (www.calcarius.cz)

V rámci areálu byla měřena vlhkost na lokalitě raně novověkého pilíře mostu (Obr. 5), na (Obr. 4) vyznačen jako *opěrná zeď - přemostění*. Volba lokality je spojena jednak s předchozí zkušeností pracovníků Archeologického ústavu Akademie věd, které danou lokalitu vytypovaly jako relativně vlhkou oproti okolí. Zároveň na dané lokalitě bylo možné využít invazivní metody měření vlhkosti z hlediska památkové ochrany a péče. V neposlední řadě je lokalita zajímavá díky výrazným výkyvům teplot v letních měsících mezi patou zdiva a vrchní částí zdiva. Stropní část je v letních měsících prohřívána dopadajícími slunečními paprsky na III. nádvoří. Na lokalitě most byla prováděna většina měření. Jako doplňkový výzkum bylo prováděno měření vlhkosti vybraných zdí v areálu, na (Obr. 4) vyznačeny jako „u šterku“, „sv. Bartoloměj“ což je novodobá opěrná zeď v blízkosti pozůstatků románské kaple sv. Bartoloměje a zeď „u vchodu“ (Obr. 4, 12, 13). V mapě jsou zaneseny také čtyři vrty A-D. Vrt A je jediný, který zastihuje hladinu podzemní vody, vrty B - D jsou suché, hloubky vrtů viz tabulka příloha 1.



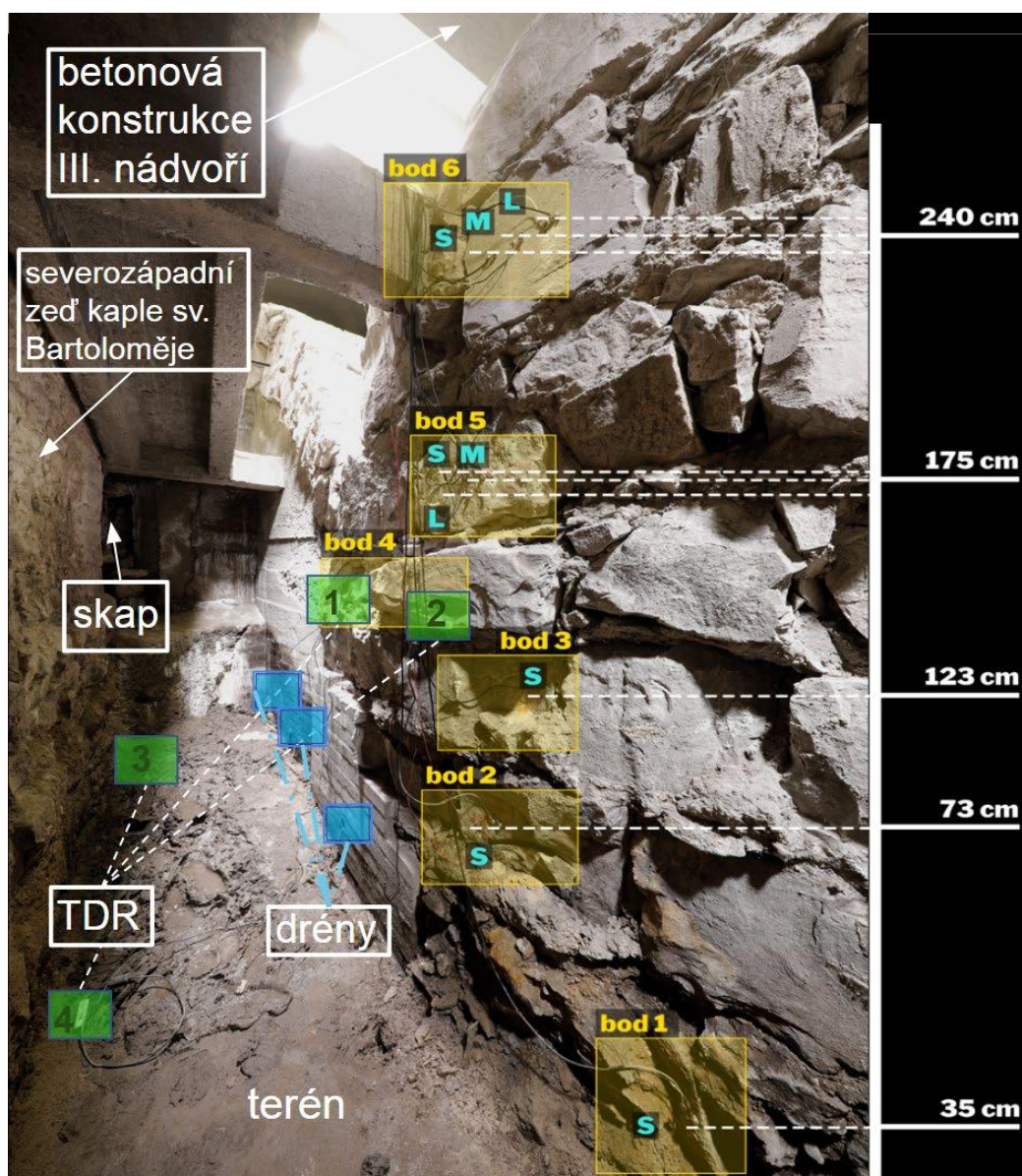
Obr. 4. Plán archeologického areálu, pilíř raně novověkého mostu je zde označen jako *opěrná zeď - přemostění*. Dále jsou vyznačeny vrty A-D a vybrané zdi - „sv. Bartoloměj“, „u šterku“ a „u

vchodu". Pro orientaci vyznačen půdorys kaple sv. Bartoloměje. Převzato z projektu Calcarius (www.calcarius.cz) a upraveno

Umístění bodů, ve kterých probíhala měření je znázorněno na (Obr. 6). Body jsou číslovány 1 - 6 od terénu, přičemž bod 1 se nachází ve výšce 35 cm nad terénem a bod 6 ve výšce 240 cm nad terénem. V šesti bodech byla měřena vlhkost pomocí odporových metod, elektromagnetických metod a pomocí sondy využívající reaktivní barvivo. Měření pomocí elektromagnetické metody TDR probíhalo automaticky na vyznačených místech (Obr. 6). Kromě měření vlhkosti probíhala další doplňková měření - měření teploty vzduchu, zdiva a půdy, měření relativní vlhkosti vzduchu (Obr. 7), měření hladiny vody ve vrtu A (Obr. 5) a v kaluži 1 (Obr. 11), dále probíhal odběr skapu (Obr. 6, 10) a měření objemu skapané vody. U vody z vrtu A, kaluže 1 a 2 a skapu, byla měřena konduktivita a teplota pomocí konduktometru Cond 340i a pH pomocí pH metru Greisinger GMH 3511 -SET.



Obr. 5. Celkový pohled na lokalitu raně novověkého mostu. V popředí skleněný vrt A. Vlastní foto autorky.



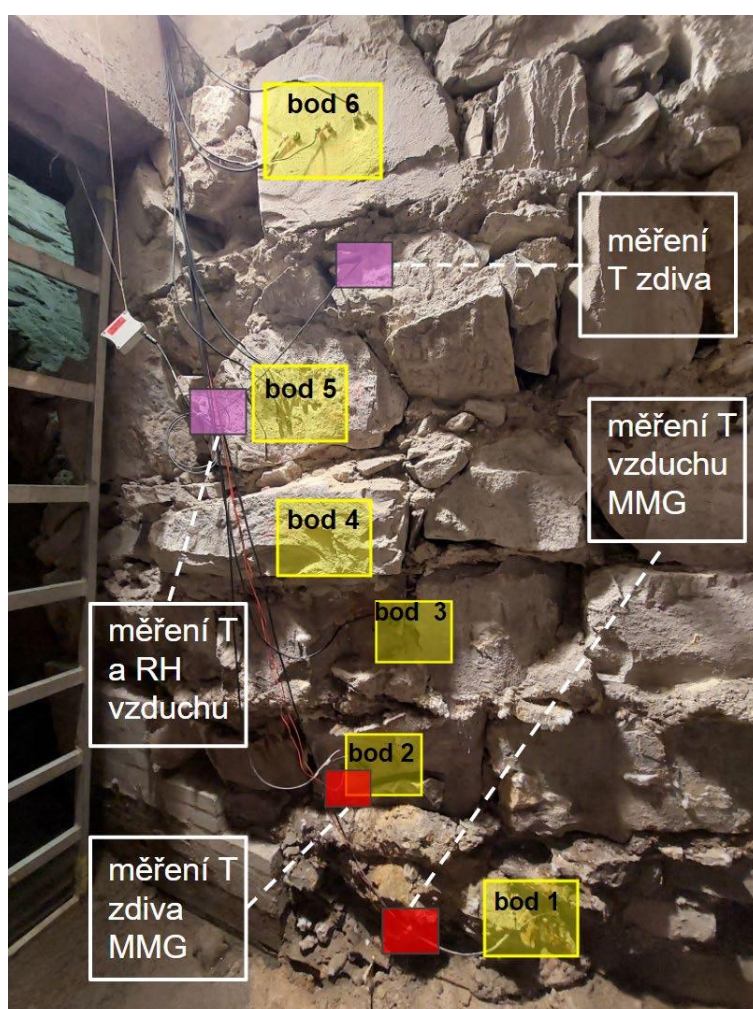
Obr. 6. Umístění bodů na mostním pilíři - žlutě vyznačeny body povrchového měření odporu a sondy s reaktivním barvivem. V bodech 1-3 a 5-6 vyznačeny body měření podpovrchového odporu (bílá linie s údaji o výšce bodu nad terénem) kde S = „short” krátké elektrody 21 mm hloubka, M = „medium” středně dlouhé elektrody 60 mm hloubka a L= „long” dlouhé elektrody 200 mm hloubka. Zeleně jsou označeny body měření TDR. Modře jsou vyznačena vyústění drenů. Převzato a upraveno z Weiss et al. 2022; fotografie Jan Gloc

Tabulka 3 - Přehledová tabulka použitých přístrojů, převzato a upraveno z Weiss et al. 2022

Označení metody v práci	Typ metody	Použitý přístroj měření	Časový krok	Charakteristika	Přesnost měření (dle výrobce)
podpovrchový odpor	Odporová metoda	Material Moisture Gigamodule (Scantronik)	6 hodin	Rozteč elektrod 3cm; Hloubka od 1 do 18,6 cm; napětí 10V; 10kOhm - 100GOhm	-
GMR 110	Odporová metoda	Greisinger GMR 110	21 dní	napětí 9V; proud 1,8 mA; rozlišení 0,1 %(< 20 %), 1 % (> 20 %) rozpětí hrotů	± 0,2% (při 25°C)
TDR	Elektromagnetická metoda	METER TEROS 12	4 hodiny	rozsah 0 - 100 % frekvence 70MHz dosah 1010 ml	<1 %
MOIST0-3 MOIST0-15 MOIST0-30	Elektromagnetická metoda	MOIST 210B 0-3 (R1M) 0-15 (DM 0175) 0-30 (PM 02181)	21 dní	výkon 0,1 MW DM 0175 hloubkový dosah 11 cm, měřená objem materiálu až 2 l; PM 02181 dosah až 30 cm, max. měřený objem 15 l	0,2-0,5 % podle druhu materiálu
EM 100	Elektromagnetická metoda	Greisinger GMK 100	21 dní	napětí 9V; proud 2,5 mA; hloubka měření 25 mm	-
Sonda využívající reaktivní barvivo	Sonda využívající reaktivní barvivo	viz Weiss et. al. 2020	21 dní	rozsah 0 - 122 mm	± 1 mm za ideálních podmínek
Infračervené snímkování	Infračervené snímkování	FLIR C2 Compact Thermal	-	80 × 60 (4800 pixelů); teplotní rozsah -10 °C až +150 °C; teplotní rozlišení < 0,1 °C	± 2°C (při 25 °C)
-	měření pH	Greisinger GMH 3511 - SET	-	napětí 9V; rozsah 0 - 14 pH	± 0,01 pH
-	Konduktometrie a měření teploty vody	Cond 340i TetraCon probe (WTW)	21 dní	rozsah konduktivity 0-2000μS/cm; teploty -5°C až +105°C	± 0,5% konduktivita ± 0,1°C teplota

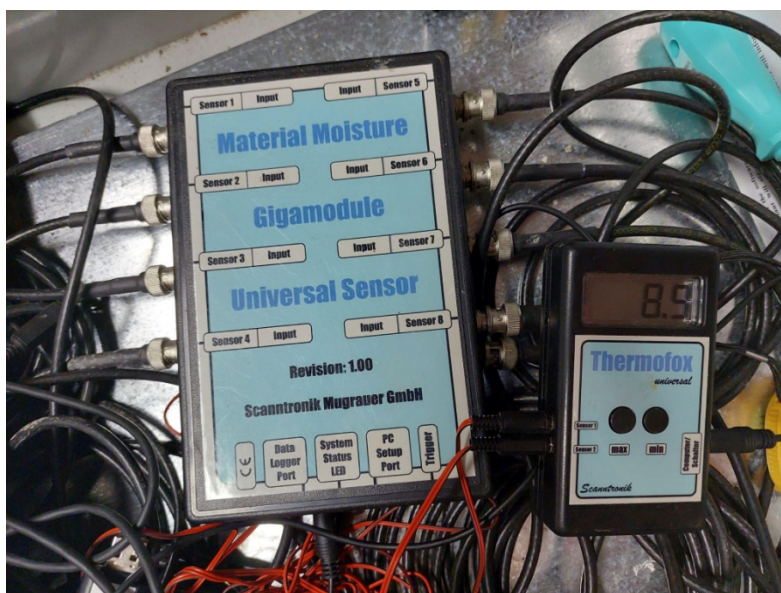
3.2 Měření

Měření teploty vzduchu, teploty zdiva a relativní vlhkosti vzduchu bylo zajišťováno jednak teplotními čidly, na (Obr. 7), ale také pomocí teplotních čidel přístroje Material Moisture Gigamodule (měření teploty vzduchu a zdiva) (Obr. 7), které primárně slouží k měření podpovrchového odporu zdiva. Všechna měření teploty a relativní vlhkosti zdiva probíhala automaticky, pro účely této práce byla teplota a relativní vlhkost vzduchu odečítána při ručních měřeních s periodou cirká 21 dní, teploty měřené Material Moisture Gigamodule byly zaznamenávány s časovým krokem 6 hodin.



Obr. 7. Umístění bodů na mostním pilíři - žlutě vyznačeny body povrchového měření odporu a sondy s reaktivním barvivem. Fialově jsou vyznačeny body měření teploty vzduchu, teploty zdiva a relativní vlhkosti vzduchu. Červeně jsou vyznačeny body měření teploty vzduchu a zdiva pomocí přístroje Material Moisture Gigamodule. Vlastní foto autorky.

Automatické měření podpovrchového odporu probíhalo pomocí přístroje Material Moisture Gigamodule (Obr. 8), v bodech (Obr. 6) o různé hloubce, v bodech 5 a 6 ve třech hloubkách (21 mm; 60 mm; 200 mm) a v bodech 1-3 v hloubce 21 mm. Časový krok měření byl stanoven zpočátku na 1 hodinu a to od začátku měření 6. 8. 2020 do 24. 9. 2020. Ze získaných dat plyne, že v řádu hodin se elektrický odpor mění jen zanedbatelně (Obr. 55) a proto byl časový krok měření prodloužen na 6 hodin. Měření na lokalitě probíhá i nadále, v této práci jsou uvedena data k 6. 4. 2022.



Obr. 8. Přístroj Material Moisture Gigamodule a datalogger Thermofox (Výrobce Scantronik).
Vlastní foto autorky.

Automatické měření TDR probíhalo od 21. 8. 2020 do 1. 9. 2020 s časovým krokem 1 hodina. Kvůli potřebě měřicí aparatury TDR pro jiný výzkum bylo měření přerušeno a znovu obnoveno bylo 27. 9. 2020 a pokračovalo do 4. 4. 2021 s časovým krokem 4 hodiny. Umístění sond při druhé části měření je znázorněno na (Obr. 6).

Kromě automatickým měření probíhala také ruční měření s časovým krokem cirká 21 dní, tento interval byl v 11/2021 prodloužen na cirká 35 dní. Při ručních měřeních byly odečítány aktuální hodnoty teploty vzduchu a zdiva a relativní vlhkosti vzduchu. Dále bylo prováděno ruční měření odporu přístrojem Greisinger GMR 110 (Obr. 9) v bodech měření 1 - 6 (Obr. 6). Měření probíhá přiložením přístroje ke zdivu pod lehkým tlakem, tak aby se hroty

přístroje dotýkaly zdiva v požadovaném bodě. Měření bylo vždy opakováno třikrát a jako naměřená hodnota byla vzata nejvyšší hodnota z daných třech měření.



Obr. 9. Vlevo přístroj Greisinger GMR 110, vpravo přístroj Greisinger GMK 100 z přední a zadní strany. Foto výrobce (<https://greisinger.cz/>)

Během pravidelných ručních měření bylo také prováděno měření výparové fronty pomocí metody sondy využívající reaktivní barvivo, dle dané metodiky Weisse et al. (2020). Do předem vyvrtaných otvorů v místech bodů 1 až 6 (Obr. 6) jsem vkládala sondy. Sondy je nutné před měřením očistit a nanést na ně vrstvu lepidla na bázi polyuretanu a následně je obalit ve fluoresceinu (3',6'-dihydroxyspiro(2-benzofuran-1,9'-xanthen)-3-on). Před vložením připravených sond do zdiva jsem vždy použila ruční pumpičku k profouknutí otvorů. Profouknutí jednak vede k odstranění prachových částic z otvoru, ale také vede k vyrovnání relativní vlhkosti vzduchu v otvoru s relativní vlhkostí vzduchu v okolí. Po profouknutí jsem vložila připravené sondy do otvorů a nechala jsem barvivo 10 až 15 minut reagovat. Poté jsem sondy z otvorů vyjmula a pomocí posuvného milimetrového pravítka jsem změřila části, kde barvivo změnilo díky reakci s vodou barvu z oranžové na zelenou.

Dále jsem prováděla zjištění objemu skapu. Skap z krápníků a brček byl zachytáván do 10 l nádoby (Obr. 10) po dobu jednoho cyklu měření. Nádoba byla umístěná v místě zvýšeného výskytu krápníků, pod betonovým chodníkem (Obr. 10). Ve skapu jsem měřila objem pomocí měrné stupnice na nádobě, dále jsem měřila konduktivitu a teplotu vody

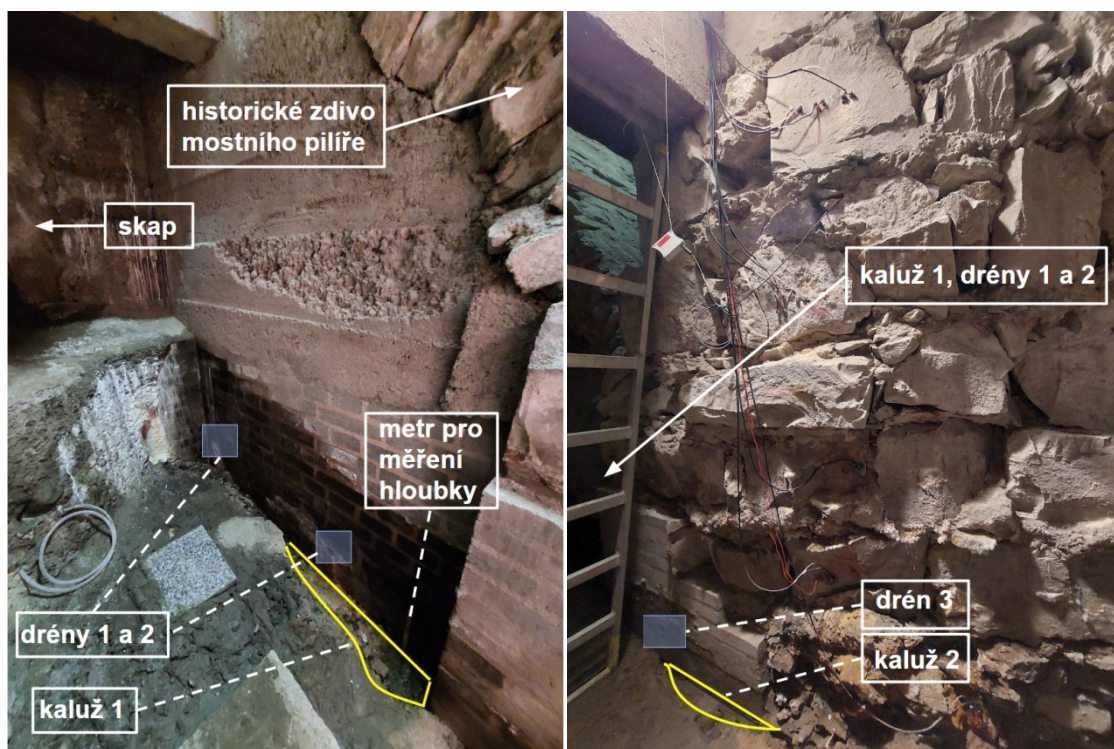
pomocí konduktometru Cond 340i a příležitostně jsem měřila pH vody pomocí pH metru GMH 3511-SET. Obsah nádoby jsem při každém měření vyprázdnila mimo archeologický areál.



Obr. 10. Detail umístění nádoby na odběr a měření objemu skapu

Ve vrtu A jsem při každém cyklu měření změřila hladinu vody od skleněného záhlaví. Celková hloubka vrtu A je 78,5 cm, záhlaví měří 45 cm (Obr. 5). Ve vrtu jsem dále měřila konduktivitu a teplotu vody pomocí konduktometru a příležitostně také pH vody pomocí pH metru. U vrtů B, C a D jsem také měřila hladinu vody, ovšem nikdy zde nebyla hladina podzemní vody zastižena.

Dále jsem při ručních měřeních odečítala výšku hladiny v kaluži 1 z instalovaného metru (Obr. 11). V kalužích 1 a 2 jsem měřila konduktivitu vody, teplotu vody a příležitostně pH vody.



Obr. 11. Vlevo kaluž 1, drény 1 a 2. Vpravo kaluž 2 a drén 3. Vlastní fotografie autorky.

U vybraných zdí v archeologickém areálu (Obr. 4, 12, 13) byla měřena vlhkost pomocí GMR 110, EM 100 (obojí prováděla Přírodovědecká fakulta UK) a MOIST (prováděl Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR) a snímkování pomocí termokamery FLIR C2 Compact Thermal (prováděla Přírodovědecká fakulta UK).

Pro každou z vybraných zdí byla stanovena měřicí síť bodů, rovnoměrně pokrývající plochu zdi. Měření pomocí GMR 110 probíhalo stejným způsobem jako na lokalitě pilíře mostu. Přístroje EM 100 a MOIST se přikládají na požadovaný bod, ideálně na rovný povrch. Z tří hodnot změřených pomocí MOIST se jako výsledná hodnota uvažuje průměr daných třech měření.

Měření pomocí EM 100 a MOIST je problematické na nerovných površích. Pokud je mezi přístrojem a měřeným povrchem mezera, dojde ke změně rychlosti signálu při průchodu vzduchem. U přístroje Greisinger GMK 100 (EM 100) bylo při měření vlhkosti vybraných zdí několik měřících bodů vynecháno z důvodu silně nerovného povrchu, jehož vlivem by docházelo k chybám měření.



Obr. 12. Vlevo - měřicí stanoviště zed' „u šterku”. Vpravo - měřicí stanoviště zed' „sv. Bartoloměj”
Vlastní fotografie autorky.



Obr. 13. Měřicí stanoviště zed' „u vchodu”. Vlastní foto autorky.

3.3 Kalibrace metod

Z měření prováděných na mostním pilíři jsem kalibrovala podpovrchový odpor, GMR 110 a MOIST pro všechny hloubkové dosahy. Měření pomocí TDR je kalibrováno automaticky. Metody infračerveného snímkování a sondy využívající reaktivní barvivo nevyžadují kalibraci.

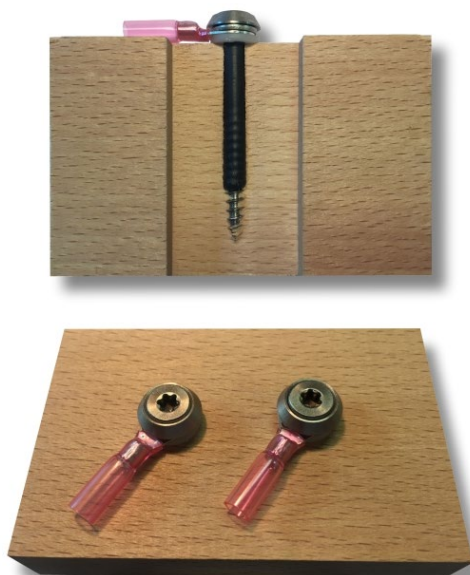
Měření prováděná na vybraných zdech nebyla kalibrována pro žádnou z použitých metod (GMR 110, MOIST 0-15 a EM 100). Kalibrace na vlhkost nebyla u vybraných zdí provedena, protože nebyly odebrány vzorky materiálu pro stanovení vlhkosti gravimetrickou metodou. Pro měření GMR 110 a MOIST 0-15 by teoreticky bylo možné využít výsledky gravimetrického stanovení vlhkosti v opuce na lokalitě most, nicméně vlhkost by velice pravděpodobně neodpovídala skutečnosti u cihlových zdí „sv. Bartoloměj“ a „u vchodu“. Metoda EM 100 nebyla v lokalitě most využívána, a proto pro ni nebyla vytvořena kalibrační křivka. Při nemožnosti kalibrovat metodu EM 100 a kalibraci metod GRM 110 a MOIST na odlišný materiál jsem se rozhodla využít pro srovnání měření nekalibrované hodnoty a srovnávat pouze zjištěné relativní hodnoty. Pro dané relativní hodnoty jsem použila podmíněné formátování, kdy nejnížší zjištěná hodnota v souboru dat byla označena žlutou barvou a nejvyšší naměřená hodnota datového souboru byla označena černou barvou, zbylé hodnoty se mezi tyto odstíny lineárně rozloží. Na základě relativních výsledků jsou odlišitelné zejména extrémní hodnoty.

3.3.1 Kalibrace měření podpovrchového odporu

Pro podpovrchové měření odporu nebyla zjištěna vlhkost zdiva mostního pilíře gravimetricky. Nejprve byla naměřená data elektrického odporu (Ohm) převedena na měrný elektrický odpor (Ohm/m) a to pomocí rovnice 2.

$$R = \rho \times \frac{l}{S} \quad \text{rovnice 2}$$

Kde R je skutečný odpor (Ohm), ρ je měrný elektrický odpor (Ohm / m), l je vzdálenost mezi elektrodami (m), což bylo v případě tohoto měření 3 cm a S je plocha průřezu kolmého na směr mezi elektrodami (m). Hodnoty pro výpočet S nebyly z důvodu pokračujícího měření změřeny přesně, mohou se lišit v řádech prvních mm, průměr elektrod 3 mm, délka elektrod se liší. Pro měření byly využity tři délky elektrod - 21 mm, 60 mm a 200 mm, pro výpočet parametru S byla brána délka nezakryté části elektrody, pro krátké elektrody (S na Obr. 6.) byla brána délka 21 mm, pro středně dlouhé elektrody (M) délka 48 mm a pro dlouhé elektrody (L) délka 186 mm. Délky elektrod využité pro výpočet parametru S odpovídají nezakryté délce elektrod, zbylé části jsou zakryté nevodivým plastovým krytem (Obr. 14.).



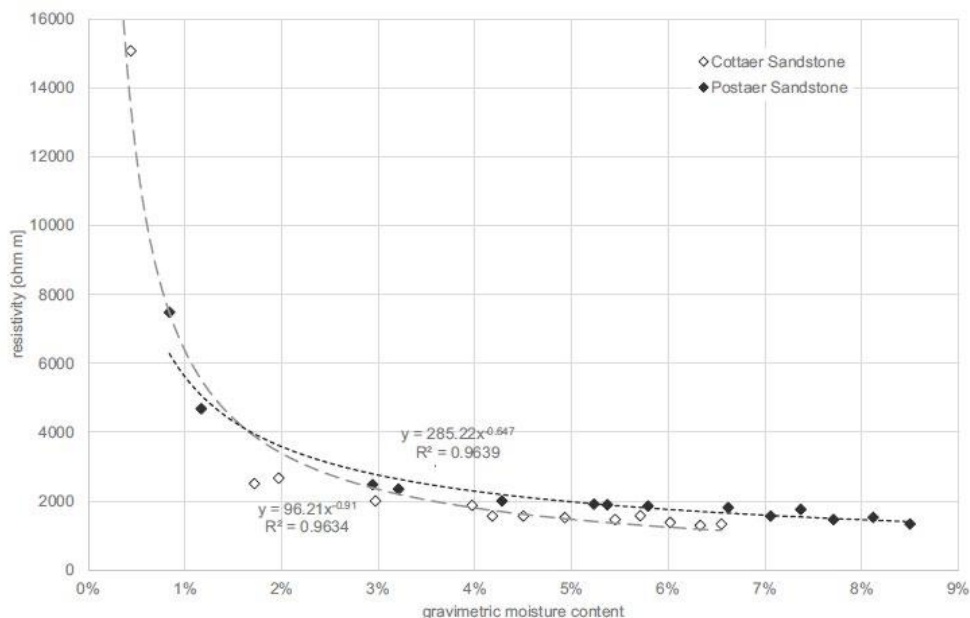
Obr. 14. Typizovaný vzhled elektrod podpovrchového měření odporu. Délka zakrytí neodpovídá aplikaci měření na mostním pilíři, jedná se o ilustrativní foto Zdroj: www.scanntronik.de

Dále byla hodnota měrného elektrického odporu kalibrována na teplotu. Teplota byla měřena ve zdivu (Obr. 7, příloha 8). Ke kalibraci teploty byla použita rovnice 3 (Weast et al. (1989).

$$EO_t = EO - (t \times 0,022 \times EO) \quad \text{rovnice 3}$$

Kde EO_t je elektrický odpor kalibrovaný na teplotu, EO je měrný elektrický odpor (Ohm / m), t je teplota (°C) a 0,022 je korekční koeficient. Hodnota korekčního koeficientu závisí na množství rozpuštěných elektrolytů ve vodném roztoku a pohybuje se kolem 2 % na K⁻¹ (Hayashi, 2004). Použitá hodnota 2,2 % na K⁻¹ je standardní hodnotou dle Weast et al. (1989).

Nepodařilo se dohledat vhodnou studii, ve které by bylo toto měření aplikováno na opukové zdivo a ani výrobce měřící aparatury nebyl schopen poskytnout kalibrační křivky pro opukové zdivo. Z tohoto důvodu byla pro kalibraci dat použita studie Sasse (2022), která využívá měření elektrického odporu k zjištění vlhkosti přírodního pískovce v oblasti NP Českosaské Švýcarsko. Hodnoty vlhkosti jsou tedy spíše orientační a neodpovídají zcela vlhkostí situaci mostního pilíře. Pro kalibraci byla využita kalibrační křivka (Obr. 15; rovnice 4) s koeficientem determinace $R^2 = 0,9639$, hodnoty vlhkosti ve vzorku byly stanoveny gravimetricky (Sass, 2022).



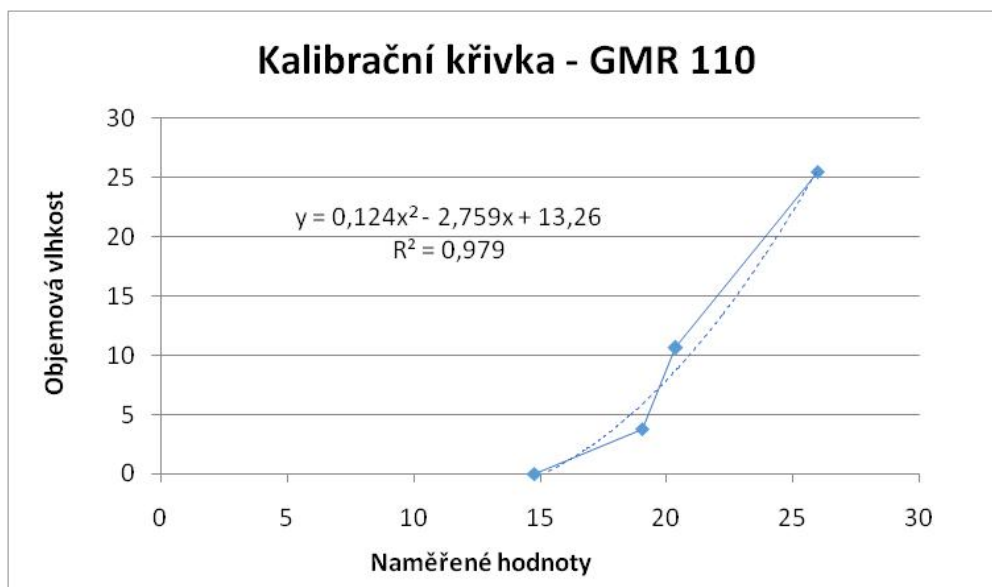
Obr. 15. Kalibrační křivka použitá pro kalibraci měření podpovrchového odporu. Převzato z Sass, (2022)

$$y = 285,22 \times x^{-0,647}$$

rovnice 4

3.3.2 Kalibrace měření povrchového odporu

Hodnoty naměřené přístrojem GMR 110 byly kalibrovány pomocí gravimetrického stanovení vlhkosti ve vzorcích opukového zdiva. Vzorky byly odebrány z reprezentativního pískovcového bloku a samotné stanovení vlhkosti vzorků prováděl Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. Kalibrace byla vytvořena pomocí 4 dvojic hodnot. Nejnižší naměřená hodnota na mostním pilíři byla brána jako 0 % objemové vlhkosti. Objemová vlhkost saturovaného materiálu byla stanovena změřením pórovitosti na 25,5 % vlhkosti, za tuto hodnotu byla brána nejvyšší naměřená relativní hodnota. Další dvě dvojice hodnoty byly stanoveny laboratorním měřením, 3,8 % a 10,6 % objemové vlhkosti. Výsledné dvojice hodnot byly vyneseny do grafu a proloženy polynomicou funkcí (Obr. 16) (koeficient determinace $R^2 = 0,979$). Průběh kalibrační křivky viz (Obr. 16).

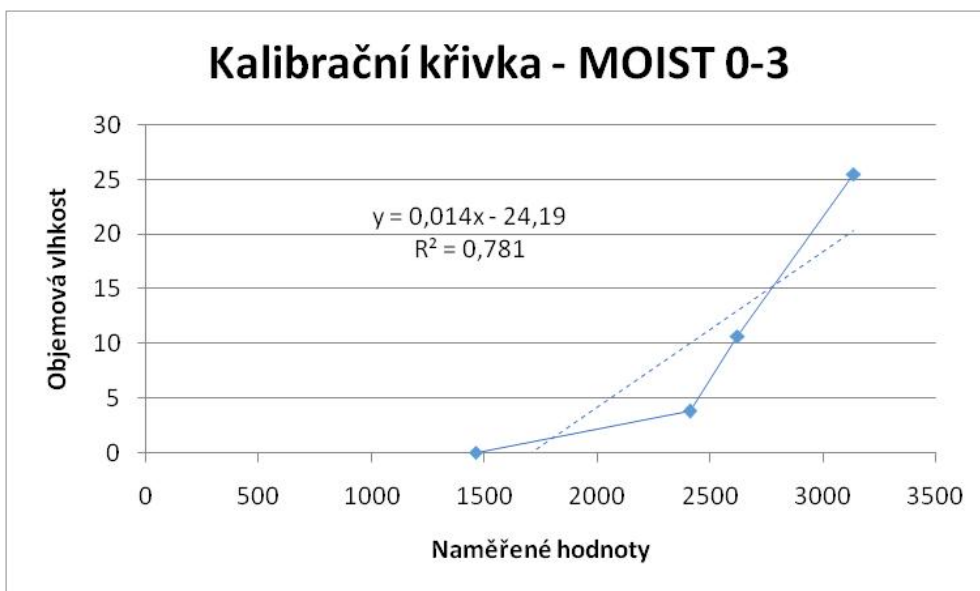


Obr. 16. Kalibrační křivka metody GMR 110 pro lokalitu mostního pilíře

3.3.3 Kalibrace elektromagnetické metody MOIST

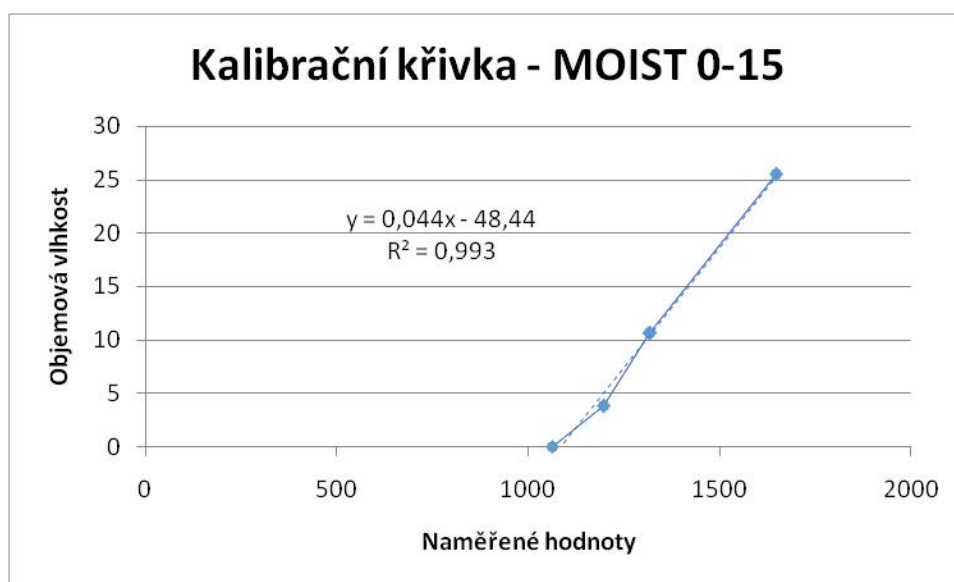
K přístroji MOIST 210 B, kterým bylo měření provedeno, lze připojit různé sondy, s různým dosahem, byly použity 3 sondy: MOIST 0-3, MOIST 0-15 a MOIST 0-30. Z počátku bylo měření na mostním pilíři prováděno pomocí tří sond ale později v návaznosti na kalibraci se pomocí MOIST 0-3 měří jen vybrané body a MOIST 0-30 se přestalo měřit zcela. Výsledky metody MOIST byly kalibrovány na základě gravimetrického stanovení objemové vlhkosti ve vzorcích z lokality mostního pilíře, pro každou sondu zvlášť. Byly využity čtyři páry hodnot, pro každou sondu. Nejnižší naměřená hodnota v souboru dat dané sondy byla pokládána za rovnou 0 % a nejvyšší naměřená hodnota jako rovná 25,5 % objemové vlhkosti, na základě měření pórovitosti. Zbylé dva páry hodnot byly stanoveny v laboratoři. Hodnoty byly proloženy lineární regresní přímkou.

Pro sondu MOIST 0-3 byla kalibrace nejméně přesná ze všech tří sond MOIST, koeficient determinace $R^2 = 0,781$ (Obr. 17). Ideálně by měla být kalibrační křivka zhruba lineární, což není případ kalibrační křivky pro MOIST 0-3 (Obr. 17), výsledné hodnoty kalibrované podle této křivky je nutné brát s rezervou.

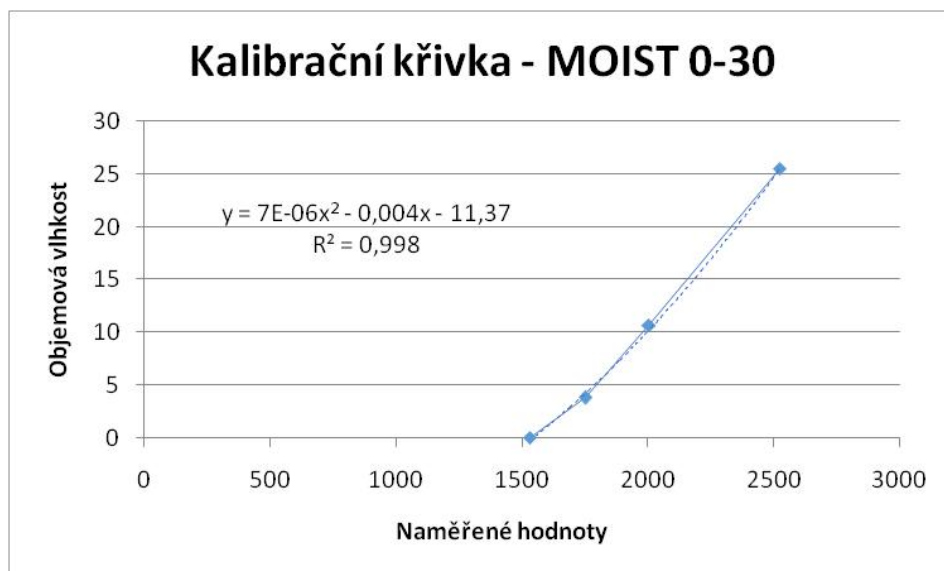


Obr. 17. Kalibrační křivka metody MOIST 0-3 pro lokalitu mostního pilíře.

Kalibrace hodnot pro MOIST 0-15 a MOIST 0-30 přinesla spolehlivější výsledky než kalibrace MOIST 0-3. Hodnota koeficientu determinace pro MOIST 0-15 je $R^2 = 0,993$ a pro MOIST 0-30 je $R^2 = 0,998$ (Obr. 18, 19). Hodnoty pro MOIST 0-15 byly proloženy lineární regresní přímkou a pro MOIST 0-30 polynomicickou křivkou.



Obr. 18. Kalibrační křivka metody MOIST 0-15 pro lokalitu mostního pilíře.



Obr. 19. Kalibrační křivka metody MOIST 0-30 pro lokalitu mostního pilíře.

3.3.4 Kalibrace elektromagnetické metody TDR

Přístroj METER TEROS 12 pomocí něhož bylo prováděno automatické měření TDR umožňuje přednastavit kalibraci. Kalibrace je výrobcem nastavena pro případ, kdy je celý senzor i s hroty umístěn v substrátu, v případě měření na lokalitě mostního pilíře byly v substrátu a v hornině umístěny pouze hroty, což je zdrojem nepřesnosti jak u měření na zdivu tak u měření půdy. Pro kalibraci bylo zvoleno nastavení *Mineral soil*. Ke kalibraci je využívána Toppova rovnice (rovnice 5) (Topp et al., 1980) udávající dielektrickou permitivitu, v rovnicích 5, 6 a 7 *RAW* udává výstup z dataloggeru (rovnice poskytuje výrobce v manuálech k přístrojům).

$$\varepsilon_a = \frac{1}{(-1,1057 \times 10^{-9})(RAW^3) + (3,575 \times 10^{-6})(RAW^2) - (3,9557 \times 10^{-3})(RAW) + 1,53153}$$

rovnice 5

Pro přepočítání na vlhkost slouží další dvě rovnice. Rovnice 6 byla stanovena výrobcem na základě testů a výrobce udává, že je platná pro rozsah elektrické konduktivity od 0 do 10 dS/m. Výsledná vlhkost θ je udávána v jednotkách (m^3 / m^3). Rovnice 6 je zároveň platná pro stav nasycení půdy do 60 % objemové vlhkosti

$$\theta = (8,5 \times 10^{-4}) \times RAW - 0,48$$

rovnice 6

Rovnice 7 byla stanovena výrobcem pro minerální půdy a je využitelná pro rozsah elektrické konduktivity od 0 do 8 dS/m. Výsledné hodnoty vlhkosti jsou udávány v jednotkách (m^3 / m^3). Rovnice 7 je platná pro maximální nasycení půdy 70 % objemové vlhkosti. Výrobce uvádí, že lineární rovnice poskytly lepší výsledky než polynomické, a proto je doporučuje.

$$\theta = (3,879 \times 10^{-4}) \times RAW - 0,6956$$

rovnice 7

4 VÝSLEDKY

Výsledky jsou strukturovány podle jednotlivých metod měření vlhkosti. Nejprve jsou prezentovány výsledky odporových metod (podpovrchové měření odporu, GMR 110), dále pak TDR, výsledky sondy využívající reaktivní barvivo a infračervené snímky lokalit. Následují výsledky měření vlhkosti vybraných zdí pomocí EM 100, GMR 110 a MOIST 0-15. V další části následují výsledky dalších provedených měření, jako jsou hodnoty teplot a vlhkosti vzduchu, dále hodnoty konduktivity vody, její teploty a pH. Měřena byla také výška hladiny podzemní vody ve vrtech, dále pak v otevřených kalužích a hodnoty zachyceného skapu z krápníků a brček, které se na lokalitě tvoří. Poslední část kapitoly je věnována zhodnocení meteorologických dat ze tří stanic v Praze a to konkrétně ze stanic Klementinum, Ruzyně a Břevnov.

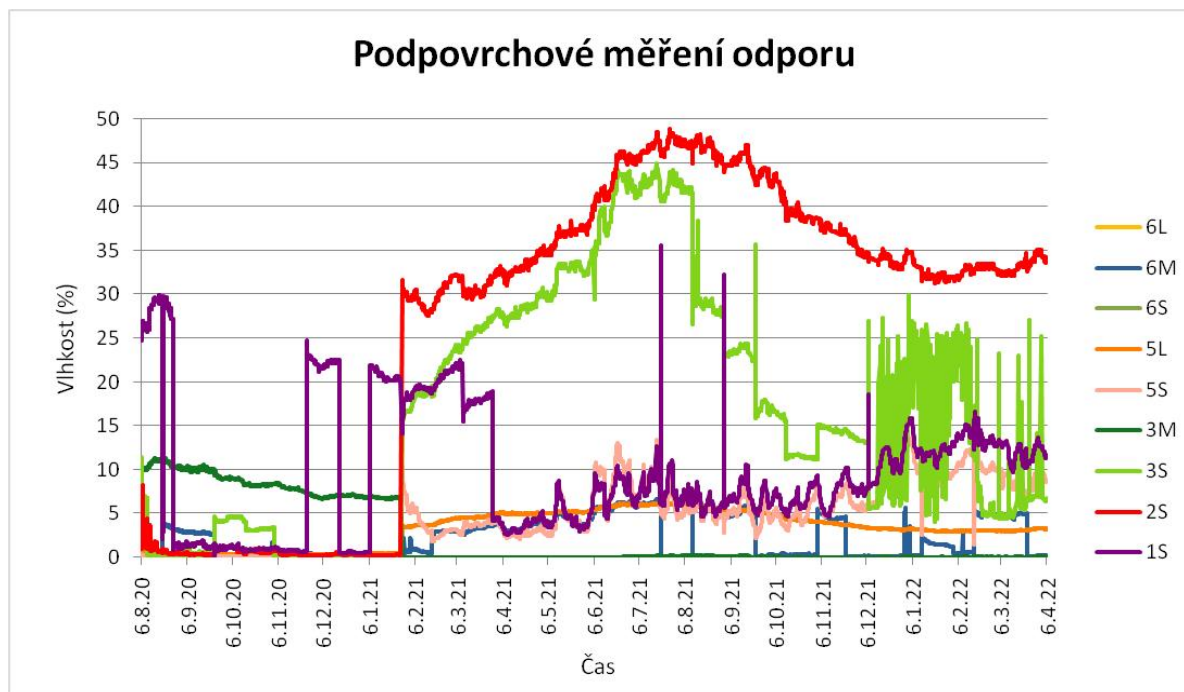
Výsledky měření, která byla provedena ručně, odpovídají období od 8/2020 do 3/2022, není-li uvedeno jinak. Příslušná měření i nadále pokračují.

4.1 Odporová metoda

4.1.1 Podpovrchové měření odporu

Odporové měření přístrojem Material Moisture Gigamodule probíhala automaticky zpočátku s časovým krokem 1 h a později s krokem 6 h. Zde prezentovaná data byla naměřena od 8/2020 do začátku 4/2022 (Obr. 20). Měřicí aparatura je schopna zajistit automatické měření v 8 bodech naráz, pro měření bylo vytyčeno 9 bodů, bod 6S byl měřen nepravidelně při ručních měřeních, kdy lze bod změřit díky přepojení měřených bodů v dataloggeru.

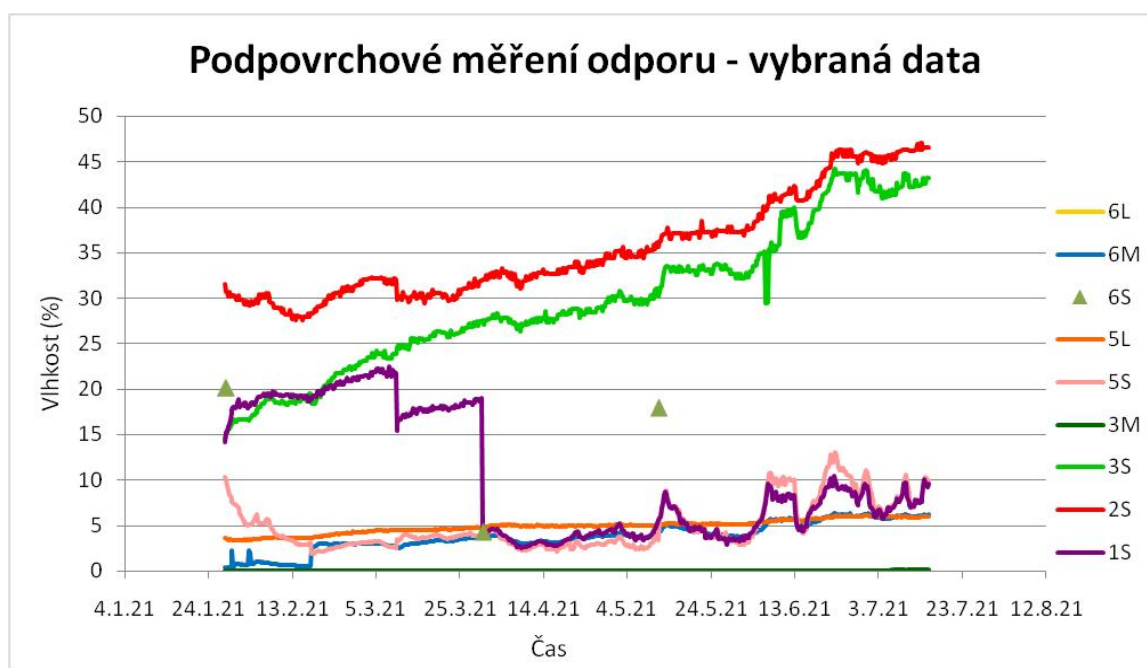
Na obrázku níže (Obr. 20) je zobrazen vývoj vlhkosti od 8/2020 do 4/2022. Hodnoty vlhkosti jsou značně rozkolísané, díky nekvalitnímu kontaktu elektrod s horninou. V 1/2021 byly elektrody vyjmuty z horniny a promazány vodivou grafitovou pastou pro zlepšení kontaktu.



Obr. 20. Souhrnný graf vývoje vlhkosti od 8/2020 do 4/2022. Body 1 až 6 jsou seřazeny od terénu, značky S, M a L u čísel znázorňují hloubku měření, S (short) 21 mm, M (medium) 60 mm a L (long) 200 mm.

Měření před aplikací vodivé pasty na povrch sond je méně přesné a zatížené chybou způsobenou nedostatečným kontaktem mezi elektrodami a materiálem. Chyby v měření se projevují skokovými změnami vlhkosti v řádech X0 %, příkladem je bod 1S (Obr. 20) kde se vlhkost skokově mění až o 25 %. Po aplikaci vodivé pasty se hodnoty vlhkosti ustálily (Obr. 21). Toto ustálení trvalo přibližně půl roku, po této době opět dochází k výrazným skokovým změnám vlhkosti o první desítky procent (Obr. 20). Skokové změny vlhkosti se objevují zejména u bodů 3S, 1S a 6M (Obr. 20).

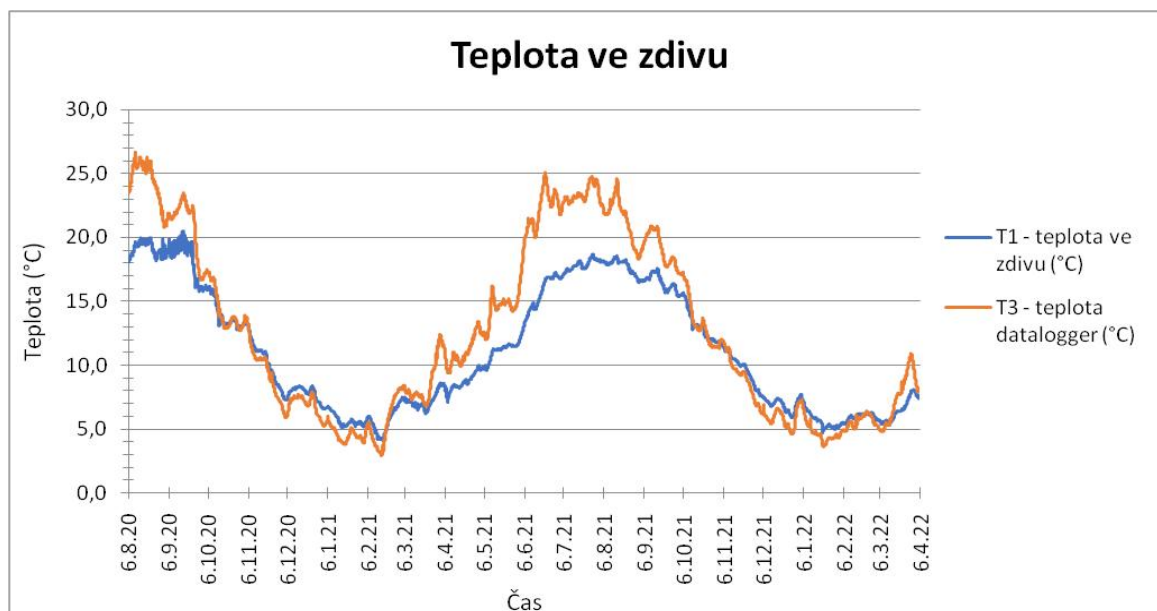
Na (Obr. 21) jsou zobrazena data za období 1/2021 až 7/2021 kdy byl kontakt elektrod s horninou zřejmě nejlepší za celou dobu měření, přesto i zde je patrné výrazné kolísání vlhkosti v bodě 1S. Obecně hodnoty od 1/2021 spíše stoupaly. Výraznější nárůst vlhkosti lze pozorovat u bodů 2S a 3S až k 45 % vlhkosti, pozvolnější nárůst vlhkosti lze pozorovat u bodů 6M, 5L, 5S a 1S. Hodnoty vlhkosti bodů 6L a 3M jsou velmi nízké a blíží se 0 %.



Obr. 21. Vývoj vlhkosti od 1/2021 do 7/2021. Body 1 až 6 jsou seřazeny od terénu, značky S, M a L u čísel znázorňují hloubku měření, S (short) 21 mm, M (medium) 60 mm a L (long) 200 mm.

Z hodnot vlhkosti nelze jasně říci, že by vlhkost klesala směrem vzhůru ve vertikálním profilu zdi tedy, že nejvyšší vlhkost je u paty stěny a nejnižší v jejím nejvyšším bodě. Například hodnoty zjištěné v bodě 1 (Obr. 6) zde prezentovaný elektrodou 1S se jeví s nízkými hodnotami vlhkosti od 3 % do 22 % jako sušší oproti bodům 2 a 3, kde se vlhkost pohybuje od 15 % do 46 % (Obr. 21). Z dlouhodobého pohledu se zdá, že hodnoty vlhkosti reagují na chod ročních období, s maximy během léta a minimem během zimy (Obr. 20), hodnocení je však znesnadněno rozkolísaností záznamu. Nejlépe jsou reakce na roční období patrné u bodu 2S, v jehož záznamu se v období 1/2021 až 4/2022 nevyskytují významné skokové změny vlhkosti, dále u bodů 5S a 1S, kde je reakce na roční chod viditelná v období 4/2021 až 4/2022, s občasnými skokovými změnami vlhkosti zejména u bodu 1S (obr. 20).

Během celého roku byla také zaznamenávána teplota zdiva (Obr. 22) umístění teplotního čidla je zobrazeno na obrázku rozmístění teplotních čidel (Obr. 7). Hodnoty se pohybují v rozmezí 5 - 20 °C a odpovídají chodu ročních období, nejnižší hodnoty byly zaznamenány v zimních měsících a nejvyšší v letních měsících.

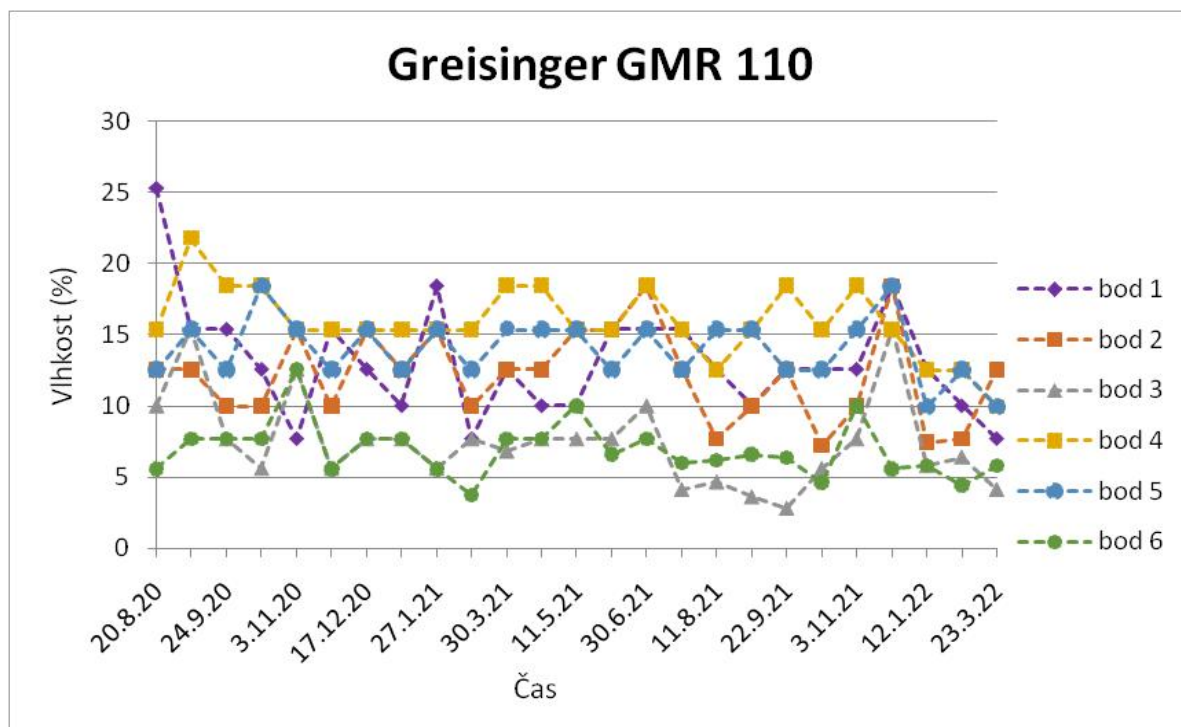


Obr. 22. Vývoj teploty zdiva a teploty vzduchu v blízkosti dataloggeru

4.1.2 Povrchové měření odporu GMR 110

Měření pomocí přístroje Greisinger GMR 110 byla provedena ručně. Přesnost měření dle výrobce je 0,2 %. Na souhrnném grafu (Obr. 23) lze sledovat vývoj vlhkosti v jednotlivých měřených bodech, přičemž bod 1 odpovídá nejnižšímu bodu měření a bod 6 nejvyššímu bodu měření (Obr. 6). Data jsou kalibrována, viz kapitola 3.3.1.

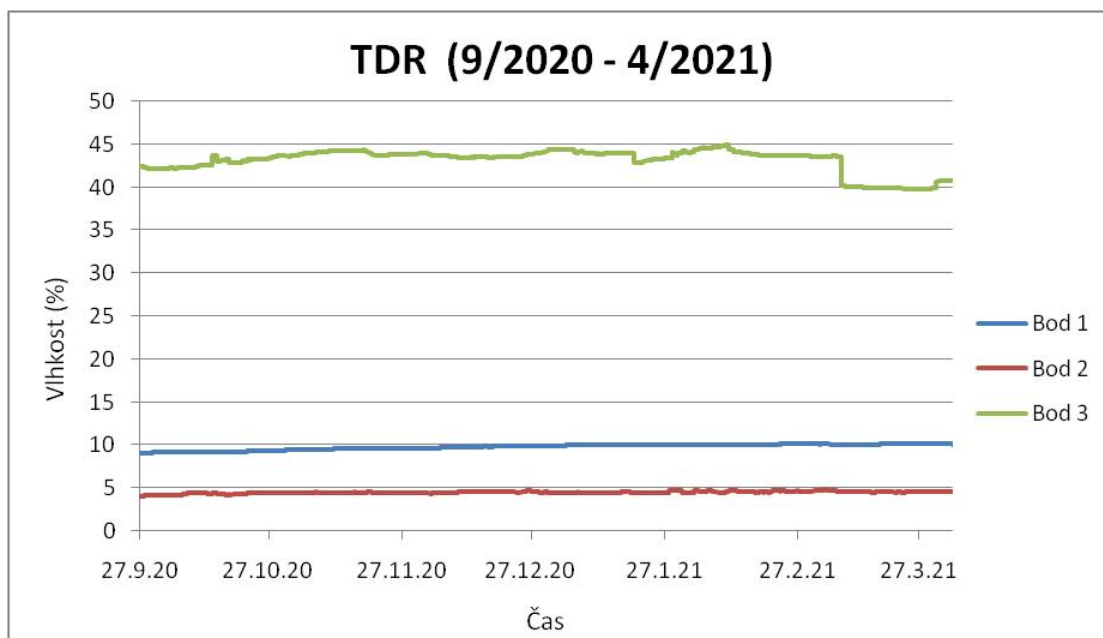
Obecně z dat nevyplývá žádný jasný trend a nelze zde zaznamenat vliv ročních období. V dlouhodobém měřítku jsou hodnoty vlhkosti v měřených bodech ustálené. Hodnoty se pohybují od 2,8 % vlhkosti až po 25,5 %, průměrná hodnota ze všech bodů měření je 11,6 % pro jednotlivé body měření se hodnoty vlhkosti mění, bod 1 - 13,1 %, bod 2 - 12,2 %, bod 3 - 7,4 %, bod 4 - 15,96 %, bod 5 - 14,08 % a bod 6 - 6,91%. Nejvíce ustálené hodnoty lze pozorovat u měřených bodů 4 a 5, ostatní body měření vykazují výraznější rozkolísanost, což se projevuje i na hodnotách průměrů. Z dlouhodobého pohledu vykazuje nízké hodnoty vlhkosti bod měření 6, který se nachází v nejvyšším měřeném úseku, nízké hodnoty vlhkosti vykazuje také měřený bod 3. Vysokých hodnot vlhkosti je dlouhodobě dosahováno u bodů 1, 2, 4 a 5. Celkově nejnižší hodnoty vlhkosti bylo dosaženo v bodě 3 dne 22. 9. 2021 a to 2,8 % objemové vlhkosti, nejvyšší naměřené hodnoty bylo dosaženo v bodě 1 dne 20. 8. 2020. Grafy vykreslující hodnoty vlhkosti jsou přiloženy v příloze 3.



Obr. 23. Vývoj měření vlhkosti přístrojem Greisinger GMR 110 na zdi mostu, souhrnný graf.

4.2 Metoda TDR

Měření TDR probíhalo ve dvou kampaních. První měření probíhalo od 8/2020 do 9/2020 a jeho výsledky jsou uvedeny v příloze (příloha 10). Další měřicí kampaň probíhala od 9/2020 do 3/2021 na třech měřících bodech pomocí přístroje METER TEROS 12 s frekvencí měření 6 hodin. Umístění měřících bodů viz (Obr. 6). Z výsledků vyplývá, že vlhkost stagnuje (Obr. 24). Ze tří instalovaných čidel jsem pozorovala výraznější změny ve vlhkosti pouze u čidla 3, které měří vlhkost půdy, kde vlhkost kolísá v řádech setin m^3/m^3 . Čidla 1 a 2 měří vlhkost zdiva (Obr. 6).

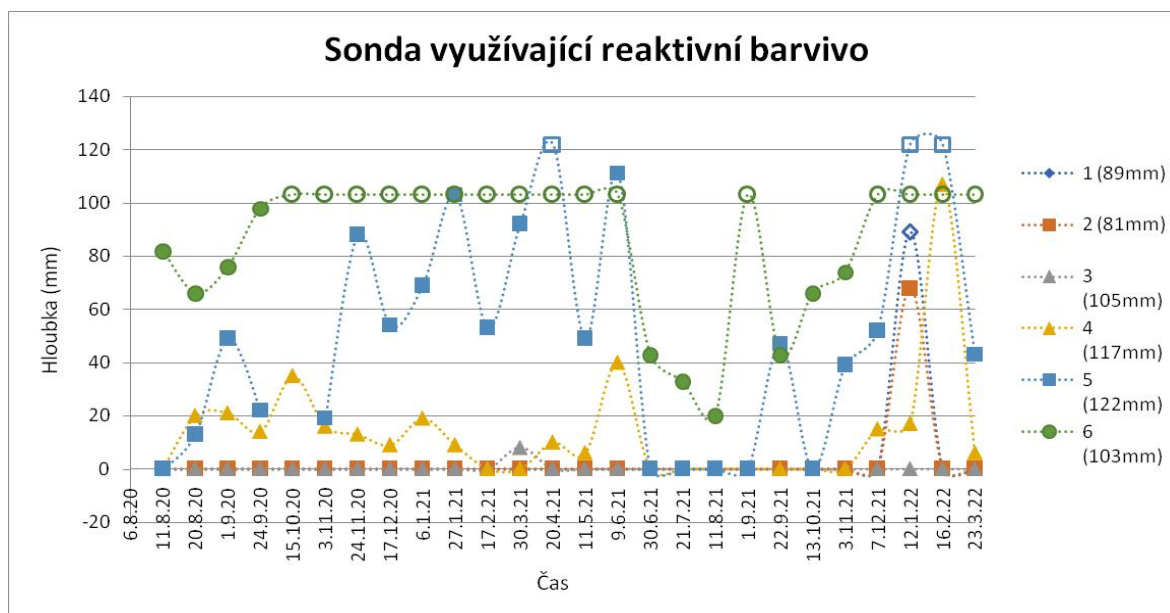


Obr. 24. Vývoj vlhkosti ve sledovaných bodech pomocí TDR, 9/2020 až 4/2021, označení bodů viz Obr. 6

4.3 Sonda využívající reaktivní barvivo

Výsledky metody využívající reaktivní barvivo jsou prezentovány ve formě hloubky, ve které se vyskytuje výparová fronta. Každý bod měření má jinou hloubku, ta je uvedena v závorce v legendě (Obr. 25). Hodnoty uvedené v grafu se rovnají hloubce, ve které byla zastižena výparová fronta. Nižší hodnoty značí situaci, kdy barvivo zreagovalo po celé délce vyvrtaného otvoru a výparová fronta dosahuje až k povrchu. Body bez výplně značí situaci, kdy nebyla zastižena výparová fronta, barvivo nezreagovalo.

U bodu 6 se ve velké části měření nebyla zastižena výparová fronta a barvivo vůbec nezreagovalo. Za relativně stagnující body lze považovat bod 1, 2 a 3, které trvale vykazují hodnoty rovnající se nule, tedy barvivo zreaguje po celé délce sondy. Body 4 a 5 vykazují větší rozkolísanost hodnot. U většiny bodů nelze vysledovat návaznost na chod ročních období. Jako výjimka z tohoto pravidla se jeví bod 5, který vykazuje posun výparové fronty směrem od povrchu do hloubky v zimních a jarních měsících (Obr. 25). V letních a podzimních měsících se výparová fronta u bodu 5 posunuje směrem k povrchu materiálu a barvivo reaguje po celé délce sondy. Podobný chod lze vysledovat u bodu 6, ovšem tento vývoj je zde méně výrazný. V zimních měsících je bod 6 spíše suchý a v letních a podzimních měsících je zde zastižena vlhkost, která ovšem nikdy nepostihuje celou hloubku otvoru. Body 5 a 6 se nacházejí v měřeném profilu nejvýše nad terénem (Obr. 6).

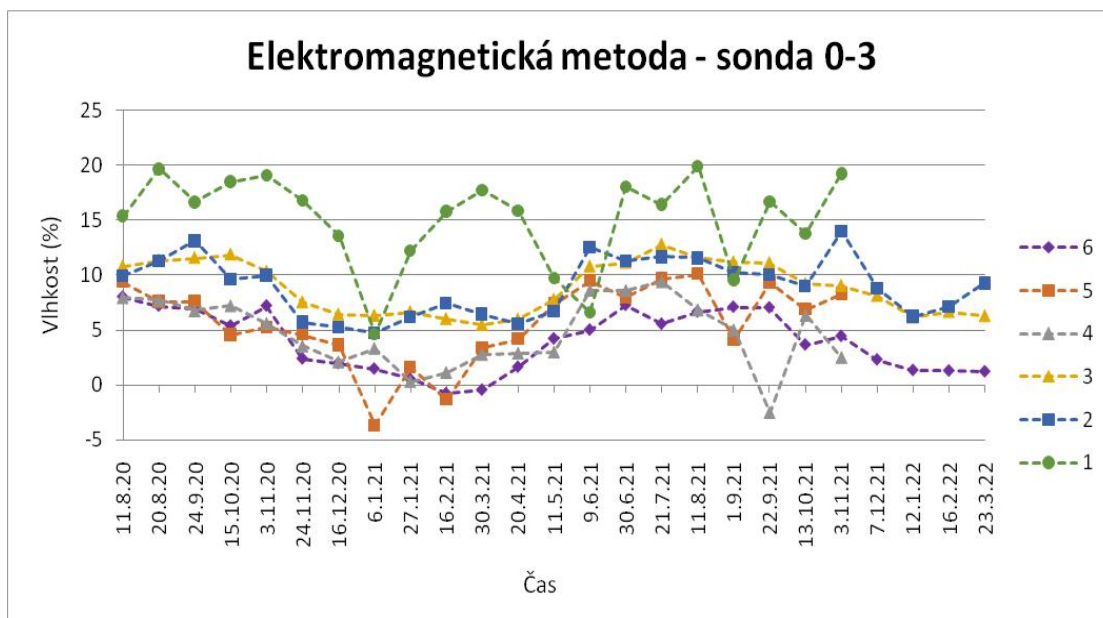


Obr. 25. Vývoj hloubky výparové fronty v měřených bodech, body 1 až 6 seřazeny od terénu, prázdné body ○ symbolizují měření, kdy nebyla zaznamenána kapalná voda.

4.4 Elektromagnetická metoda

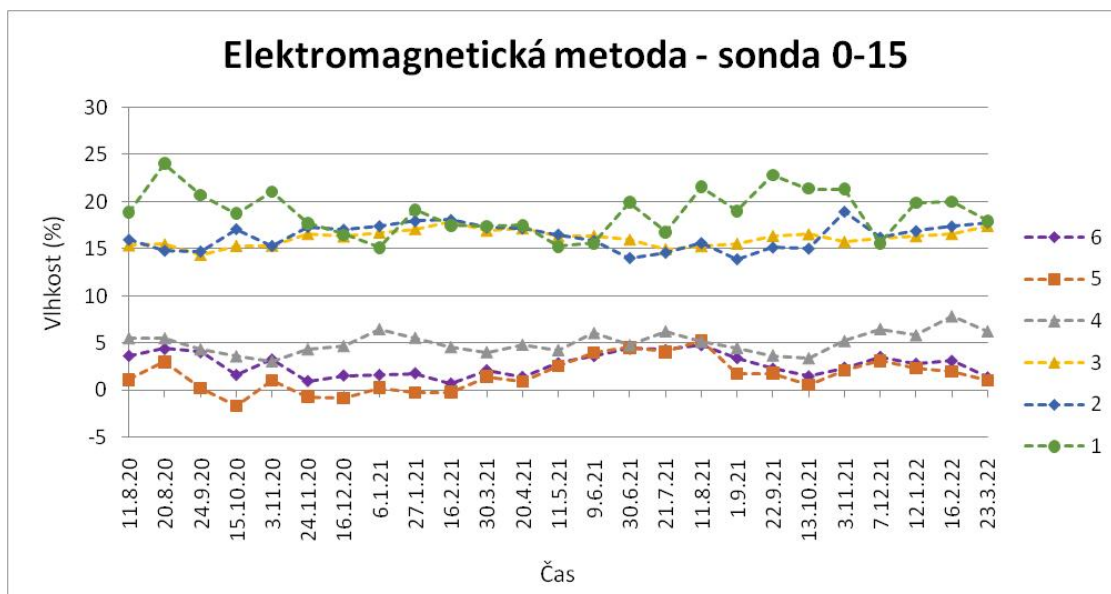
Měření MOIST bylo zajišťováno Ústavem teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky.

Výsledky MOIST 0-3 od 8/2020 do 3/2022, měřené v mělké hloubce (dle výrobce do 3 cm) dobře ukazují předpokládaný chod vlhkosti (Obr. 26), kdy nejvyšší vlhkost je naměřena u bodů níže nad terénem, body 1, 2, a 3. Nejnižších hodnot vlhkosti je dosaženo u bodů, které jsou vysoko na zdi, body 4, 5, a 6 (Obr. 6). Nejvíce vlhkost kolísá v bodě 1, který se nachází ve výšce 35 cm nad terénem. Ve vývoji hodnot vlhkosti u bodů 2 až 6 lze pozorovat nižší hodnoty během zimních a jarních měsíců a zvýšené hodnoty během letních a podzimních měsíců. Některé hodnoty ukazují na chybová měření, například hodnota z 6. 1. 2021 u bodu 5, nebo hodnota z 22. 9. 2021 u bodu 4. Tyto chyby mohou být dány kalibrací, která byla pro MOIST 0-3 nejméně přesná ze všech tří měřených hloubek (MOIST 0-15 a MOIST 0-30). Chyby mohou vznikat také v důsledku nerovnosti terénu, či nepřesným přiložením sondy k měřenému bodu.



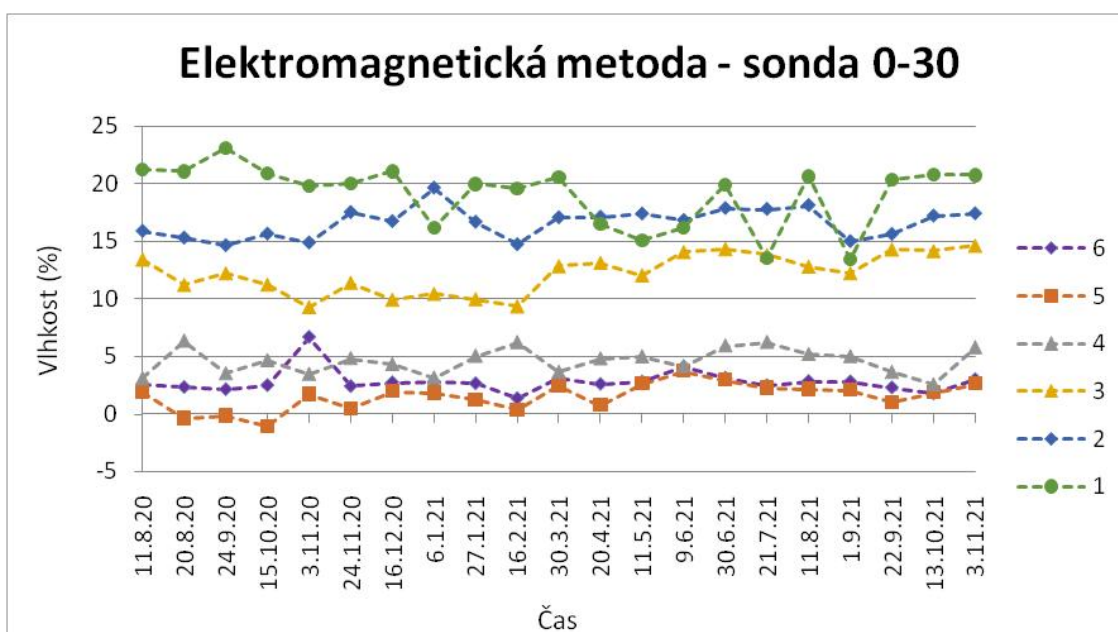
Obr. 26. Vývoj vlhkosti v měřených bodech na mostním pilíři, elektromagnetická metoda MOIST, sonda s dosahem 0-3 cm, 8/2020 až 3/2022

Měření MOIST 0-15, dle výrobce je hloubková dosah až 15 cm, dle Weiss et al. (2022) je dosah spíše menší, 11 cm, probíhalo v období 8/2020 až 3/2022. Je zde patrný rozdíl mezi dvěma skupinami bodů (Obr. 27). Jako vlhčí se projeví body 1, 2, a 3 a jako výrazně sušší body 4, 5, a 6 (Obr. 6). Vlhkost v bodě 1, blízko terénu je oproti průběhu vlhkosti ve zbylých měřených bodech více rozkolísaná. Jako nejsušší se jeví body 5 a 6, jejichž vlhkost se pohybuje v rozmezí 0 - 5 % vlhkosti. Oproti měření MOIST 0-3 je jednak patrný výrazný rozdíl ve vlhkosti mezi spodní a horní částí zdiva, ale zároveň je zde méně výrazný vliv ročních období. Rozdíly mezi naměřenou vlhkostí v letních a zimních měsících jsou malé, hodnoty vlhkosti spíše stagují.



Obr. 27. Vývoj vlhkosti v měřených bodech na mostním pilíři, elektromagnetická metoda MOIST, sonda s dosahem 0-15 cm, 8/2020 až 3/2022

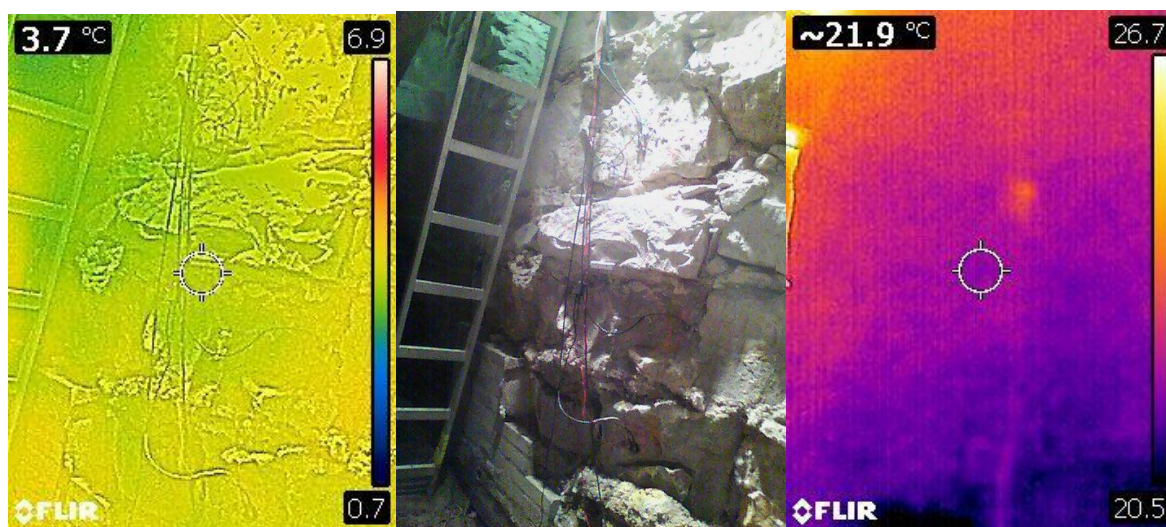
Měření MOIST 0-30, dle výrobce činí hloubkový dosah až 30 cm, probíhalo na pilíři mostu od 8/2020 do 11/2021. Jako nejvlhčí z měřených bodů se projevuje bod 1, u kterého jsou zároveň hodnoty oproti zbylým měřeným bodům rozkolísanější, jako poměrně vlhký se projevil také bod 2 (Obr. 28). Jako relativně sušší se projeví body vysoko na mostním pilíři body 4, 5 a 6 (Obr. 6), z nichž nejsušší je bod 5, což odpovídá výsledkům měření MOIST 0-15. Hodnoty vlhkosti všech bodů se jeví jako stagnující (Obr. 28).



Obr. 28. Vývoj vlhkosti v měřených bodech na mostním pilíři, elektromagnetická metoda MOIST, sonda s dosahem 0-15 cm, 8/2020 až 11/2021

4.5 Infračervené snímkování

Infračervené snímkování kamerou FLIR C2 Compact Thermal bylo využito opakovaně v letních i zimních měsících. Na několika vybraných snímcích je možné sledovat rozdíly mezi zimními a letními teplotami. Jak je vidět na snímcích (Obr. 29) v zimních měsících (levý snímek) jsou na lokalitě mostu teploty v celém vertikálním profilu poměrně vyrovnané. Během letních měsíců je teplota jednak vyšší, ale především se výrazně liší ve spodní části a v horní části profilu pilíře mostu o 3 °C a více (Obr. 29). Pomocí infračervených snímků nelze zjistit obsah vody ve snímaném materiálu, lze pouze odhalit výpar. Za určitých předpokladů lze lokalizovat povrchovou vlhkost zdiva, vlhkost na povrchu, nebo v jeho blízkosti se na snímcích projevuje snížením teploty. Během letních měsíců, kdy je v areálu tepleji, až kolem 20 °C se dá očekávat vyšší výpar než v chladném období.



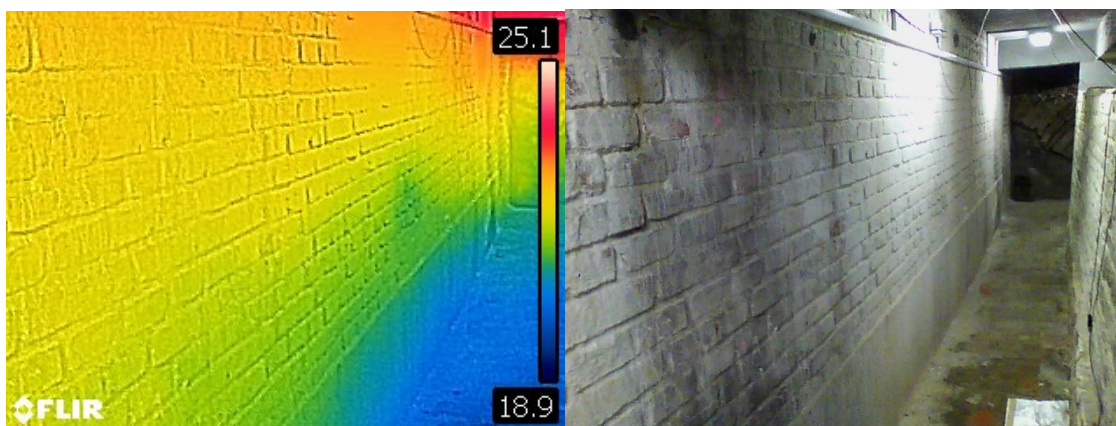
Obr. 29. Infračervené snímky a snímek ve viditelném spektru. Vlevo snímek z února 2021, uprostřed tentýž snímek ve viditelném spektru, vpravo snímek stejné lokality pořízený v srpnu 2020. Srovnání teplotních rozdílů mezi zimou a létem, převzato z Weiss et al. 2022.

Nasnímkovány byly i další lokality, například zdi, které byly následně proměřovány GMR 110, MOIST 0-15 a EM 100. Obrázek (Obr. 30) sítě „u štěrku“, byl pořízen 11. 8. 2021, stejně jako další níže prezentované snímky měřících sítí „sv. Bartoloměj“ a „u vchodu“ (Obr. 4). V letních měsících je viditelný teplotní rozdíl mezi patou a horní částí zdi, rozdíl mezi spodní a horní částí zdi je cirká 3 °C. Na obrázku jsou viditelné i vyšší teploty, kolem 23 °C ve stropní části, která se ohřívá od dopadajících paprsků slunce na III. nádvoří. Spodní část se zdá významně chladnější což napovídá, že zde dochází k většímu výparu. Pata zdi se na infračerveném snímku jeví jako vlhčí oproti vyšším partiím zdiva.



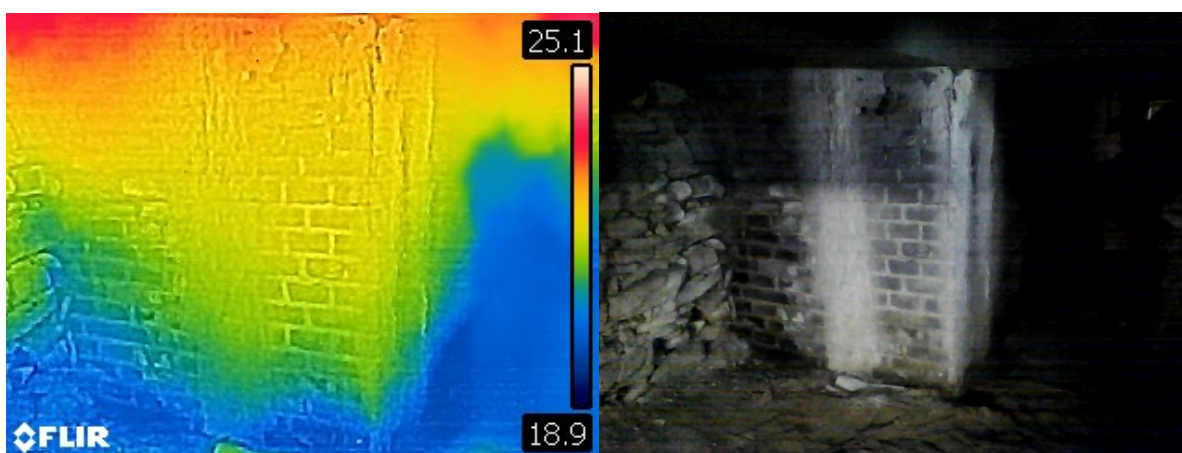
Obr. 30. Infračervený snímek sítě „u štěrku” (vlevo) a snímek stejného místa ve viditelném spektru (vpravo), pořízeno dne 11. 8. 2021, autor Martin Slavík.

Na snímku sítě „sv. Bartoloměj” (Obr. 31) je obdobně jako u sítě „u štěrku” (Obr. 30), viditelný teplotní rozdíl mezi spodní částí zdi a horní částí zdi, která je výrazně teplejší. Teplo do podzemních prostor proniká z III. nádvoří. Betonová podlaha chodby je na infračerveném snímku zachycena v modrých odstínech obdobně jako pata zdiva, na snímku ve viditelném spektru lze vidět vlhkost zejména na podlaze betonového chodníčku. V zelených odstínech se na infračerveném snímku jeví střední část zdiva, to může poukazovat jednak na méně významnou vlhkost, ale také se může jednat o vlhkou zónu ve větší hloubce zdiva. Vrchní část zdi se dle infračerveného snímku jeví jako relativně sušší oproti spodní části zdiva a patě zdi.



Obr. 31. Infračervený snímek sítě „sv. Bartoloměj” (vlevo), tentýž snímek ve viditelném spektru (vpravo), snímek byl pořízen 11. 8. 2021, autor Martin Slavík

Na snímcích sítě „u vchodu” (Obr. 32) lze vidět výše popsáný jev, tedy vyšší teploty ve vrchní části zdi a nižší teploty u paty zdi. Rozdíl teplot je zde přibližně 3 °C a stropní část je oproti patě zdi a terénu teplejší až o 6 °C. V této části areálu jsou zhoršené podmínky viditelnosti, část zdiva na pravé straně obrázku ve viditelném spektru proto zůstává ve tmě. Z infračerveného snímku se jako chladnější a patrně tedy i vlhčí jeví roh novějšího a původního zdiva (zcela vlevo) a také část zdi, která není na viditelném záběru patrná (zcela vpravo) (Obr. 32).



Obr. 32. Infračervený snímek sítě „u vchodu” (vlevo), tentýž snímek ve viditelném spektru (vpravo), snímek byl pořízen 11. 8. 2021, autor Martin Slavík

4.6 Měření vlhkosti vybraných zdí v archeologickém areálu

Vybrané úseky zdí byly měřeny odporovou metodou GMR 110 pomocí přístroje Greisinger GMR 110 a elektromagnetickou metodou EM 100 pomocí přístroje Greisinger

GMK 100, v případě těchto přístrojů bylo měření provedeno třikrát a to 8/2021, 9/2021 a 12/2021. Ve stejných bodech bylo provedeno měření také týmem z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky metodou MOIST 0-15 během pěti měřících kampaní a to: 6/2021, 8/2021, 11/2021, 12/2021 a 1/2022. Hodnoty nejsou kalibrovány, protože kalibrace pro odporovou metodu i pro elektromagnetickou metodu byla vytvořena pro opuku, ale vybrané zdi se sestávají z různých materiálů a z toho důvodu nemůže být využita. Měření přístrojem GMK 100 nebyla kvůli nerovnostem povrchu aplikována na celou síť bodů, protože v některých bodech měření byl povrch natolik nerovný, že by výsledky byly výrazně ovlivněny (viz kapitola 3.2). Lokality, kde bylo měření provedeno, jsou upřesněny v kapitolách 3.1 a 3.2 (Obr. 4, 12, 13).

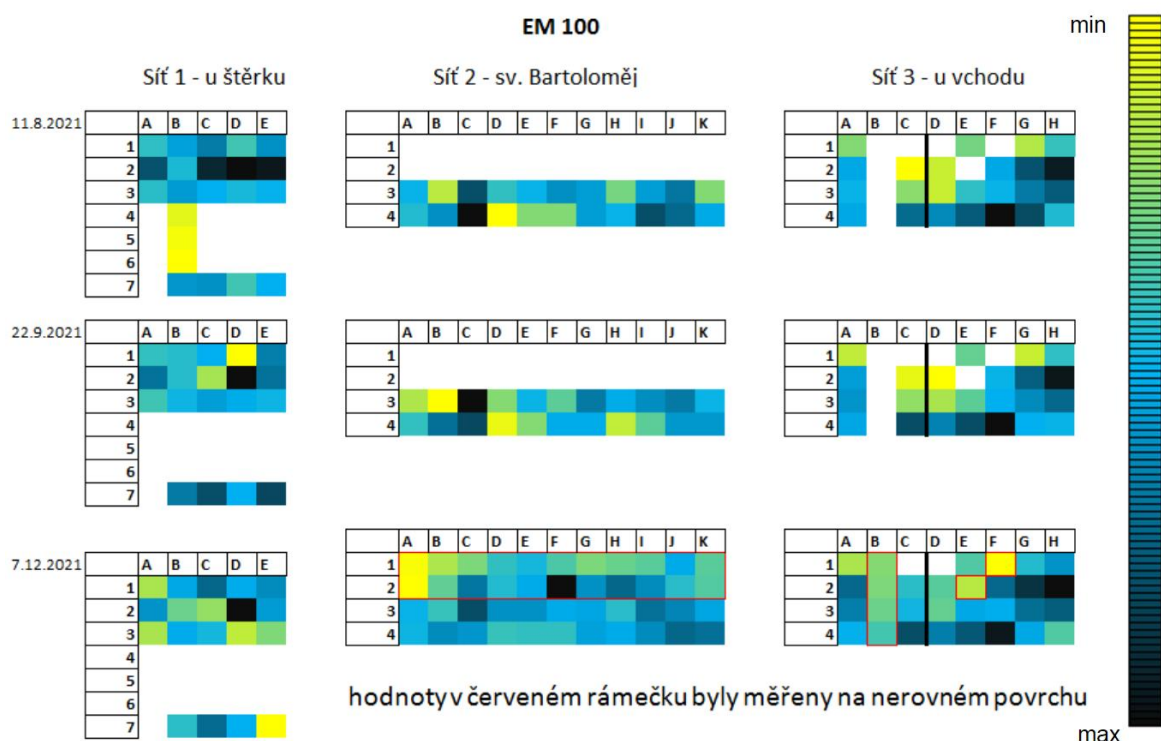
4.6.1 Měření elektromagnetickou metodou EM 100

První prezentovanou vybranou zdí je zeď „*u štěrku*“ (Obr. 4, 12). Z výsledků získaných pomocí EM 100 výrazně vybočuje bod D2, který byl výrazně vlhký při měření v 9/2021 a v 12/2021, při vůbec prvním měření 8/2021 se jako výrazně vlhčí oproti okolí jeví druhá řada bodů. Při prvním měření byly proměřeny i body B 4-6, které se jeví jako suché oproti okolí, kvůli nerovnému povrchu bylo při dalších cyklech měření upuštěno od měření těchto bodů. Při měření v září se jako vlhčí projeví body ve spodní části sítě a při měření v prosinci pak body 1C a 7C. Kromě těchto jmenovaných bodů a oblastí je vlhkost spíše vyrovnaná (Obr. 33).

Při měření sítě bodů „*sv. Bartoloměj*“ metodou EM 100 se jeví jako výrazně sušší levá horní část sítě, při měření v prosinci, kdy byla změřena celá síť (Obr. 33). Jako výrazně vlhčí oproti okolí byly zjištěny body 3C a 2F při měření v prosinci (Obr. 33). Spodní části sítě byly proměřeny ve všech případech. Spodní část sítě se jeví jako vlhká a stagnující, relativně nejvlhčími body jsou ve spodní části sítě dlouhodobě body 3C a 4C, jako relativně suché se jeví body 3B a 4D. V případě měřicí sítě „*sv. Bartoloměj*“ podaly metody EM 100 a GMR 110 rozdílné výsledky (Obr. 33, 34).

V měřicí síti „*u vchodu*“ se projeví relativně vlhčí zóny oproti okolí a to v levé části sítě body A2 a A3 zejména v prosinci a velká část bodů v pravé střední a spodní části sítě 1H, 2F - H, 3F - H a 4C - G, během všech tří měřících kampaní (Obr. 33). Několik bodů sítě „*u vchodu*“ měřených EM 100, se nacházelo na nerovném povrchu a to B 1 - 4, E2 a F1, naměřené hodnoty u těchto bodů je nutné brát jako potenciálně chybné, při měření v srpnu a září byly vynechány. Nebyly měřeny body C1 a D1, protože se v daném místě nachází část

železobetonové konstrukce nesoucí III. nádvoří, zároveň mezi sloupci C a D se nachází roh zdi (Obr. 13). V bezprostředním okolí bodů C1 a D1 se projevila relativně suší zóna oproti zbylým měřeným bodům během tří provedených měření, která je viditelná zejména v měřeních ze srpna a září, další relativně suší anomálií je bod F1 (Obr. 33), vzhledem k nerovnosti povrchu je výsledek zřejmě nepřesný. Vlhkost je na této síti bodů spíše stagnující.



Obr. 33. Vizualizace výsledků měření vybraných zdí pomocí přístroje Greisinger GMK 100. Jako relativně suší jsou označeny žluté oblasti, černá barva značí relativně vlhké části zdiva; červené rámečky vyznačují body s nerovným povrchem, černá linie na vizualizaci sítě „u vchodu“ mezi sloupci C a D značí roh zdi. Škála hodnot je lineární, hodnoty se pohybují v rozmezí 19 až 114.

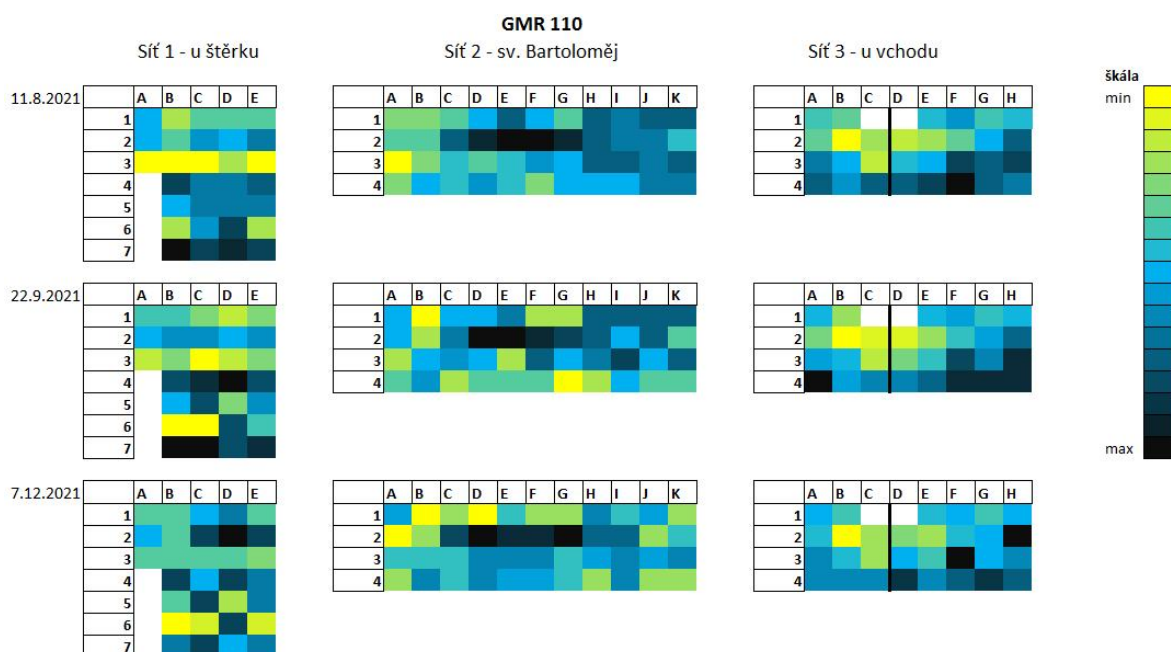
4.6.2 Měření odporovou metodou GMR 110

Výsledky měření zdi „u šterku“ pomocí GMR 110 jsou oproti měřením pomocí EM 100 ucelené. Jako relativně vlhčí oproti okolí se jeví celá řada bodů 7, což je patrné zejména při srpnovém a zářijovém měření, jako vlhčí oproti okolí se jeví také 4. - 6. řada bodů zejména při srpnovém měření, později se v těchto řadách vyskytují relativně suší body, u zbylých měření byly zjištěny spíše izolované vlhčí body, nikoli ucelené oblasti (Obr. 34). Relativně vlhčí oproti okolí jsou body 4 B-E, 5C, 5E, 6D, a řada 7 při měření v září a body v řadě 2 C-E, 4B, 4D, 5C, 6D a 7C při prosincovém měření. Naopak jako relativně suší body oproti

okolí se jeví body 6B, 6C a 6E při měření v září i v prosinci (Obr. 34). Nelze zde vysledovat jasnou zonalitu vlhkých a sušších oblastí (Obr. 34).

Jako relativně nejvlhčí část zdi „sv. Bartoloměj” byla při měření GMR 110 zjištěna 2. řada v rozsahu C až G (Obr. 34), tato vlhká zóna se projevuje při všech měřeních. V levé horní části měřicí sítě byla zjištěna relativně sušší zóna, která se více projevuje při měření v srpnu a v prosinci, méně výrazně se projevuje a při měření v září. Při měření stejné sítě pomocí EM 100 byla zjištěna relativně vlhčí zóna v pravé části měřicí sítě (Obr. 33 a 34), ale při měření přístrojem GMR 110 se tato zóna jeví srovnatelně vlhká jako okolí, tedy nijak nevybočuje, lehký náznak takové zóny lze pozorovat pouze v prosincovém měření v zelených odstínech.

Relativně sušší zóna se i v případě sítě bodů „u vchodu” nacházela v okolí neměřených bodů 1C a 1D. Jako relativně vlhčí zóna oproti okolí se jeví pravá střední a spodní část měřicí sítě a celá 4. řada bodů. Jako relativně vlhké lze vymezit 3. a 4. řadu, kromě bodu 3C - E, za relativně vlhké lze pokládat i sloupce E - H, kromě bodu 2E (Obr. 34). Tyto výsledky metody GMR 110 souhlasí s výsledky metody EM 100 zjištěnými v měřicí síti „u vchodu” (Obr. 33 a 34).



Obr. 34. Vizualizace výsledků měření vybraných zdí pomocí přístroje Greisinger GMR 110, jako relativně sušší zóny jsou označeny žluté a světle zelené odstíny, jako relativně vlhké jsou označeny černé odstíny, na síti „u vchodu” je černě vyznačen roh zdi mezi sloupci C a D. Škála hodnot je lineární, hodnoty se pohybují v rozmezí 13 až 29.

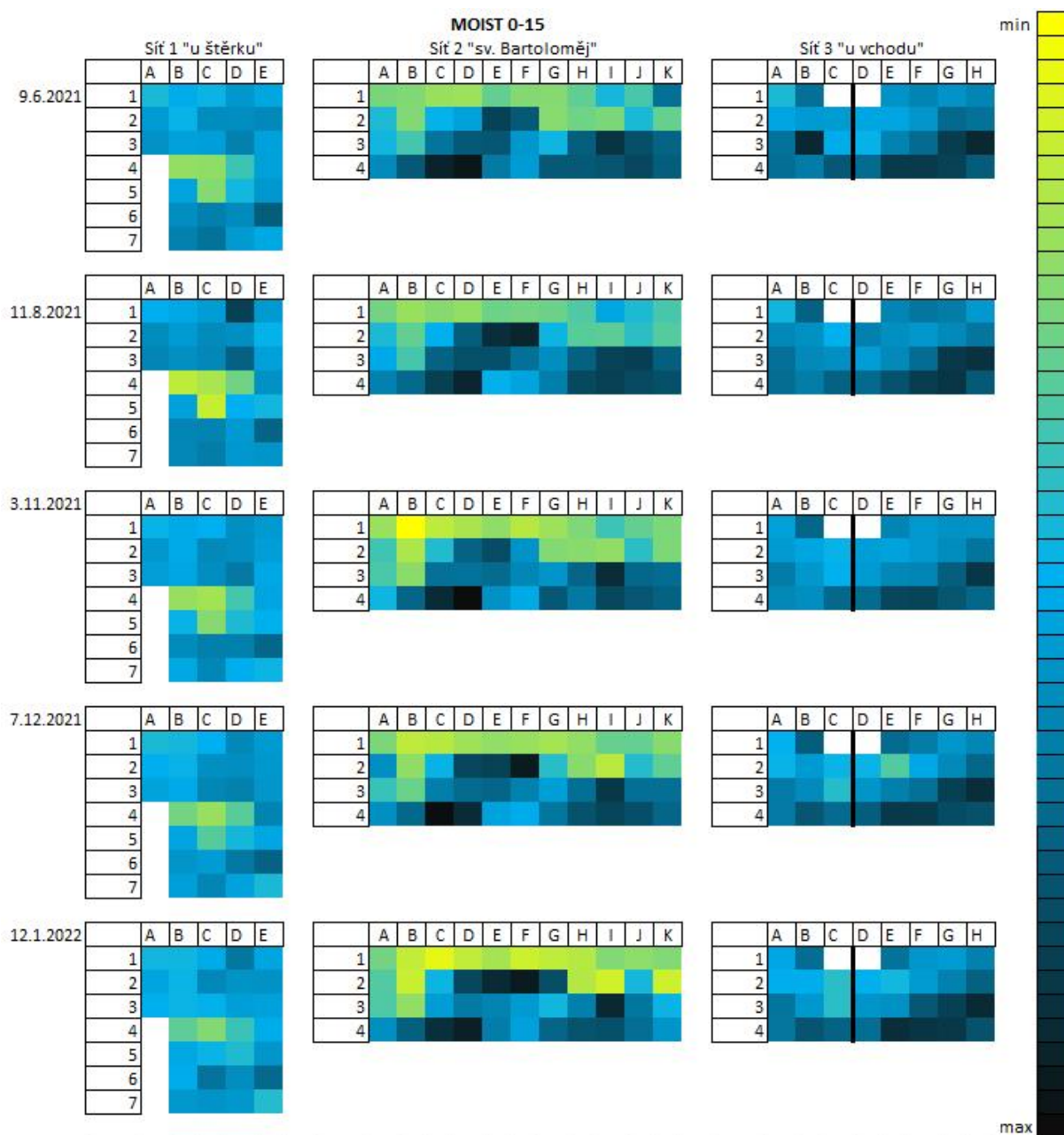
4.6.3 Měření elektromagnetickou metodou MOIST 0-15

Jak bylo zmíněno v úvodu této podkapitoly, stejné sítě bodů byly měřeny také kolegy z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, kteří využili přístroj MOIST 210 B. Získaná data jsou i v tomto případě nekalibrovaná a tedy pouze relativní.

Jako relativně sušší se na vybrané zdi „u štěrku” jeví body 4B, 4C, 5C a v některých případech i 4D. Body šesté řady se u měření MOIST 0-15 jeví spíše jako relativně vlhké, zejména bod 6E. Obecně z dat získaných měřením MOIST 0-15 plyne, že síť bodů „u štěrku” postupem času pomalu vlhne (Obr. 35).

Další zeď, „sv. Bartoloměj”, byla přístrojem MOIST proměřena kompletně. V horní části sítě je viditelná relativně sušší zóna, která postihuje prakticky celou řadu 1, a body 2B a 2E - K a 3B, zároveň z dat plyne, že tato oblast se stává relativně sušší, nejsušší při zatím posledním měření v 1/2022. Část druhé řady, body 2C až 2G se jeví jako relativně vlhčí oproti sousední sušší oblasti (Obr. 35).

Poslední vybraná zeď nazvaná „u vchodu” byla proměřena celá kromě bodů 1C a 1D. Zde se celá síť jeví jako poměrně vlhká v tmavě modrých až černých odstínech s relativně nejvlhčí pravou spodní částí sítě (Obr. 35). Za lehce sušší oblast lze označit okolí neměřených bodů 1C a 1D. U této sítě dochází spíše k stagnaci vlhkosti v čase.



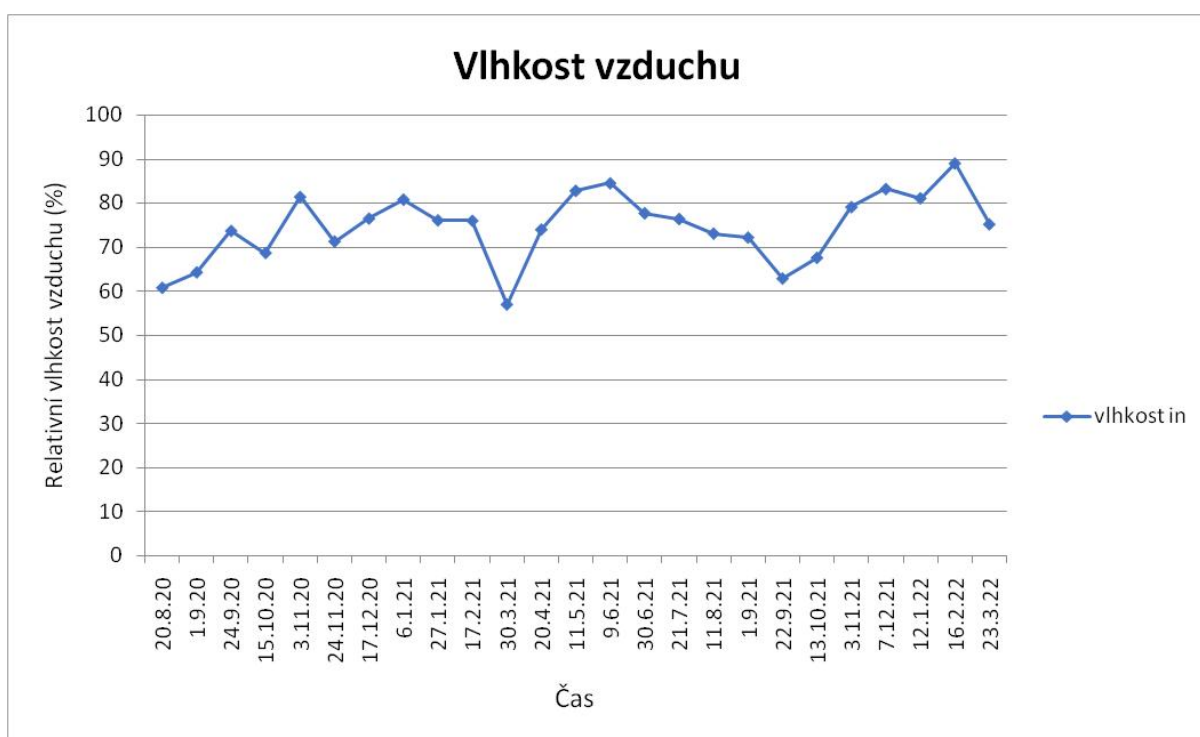
Obr. 35. - Vizualizace výsledků měření vybraných zdí pomocí přístroje MOIST 210 B (MOIST 0-15), data ÚTAM AV ČR, relativně sušší jsou zobrazena data v žlutých a zelených odstínech a jako relativně vlhčí jsou zobrazeny body v černých odstínech. Na síti „u vchodu” je černě vyznačen roh zdi mezi sloupci C a D. Škála hodnot je lineární, hodnoty se pohybují v rozmezí 870 až 1718.

4.7 Další měření

4.7.1 Relativní vlhkost vzduchu a teplota na lokalitě mostního pilíře

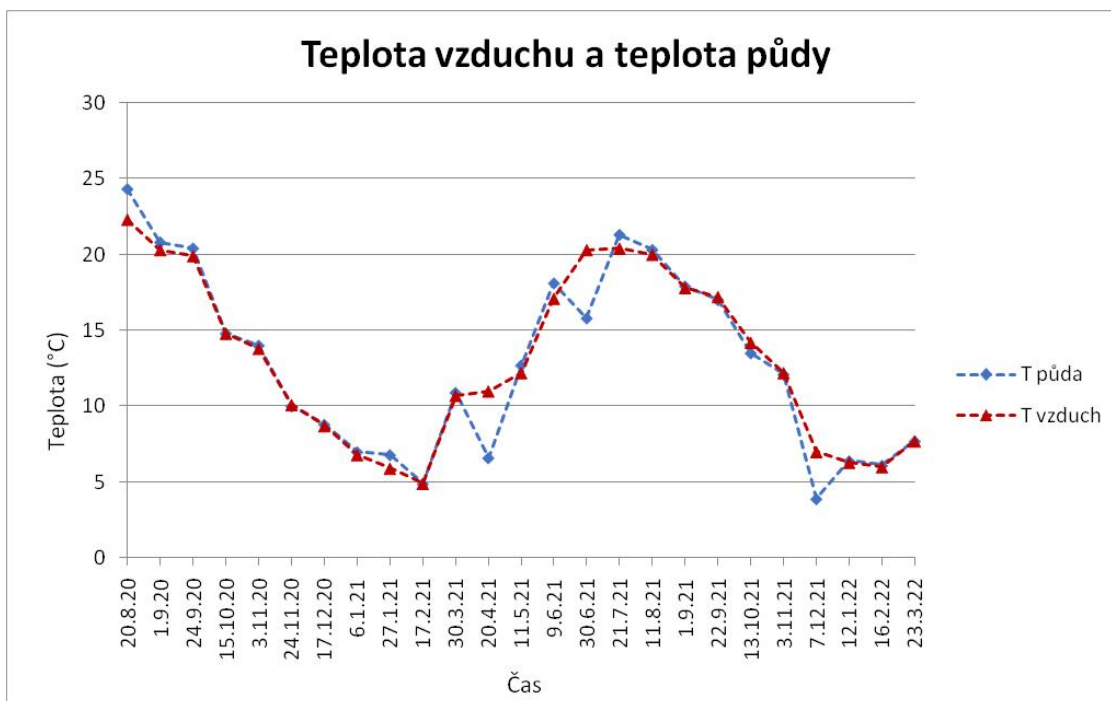
Relativní vlhkost vzduchu, jejíž měření probíhalo na lokalitě mostního pilíře (Obr. 7) je spíše vyšší, pohybuje se v rozmezí 57 % až 89 %, průměrná hodnota je 74,6 %. Nejnižší

hodnoty vlhkosti vzduchu bylo dosaženo v 3/2021 a nejvyšší v 2/2022. Během podzimu a zimy dochází k nárůstu relativní vlhkosti vzduchu 9/2020 1/2021, v jarních měsících pak k jejímu poklesu 3/2021 (Obr. 36). V jarním období roku 2021 dochází k nárůstu relativní vlhkosti a od 6/2021 do 9/2021 k jejímu poklesu. Následuje opět nárůst hodnot od 9/2021 do 2/2022. Zdá se tedy, že relativní vlhkost roste v podzimních měsících a poté klesá v zimních a jarních měsících. Tento vývoj zhruba odpovídá vývoji vlhkostí na sledovaných meteorologických stanicích (Obr. 52). Typicky je nejvyšších hodnot relativní vlhkosti dosahováno v podzimních a zimních měsících, nejnižší hodnoty bývají zaznamenávány od dubna do srpna, průběh relativní vlhkosti vzduchu je řízen mírou výparu.



Obr. 36. Vývoj vlhkosti vzduchu u sledovaného mostu, 8/2020 - 3/2022

U teploty vzduchu a teploty půdy, které byly měřeny u sledovaného mostu přístrojem Comet, lze sledovat jasný vliv ročních období (Obr. 37). Vyšší teploty kolem 20 °C zde panují v letních měsících, během zimy teploty klesají až k 5 °C. Po většinu roku jsou teploty vzduchu a teploty půdy srovnatelné. V letních měsících (srpen 2020, červen, červenec a srpen 2021) jsou teploty půdy lehce vyšší než teploty vzduchu, toto pravidlo neplatí absolutně, příkladem toho jsou hodnoty z 20. 4. 2021 a 30. 6. 2021 kdy je teplota půdy výrazně nižší než teplota vzduchu. Stejná situace nastala ještě jednou v zimě 2021 a to 7. 12. 2021.

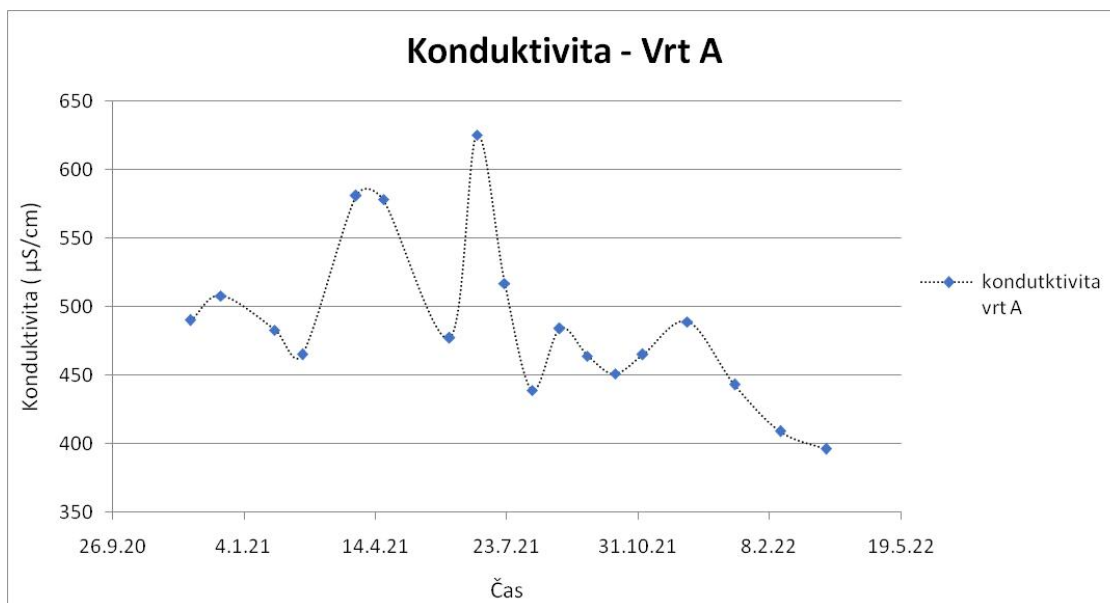


Obr. 37 - Vývoj teploty vzduchu a teploty půdy na lokalitě mostního pilíře.

4.7.2 Měření konduktivity

U podzemní vody, vody hromadící se v kalužích pod sledovanou stěnou mostu a také u skapu z krápníků a brček, které se nacházejí na lokalitě, byla měřena konduktivita (Obr. 5, 10, 11).

Konduktivita podzemní vody byla měřena ve vrtu A (Obr. 5) od 11/2020 do 3/2022. Hodnoty se pohybují v rozmezí 396 $\mu\text{S/cm}$ do 625 $\mu\text{S/cm}$, průměrná konduktivita vody ve vrtu A je 486,8 $\mu\text{S/cm}$ (Obr. 38). Většina hodnot se pohybuje v rozmezí 470 $\mu\text{S/cm}$ až 520 $\mu\text{S/cm}$, výjimku tvoří hodnoty z března, dubna a června 2021, které se pohybují výrazně nad hodnotami 550 $\mu\text{S/cm}$ (Obr. 38). Opačnou výjimku tvoří nejnižší naměřená hodnota 396 $\mu\text{S/cm}$ března 2022. Konduktivita vody ve vrtu A kopíruje průběh hladiny vody ve vrtu A (Obr. 43), s rostoucí hladinou ve vrtu roste i konduktivita a naopak s klesající hladinou klesají také hodnoty konduktivity.



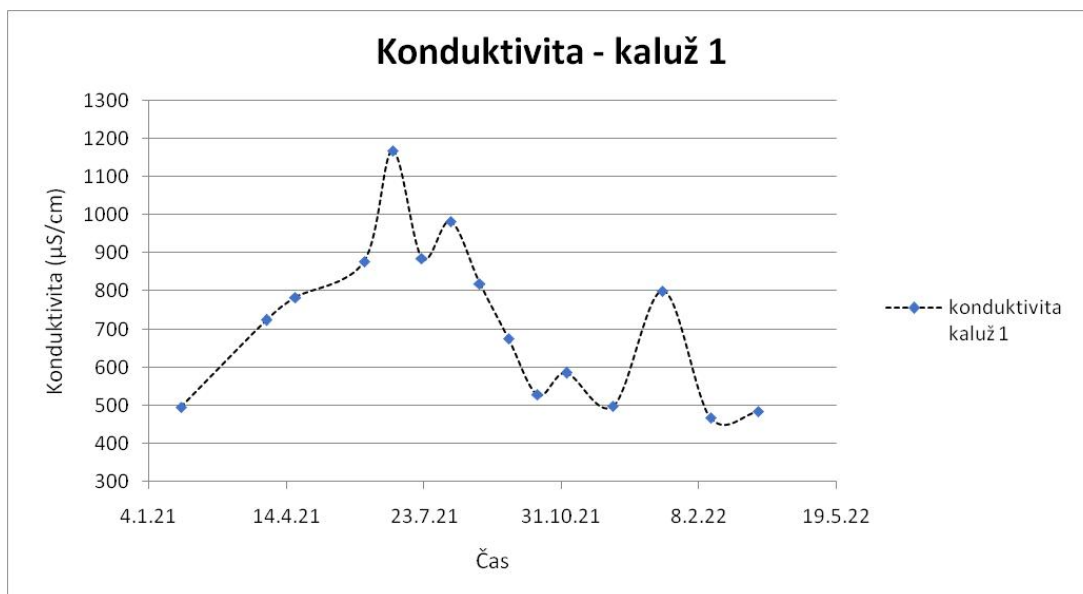
Obr. 38. Vývoj konduktivity podzemní vody, měřeno ve vrtu A.

Hodnoty konduktivity skapu (Obr. 10) byly měřeny od 11/2020 do 3/2022. Oproti poměrně nevyrovnaným hodnotám konduktivity vody ve vrtu A (Obr. 38), u konduktivity skapu lze pozorovat vyrovnanější hodnoty (Obr. 39). Hodnoty konduktivity skapu se pohybují mezi 261 $\mu\text{S/cm}$ a 839 $\mu\text{S/cm}$, průměrná hodnota je 361 $\mu\text{S/cm}$. Z poměrně ustálených hodnot vyčnívá nejvyšší naměřená konduktivita skapu ze dne 17. 12. 2020 (Obr. 39). Tato hodnota je odlehlá a v datovém souboru ojedinělá, velice pravděpodobně se jedná o chybu měření. Pokud pominu tuto odlehlou hodnotu je konduktivita skapu poměrně vyrovnaná od 261 $\mu\text{S/cm}$ do 403 $\mu\text{S/cm}$. Pokud porovnáím tento rozsah hodnot konduktivity u skapu s vrtem A, je u skapu vyrovnanější. Hodnoty jsou lehce vyšší v letním a podzimním období a nižší v zimním a jarním období, což je zřejmě ovlivněno změnami teploty, na které konduktivita reaguje.



Obr. 39. Vývoj konduktivity skapu.

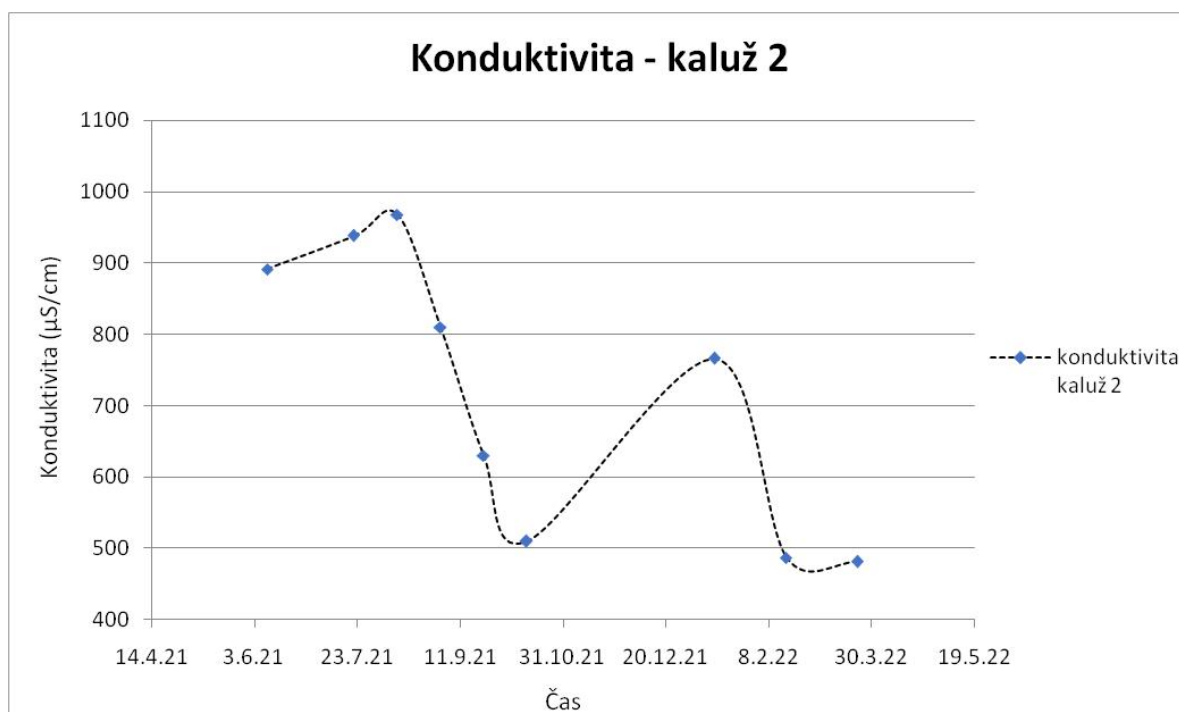
Hodnoty konduktivity byly měřeny v kaluži 1 (Obr. 11) od 1/2021 do 3/2022. Hodnoty konduktivity v kaluži 1 se pohybují mezi 467 $\mu\text{S/cm}$ a 1168 $\mu\text{S/cm}$, průměrná hodnota je 718,5 $\mu\text{S/cm}$. Obecně lze říci, že vyšších hodnot je dosaženo v letních měsících a v zimních měsících jsou hodnoty nižší. Z tohoto vývoje vyčnívá hodnota z 12. 1. 2022 a (Obr. 40), kdy byla naměřena poměrně vysoká hodnota konduktivity skapu a to 800 $\mu\text{S/cm}$, která zmíněnému vývoji neodpovídá. Výrazně vyšší hodnota konduktivity byla zaznamenána 30. 6. 2021 a to 1168 $\mu\text{S/cm}$ (Obr. 40), což může být spojeno s částečným zaplavením lokality. Po většinu roku jsou hodnoty konduktivity kaluže 1 vyšší, než hodnoty naměřené u skapu a ve vrtu A (Obr. 38, 39). Rozsah naměřených hodnot je také výrazně větší než tomu bylo u skapu a u vrtu A (Obr. 38, 39, 40).



Obr. 40. Vývoj konduktivity vody v kaluži 1.

Konduktivita v kaluži 2 (Obr. 11, 41), byla měřena po kratší dobu a to od 6/2021 do 3/2022, není zde tedy zastížen celý kalendářní rok. Hodnoty se pohybují v rozmezí 481 $\mu\text{S/cm}$ až 968 $\mu\text{S/cm}$, průměrná hodnota konduktivity je 720,1 $\mu\text{S/cm}$. Rozsah hodnot konduktivity vody v kaluži 2 je menší než rozsah hodnot v kaluži 1 (Obr. 40 a 41). Na grafu (Obr. 41), lze jasně vidět, že vyšších hodnot konduktivity je dosaženo v letních měsících a nižších hodnot v podzimních a zimních měsících, což je pravděpodobně ovlivněno změnami teplot. I zde existuje výjimka z tohoto tvrzení a to hodnota naměřená dne 12. 1. 2022, která činí 766 $\mu\text{S/cm}$ a neodpovídá zmíněnému tvrzení (Obr. 41).

Ze všech stanovišť, kde byla měřena konduktivita, jsou nejvyrovnanější hodnoty u skapu (Obr. 39), zbylá stanoviště vykazují větší rozkolísanost hodnot. Společně s konduktivitou byla měřena také teplota viz příloha 4.



Obr. 41. - Vývoj konduktivity vody v kaluži 2

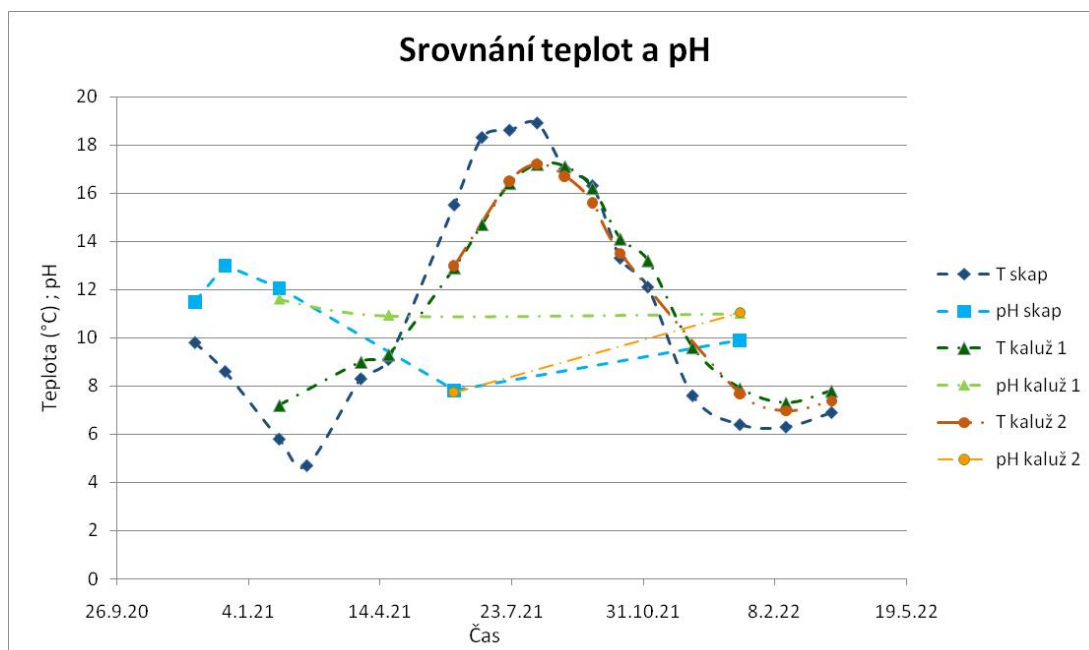
4.7.3 Měření pH

Na grafu (Obr. 42) je srovnání teplot a pH pro skap, kaluž 1 a kaluž 2 (Obr. 11), ve všech případech bylo pH měřeno nepravidelně. Vývoj pH má opačný trend k vývoji teploty (Obr. 42). Je známo, že pH dosahuje vyšších hodnot při nižších teplotách a naopak pH klesá s rostoucí teplotou. Nejvyšší naměřené pH skapu bylo 12,99 a nejnižší 7,81.

Teplota byla v kaluži 1 měřena od 1/2021 do 3/2022. Vývoj teploty v kaluži 1 odpovídá teplotnímu vývoji ve vrtu A a ve skapu (příloha 4). Nízké teploty byly zaznamenány v zimním období, následuje nárůst teploty na jaře a maxima je dosaženo v letních měsících a na podzim dochází k poklesu teplot. Maximální dosažená teplota vody v kaluži 1 je 17,2 °C a nejnižší teplota činí 7,2 °C. Hodnoty pH byly v kaluži 1 změřeny 3x za dobu měření. Lze očekávat stejný vývoj, který byl popsán u vývoje pH skapu, ovšem zde z důvodu nedostatku dat není podložitelný. Hodnoty pH se u vody z kaluže 1 pohybují kolem hodnoty 11 (Obr. 42).

V kaluži 2 byla teplota měřena od 6/2021 do 3/2022 a nepostihuje tedy celý kalendářní rok, nicméně teplotní vývoj je poměrně jasný (Obr. 42). V letních měsících byly zaznamenány nejvyšší teploty a to až 17,2 °C a nejnižší naměřená teplota v kaluži 2 je 7 °C. Obdobně jako u měření pH u kaluže 1, ani u kaluže 2 není k dispozici dostatek měření k

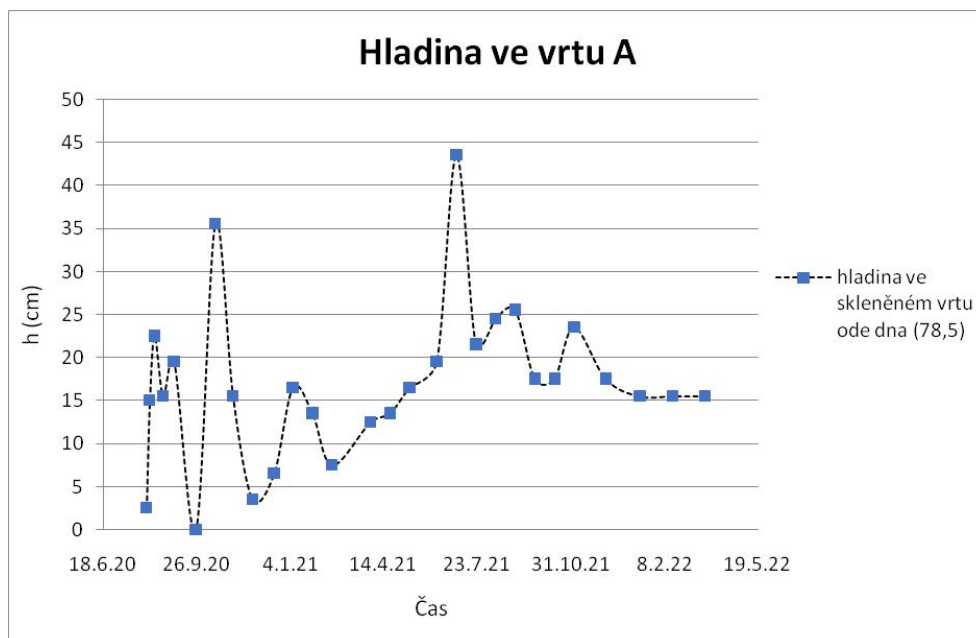
jasnému potvrzení vývoje hodnot pH. Nižší naměřená hodnota pH je 7,74 a vyšší 11,03 (Obr. 42).



Obr. 42. Srovnání vývoje teploty a pH, ve skapu, v kaluži 1 a kaluži 2. Na ose y hodnoty teploty odpovídají dané teplotě a hodnoty pH danému pH, byla použita jedna osa pro oba parametry.

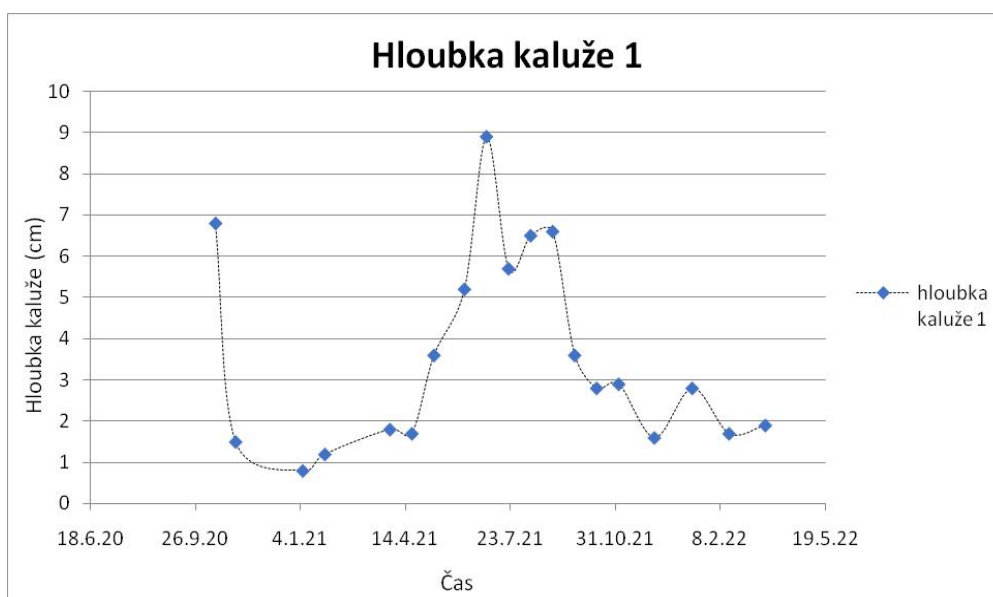
4.7.4 Měření hladiny podzemní vody a hladiny v kalužích

Dalším parametrem, který byl měřen je hladina podzemní vody ve vrtech. Hladina byla měřena ve vrtech A, B, C a D (Obr. 4; příloha 2), ovšem pouze ve vrtu A byla hladina podzemní vody zastižena. Na obrázku (Obr. 43) je znázorněn vývoj hladiny podzemní vody ve vrtu A. Nejvyšší hladina, 43,5 cm byla naměřena dne 30. 6. 2021, kdy došlo k významnému zaplavení prostoru kolem vrtu A. Další situace, kdy byla hladina poměrně vysoká, nastala dne 15. 10. 2020, kdy hladina dosáhla 35,5 cm, po intenzivních srážkách došlo také k zaplavení prostoru kolem vrtu A (příloha 5).



Obr. 43. Vývoj hladiny ve vrtu A od 8/2020 do 3/2022

V kaluži 1 (Obr. 11) byla měřena hladina v období 10/2020 až 3/2022. V 10/2020 byla naměřena poměrně vysoká hladina, která poté během zimních měsíců poklesla až téměř do vyschnutí. Hloubka se opět zvyšovala od 5/2021 a rostla až do 9/2021, poté opět hladina poklesla (Obr. 44). Nejvyšší hladina byla naměřena dne 30. 6. 2021, kdy byla lokalita částečně zaplavená (příloha 5). Poměrně zřetelně je na hodnotách výšky hladiny kaluže 1 viditelná sezonalita, během jara a léta je hladina vyšší a během zimních měsíců hladina klesá, až vysychá.

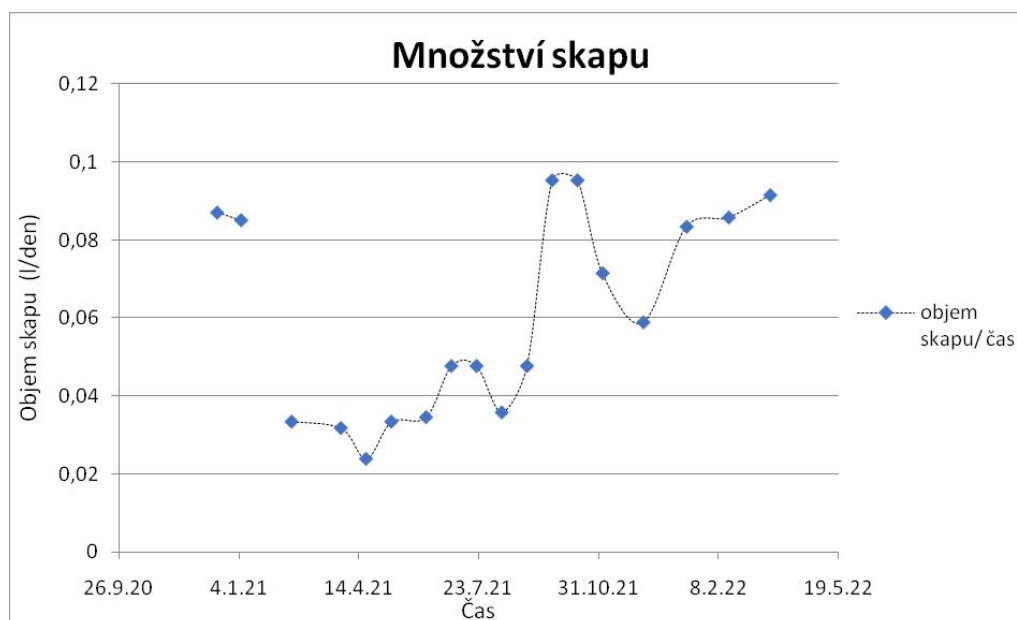


Obr. 44 - Vývoj hloubky kaluže 1 od září 2020 do února 2022

4.7.5 Měření objemu skapu

Skap z brček a krápníků nacházejících se na lokalitě (Obr. 10) byl zachytáván do 10 l nádoby a byl zaznamenáván objem skapu za pomoci měrky s ryskami po 1 l. Objem skapu byl zjišťován, během ručně prováděných měření v různě dlouhých intervalech. Aby bylo možné zhodnotit množství skapu byla hodnota odhadnutého objemu vydělena počtem dní uplynulých od posledního měření, výpar z nádoby je zanedbáván.

Vysoké hodnoty skapu kolem 0,08 až 0,09 l/den byly pozorovány v prosinci a lednu 2020 a v zimních měsících 2021 a 2022. Během jarních a letních měsíců roku 2021 byl objem skapu výrazně nižší. Minimální objem skapu byl naměřen během dubna 2021, odpovídá 0,024 l/den, maximální naměřená hodnota odpovídá 0,095 l/den a byla naměřena během září a října 2021. Průměrná hodnota skapu činí 0,06 l/den, ovšem taková hodnota je poměrně zavádějící (Obr. 45), průměr hodnot od března do začátku září, tedy letní průměr je 0,037 l/den a zimní průměr, počítaný od září do března je 0,083 l/den. Z výsledků poměrně jasně plyne, že objem skapu je vyšší v zimních měsících a nižší v letních měsících (Obr. 45).



Obr. 45. - Vývoj množství skapu v období 12/2020 až 3/2022.

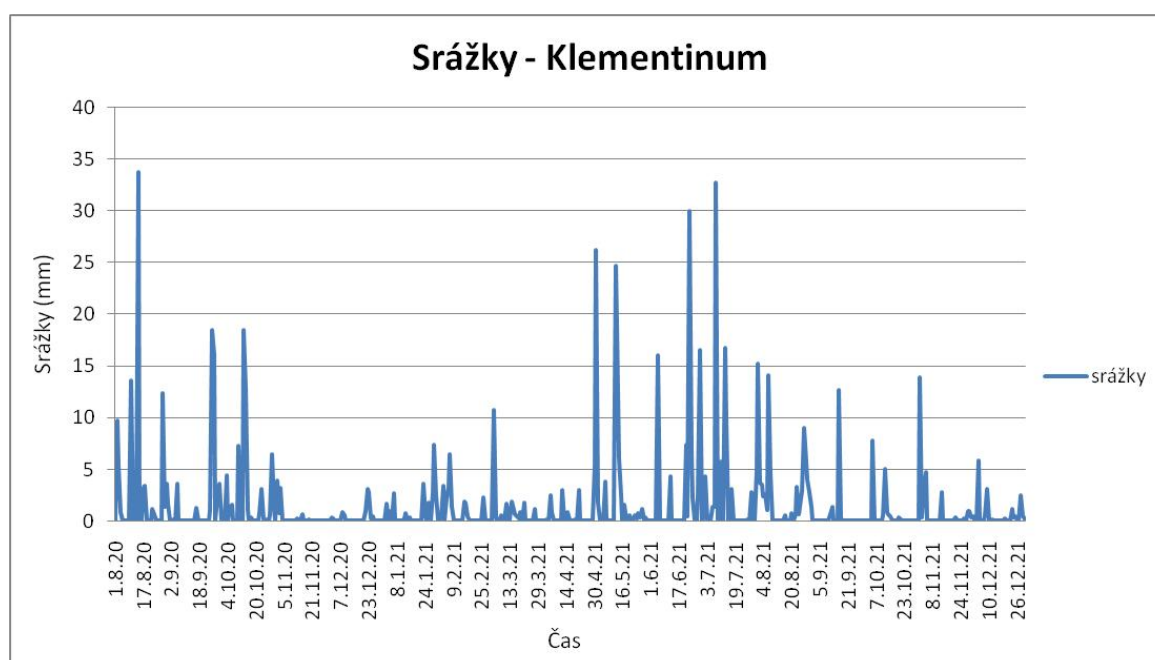
4.8 Meteorologická data

Data prezentovaná v této podkapitole jsou denní data poskytovaná Českým hydrometeorologickým ústavem. Byly vybrány tři meteorologické stanice v relativní blízkosti Pražského Hradu a to Klementinum (190,7 m. n. m.), Ruzyně (364 m. n. m.) a Břevnov (355

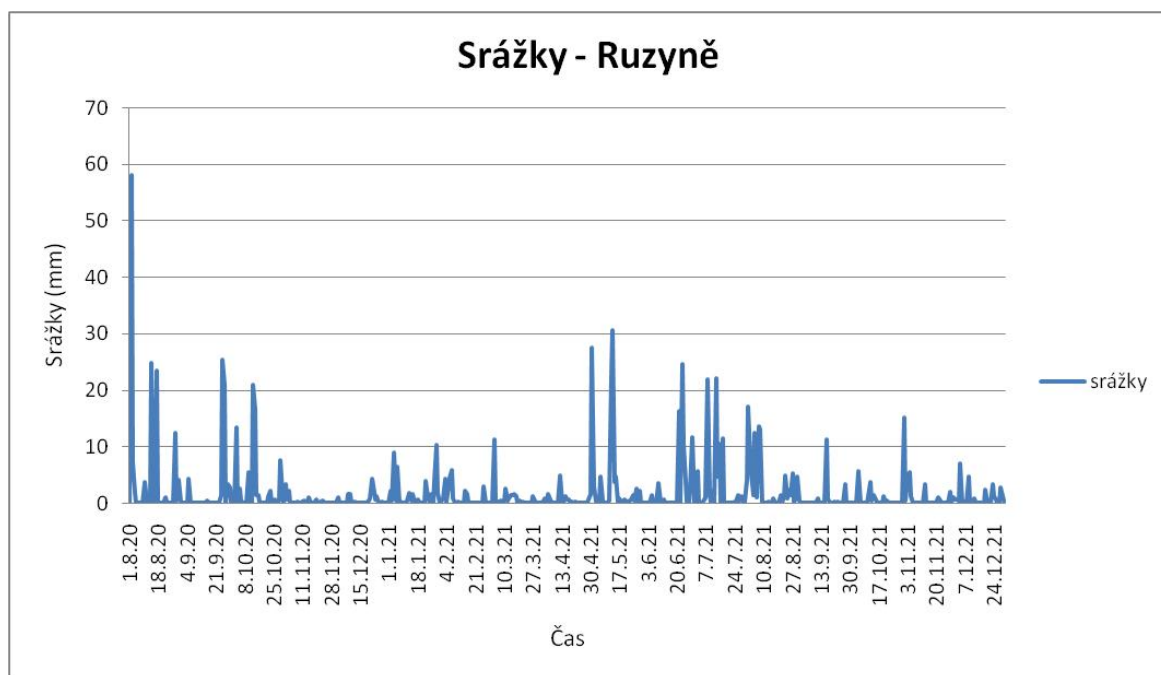
m. n. m.). U stanic Klementinum a Ruzyně jsou prezentována data průměrných, maximálních a minimální denních teplot, relativní vlhkosti vzduchu a úhrnu srážek. U stanice Břevnov jsou dostupná pouze data o úhrnu srážek. Prezentována jsou data od 8/2020 do 12/2021, data za rok 2022 jsou v době psaní této práce nedostupná.

V datovém souboru volně sdíleném ČHMÚ jsou některé hodnoty srážek označené jako neměřitelná hodnota, takové úhrny byly v této práci považovány za nulové. Ve stanici Klementinum se během zmíněného období vyskytuje více výraznějších srážkových událostí, které lze identifikovat u všech tří stanic (Obr. 49). Při bližším prozkoumání dat je patrné, že rozložení srážek nad Prahou není rovnoměrné, například při srážkové události dne 2. 8. 2020 bylo ve stanici Klementinum naměřeno 10 mm úhrn, v stanici Břevnov 20 mm úhrn a ve stanici Ruzyně dokonce 58 mm úhrn (Obr. 46, 47, 48, 49). Obecně jsou zjištěné úhrny nejnižší ve stanici Klementinum

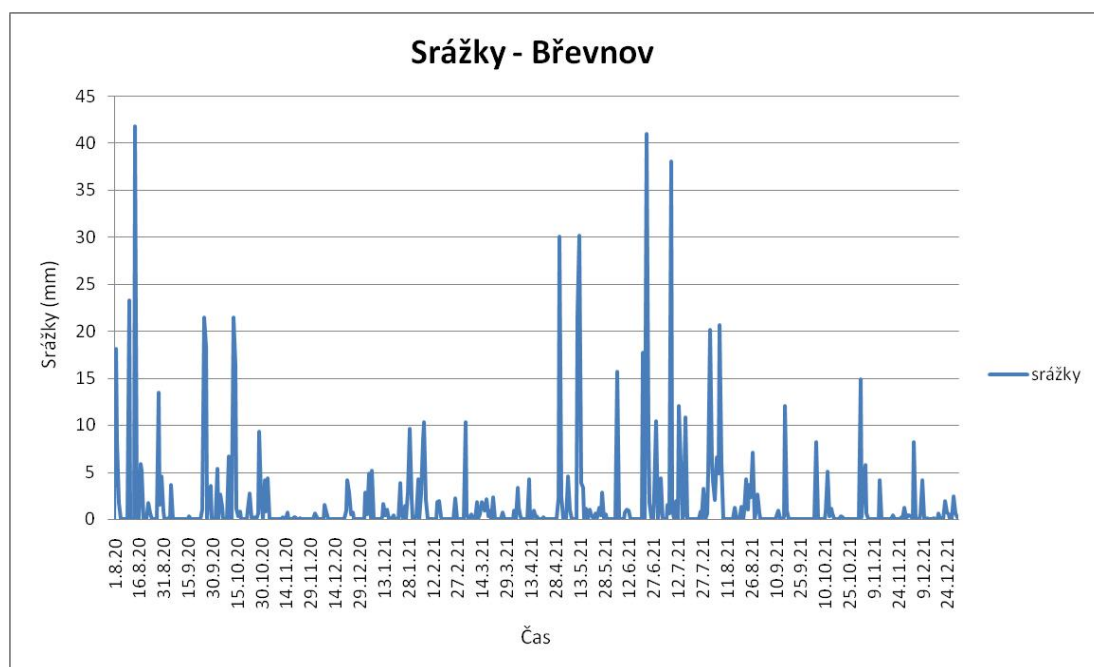
Dne 15. 10. 2020 bylo prováděno ruční měření v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu, při této měřicí kampani bylo pozorováno částečné zaplavení okolí vrtu A (příloha 5). Na všech třech stanicích byly pozorovány úhrny srážek 13. a 14. 10. 2020 a to 21 a 16 mm pro tyto dny na stanicích Ruzyně a Břevnov a 18 a 13 mm na stanici Klementinum. Další zaplavení bylo pozorováno při měření dne 30. 6. 2021 (příloha 5), den před tímto měřením byly zaznamenány srážky na všech stanicích kolem 10 - 16 mm a týden před měřením byly srážky na stanicích v rozmezí 24 - 41 mm (Obr. 49).



Obr. 46. Úhrn srážek za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Klementinum, zdroj dat ČHMÚ.



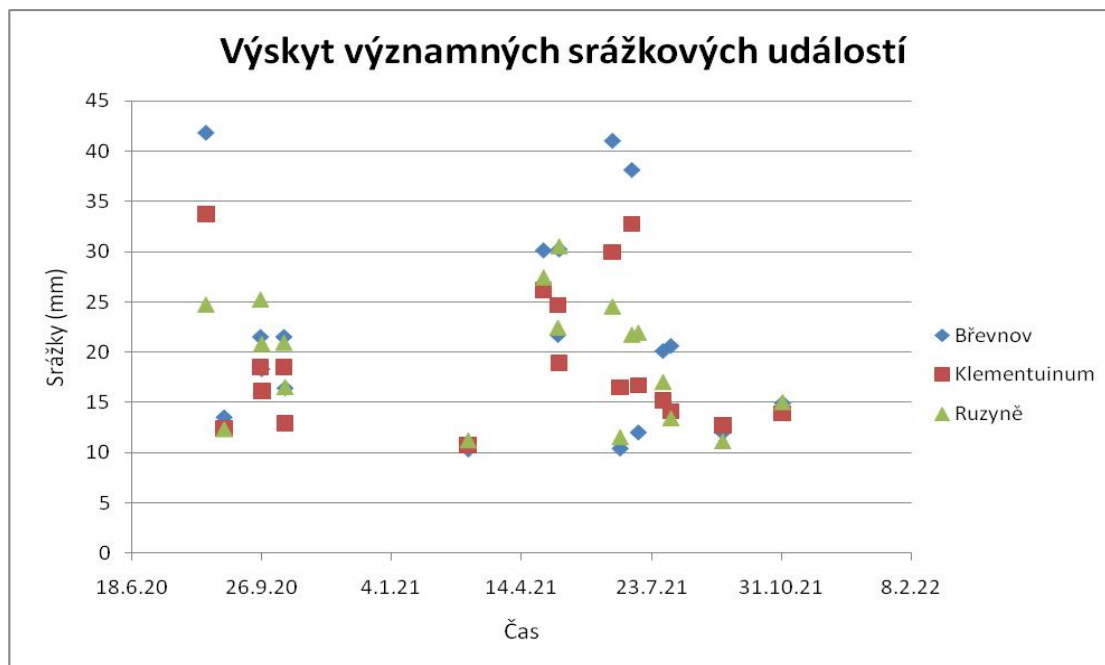
Obr. 47. Úhrn srážek za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Ruzyně, zdroj dat ČHMÚ.



Obr. 48. Úhrn srážek za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Břevnov, zdroj dat ČHMÚ.

Na následujícím grafu (Obr. 49) jsou zobrazeny vybrané hodnoty srážek pro všechny tři stanice. Vybrané srážkové události mají úhrn srážek vyšší nebo roven 10 mm/den, zároveň byly filtrovány jen takové události, kdy byly srážky vyšší či rovné 10 mm/den zaznamenány

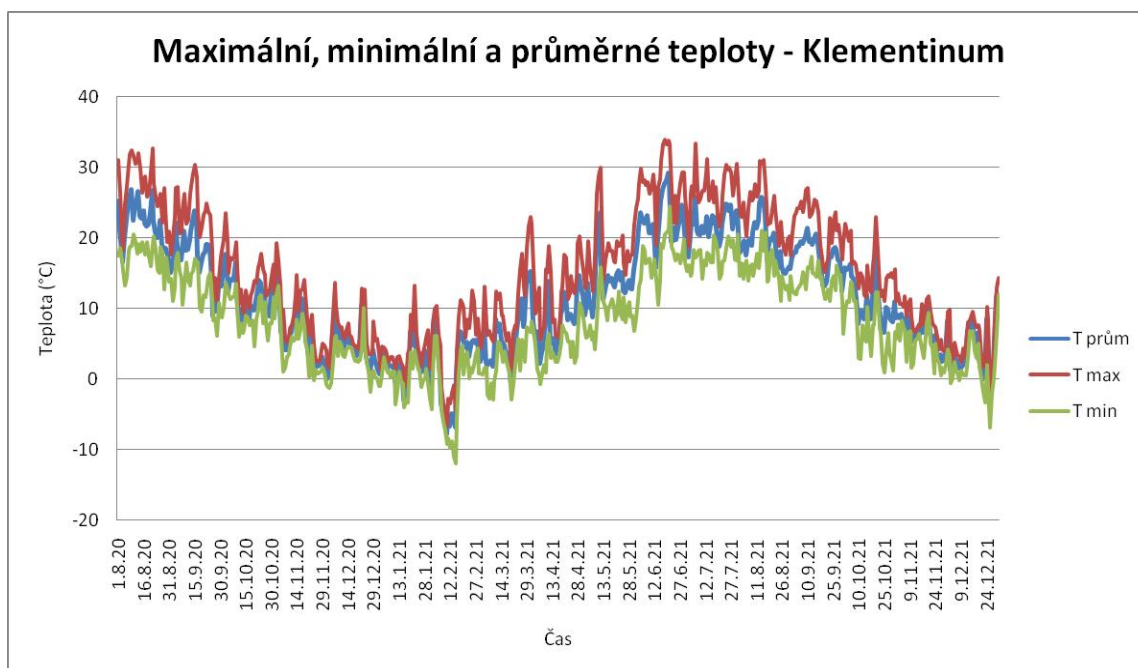
na všech třech sledovaných stanicích ve stejný den. Události splňující popsané parametry se vyskytují zejména v letních měsících. Význam srážek roste, pokud se srážkové události nad 10 mm/den opakují v řádu několika dní, jako tomu bylo v případě události zatopení okolí vrtu A 15. 10. 2020 (příloha 5) (Obr. 49.)



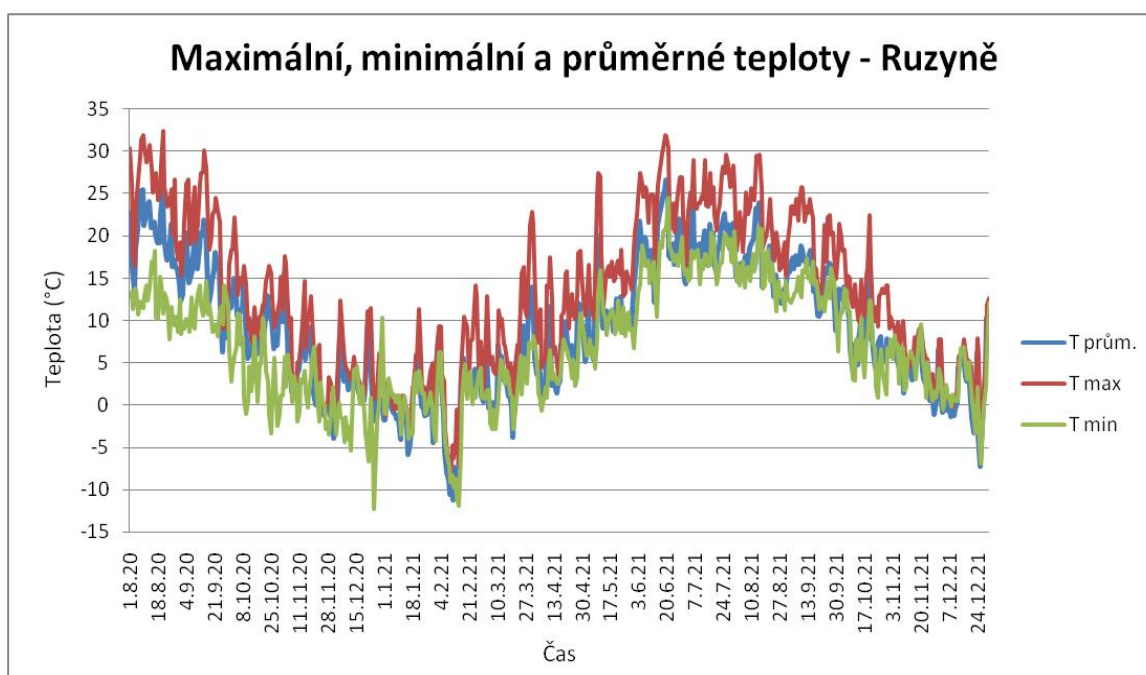
Obr. 49. Výskyt srážek 10 mm/den a vyšších na sledovaných stanicích Břevnov, Klementinum a Ruzyně.

Na obrázcích níže (Obr. 50, 51) jsou prezentovány maximální, minimální a průměrné denní teploty z meteorologických stanic Klementinum a Ruzyně. Teplotní vývoj je dle očekávání shodný v obou případech. Minima teplot jsou nižší u stanice Ruzyně, než u stanice Klementinum, to je zřejmě způsobeno efektem tepelného ostrova města. Stanice Klementinum se nachází v centru města a stanice Ruzyně na okraji města. Během 2/2021 byly zaznamenány teploty klesající až k $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, z teplotních dat měřených přímo v areálu však vyplývá, že v tomto období klesla teplota v okolí mostního pilíře k $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, zároveň během letních měsíců se maxima teplot pohybují kolem $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž na sledované lokalitě byla nejvyšší naměřená teplota $< 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Obr. 37). Hodnota korelačního koeficientu průměrných teplot pro stanice Klementinum a Ruzyně činí 0,996. Srovnala jsem také průměrné teploty ze stanice Klementinum s teplotami z lokality mostního pilíře (Obr. 37 - teplota vzduchu), hodnota korelačního koeficientu byla 0,84 a při srovnání průměrných teplot ze stanice

Ruzyně s lokalitou mostního pilíře je hodnota korelačního koeficientu také 0,84 (korelováno funkcí CORREL).

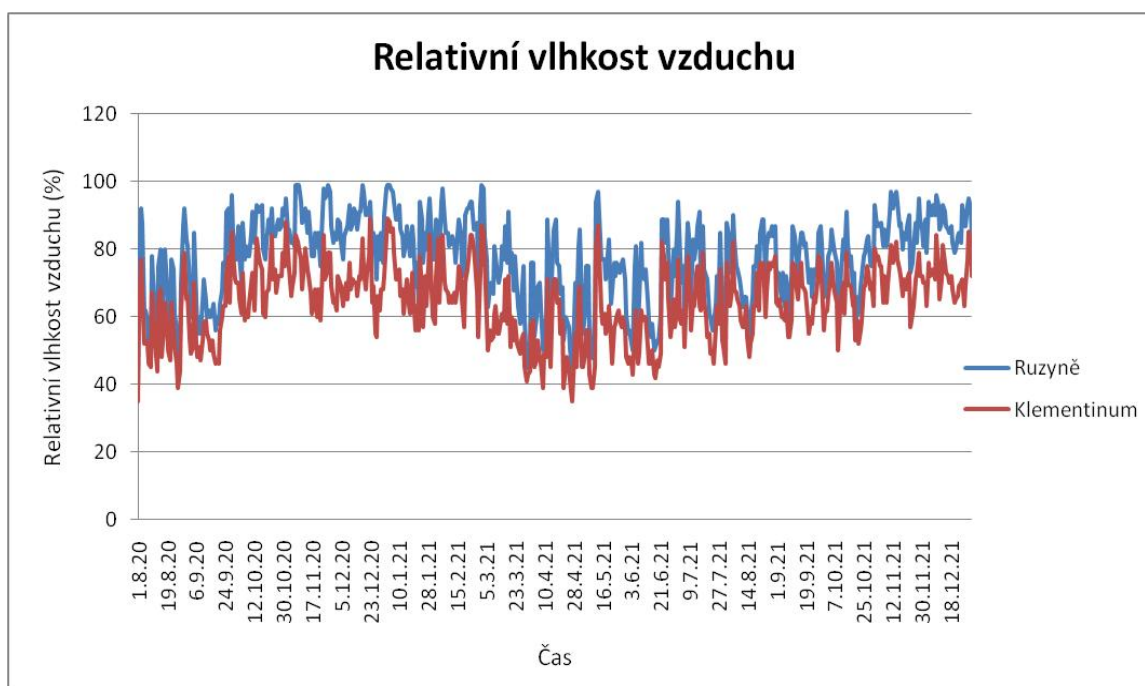


Obr. 50. Maximální (červená), minimální (zelená) a průměrné (modrá) teploty za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Klementinum, zdroj dat ČHMÚ.



Obr. 51. Maximální (červená), minimální (zelená) a průměrné (modrá) teploty za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Ruzyně, zdroj dat ČHMÚ.

Hodnoty relativní vlhkosti vzduchu za období 8/2020 až 12/2021 jsou zobrazeny na obrázku níže (Obr. 52). Oproti hodnotám naměřeným v archeologickém areálu pod Pražským hradem jsou hodnoty ze stanice Klementinum a Ruzyně nižší (Obr. 36). Hodnoty zjištěné v archeologickém areálu se pohybují mezi 60 % až 90 %, ale u meteorologických stanic klesají v letních měsících hodnoty až ke 40 %. Hodnota korelačního koeficientu pro stanice Klementinum a Ruzyně činí 0,93. Při srovnání dat ze stanice Klementinum a dat změřených na lokalitě most je korelační koeficient roven 0,35 a při srovnání stanice Ruzyně a dat z lokality 0,45 (korelováno funkcí CORREL).

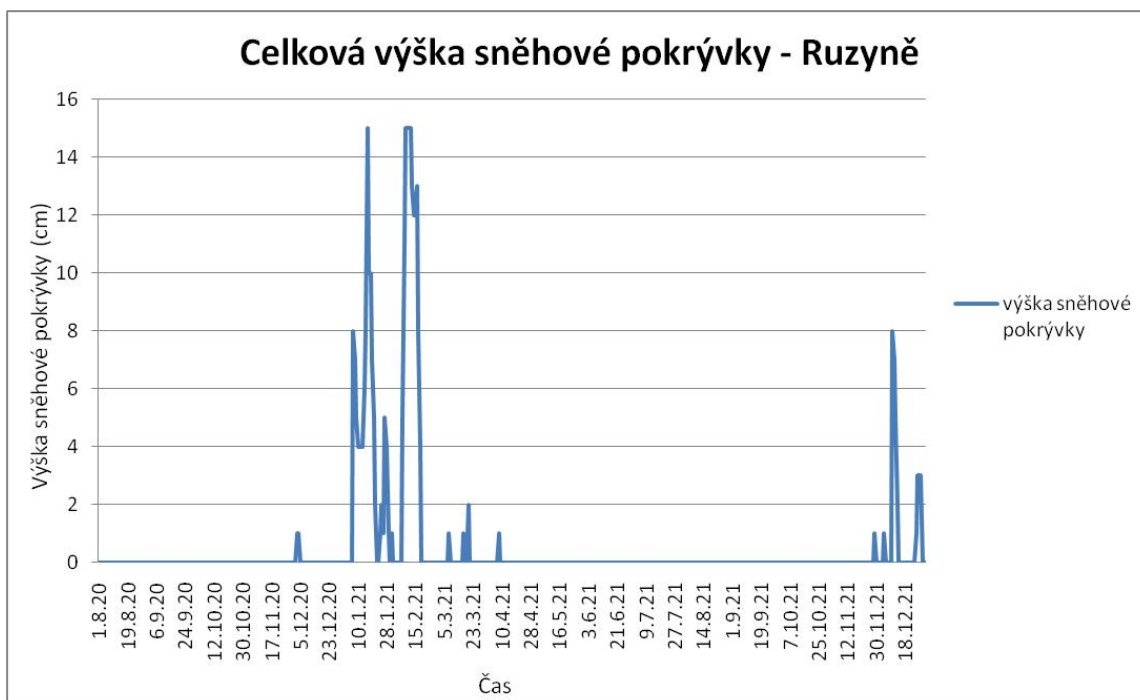


Obr. 52. Relativní vlhkost vzduchu za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Klementinum a Ruzyně, zdroj dat ČHMÚ.

Pro ucelení představy o meteorologické situaci a o srážkách jsou zde prezentována také data o celkové výšce sněhové pokrývky ze stanic Klementinum a Ruzyně. V obou stanicích byla zaznamenána výška sněhové pokrývky dosahující až 12 cm na stanici Klementinum a až 15 cm na stanici Ruzyně během února (v případě Ruzyně i ledna) 2021 (Obr. 53, 54). V tomto období byla provedena měřicí kampaň 17. 2. 2021, kdy nebyla pozorována zvýšená hladina ani žádné zatopení okolí vrtu A. Ani při následujícím měření 30. 3. 2021 nebyla zaznamenána zvýšená hladina vody. Pro stanici Klementinum je uvedeno jen období 1/2021 až 2/2021, což bylo jediné období od 8/2020 do 12/2021 kdy zde byla pozorována souvislá sněhová pokrývka.



Obr. 53. Celková výška sněhové pokrývky za období 1/2021 až 2/2021, meteorologická stanice Ruzyně, zdroj dat ČHMÚ.



Obr. 54. Celková výška sněhové pokrývky za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Ruzyně, zdroj dat ČHMÚ.

5 DISKUZE

V kapitole 5.1 jsou zmíněna vyhodnocení ručních a automatických měření v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu z lokality most a poté zhodnocení stavu vlhkosti vybraných zdí. Dále následuje v kapitole 5.2 zhodnocení jednotlivých metod a jejich vhodnosti pro měření vlhkosti historických stavebních materiálů. V kapitole 5.3 jsou diskutovány zdroje vlhkosti v archeologickém areálu a v poslední kapitole diskuze, 5.4 jsou doporučeny možnosti dalšího monitoringu v areálu.

5.1 Rozbor výsledků

5.1.1 Vlhkostní situace pilíře raně novověkého mostu

Vlhkostní situace mostního pilíře byla hodnocena na základě všech použitých metod, s přihlédnutím k těm, které jsou pro měření vhodnější. Z dostupných dat vyplývá, že vlhkost v měřených bodech na pilíři raně novověkého mostu dlouhodobě stagnuje. Stagnace vlhkosti je patrná zejména v hlubších vrstvách zdiva, což vyplývá například z výsledků měření pomocí MOIST (Obr. 27, 28), ale také z podpovrchového měření odporu (Obr. 20) a GMR 110 (Obr. 23). Z měření pomocí MOIST 0-3 vyplývá, že v přípovrchové zóně zdiva se vlhkost během roku mění, v letních měsících vlhkost v přípovrchové vrstvě stoupá a v zimních měsících klesá (Obr. 26). Nicméně výsledky MOIST 0-3 je nutné brát s rezervou kvůli nižší hodnotě koeficientu determinace ($R^2 = 0,78$) při kalibraci oproti MOIST 0-15 a MOIST 0-30. Zjištění, že je v areálu vyšší vlhkost v letních měsících, podporuje i měření pomocí sondy využívající reaktivní barvivo. Z výsledků vyplývá, že ve spodní části zdiva zůstává výparová fronta u povrchu po celý rok, zatímco u bodů vysoko položených na zdi se zdá, že dochází k posunu výparové fronty. Tento jev lze pozorovat především u bodů 5 a 6 (Obr. 25), kdy během zimních měsíců jsou sledované otvory buďto úplně suché v případě bodu 6 a nebo se výparová fronta nachází hlouběji v materiálu, což je případ bodu 5 (Obr. 25). Během letních měsíců byl u bodu 6 zaznamenán posun výparové fronty směrem k povrchu, obdobně jako u bodu 5 kde dokonce dosáhla výparová fronta povrchu.

U některých metod nebyla prokázána prvotní hypotéza, že pata zdiva bude výrazně sušší než vrchní část zdiva, tento předpoklad nelze prokázat pomocí měření podpovrchového odporu (Obr. 20, 21) a pomocí GMR 110 (Obr. 23). Naopak elektromagnetická metoda MOIST (Obr. 26, 27, 28), sonda využívající reaktivní barvivo (Obr. 25) a infračervené

snímkování (Obr. 29) tento předpoklad podporují. Tento nesoulad ve výsledcích je dále diskutován v kapitole 5.2.

5.1.1.1 Výsledky metod použitých pro měření vlhkosti pilíře mostu

5.1.1.1.1 Elektromagnetická metoda MOIST

MOIST byl používán na pilíři mostu v šesti bodech měření (Obr. 6) pomocí tří sond s hloubkovým dosahem 0-3, 0-15 a 0-30 cm. Měření bylo kalibrováno pro opuku. Dle měření se vlhkost jeví jako dlouhodobě stagnující a zároveň klesá spolu s rostoucí výškou bodů nad terénem. U MOIST 0-3 je patrná rozkolísanost hodnot u bodu 1, tedy 35 cm nad terénem. Tuto rozkolísanost se nepodařilo spojit s hodnotami hladiny ve vrtu A (Obr. 43), relativní vlhkostí vzduchu (Obr. 36), ani žádným jiným sledovaným parametrem, rozkolísanost mohla být způsobena nepřesným měřením, vlivem nepřesného přiložení sondy k bodu 1. U zbylých bodů měření bylo zjištěno kolísání hodnot mezi 0 - 14 % vlhkosti, kdy nižší hodnoty vlhkosti byly naměřeny v zimních měsících a vyšší hodnoty v letních měsících. U bodu 1 je oscilace větší a vlhkost dosahuje až 20 %. Změny vlhkosti v rámci roku u MOIST 0-3 cm se na zbylých hlubších měřeních neprojevují, v hlubších částech materiálu vlhkost stagnuje. Zřejmě je to následek kondenzace vodní páry na povrchu materiálu během letních měsíců, což vede k zvýšeným hodnotám vlhkosti, nebo nedostatečně přesnou kalibrací měření MOIST 0-3.

U výsledků MOIST se objevují záporné hodnoty vlhkosti, což v reálném prostředí není možné. Záporné hodnoty se vyskytly v bodech měření, kde byl materiál spíše suchý a jsou dány kalibrací. Kalibrace byla prováděna pomocí gravimetrického stanovení vlhkosti opuky, nicméně každý blok opukového zdiva je jiný a zřejmě měřená mostní opuka měla nižší pórovitost než vzorek použitý pro kalibraci. Povrch zdiva není dokonale rovný, z čehož také plynou další nepřesnosti. Pro správné stanovení vlhkosti je nutné, aby sonda dokonale přiléhala k měřenému materiálu, pokud se mezi sondou a materiálem vyskytne prázdný prostor, dojde k tomu, že sonda proměřuje také vzduch mezi přikládanou částí sondy a zdivem, což vede k nepřesným výsledkům. Další možnou příčinou vzniku nepřesných měření může být nepřesné přiložení sondy. Body v kterých bylo měření prováděno jsou označeny křížkem (Obr. 6; příloha 7), přesto mohlo dojít k přiložení sondy řádově o milimetry nepřesně, z čehož také plynou drobné chyby měření.

5.1.1.1.2 Sonda využívající reaktivní barvivo

Metoda sondy využívající reaktivní barvivo poskytla informace o výparové frontě a o jejím pohybu. U bodů níže položených na vertikálním profilu, u bodů 1 - 3 (do 123 cm nad terénem (Obr. 6)) se výparová fronta nachází na povrchu, do této výšky dosahuje kapilární vztlínání vody, což je patrné z vysrážení solí na povrchu zdiva. Vysrážení solí není příliš patrné na fotografiích, nicméně na novodobém zdivu vedle měřeného mostního pilíře kde ústí drény je vztlínající vlhkost dobře parná (Obr. 11 vlevo; příloha 7). Ve vyšších partiích zdiva se výparová fronta pohybuje směrem k povrchu v letních měsících a směrem do hloubky materiálu v zimních měsících (Obr. 25). U této metody může docházet k nepřesnostem v řádech cirká 10 mm při vysoké relativní vlhkosti vzduchu nad 73 % (Weiss et al., 2020). Relativní vlhkost vzduchu je na lokalitě průměrně 75 %, přičemž vlhkosti vzduchu nad 73 % bylo dosaženo v 17 případech z 25 měření, takže je nutné brát výsledky s rezervou.

Pokud výsledky sondy využívající reaktivní barvivo srovnám s výsledky měření podpovrchového odporu, pak lze nalézt shodu v zjištění, že body 2 a 3 jsou vlhké, u podpovrchového měření odporu 30 až 47 % vlhkosti a u sondy využívající reaktivní barvivo jsou body 2 a 3 také vlhké, výparová fronta sahá až k povrchu. Bod 1 se na odporovém měření projevil jako sušší oproti bodům 3 a 2, což s výsledkem měření pomocí sondy využívající reaktivní barvivo nekoresponduje. U bodů 5 a 6, kde podpovrchové měření odporu sahalo do hloubek až 200 mm, vyšla vždy hlubší měření jako sušší oproti měřením při povrchu. U sondy využívající reaktivní barvivo byla hloubka měření v bodech 5 a 6 (Obr. 25) 122 mm a 103 mm, tedy mezi středním (M) a dlouhým (L) dosahem podpovrchového měření odporu (Obr. 6, 20). Body 5L, 6M a 6L u podpovrchového měření odporu měly vlhkost < 7 %. Shoda obou metod panuje v čase nárůstu vlhkosti v jarních a letních měsících (Obr. 20, 25) a následném poklesu vlhkosti v zimním období, což se u sondy využívající reaktivní barvivo projevuje jako přiblížení výparové fronty povrchu v jarních a letních měsících a následně v zimním období posun výparové fronty hlouběji do horniny.

5.1.1.1.3. Odporové metody

Z odporových metod bylo využito měření GMR 110 a také podpovrchové měření odporu. Z měření GMR 110 (Obr. 23) lze konstatovat, že hodnoty vlhkosti v měřených bodech stagnují, nedochází k výraznějším změnám během roku (detailnější grafy v příloze práce 3). Zjištěná stagnace je ve shodě s výsledky měření MOIST (Obr. 23, 27, 28) a TDR (Obr. 24, příloha 10). Zároveň podle výsledků odporového měření vlhkost neklesá s rostoucí výškou nad terénem, například jako nejvlhčí se jeví bod 4 s průměrnou vlhkostí 16 % a jako

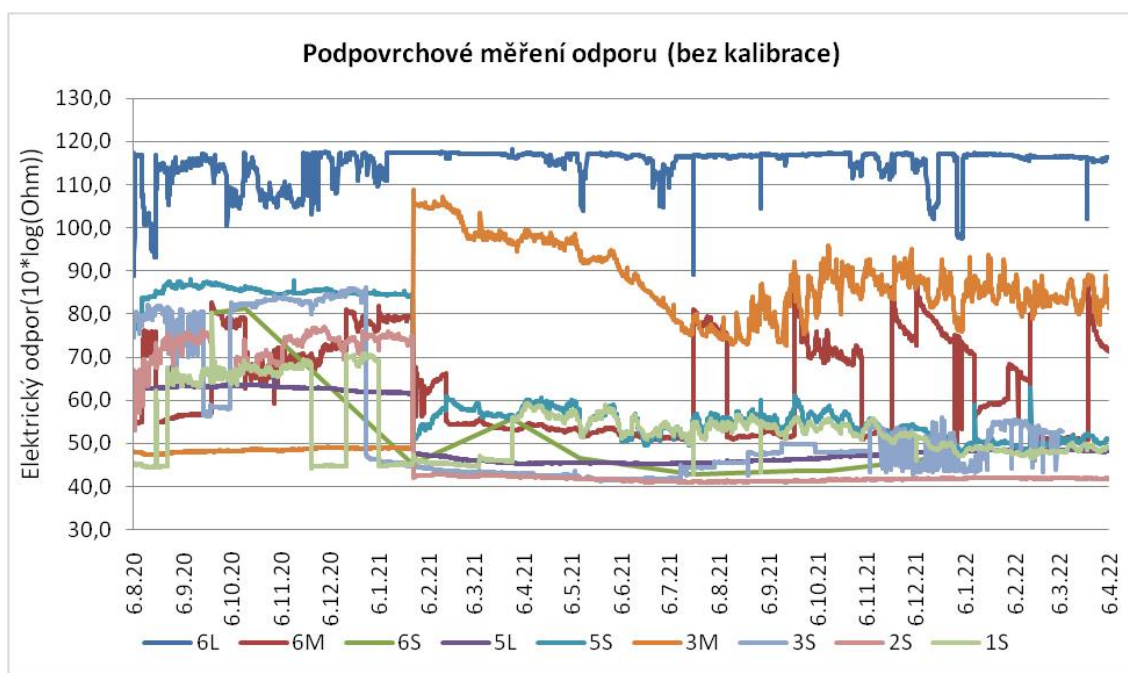
druhý nejvlhčí bod 5 s průměrnou vlhkostí 14 %. Při měření elektromagnetickou metodou byla zjištěna vlhkost $< 10 \%$ u bodů 4 a 5 (Obr. 26, 27, 28). Tento nesoulad výsledků může být dán nerovnoměrnou distribucí solí v materiálu, které ovlivňují kvalitu odporového měření, nepřesným přiložením přístrojů k měřicím bodům.

Podpovrchové měření odporu bylo využito pro měření vlhkosti mostního pilíře v bodech uvedených na (Obr. 6). Nejvyšší vlhkost je pozorována u bodů 2 a 3, kde dosahuje až 47 % vlhkosti (Obr. 20). Tyto velmi vysoké hodnoty jsou pravděpodobně dány kalibrací. Nejnížší hodnoty byly zjištěny u bodů 6L a 3M, kde se hodnoty blíží 0 % vlhkosti. Což částečně odpovídá výsledkům GMR 110, kde byly u bodů 6 a 3 naměřeny nejnížší hodnoty vlhkosti, nikoli však nulové hodnoty. Ve výsledcích lze vypožorovat, že hodnoty vlhkosti ve stejných bodech ovšem s rozdílnou hloubkou měření se liší (Obr. 20, 21). To se týká bodů 5 a 6, kde hlubší měření 6L a 5L (200 mm) vykazují nižší hodnoty vlhkosti než body ve střední hloubce (M, 60 mm) a malé hloubce (S 21 mm) (Obr. 20, 21). Bod 6L má hodnoty vlhkosti blízké 0%, 6M $< 5 \%$ a 6S $< 20 \%$ (Obr. 21), u bodu 5L jsou hodnoty vlhkosti $< 6 \%$ a hodnoty 5S dosahují až 10 %. Toto zjištění nekoresponduje s měřením MOIST 0-15 a MOIST 0-30 kde jsou hodnoty vlhkosti bodů 5 a 6 srovnatelné při obou měřeních (Obr. 27, 28). Možným vysvětlením tohoto nesouladu výsledků odporových metod a MOIST může být jednak kontakt mezi horninou a elektrodami, zejména u podpovrchového měření odporu, kde bylo zajištění dostatečného kontaktu horniny a elektrod problematické (viz dále). Dalším možným vysvětlením je vzdálenost mezi elektrodami, případně mohou mít vliv soli obsažené v hornině. Z analýzy solí Slížkové et al. (2020) vyplývá, že množství solí v odebraných vzorcích je zanedbatelné. Solné výkvěty se však vyskytují na povrchu, zejména v místech kam dosahuje kapilární vztlínání. Vlivu solí lze tedy přičíst vliv na povrchová měření, na podpovrchové měření odporu zřejmě nemají významný vliv.

Na obrázku (Obr. 20) je patrné, že před obmazáním sond vodivou grafitovou pastou nebyl zřejmě kontakt mezi horninou a elektrodou dobrý a naměřené hodnoty jsou rozkolísané, po zlepšení kontaktu sond s materiálem došlo k ustálení naměřených hodnot, kdy byly potlačeny drobné výkyvy (Obr. 20, 21, 55). Promazání bylo provedeno pouze jednou, ze získaných dat se však zdá, že kontakt elektrod s horninou byl dobrý pouze půl roku po promazání elektrod. V období 1/2021 (promazání) až 7/2021 nedocházelo v měření k výraznějším výkyvům vlhkosti respektive elektrického odporu (Obr. 21), v dalším období od 7/2021 do 4/2022 lze na výsledcích (Obr. 20) pozorovat nevysvětlitelné kolísání vlhkosti v rámci dní. V případě některých elektrod jsou výkyvy výraznější, například 6M, 3S a 1S, jiné elektrody pravděpodobně fungovaly dobře, například 2S a 5L (Obr. 20). Některé nenadálé

výkyvy mohou být také způsobeny chybou měření, případně mechanickým kontaktem se sondou, příkladem je významný náhlý výkyv u bodu 6L a 6M ve stejný čas 21. 7. 2021. V tento den bylo prováděno ruční měření a je tedy možné, že tento výkyv vznikl nechtěným kontaktem s měřicími čidly. U fungujících elektrod mohlo být nanášeno větší množství pasty. Z výsledků je patrné, že je nutné kontrolovat kontakt elektrod s horninou minimálně jednou za půl roku, aby se zajistilo správné fungování měření.

Na obrázcích (Obr. 20, 55) lze také porovnat vliv kalibrace. Hodnoty zobrazené na obrázku (Obr. 55) ukazují průběh hodnot bez dodatečné kalibrace, hodnoty na obrázku (Obr. 20) jsou již hodnoty procentuální vlhkosti. Teplota byla měřena pomocí přístroje Material Moisture Gigamodule sondou zavedenou do horniny, do hloubky cirká 2 cm (Obr. 7, příloha 8) a o tuto teplotu byla data opravena. Na první pohled se zdá vliv teploty nadhodnocený (Obr. 20). Samotné hodnoty teploty horniny jsou poměrně rozkolísané (Obr. 22), při měření teploty mohlo dojít k chybě měření, protože teplotní čidlo bylo vloženo do otvoru, kde zůstává prostor pro volný vzduch a na čidlo proto může působit okolní teplota vzduchu (příloha 8). Obecně kalibrace podpovrchového měření nebyla přesná (viz kapitola 3.3.1) jednak díky využití kalibrace na jiný materiál a to pískovec. Dalším problematickým faktorem kalibrace je, že hodnoty skutečného odporu ve studii Sasse (2022) se pohybují v řádech od 0 do 10^4 ohmů (Obr. 15) a hodnoty skutečného odporu v této práci se pohybují v rozmezí 10^4 až 10^{10} ohmů (Obr. 55).



Obr. 55. Souhrnný graf vývoje skutečného elektrického odporu od srpna 2020 do dubna 2022 - bez kalibrace. Hodnoty jsou prezentovány ve formě $10 \times \log(\text{Ohm})$, tedy například hodnota 80 na grafu odpovídá 10^8 Ohm . Body 1 až 6 jsou seřazeny od terénu, značky S, M a L u čísel znázorňují hloubku měření, S (short) 21 mm, M (medium) 60 mm a L (long) 200 mm.

5.1.1.1.4 TDR

TDR byla využita ve dvou měřicích kampaních, první 8/2020 až 9/2020 (příloha 10) a druhá 9/2020 až 3/2021. Byla měřena vlhkost zdiva a také půdy při obou měřicích kampaních (Obr. 24, příloha 10). V obou případech z měření vyplývá stejný výsledek a to stagnace vlhkosti v měřených bodech. Ze získaných dat není patrná žádná reakce na změny teplot či relativní vlhkosti vzduchu. Hodnoty vlhkosti půdy se pohybují při prvním měření kolem 50 % a při druhém měření v rozmezí 40 až 45 % vlhkosti. Při prvním měření přístroj vykázal záporné hodnoty vlhkosti, což bylo zřejmě způsobenou velmi nízkou hodnotou vlhkosti opuky v měřených bodech 1 a 2 (Obr. 6, příloha 10). Při druhé měřicí kampani již vyšly hodnoty vlhkosti zdiva v kladných číslech a to 10 % a 5 %. Oba měřené body se nacházejí ve výškové úrovni bodu 4 (Obr. 6) kde byla měřením MOIST 0-3 naměřena vlhkost 0 - 9%, MOIST 0-15 4 - 7% vlhkosti a MOIST 0-30 4 - 6% vlhkosti.

5.1.1.2 Výsledky dalších měření na pilíři mostu a v jeho okolí

Kromě výše zmíněných metod určování vlhkosti byla prováděna i další doplňující měření, jako je měření relativní vlhkosti vzduchu, teploty vzduchu a půdy, měření konduktivity a teploty vody, měření hladiny v kaluži, hladiny ve vrtu a množství skapu. Relativní vlhkost vzduchu je na lokalitě po celý rok poměrně vysoká, nicméně není po celý rok úplně stabilní, kolísá mezi 57 % až 89 %. Změny v relativní vlhkosti vzduchu dosahují až o 32 %. Jakkoliv jsou tyto změny relativní vlhkosti vzduchu pozvolné, považují je spíše za nežádoucí. Z výzkumné zprávy Slížkové et al. (2020) vyplývá, že se v archeologickém areálu nacházejí vodorozpustné soli, které mohou rekrystalizovat při vyšších hodnotách relativní vlhkosti vzduchu a mohou se výrazněji projevovat jejich hygroskopické vlastnosti (Tabulka 1). To se týká zejména sodných a sodno-draselných solí, které byly v areálu nalezeny. Teplota vzduchu a teplota půdy mají očekávaný průběh, tedy nižší teploty v zimě a vyšší v letních měsících. Mezi maximálními a minimálními teplotami vzduchu jsou rozdíly cca 20 °C, nejedná se tedy o teplotně stálé podmínky. Ohrožení lokality mrazem by zřejmě nastalo při

velmi nízkých teplotách pod bodem mrazu ($> -10\text{ }^{\circ}\text{C}$) s dlouhodobým trváním. Při vyšších teplotách dochází snáze k výparu vody ze zdiva, na výparové frontě následkem toho krystalizují soli. Hodnoty teploty vzduchu a teploty půdy jsou v několika případech až o několik stupňů Celsia rozdílné. Toto zjištění připisují rozdílné tepelné kapacitě půdy a vzduchu. U naměřených teplot vody ve vrtu A, v kalužích a ve skapu byl zjištěn předpokládaný vývoj, tedy nižší teploty v zimních měsících a vyšší teploty v letních měsících (příloha 5).

Z infračervených snímků vyplývá, že během zimních měsíců jsou teploty zdiva ve vertikálním profilu srovnatelné, naproti tomu během letních měsíců se horní části zdiva prohřívají více než pata zdi. Příčinou je, že stropní část se prohřívá, protože na III. nádvoří v letních měsících silně svítí slunce a teplo proniká i do areálu pod nádvořím. Tato metoda neposkytuje informace o vlhkosti materiálu, ale z rozdílů v teplotách lze usuzovat na míru výparu. Vyšší výpar lze očekávat v letních měsících, kdy se zdivo vlivem vyšších teplot vzduchu prohřívá. Zóny se zvýšeným výparem se v letních měsících by se projevíly relativně nižšími teplotami výparové zóny oproti okolí. Takový jev na snímcích (Obr. 29) není patrný, přesto nelze vyloučit, že k tomuto jevu dochází a pouze nebyl v době měření potvrzen.

Nejvyrovnanější výsledky při měření konduktivity byly zaznamenány u skapu. Hodnoty konduktivity u skapu se pohybují kolem $360\text{ }\mu\text{S/cm}$. Vyrovnanost hodnot konduktivity u skapu z krápníků je zřejmě dán právě faktem, že voda kape z krápníků a přísun minerálních látek je proto dlouhodobě vyrovnaný, oproti tomu voda, která se infiltruje a následně migruje zdivem a půdou přičemž v různé míře rozpouští soli, které přecházejí do roztoku má různé hodnoty konduktivity v závislosti na tom, kolik solí je při transportu rozpuštěno. Případně může být vyrovnanost hodnot dána také významným obsahem CaCO_3 ve vodě, kdy při rozpuštění CaCO_3 jsou hodnoty konduktivity ustálené, ani jedno tvrzení však nemohu podložit daty. Vzhledem k vyrovnanosti hodnot (Obr. 39) usuzuji, že nejvyšší naměřená hodnota, $839\text{ }\mu\text{S/cm}$ ze 17. 12. 2020 je chybná, jelikož významně vybočuje a převyšuje jinak vyrovnané hodnoty konduktivity, nebyla ani pozorována žádná možná příčina tohoto výkyvu. Oproti tomu hodnoty konduktivity naměřené ve vrtu A, a v kaluži 1 a 2 jsou značně rozkolísané, což souvisí s kolísáním hladiny vody ve vrtu a v kaluži (Obr. 38, 43, 44), při vyšších hladinách vzrostly také hodnoty konduktivity a naopak při nižších hladinách byly hodnoty konduktivity nižší, což pravděpodobně souvisí se zvýšeným přínosem minerálních látek. Zároveň jsou hodnoty naměřené u vrtu A vyšší, než hodnoty u skapu, kde je přísun minerálních látek dlouhodobě stejný.

Ve skapu a obou kalužích bylo několikrát změřeno pH. Jelikož skutečné hodnoty pH reagují na aktuální teplotu, jsou hodnoty naměřeného pH vždy uvedeny spolu s teplotou vody. Nejdéle bylo pH měřeno u skapu. Při srovnání s teplotou (Obr. 42) je patrné, že s klesající teplotou vody roste hodnota pH a naopak s rostoucí teplotou klesá hodnota pH.

Nejvyšší hladiny ve vrtu A byly naměřeny bezprostředně po intenzivních srážkách (Obr. 43, 49), kdy bylo i okolí vrtu zatopeno dočasnou kaluží (příloha 5). Do kaluže 1 ústí drény, ze kterých dle záznamů v 15. 10. 2020 a 30. 6. 2021 vytékalo více vody než obvykle. Z těchto pozorování se zdá, že příčinou těchto občasných záplav areálu jsou intenzivní srážky, které dopadají na III. nádvoří a jsou transportovány pravděpodobně preferenčními cestami proudění a v nízko položených místech se hromadí a posléze vsakují do půdy (Harmáček, 2021). Oproti tomu dne 24. 9. 2020 byl vrt kompletně bez vody (Obr. 43), tomuto stavu předcházelo období 18 dnů bez srážek na všech sledovaných meteorologických stanicích (Obr. 46, 47, 48, 49). Hladina byla měřena také v kaluži 1, pomocí metru, který je zde dlouhodobě instalován (Obr. 11). Nejvyšší hladiny byly naměřeny ve stejné dny jako nejvyšší hladiny ve vrtu A. Vývoj hladin ve vrtu A souhlasí s vývojem hladin v kaluži 1 (Obr. 43, 44), souhlasí naměřené extrémy a rovněž souhlasí vývoj v dalších obdobích, z čehož plyne, že spolu kaluže a vrt hydraulicky komunikují, byť hladina v kaluži 1 je zřejmě výrazněji ovlivněna výparem než vrt A, díky větší ploše volné hladiny. Jediným obdobím, kdy se vývoj hladin lišil, byl podzim 2021, kdy u vrtu A pozoruji nejprve nárůst, poté pokles a opět nárůst hladiny (Obr. 43), u kaluže 1 v tomto období dochází k poklesu hladiny, poté k stagnaci po dobu jednoho cyklu měření a opět k poklesu hladiny (Obr. 44), což může svědčit o existenci dalšího zdroje podzemní vody.

Množství skapu bylo měřeno od 12/2020 do 3/2022. Během tohoto období byl pozorován nárůst objemu zachyceného skapu. K nárůstu objemu zachyceného skapu dochází v podzimních měsících s maximem v říjnu a během zimních měsíců pozoruji pokles a opětovný nárůst, ovšem stále jsou hodnoty výrazně vyšší než v letních a jarních měsících roku 2021. V 12/2020 a 1/2021 byly zjištěny obdobně vysoké hodnoty zachyceného množství skapu jako na podzim 2021 a v zimě 2022. Ze změřených dat plyne, že během letních měsíců je objem skapu při měření nižší než během podzimních a zimních měsíců, což je pravděpodobně dáno vyšším výparem z hladiny v měrné nádobě v letních měsících. Nebylo vypořádáno, že by objem skapu reagoval na intenzivní srážkové události.

Z meteorologických dat, zejména z údajů o srážkách vyplývá, že projevy po intenzivních srážkových událostech se objevují v řádu jednoho až prvních jednotek dnů po události. Intenzivní srážky se vyskytly vícekrát za sledované období, ovšem pouze ve dvou

zmíněných případech krátce po srážkách následovalo měření přímo v archeologickém areálu a tudíž bylo zaznamenáno zaplavení části lokality. Některé významné srážky zejména v 4/2021 a 5/2021 (Obr. 49) se významněji neprojevily na vlhkosti areálu v danou chvíli, ale zřejmě napomohly celkové nasycenosti půdy a při dalších významných srážkách 6/2021 (Obr. 49) pak došlo poměrně brzy po události k částečnému zaplavení lokality. Z prezentovaných dat také vyplývá, že relativní vlhkost vzduchu je na lokalitě vyšší než ve volném prostoru. Je to způsobeno uzavřeností prostoru i lokalizací pod úrovní III. nádvoří. Prostory jsou sice částečně spojeny s venkovními prostory a dochází k výměně vzduchu, nestačí to k vyrovnání relativních vlhkostí vzduchu. Meteorologická data v této práci slouží zejména k ucelení představy o vnějších faktorech, které mají vliv na pohyb vlhkosti v areálu pod III. nádvořím Pražského hradu.

5.1.2 Vlhkostní situace vybraných zdí

Ke stanovení vlhkostní situace tří vybraných zdí (Obr. 4) byly využity metody MOIST, GMR 110, EM 100 a infračervené snímkování (FLIR C2 Compact Thermal). Data nejsou kalibrována, protože gravimetricky zjištěné hodnoty pro opuku nelze aplikovat na vybrané zdi kvůli odlišnosti stavebních materiálů (Obr. 12, 13) a kvůli absenci kalibrace pro EM 100.

Na stěně „*u štěrku*“ žádná výrazněji vlhká zóna pozorována nebyla. Z měření GMR 110 sice některé body vycházejí jako relativně vlhčí oproti okolí, ale jedná se spíše o izolované body, které netvoří celistvou zónu (Obr. 34). Měření MOIST 0-15 zdi „*u štěrku*“ vykazovalo ve střední části relativně sušší zónu (Obr. 35), která v průběhu měření postupně vlhne. Ve střední části se sušší zóna projevila na měření EM 100 11. 8. 2021 (Obr. 33), ovšem v zóně, která později metodou EM 100 již nebyla proměřována kvůli nerovnostem, shodu je tedy třeba brát s rezervou. Z infračervených snímků (Obr. 30) se jeví jako relativně chladnější spodní až střední část zdi o 3 - 4 °C oproti vrchní části zdiva. Ze snímků lze usuzovat, že v chladnějších zónách dochází k výparu a že jsou tyto zóny relativně vlhčí oproti okolí. Jako relativně vlhčí se projevily některé body ve spodní až střední části zdi „*u štěrku*“ pouze u odporové metody, ovšem jak již bylo zmíněno, netvoří ucelenou zónu. Obecně vzato u výsledků měření zdi „*u štěrku*“ nepanuje shoda ve výsledcích jednotlivých metod a zároveň nebyla na zdivu odhalena celistvá vlhká zóna.

Další měřená zeď „*sv. Bartoloměj*“ se jeví jako relativně vlhčí ve střední a celé pravé části při měření GMR 110 (Obr. 34). Vlhkost ve střední části vyplývá i z výsledků MOIST 0-15 (Obr. 35), kde se vlhkost v pravé části stěny příliš neprojevuje, ale jako vlhčí se jeví spíše

spodní polovina zdiva. Vlhká spodní polovina zdiva se projevuje u GMR 110 a EM 100 v měření ze 7. 12. 2021. V prosincovém měření všechny metody shodně vykazují spodní polovinu zdiva jako relativně vlhčí (Obr. 33, 34, 35). Relativně sušší zóna se objevuje v měření MOIST 0-15 a postupem času se zdá, že vysychá (Obr. 35), na měřeních GMR 110 příliš patrná není. Na infračerveném snímku z 8/2021 zdi „sv. Bartoloměj“ je patrná jako relativně chladnější střední část zdiva (Obr. 31). V této oblasti 8/2021 zaznamenala relativně vlhčí zónu elektromagnetická metoda MOIST 0-15 i odporová metoda GMR 110. Obecně se metody shodují na lokalizaci relativně vlhčí zóny ve spodní části zdi.

Měření zdi „u vchodu“ pomocí MOIST 0-15, GMR 110 i EM 100 vykazuje relativně vlhčí zónu v pravé spodní části zdiva (Obr. 33, 34, 35). Metody GMR 110 a EM 100 se také shodují na lokalizaci relativně sušší zóny ve vrchní části hrany zdi (Obr. 13, 33, 34). Na infračervených snímcích se jeví roh zdiva o 3 - 4 °C teplejší oproti spodním partiím. Nižší teploty v pravé spodní až střední části zdiva nasvědčují, že v daném místě dochází k výparu a dané místo je tedy i vlhčí (Obr. 32). V případě vlhké zóny v pravé spodní až střední části měřicí sítě a relativně sušší zóny ve vrchní střední části zdiva panuje shoda ve výsledcích všech použitých metod.

Při srovnávání daných metod je nutné brát zřetel na odlišný hloubkový dosah metod. Infračervené snímkování poskytuje informace pouze o výparu z povrchu materiálu, ale nic neříká a rozložení vlhkosti v hloubce. Z dalších použitých metod má největší dosah měření MOIST 0-15. U metody GMR 110 a EM 100 je hloubkový dosah nižší, cirká 2,5 cm (Tabulka 3). Nesouhlasné výsledky daných metod nemusí být nutně chybné, ale může dojít k situaci, kdy v hlubší vrstvě bude zdivo vlhčí než v přípoверхové vrstvě, kde snáze dochází k výparu, než v hloubce 11 cm (dosah MOIST 0-15).

5.2 Srovnání použitých metod z hlediska jejich vhodnosti aplikace na historické zdivo

Při měření vlhkosti historického zdiva hraje roli při výběru metody nejen její schopnost přesně kvantitativně a kvalitativně stanovit vlhkost materiálu, ale také její vhodnost z hlediska invazivnosti. Požadavkem památkářů, archeologů či restaurátorů v případě historického zdiva, či jiných historických památek, u kterých lze vlhkost určovat, bude pravděpodobně co nejmenší zásah do dané památky. Zásah by neměl mít patrné vizuální ani mechanické následky a neměl by mít vliv na budoucí stav památky v tom smyslu, aby nedošlo k započatí či progradaci erozních procesů. Požadavek na žádné či minimální zásahy do materiálu silně

znesnadňuje stanovení vlhkosti a jejího pohybu v hlubších vrstvách zdiva. Při citlivém výběru měřících bodů a stanovišť v souladu s doporučeními památkářů, ale zároveň tak, aby šlo o reprezentativní zónu může být aplikována i invazivní metoda, ovšem pokud je použita metoda neinvazivní, je to v případě historických památek významným přínosem.

V areálu pod III. nádvořím Pražského hradu byly použity jak invazivní a tak neinvazivní metody stanovení vlhkosti zdiva. Neinvazivní metody použité na Pražském hradě byly MOIST, EM 100, GMR 110 a infračervené snímkování. Mezi invazivní metody lze zařadit podpovrchové měření odporu, TDR a sondu využívající reaktivní barvivo. Pro kalibraci metod byla využita gravimetrická metoda, která je také invazivní. Použité neinvazivní metody nijak nezasahují do materiálu, v některých případech se přístroje materiálu dotýkají, ale nijak ho nepoškozují, infračervené snímkování nevyžaduje žádný kontakt s materiálem. U invazivních metod jde obvykle o vrtání otvorů pro sondy a elektrody, v případě gravimetrické metody jde přímo o odběr vzorků. V případě lokality mostního pilíře byly pro gravimetrické stanovení využity vzorky odebrané z volně ležícího bloku opukového zdiva. V případě sondy využívající reaktivní barvivo může být jako zásah vnímáno i případné obarvení okolí otvorů a jejich vnitřních částí, ke kterému může při měření dojít. Přehledová tabulka dalších metod, které lze pro měření vlhkosti využít spolu s informacemi o jejich invazivnosti se nachází v přílohách (příloha 6).

Měření historicky cenného zdiva je specifické svými nároky na co nejnížší invazivnost, ale samozřejmě i na přesnost a dobrý hloubkový dosah. Tyto předpoklady zřejmě nejlépe, z použitých metod, splňuje elektromagnetická metoda MOIST. Tato metoda je neinvazivní a při využití sond s hloubkovým dosahem 0-15 podává poměrně přesné výsledky ve srovnání s ostatními metodami. Ke stejnému závěru došla i studie Weiss et al. (2022). Nespornou výhodou elektromagnetické metody MOIST je vysoká přesnost, zejména u sond středního a dlouhého dosahu (0-15 a 0-30) (Obr. 18, 19) a zejména neinvazivnost, nevýhodou je citlivost na nerovnosti povrchu u MOIST 0-3, zároveň v případě měření vlhkosti pomocí MOIST nelze využít kontinuálního záznamu měření (Weiss et al., 2022). Obecně lze konstatovat, že senzory s nižším hloubkovým dosahem jsou ovlivněny jednak nerovnostmi materiálu, z tohoto důvodu jsou spíše nevhodné pro danou aplikaci.

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že podpovrchové měření odporu je vhodné spíše pro sledování vývoje konkrétních sledovaných bodů, méně vhodná je tato metoda pro porovnávání jednotlivých bodů měření mezi sebou. Při aplikaci měření elektrického odporu je nutno vzít v úvahu vliv kolísání teploty na měření (Cao and Chung 2002; Farnam et al., 2015; Weiss et al. 2022). Klíčovým faktorem při měření odporu je zajištění dobrého kontaktu mezi

elektrodami a zdivem. Možností je několik - v této práci byla využita grafitová pasta, která by však potřebovala pravidelnou obnovu (viz kap. 5.1.1.1.3), Caciotti et al. (2018) využili směs epoxidu a grafitu a Weiss a Sass (2022) roztažné elektrody. Autoři uvádějí jako nevýhodu jimi aplikovaného odporového měření nutnost kalibrovat hodnoty pro každý bod měření zvlášť, což značně komplikuje kalibraci a znesnadňuje, až znemožňuje srovnávání jednotlivých bodů mezi sebou. Pro upevnění sond byl použit epoxid, což přináší další nejistoty související s výparem. Metoda zlepšení kontaktu elektrod s horninou pomocí slané roztoku aplikovaného mezi elektrodu a horninu se ve studii Weiss a Sass (2022) ukázalo jako nevhodné, kvůli narušení původních vlhkostních podmínek ve vzorku. Nevýhodou odporového měření je nepřesnost v zasolených materiálech, při silném zasolení materiálu je vhodné využít metody, které jsou zasolením méně ovlivněny (Hall a Hoff, 2012; Pazderka a Hájková, 2014; Farnam et al., 2015; Weiss et al., 2022).

GMR 110 je sice neinvazivní metodou, ovšem hloubkový dosah je poměrně malý, řádově první centimetry. V takových podmínkách může dojít k ovlivnění měření, nicméně pro materiály bez zasolení povrchu je metoda jistě vhodnou alternativou k invazivním měřením. Nevýhodou je nutnost ručního měření, bez automatického záznamu. Metodu GMR 110 lze pro aplikaci na historické materiály doporučit.

Aplikace metody TDR by zřejmě byla přínosnější v situacích, kdy vlhkost osciluje významněji, než v případě této práce. Tato metoda je invazivní, jelikož elektrody je nutné vpravit do materiálu, v případě horniny do vyvrtaných otvorů. Výhodou je možnost kontinuálního měření. Metoda TDR je náchylná k chybovosti ve velmi zasolených materiálech (Lekshmi et al 2014), z analýzy solí (Slížková et al., 2020) plyne, že mostní pilíř není ve větších hloubkách příliš zasolený (v řádech 0,X hmotnostních %). Tuto metodu lze pro účely měření vlhkosti historického zdiva doporučit pouze v případech, kdy vlhkost výrazně osciluje a zároveň v případech kdy je možné využít invazivní metody.

Infračervené snímkování je neinvazivní metoda, vhodná pro získání prvotní představy o rozložení povrchové vlhkosti zdiva, respektive o výparu z povrchu materiálu. Účelem této metody je spíše identifikace vlhkých míst, což může být výhodné pro vytipování lokalit vhodných pro monitoring vlhkosti. Při dlouhodobém kontinuálním snímání lze získat lepší přehled o výparu z povrchu sledovaného materiálu. Výhodou je neinvazivnost a možnost snímkovat rozsáhlé plochy během krátké doby. Nevýhodou je, že na základě infračervených snímků nelze kvantitativně stanovit vlhkost. Tato metoda je vhodná pro aplikaci na historické zdivo zejména ve stádiu vytipování lokalit pro podrobnější monitoring a pro preventivní sledování historicky cenných lokalit.

Sonda využívající reaktivní barvivo je invazivní metoda, která neurčuje přímo vlhkost materiálu, ale podává cenné informace o pozici výparové fronty v materiálu. Na výparové frontě dochází ke krystalizaci solí, což vede k rozrušování materiálu. Invazivnost této metody spočívá ve vyvrtání otvorů, do kterých se sonda vkládá, což může být pro aplikaci na některé historické památky problematické. Otvory mohou být poměrně malého průměru cirká 3 mm. Dalším faktorem je možnost zbarvení okolního materiálu, při precizní manipulaci se sondou, lze znečištění reaktivním barvivem omezit na minimum, ovšem přímo ve vyvrtaném otvoru obarvení nelze zabránit. Vzhledem k možným poškozením materiálu tato metoda není příliš vhodná pro historické zdivo, lze ji využít spíše v místech, kde případně obarvení nebude na první pohled patrné, případně v místech, kde se počítá po skončení měření s povrchovými úpravami, které by obarvení zakryly. Metoda je stále poměrně nová a na vyřešení problémů s obarvením měřeného materiálu se na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze pracuje (<https://web.natur.cuni.cz/uhigug/moistureprobe/>).

5.3 Zdroj vlhkosti pod III. nádvořím Pražského hradu

Jedním z dílčích cílů této práce je určit zdroj vody v areálu pod III. nádvořím. Jako primární zdroj vody jsem identifikovala srážky, čemuž nasvědčují pozorování na místě a údaje o úhrnech srážek ze tří meteorologických stanic v okolí Pražského hradu (Obr. 46, 47, 48, 49).

Z umístění a tvarů některých solných krust nacházejících se v archeologickém areálu je patrné, že zdroj vody, která se na jejich utváření podílí, přichází ze stropní části, tedy průsakem skrze železobetonovou konstrukci, která nese III. nádvoří. V některých místech se vyskytují drobné krápníky (Obr. 56), které rovněž podporují tvrzení, že zdrojem vody je průsak skrze železobetonovou konstrukci. Voda zde gravitačně stéká od stropních partií po historických i novějších zdech k terénu. Shodně identifikují jako zdroj vody srážky, také studie Slížková et al. (2020) a Harmáček (2021).



Obr. 56. Fotografie vlevo - krápníky a solné krusty, pod železobetonovým chodníkem pro návštěvníky. Fotografie vpravo - solné krusty na fragmentu zdi kostela sv. Bartoloměje. Vlastní foto autorky.

Hromadění vody v okolí vrtu A je způsobeno přítomností lokální zavěšené zvodně (Harmáček, 2021), nacházející se v sedimentárním podloží areálu. Kromě ordovických sedimentů se zde nacházejí také antropogenní navážky. Infiltrací dešťové vody do navážek, pravděpodobně dochází k obohacení solemi. Z práce, která probíhala v archeologickém areálu a zabývala se hydrogeologií dané oblasti, také plyne, že transmisivita antropogenních navážek je poměrně malá („ $1,9 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{d}$ a $1,38 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{d}$ ” (Harmáček, 2021)), tedy průtok vody navážkami je poměrně pomalý. Z toho plyne, že relativně rychlé reakce hladiny vody ve vrtu A a v kaluži 1 na srážky, jsou dány buďto šířením hydraulické odezvy v prostředí, nebo stokem srážek po stěnách areálu a preferenčními cestami. Třetí možnosti, kterou ve své práci zmiňuje také Harmáček (2021) je existence dalšího zdroje vody. Tímto zdrojem může být průsak z vodovodu, či kanalizace, který dosud nebyl lokalizován. Tento zdroj vody by se však týkal dotace zavěšené zvodně, na strukturu a umístění solných krust a krápníků by neměl vliv. Případný další zdroj vody dotující zavěšenou zvodně by měl být dalším předmětem výzkumu.

5.4 Doporučení pro další sledování vývoje vlhkosti

Dosud není zcela podloženo, zda dochází k úniku vody z kanalizace či vodovodu přímo v archeologickém areálu či v jeho blízkosti. Řešení této výzkumné otázky by mělo být předmětem dalšího výzkumu. Pravděpodobně nejlépe realizovatelnou formou výzkumu úniků z vodovodu či kanalizace by byla stopovací zkouška. Za výhodu považují, že dlouhodobě probíhá monitoring konduktivity vody ve vrtu A a také v kaluži 1, v návaznosti na sledování hladin, pozadové hodnoty konduktivity a jejich reakce na výšku hladiny jsou tedy již známy. Další případnou možností je komplexní geofyzikální průzkum.

Dle zjištěných výsledků dochází ke stagnaci vlhkosti ve sledovaných částech archeologického areálu. Vlhkost je zásadním faktorem pro solné zvětrávání a zvětrávání vlivem činnosti organismů a z toho důvodu by bylo vhodné míru vlhkosti na lokalitě omezit. Na historických i novějších zdech v areálu se projevují známky krystalizace solí a dochází i k povrchovým projevům solí, solným výkvětům a krustám. K iniciálnímu poškození části zdiva mohlo dojít již ve 20. letech 20. století, kdy byl areál kompletně odkryt, v této době pravděpodobně došlo k narušení opuky v horních partiích zdi v důsledku mrazového zvětrávání. V současné době sice již nehrozí postižení mrazovým zvětráváním, ovšem již vzniklé struktury mohou být dále progradovány dalšími zvětrávacími procesy.



Obr. 57. Fragmenty opukového zdiva v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu. Zdivo ve výšce cirká 150 cm nad terénem. Praskliny potenciálně způsobené mrazovým zvětráváním opuky ve 20. letech 20. století. Vlastní foto autorky

Pokud bude rozhodnuto o uplatnění opatření zamezujících průnik vlhkosti z III. nádvoří do archeologického areálu, například obnovením spárování dlažby na třetím nádvoří, pak považuji za vhodné pokračovat v monitoringu vlhkosti. Monitoring by mohl doložit, zda a do jaké míry mají aplikovaná opatření skutečný vliv na průnik vlhkosti do areálu. Mohl by také doložit kvalitu a kvantitu vysoušení po takovém zásahu.

Za předpokladu, že nebude přistoupeno k opatřením zamezujícím průniku vlhkosti do areálu, lze očekávat stagnaci současného stavu vlhkosti, případně zhoršování situace při intenzivních srážkových událostech. Monitoring vlhkosti pilíře raně novověkého mostu, by měl smysl ve formě sledování pohybu výparové fronty v návaznosti na sledování krystalizace solí. Monitoring stavu vlhkosti by se mohl přesunout na další lokality v areálu a podrobněji zmapovat situaci vybraných zdí, zejména zdi „u vchodu“, která se jeví jako výrazně vlhká na základě měření i vizuálního hodnocení. Problematickým faktorem by zde mohly být solné krusty v některých částech zdi (Obr. 13). Další ze sledovaných zdí „u štěrku“ je částečně tvořena historickým zdivem a její monitoring by také mohl být přínosný k pochopení a celkovému ucelení představy o transportu vlhkosti mezi novodobým a historickým zdivem. Zároveň u této zdi nepanuje shoda ve výsledcích použitých metod, proto by mohla být aplikace některé další metody přínosná. Novodobé zdivo je tvořeno cihlami a na jeho hladkém povrchu se tvoří solné krusty, oproti tomu historické zdivo je převážně tvořeno opukou a jeho povrch je nerovný, krystalizace solí se projevuje spíše ve formě solných výkvětů. Některé novodobé zdi v areálu slouží jako podpůrné a v některých případech navazují přímo na historické zdivo, v těchto případech by bylo vhodné zmapovat, zda dochází k průsaku z novodobých konstrukcí do na ně navázaných historických konstrukcí či naopak, případně o jak významný přísun vlhkosti se jedná a jaký to má vliv a distribuci solí. Případně mohou být vytipovány další lokality vhodné k měření vlhkosti, například v návaznosti na zkušenosti archeologických pracovníků. Takovou lokalitou je například zdivo v okolí vrtu D, kde jsou sporadicky sledovány projevy vlhkosti zdiva.

6 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá měřením vlhkosti v historických stavebních materiálech. Zejména byla zkoumána aplikace na opukovém zdivu, ovšem velká část metod je použitelná i pro další stavební materiály. Práce vznikla jako příspěvek k řešení projektu: *“Skryto pod povrchem. Archeologické terény Pražského hradu, jejich ochrana a prezentace v moderním světě.”* Technologické agentury ČR. Na tomto projektu se kromě Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy podílí také Archeologický ústav a Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR, jehož data byla v práci využita.

Cílem práce bylo analyzovat vybrané metody měření vlhkosti v historických stavebních materiálech a zhodnotit jejich přednosti a nedostatky. Praktickým cílem bylo posoudit stav vlhkosti v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu a navrhnout doporučení postupu při dalším monitoringu vlhkosti. Pro tyto účely byla zvolena lokalita raně novověkého mostního pilíře a tři další vybrané zdi v areálu. Vedlejším cílem práce bylo také odhalit zdroj vlhkosti v areálu.

Pro účely monitoringu historického zdiva je důležitým faktorem neinvazivnost metod, neinvazivní metody mohou být v některých případech méně přesné než invazivní metody. Z použitých neinvazivních metod bylo dosaženo kvalitních výsledků pomocí měření přístrojem MOIST (elektromagnetická metoda) se středním a dlouhým hloubkovým dosahem. Tato metoda je vzhledem k neinvazivnosti poměrně přesná a je dobrou alternativou k invazivním metodám. Z výsledků vyplývá, že vlhkost na sledovaných lokalitách dlouhodobě stagnuje, její přítomnost umožňuje solné zvětrávání. Jako zdroj vlhkosti v areálu byly identifikovány srážky, které dopadají na III. nádvoří a skrze železobetonovou konstrukci se pravděpodobně infiltrují do archeologického areálu pod nádvořím. Srážky v areálu stékají od stropních partií k terénu, kde se vsakují a v místě lokality mostního pilíře tvoří lokální zavěšenou zvodeň. Nelze vyloučit, že kromě srážek se do areálu voda dostává i jinak, například z vodovodního či kanalizačního potrubí. V budoucnu by bylo vhodné potvrdit, nebo vyloučit další zdroj vody v areálu, buďto stopovací zkouškou, nebo za využití geofyzikálních metod. Doporučení pro sledování monitoringu vlhkosti se odvíjí od případných opatření proti pronikání vlhkosti z III. nádvoří. Pokud budou opatření učiněna, pak by pokračující monitoring mohl poskytnout informace o účinnosti opatření proti pronikání vlhkosti do areálu. V případě, že opatření učiněna nebudou, je možné se zaměřit na situaci v dalších částech areálu, například v místech kde na historické zdivo navazuje novodobé zdivo. Případně lze vytipovat další lokality pro

měření vlhkosti, kde je pravděpodobné, že se vlhkost bude měnit, sporadicky vlhké oblasti, kde lze zkoumat kvantitu a kvalitu vysychání zdiva.

Práce shrnuje dostupné informace o vybraných metodách měření vlhkosti a o výhodách a nevýhodách jednotlivých metod. Praktickým přínosem práce je zhodnocení stavu vlhkosti v archeologickém areálu a návrh dalšího monitoringu. Hodnocení vlhkosti přispívá spolu s dalšími výzkumy archeologického areálu v rámci projektu Technologické agentury ČR k ucelení představy o stavu areálu a možnostech jeho budoucí ochrany, využití a prezentace.

7 LITERATURA

Avdelidis N. P., Moropoulou A. (2003). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage* 5. pages 119-127 <https://doi.org/10.1016/j.culher.2003.07.002>

Bellinzoni A. M., Caneva G., Ricci S. (2013). Ecological trends in travertine colonization by pioneer algae and plant communities. *International Biodeterioration & Biodegradation* 51. pages 203–210. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00172-5)

Bruthans J., Filippi M., Schweigstillová J., Řihošek, J. (2017). Quantitative study of a rapidly weathering overhang developed in an artificially wetted sandstone cliff. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(5), pages 711-723. <https://doi.org/10.1002/esp.4016>

Calamita G., Brocca L., Perrone A., Piscitelli S., Lapenna V., Melone F., Moramarco T. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test sites. *Journal of Hydrology*. volume 454-455. pages 101-112. ISSN 0022-1694
DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.001

Cao J. and Chung D. D. L. (2002). Damage evolution during freeze–thaw cycling of cement mortar, studied by electrical resistivity measurement. *Cement and Concrete Research*, volume 32(10), pages 1657-1661. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00856-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00856-6)

Cacciotti R., Valach V., Wolf B. (2018). Innovative and easy-to-implement moisture monitoring system for brick units. *Construction and Building Materials*. volume 186. pages 598-614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.125>

Charola E. A., 2000. Salts in the deterioration of porous materials: An overview. *Journal of the American Institute for Conservation* 39, volume 3, pages 327–343. <https://doi.org/10.1179/019713600806113176>

Davis J. R., Ilic J., Wells P., (1992). Moisture content in drying wood using direct scanning gamma-ray densitometry. *Wood and Fibre Science*. volume 25, issue 2, pages 153-162. ISSN : 0735-6161

Diaz Gonçalves T., Rodrigues J., Marinho Mendes Abreu M. (2006). Evaluating the salt content of salt-contaminated samples on the basis of their hygroscopic behaviour: Part II: experiments with nine common soluble salts. *Journal of Cultural Heritage*. volume 7. 193-200. [10.1016/j.culher.2006.03.002](https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.03.002).

Farnam Y., Todak H., Spragg R., and Weiss J. (2015). Electrical response of mortar with different degrees of saturation and deicing salt solutions during freezing and thawing. *Cement and Concrete Composites*, volume 59, pages 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.003>

Franzen Ch., Mirwald P. (2009). Moisture sorption behaviour of salt mixtures in porous stone. *Chemie der Erde - Geochemistry*. volume 69. pages 91-98. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2008.02.001>

Gizzi S., Scudino D., Della Torre S., Rosina E., Valentini M. (2007). Karst soil and rising damp in Sassari: guidelines for restoration of Canopolenò complex. 7th International Symposium on the Conservation of Monuments of Mediterranean Basin, Campus of the University, Orleans, France, 6–9 June

Hayashi, M. (2004). Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. *Environmental Monitoring and Assessment*. volume 96. pages 119–128. DOI: [10.1023/b:emas.00000031719.83065.68](https://doi.org/10.1023/b:emas.00000031719.83065.68)

Hall C., Hoff W.D. (2012). *Water Transport in Brick, Stone and Concrete* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9780203301708>

Harmáček. J. (2021). Hydrologie areálu Pražského hradu. Bakalářská práce. PřF UK. Praha

He H., Dyck M. F., Horton R., Ren T., Bristow K. L., Lv J., Si B. (2018). Development and Application of the Heat Pulse Method for Soil Physical Measurements. *Reviews of Geophysics*. volume 56, issue 4, pages 567 - 620. <https://doi.org/10.1029/2017RG000584>

Hokett S.L., Chapman J.B., Russell C.E., (1992). Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock. *Journal of Hydrology*. volume 138. pages 89-96. ISSN 0022-1694 [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90157-Q](https://doi.org/10.1016/0022-1694(92)90157-Q)

Huinink H., Pel L., Kopinga K., (2004). Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms*, volume 29, issue 10, pages 1225–1233. <https://doi.org/10.1002/esp.1087>

Kotlík B., Lank V., Růžicková K., Vondra M., Vošický Z., (2003). *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro SŠ a nižší ročníky víceletých gymnázií*. Nakladatelství Fragment, 1 vydání. Praha. ISBN 978-80-7200-521-5

Lekshmi S. S. U., Singh D.N., Baghini S. M. (2014). A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*. volume 54. pages 92-105. ISSN 0263-2241. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.04.007>

Matsuoka N. and Murton J. (2008). Frost Weathering: Recent Advances and Future Directions. *Permafrost and Periglacial Processes*. volume 19. issue 2. pages 195-210. <https://doi.org/10.1002/ppp.620>

Mol L., Viles H. (2013). Exposing drying patterns: using electrical resistivity tomography to monitor capillary rise in sandstone under varying drying conditions. *Environmental Earth Sciences*. volume 68. pages 1647-1659. DOI:10.1007/s12665-012-1858-x

Netopilová M. (2004). *Stavební materiály*. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství. Ostrava. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství. ISBN: 80-86634-27-2

Pazderka J., Hájková E. (2014) - Použití odporové metody ke stanovení vlhkosti zdiva historických budov. *Stavební obzor*. 5-6, page 89-94

Přikryl R., Lokajíček T., Svobodová J., Weishauptová Z. (2003). Experimental weathering of marlstone from Přední Kopanina (Czech Republic) - historical building stone of Prague.

Building Environment. volume 38. issue 9. pages 1163–1171. doi:10.1016/S0360-1323(03)00073-8

Přikryl R., Přikrylová J., Racek M., Weishauptová Z., Kreislová K. (2017). Decay mechanism of indoor porous opuka stone: a case study from the main altar located in the St. Vitus Cathedral, Prague (Czech Republic). Environmental Earth Sciences. volume 76, issue 7, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6596-7>

Phillipson M. C., Baker P. H., Davies M., Ye Z., McNaughtan A., Galbraith G.H., McLean R. C. (2007). Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches. Building Services Engineering Research and Technology. volume 28. issue 4. pages 303-316. <https://doi.org/10.1177/0143624407084184>

Roels S., Carmeliet J., (2006). Analysis of moisture flow in porous materials using microfocus X-ray radiography. International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 49. Issues 25–26. pages 4762-4772. ISSN 0017-9310. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.035>.

Rosina E. (2018). When and how reducing moisture content for the conservation of historic building. A problem solving view or monitoring approach? Journal of Cultural Heritage, volume 31, Supplement, pages 82-88, ISSN 1296-2074, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.023>.

Sakai M., Jones S. B., Tuller M. (2011). Numerical evaluation of subsurface soil water evaporation derived from sensible heat balance. Water Resources Research. volume 47. 10.1029/2010WR009866

Sass O., Viles H. A. (2010). Two-dimensional resistivity surveys of the moisture content of historic limestone walls in Oxford, UK: implications for understanding catastrophic stone deterioration. Geological Society. London. Special Publications. volume 331. pages 237-249. DOI:10.1144/SP331.22

Saas. O. (2022). Investigation rock moisture at a sandstone massif in the Saxonian Switzerland climbing area. Journal of Geomorphology. DOI: 10.1127/jgeomorphology/2022/0711

Slavík M., Bruthans J., Weiss T., Schweigstillová J. (2020). Measurements and calculations of seasonal evaporation rate from bare sandstone surfaces: Implications for rock weathering. Earth Surface Processes and Landforms. volume 45, issue 12, pages 2965-2981. <https://doi.org/10.1002/esp.4943>

Slížková Z., Ševčík R., Válek J. (2020). Zpráva o výsledcích průzkumu zasolení zdív pod III. nádvořím na Pražském hradě. Výzkumná zpráva 11/2020. Ústav teoretické a aplikované Mechaniky AV ČR, Praha

Slížková Z., Ševčík R., Válek J., (2021). Rozbor materiálů z architektonického fragmentu pod 3. nádvořím Pražského hradu. Výzkumná zpráva č. 2021/107 . Ústav teoretické a aplikované Mechaniky AV ČR, Praha

Suchorab Z., Majerek D., Brzyski P., Sobczuk H., Raczkowski A. (2017). Estimation of water absorption coefficient using the TDR method. AIP Conference Proceedings. volume 1866. issue 1. <https://doi.org/10.1063/1.4994518>

Šrámek J. (2009). Pískovce z Pražského hradu a okolí. - Bulletin Mineralogie, Petrologie. Oddělení Národního Muzea (Praha), volume 17. issue 1. pages 60-64. ISSN: 1211-0329

Toll D.G. (2012). The behaviour of unsaturated soils. Chapter 5 in A Handbook of Tropical Residual Soil Engineering, (eds. Huat, B.B.K., Toll, D.G. & Prasad, A.) London: Taylor and Francis, ISBN: 9780415457316.

Toll D. G., Asquith J., Fraser A., Hassan A., Liu G., Lourenço S. D. N., Mendes J., Noguchi T., Osinski P., Stirling R. (2015). Tensiometer techniques for determining soil water retention curves. Conference: Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soil. DOI: 10.1201/b19248-4.

Topp G.S., Davis J.L., Annan A.P., (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*. volume 16. issue 3. pages 574 - 582. ISSN 1944-7973. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>

Vogel T., Dušek J., Dohnal M., Sněhota M. (2020). Moisture regime of historical sandstone masonry. *Journal of Cultural Heritage*. volume 42. pages 99-107. ISSN 1296-2074. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.09.005>

Vosoughi P., Taylor P., Ceylan H., (2017). Impacts of Internal Curing on the Performance of Concrete Materials in the Laboratory and the Field. *National Concrete Pavement Technology Center*. Iowa State University, Institute for Transportation, page 11, DOI:10.13140/RG.2.2.18367.61608

Weiss T., Mareš J., Slavík M., Bruthans J. (2020). A microdestructive method using dye-coated-probe to visualize capillary, diffusion and evaporation zones in porous materials. *Science of The Total Environment*. volume 704

Weiss T., Kalianková K., Slavík M., Mareš J., Maříková-Kubková J., Válek J. (2022). Metody měření vlhkosti v historickém zdivu s příklady využití na archeologických areálech pod III. nádvořím Pražského hradu. *Zprávy památkové péče*. V době psaní práce zatím článek nebyl publikován. Příloha 9

Weiss T. and Sass O. (2022). The Challenge of Measuring Rock Moisture—A Laboratory Experiment Using Eight Types of Sensors. SSRN. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4076718>

Warscheid T., Braams J., (2000) Biodeterioration of stone: a review, *International Biodeterioration & Biodegradation*. volume 46. issue 4. pages 343-368. ISSN 0964-8305. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00109-8](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00109-8)

Weast R. C., Astle M. J., Beyer, W. H. (1989). *Handbook of Chemistry and Physics*. Library of Congress, Edition 69. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Wormald R., Britch A. L. (1969). Methods of measuring moisture content applicable to building materials. Building Science. volume 3. issue 3. pages 135-145. ISSN 0007-3628. [https://doi.org/10.1016/0007-3628\(69\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0007-3628(69)90026-7).

7.1 Internetové zdroje

webové stránky a mapové podklady projektu Calcarius

www.calcarius.cz

Datum posledního navštívení: 18. 4. 2022

webové stránky výrobce přístroje a příslušenství měřicí aparatury podpovrchového odporu Material Moisture Gigamodule - Scanntronik

www.scanntronik.de/

Datum posledního navštívení: 26. 4. 2022

webové stránky výrobce přístroje a příslušenství měřicí aparatury Greisinger

www.greisinger.cz/

Datum posledního navštívení: 28. 4. 2022

webové stránky týmu vyvíjejícího metodu sondy využívající reaktivní barvivo

<https://web.natur.cuni.cz/uhigug/moistureprobe/>

8 Seznam obrázků

Obr. 1. - Model procesu rozrušení krystalizací solí

Obr. 2. Příklad retenční křivky

Obr. 3. Lokalizace archeologického areálu v rámci areálu Pražského hradu

Obr. 4. Plán archeologického areálu

Obr. 5. Celkový pohled na lokalitu raně novověkého mostu

Obr. 6. Umístění bodů na mostním pilíři, měření vlhkosti

Obr. 7. Umístění bodů na mostním, měření pelot a relativní vlhkosti vzduchu

Obr. 8. Přístroj Material Moisture Gigamodule a datalogger Thermofox

Obr. 9. Přístroj Greisinger GMR 110 a přístroj Greisinger GMK 100

Obr. 10. Detail umístění nádoby na odběr a měření objemu skapu

Obr. 11. Kaluž 1, drény 1 a 2. Kaluž 2 a drén 3.

Obr. 12. Měřicí stanoviště zeď „u štěrku”. Měřicí stanoviště zeď „sv. Bartoloměj”

Obr. 13. Měřicí stanoviště zeď „u vchodu”.

Obr. 14. Typizovaný vzhled elektrod podpovrchového měření odporu.

Obr. 15. Kalibrační křivka použitá pro kalibraci měření podpovrchového odporu.

Obr. 16. Kalibrační křivka metody GMR 110 pro lokalitu mostního pilíře.
 Obr. 17. Kalibrační křivka metody MOIST 0-3 pro lokalitu mostního pilíře.
 Obr. 18. Kalibrační křivka metody MOIST 0-15 pro lokalitu mostního pilíře.
 Obr. 19. Kalibrační křivka metody MOIST 0-30 pro lokalitu mostního pilíře.
 Obr. 20. Souhrnný graf vývoje vlhkosti, podpovrchové měření odporu.
 Obr. 21. Vývoj vlhkosti od 1/2021 do 7/2021, podpovrchové měření odporu.
 Obr. 22. Vývoj teploty zdiva a teploty vzduchu v blízkosti dataloggeru
 Obr. 23. Vývoj měření vlhkosti přístrojem Greisinger GMR 110 na zdi mostu, souhrnný graf.
 Obr. 24. Vývoj vlhkosti ve sledovaných bodech pomocí TDR, 9/2020 až 4/2021
 Obr. 25. Vývoj hloubky výparové fronty v měřených bodech, sonda využívající reaktivní barvivo
 Obr. 26. Vývoj vlhkosti v měřených bodech na mostním pilíři, MOIST 0-3
 Obr. 27. Vývoj vlhkosti v měřených bodech na mostním pilíři, MOIST 0-15
 Obr. 28. Vývoj vlhkosti v měřených bodech na mostním pilíři, MOIST 0-30
 Obr. 29. Infračervené snímky mostního pilíře
 Obr. 30. Infračervený snímek sítě „u štěrku“
 Obr. 31. Infračervený snímek sítě „sv. Bartoloměj“
 Obr. 32. Infračervený snímek sítě „u vchodu“
 Obr. 33. Vizualizace výsledků měření vybraných zdí pomocí přístroje Greisinger GMK 100
 Obr. 34. Vizualizace výsledků měření vybraných zdí pomocí přístroje Greisinger GMR 110,
 Obr. 35. - Vizualizace výsledků měření vybraných zdí pomocí přístroje MOIST 210 B (MOIST 0-15)
 Obr. 36. Vývoj vlhkosti vzduchu u sledovaného mostu, 8/2020 - 3/2022
 Obr. 37 - Vývoj teploty vzduchu a teploty půdy na lokalitě mostního pilíře.
 Obr. 38 - Vývoj konduktivity podzemní vody, měřeno ve vrtu A.
 Obr. 39 - Vývoj konduktivity skapu.
 Obr. 40 - Vývoj konduktivity vody v kaluži 1.
 Obr. 41. - Vývoj konduktivity vody v kaluži 2.
 Obr. 42 - Srovnání vývoje teploty a pH, ve skapu, v kaluži 1 a kaluži 2.
 Obr. 43. Vývoj hladiny ve vrtu A od 8/2020 do 3/2022
 Obr. 44 - Vývoj hloubky kaluže 1 od září 2020 do února 2022
 Obr. 45. - Vývoj množství skapu v období 12/2020 až 3/2022.
 Obr. 46. Úhrn srážek za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Klementinum
 Obr. 47. Úhrn srážek za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Ruzyně
 Obr. 48. Úhrn srážek za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Břevnov
 Obr. 49. Výskyt srážek 10 mm/den a vyšších na sledovaných stanicích Břevnov, Klementinum a Ruzyně
 Obr. 50. Maximální, minimální a průměrné teploty za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Klementinum
 Obr. 51. Maximální, minimální a průměrné teploty za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Ruzyně
 Obr. 52. Relativní vlhkost vzduchu za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Ruzyně a Klementinum
 Obr. 53. Celková výška sněhové pokrývky za období 1/2021 až 2/2021, meteorologická stanice Ruzyně
 Obr. 54. Celková výška sněhové pokrývky za období 8/2020 až 12/2021, meteorologická stanice Ruzyně
 Obr. 55. Souhrnný graf vývoje skutečného elektrického odporu od srpna 2020 do dubna 2022 - bez kalibrace.
 Obr. 56. Krápníky a solné krusty
 Obr. 57. Fragменты opukového zdiva v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu.

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled rovnovážných relativních vlhkostí vybraných solí při 20 °C

Tabulka 2 - Hodnoty relativní permitivity u vybraných látek.

Tabulka 3 - Přehledová tabulka použitých přístrojů

PŘÍLOHY

Příloha 1 - Hloubka vrtů

Vrt	Hloubka vrtu od záhlaví (cm)
A	78,5
B	518
C	548
D	621

Příloha 2 - Vrty v archeologickém areálu



Obr. 57. Vrt A vlastní foto autorky, umístění viz Obr. 4.



Obr. 58. Vrt B vlastní foto autorky, umístění viz Obr. 4.

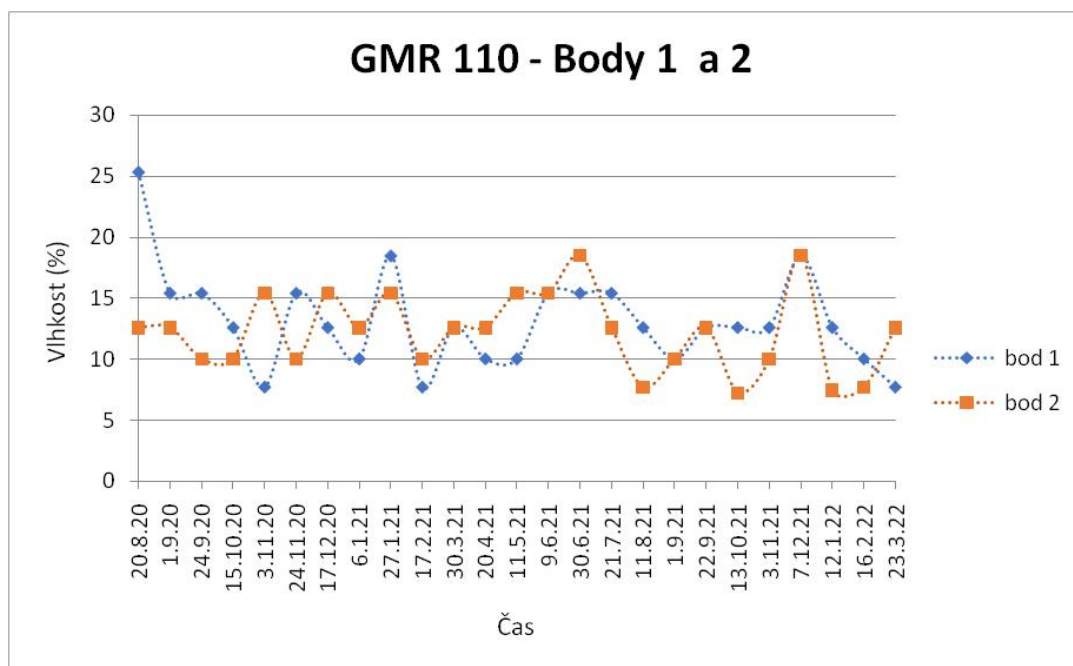


Obr. 59. Vrt C foto Tomáš Weiss, umístění viz Obr. 4.

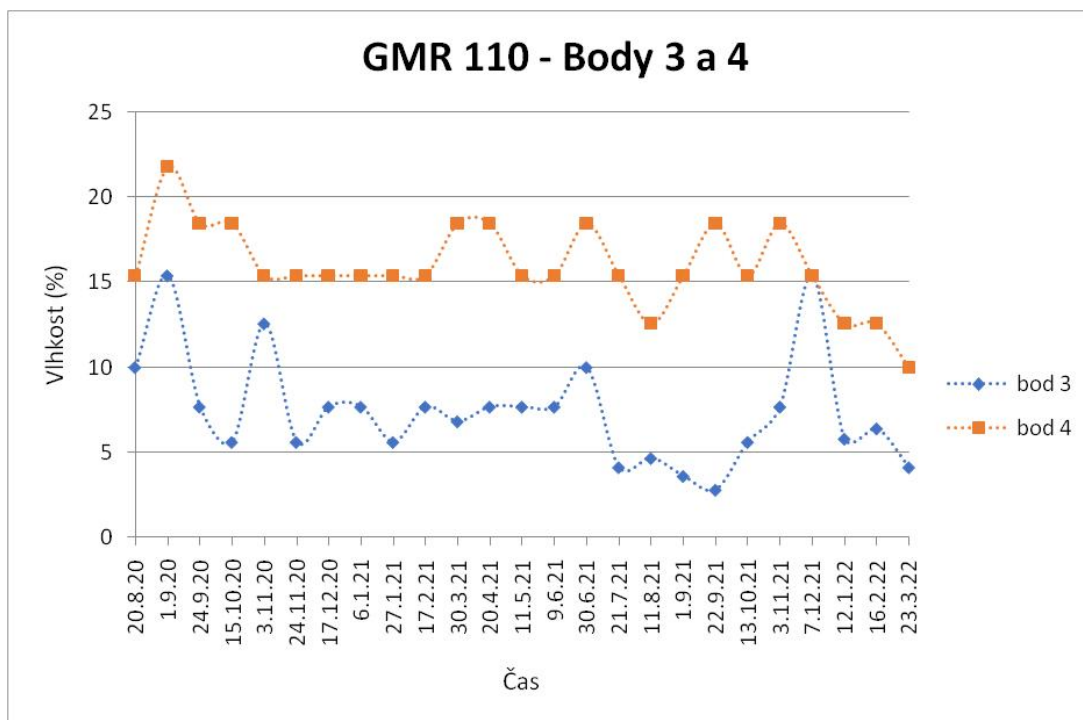


Obr. 60. Vrt D vlastní foto autorky, umístění viz Obr. 4.

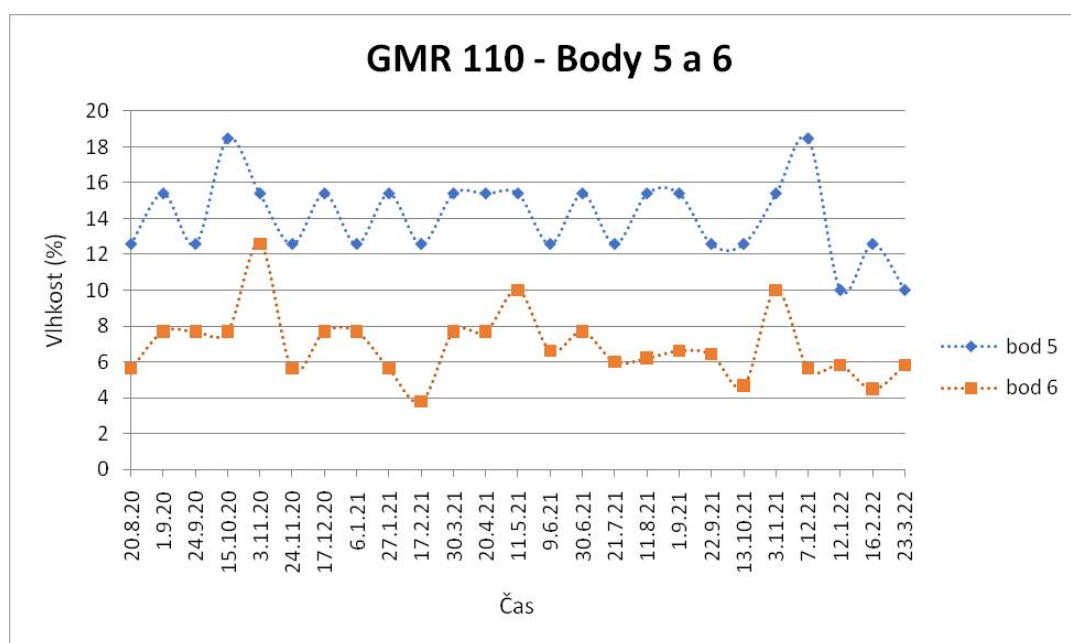
Příloha 3 - Grafy pro body měření GMR 110, vykreslené po dvou bodech pro větší přehlednost



Obr. 61. Vývoj vlhkosti v bodech 1 a 2, měřeno GMR 110.



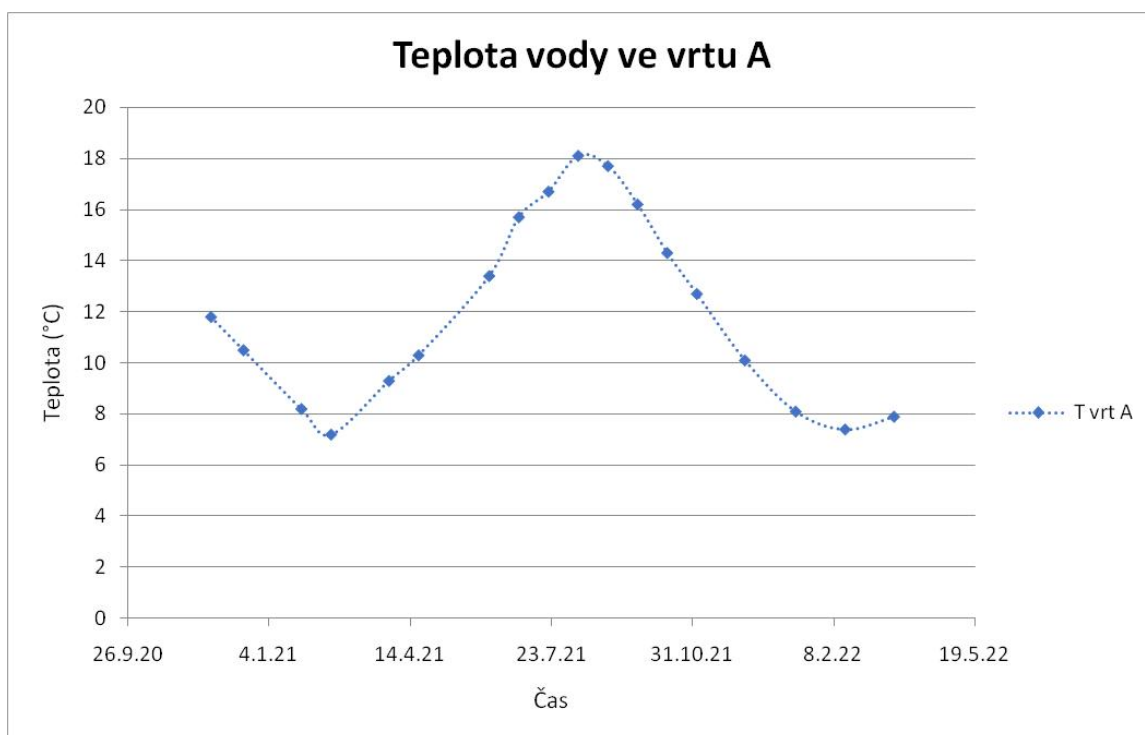
Obr. 62. Vývoj vlhkosti v bodech 3 a 4, měřeno GMR 110.



Obr. 63. Vývoj vlhkosti v bodech 5 a 6, měřeno GMR 110.

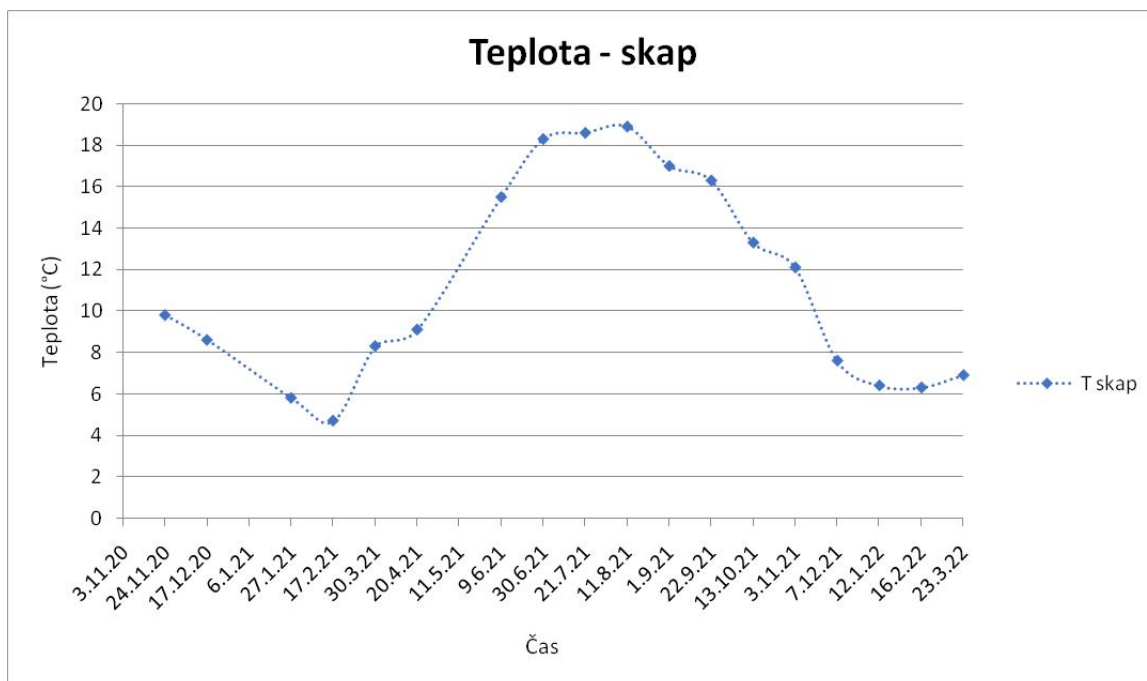
Příloha 4 - Měření teploty vody ve vrtu A a ve skapu

Na grafu (Obr. 64) lze sledovat vývoj teploty vody ve vrtu A. Teplota zde byla měřena od 11/2020 do 3/2022 a je zde vidět jasný chod ročních období, kdy teploty klesají během podzimu a zimy a v jarních měsících stoupají. Minima teplot je dosaženo v 2/2021 7,2 °C a maxima 18,1°C v 8/2021.



Obr. 64. Vývoj teploty vody ve vrtu A

Teplota skapu byla měřena od 11/2020 do 3/2022. U teploty skapu je viditelný stejný trend, tedy pokles teplot v podzimních měsících a jejich nárůst v jarních měsících s maximem v létě (Obr. 65). Minimální naměřená teplota skapu je 4,7 °C v 2/2021 a nejvyšší teplota je 18,9 °C v 8/2021. Maximální naměřená teplota skapu je vyšší než maximální teplota vody ve vrtu A a nejnižší naměřená teplota skapu je nižší než nejnižší teplota vody ve vrtu A (Obr. 64, 65).



Obr. 65. - Vývoj teploty skapu.

Příloha 5 - Zaplavení okolí vrtu A



Obr. 66. Zaplavení okolí vrtu A, ze dne 30. 6. 2021, vlastní foto autorky.



Obr. 67. - Zaplavení okolí vrtu A ze dne 15. 10. 2020, foto Jakub Harmáček.

Příloha 6 - Tabulka vybraných metod měření vlhkosti

Tabulka 4. Přehled metod měření vlhkosti

Název metody	Využitelnost in-situ	Invazivnost (popis invazivnosti)	Měření	Poznámky
TDR	Ano	Ano (zasunutí sondy do materiálu)	Měření lze provádět opakovaně i jednorázově	Nepřesnost při vysokém zasolení
FDR	Ano	Ano (zasunutí sondy do materiálu)	Měření lze provádět opakovaně i jednorázově	Nepřesnost při vysokém zasolení
Infračervená tomografie	Ano	Ne (měření teploty povrchu)	Lze provádět bez dodání tepla, nebo s cílenou změnou teploty	Výsledky spíše orientační, pro mapování ploch vhodných k dalšímu průzkumu
Metoda tepelných pulsů	Ano	Ano (zasunutí sondy do materiálu)	Lze provádět jednorázově, případně periodicky	Bez vlivu solí, ale citlivost na nehomogenity
ERT	Ano	Ano (zasunutí sondy do materiálu)	Možnost dlouhodobého (kontinuálního) měření	Nepřesnost v zasolených materiálech
Tenzometrie	Ano	Ano (vyvrtaný otvor, nebo jiný existující otvor)	Spíše jednorázová měření	Fyzikální omezení metody (nelze měřit pod - 1 atm)
Sonda využívající reaktivní barvivo	Ano	Ano (je nutné vyvrtat do materiálu otvory), možné obarvení okolí bodu měření	Opakovaná jednorázová měření	Měření výparové fronty. Spíše doplňková metoda

Příloha 7 - Detailní pohled na jednotlivé body měření



Obr. 68. Detailní pohled na body měření 1 (vlevo) a 2 (vpravo), umístění viz Obr. 6.



Obr. 69. Detailní pohled na body měření 3 (vlevo) a 4 (vpravo), umístění viz Obr. 6.



Obr. 70. Detailní pohled na body měření 5 (vlevo) a 6 (vpravo), umístění viz Obr. 6.

Příloha 8 - Detailní pohled na umístění teplotních čidel Material Moisture Gigamodule



Obr. 71. Čidla Material Moisture Gigamodule pro měření teploty vzduchu (vlevo) a zdiva (vpravo).

Metody měření vlhkosti v historickém zdivu s příklady využití na archeologických areálech pod III. nádvořím Pražského hradu

Tomáš Weiss ⁺, Kateřina Kalianková ⁺, Martin Slavík ⁺, Jakub Mareš ⁺, Jana Maříková-Kubková [×], Jan Válek [~]

⁺ Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Albertov 6, 128 00 Praha 2

[×] Archeologický ústav Akademie věd ČR, Letenská 4, 118 01 Praha 1

[~] Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR, Prosecká 809, 190 00 Praha 9-Prosek

Podklad pro cizojazyčné resumé

Mnoho historicky cenných staveb je ohrožováno degradací zdiva, která je často vázána na přítomnost vlhkosti – má vliv na solné či mrazové zvětrávání, ale i na bobtnání a smršťování jílových složek nebo na biogenní degradaci. Tento článek se zaměřuje na vlhkost v kamenném zdivu, a to zejména na metody, kterými se vlhkost stanovuje. Článek podává přehled metod – jejich fyzikální princip a přehledný výčet jejich výhod, nevýhod a omezení. Vybrané metody jsou představeny na konkrétním případě aplikace v archeologických areálech pod III. nádvořím Pražského hradu, který je významný svými pozůstatky románské a gotické architektury a fragmenty raně středověkých valových opevnění. Areál byl odkryt ve 20. letech 20. století, ale v současnosti se potýká s degradací přítomných opuk, což pravděpodobně s vlhkostí souvisí.

Měření se provádí na opukovém pilíři raně novověkého mostu, nacházejícího se severozápadně od kaple sv. Bartoloměje. Toto místo bylo zvoleno pro své specifické teplotní a vlhkostní podmínky. Voda se zde nachází mělce pod povrchem historického terénu a vzlíná po mostním pilíři vzhůru. Teplotní podmínky jsou zajímavé díky výrazně nižším teplotám naměřeným u paty pilíře a vysokým teplotám v jeho vyšších partiích. Pro monitoring vlhkosti zde byla zvolena kombinace více metod, a to destruktivních i nedestruktivních: odporové metody, elektromagnetické metody a sonda využívající reaktivní barvivo. Monitoring probíhá pomocí manuálního měření jednou za 3 týdny a u přístrojů, které to umožňují, je využito měření automatické s 1hodinovým intervalem.

Dosavadní měření ukazuje, že obsah vlhkosti se ve zdivu mostního pilíře během roku výrazně nemění, ale potvrdil se předpoklad, že se vlhkost opuky obecně snižuje s výškou nad terénem, a to pravděpodobně kvůli vzlínání podzemní vody. Měření však stále probíhají a prezentované výsledky ani jejich interpretace nejsou konečné a v rámci výzkumu se plánuje provedení dalších materiálových analýz a využití jiných metod nad rámec tohoto článku.

Výsledky a zkušenosti s měřením vedou k závěru, že jako nejvhodnější nedestruktivní metodou je metoda mikrovlnná s větším hloubkovým dosahem. Pro hrubé, členité povrchy

nedoporučujeme elektromagnetické sondy s nižší hloubkou měření, jelikož jejich výsledky se ukázaly jako významně zkreslené. V případě omezených finančních možností je vhodnou volbou odporová metoda se dvěma elektrodami, která je ovšem náchylná k chybovosti v zasolených materiálech. Pokud je cílem měření odhalit místa podpovrchového výparu, vhodnou metodou je sonda využívající reaktivní barvivo. Zde prezentované metody se týkají pouze měřením vlhkosti vlastního stavebního materiálu, ale z pohledu studia vlhkosti v interiérech staveb je kritická i vlhkost vzduchu, kterou doporučujeme měřit společně teplotou vzduchu a zdiva.

Abstrakt

Degradace zdiva historicky cenných staveb je často vázána na přítomnost vlhkosti, která má vliv na solné, mrazové a biogenní zvětrávání či na bobtnání jílových minerálů. Článek přibližuje využití metod (odporové, elektromagnetické, tepelných pulzů, využívající reaktivní barvivo, infračervené termografie nebo tenzometrie) k monitoringu přítomnosti vody ve stavebních konstrukcích s důrazem na jejich využití v památkové péči shrnující na jednom místě jejich principy, výhody, nevýhody a možnosti jejich vzájemné kombinace. Vybrané metody (odporové, elektromagnetické, infračervené, sonda využívající reaktivní barvivo) jsou prezentovány a kriticky zhodnoceny na případové studii monitoringu vlhkosti v archeologickém areálu pod III. nádvořím Pražského hradu. Jako nejvhodnější nedestruktivní metoda je doporučena metoda mikrovlnná s větším hloubkovým dosahem – naopak elektromagnetické sondy s nižší hloubkou měření jsou značně zkreslené tvarem povrchu měřeného materiálu a nelze je doporučit. Odporové metody jsou náchylné k chybovosti v zasolených materiálech, ale v případě omezených financí jsou adekvátní volbou. Obsah vlhkosti ve sledovaném opukovém pilíři raně novověkého mostu pod III. nádvořím se v současnost jeví jako stagnující, ovšem naměřené časové řady jsou příliš krátké pro zodpovědné vyvození závěrů a v měření nadále pokračujeme.

Klíčová slova: vlhkost zdiva, Pražský hrad, odporová metoda, kapacitní metoda, mikrovlnná metoda, uranine-probe

Úvod

Přítomnost vody v historických stavebních materiálech má zásadní vliv na jejich degradaci – podílí se na zvětrávání solném, mrazovém, biogenním nebo způsobeném bobtnáním jílových minerálů. Z hlediska solného zvětrávání je zásadní pohyb solí, který je umožněn pouze v roztoku, a tedy jen v přítomnosti kapalné vody. Soli jsou přítomné prakticky ve všech historických stavebních materiálech, ať již z atmosférických srážek, chemických posypů, hnojení půdy, poruch instalace či kanalizace, kvůli nevhodným konzervačním zásahům nebo v důsledku rozpouštění vlastního materiálu. Podrobný fyzikální popis solného zvětrávání je mimo rámec tohoto článku, ale můžeme říci, že solné zvětrávání je způsobeno krystalizací solí, ke které dochází nejčastěji kvůli výparu.¹

Při zmrznutí vody v pórech dochází k mrazovému zvětrávání, jehož účinky jsou ovlivněny jak množstvím vody, tak i jejím prostorovým uspořádáním v materiálu.² Také zvětrávání v důsledku biologických procesů je do značné míry vázané na přítomnost vody.³ Poslední typ představovaného zvětrávání je dán bobtnáním a smršťováním zejména jílových minerálů

podle dostupnosti vody, což může způsobit tlak ve stovkách MPa.⁴ Tento typ zvětrávání se dotýká řady materiálů včetně opuky, která v sobě jílové minerály obsahuje,⁵ takže k jejich degradaci dochází zejména při velmi nízké vlhkosti.

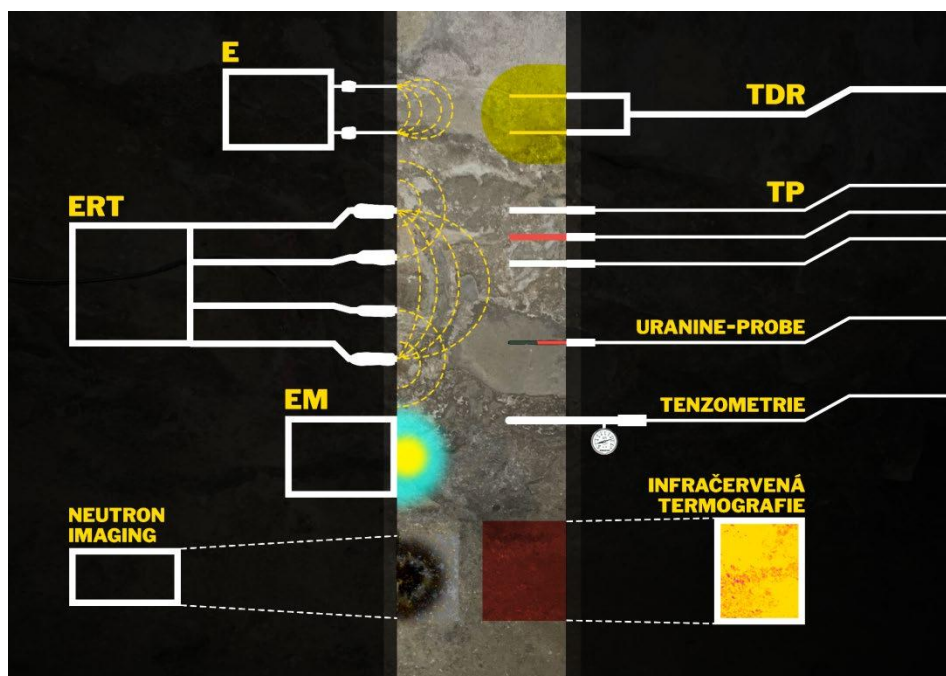
Voda vstupuje do materiálů buď ve fázi kapalné, a to z atmosférických srážek, kapilárním vztlínáním půdní či podzemní vody, příp. různými průsaky z antropogenních úprav (trubky, stoky aj.). Nebo ve fázi plynné ze vzdušné vlhkosti, a to buď vlivem kondenzace nebo hygroskopicity materiálu dané přítomnými solemi.⁶

Cílem tohoto článku je přiblížit čtenářům využití vybraných metod k monitoringu přítomnosti vody v historickém zdivu. Prezentované metody byly již v minulosti různými autory testovány na stavebních materiálech nebo na přírodních horninových výchozech, ale dosud chyběla česky psaná literatura s důrazem na využití těchto metod v památkové péči shrnující na jednom místě jejich principy, výhody, nevýhody a možnosti jejich vzájemné kombinace. Na příkladu monitoringu vlhkosti na památkově chráněné lokalitě pod III. nádvořím Pražského hradu jsou proto vybrané metody kriticky zhodnoceny z hlediska jejich využití v památkové péči. Dílčím cílem je pak prezentace a interpretace dosavadních výsledků výzkumu od srpna 2020 do května 2021. Článek si tak neklade ambici být komplexní zprávou o vodním režimu pod III. nádvořím ani souhrnným metodickým návodem pro měření vlhkosti zdiva ve všech aplikacích památkové praxe.

Pod III. nádvořím Pražského hradu je v současnosti přetrvávajícím problémem degradace opuk, která může být způsobena sedáním desky nádvoří, krystalizací rozpuštěných solí či dilatací materiálu v důsledku kondenzace vlhkosti.⁵ Výzkum těchto příčin je součástí multioborového projektu Technologické agentury ČR *Skryto pod povrchem. Archeologické terény Pražského hradu, jejich ochrana a prezentace v moderním světě*, v rámci kterého dochází také k podrobnému monitorování vodního režimu.

Metody k měření vlhkosti

Nejčastější a nejpřesnější metodou pro určování vlhkosti ve stavebním materiálu je gravimetrické měření, které spočívá ve stanovení vlhkosti z rozdílu hmotnosti odebraného a vysušeného vzorku.⁷ Tato metoda je však zároveň značně destruktivní, a tak ji nelze v případě monitoringu až na výjimky použít. Všechny ostatní metody, které jsou uvedeny níže, měří určitou fyzikální veličinu prostředí, na základě které se obsah vody vypočítává. Měření vlhkosti těmito metodami je tak ale závislé na řadě dalších parametrů, které s vlhkostí přímo nesouvisí, jako je hustota a minerální složení materiálu, porozita, přítomnost solí v roztoku, úroveň homogenity i izotropie materiálu atp. Interpretace získaných dat je tak obvykle náročná a často vyžaduje kalibraci na měření vlhkosti právě gravimetrickým měřením. Detailní rozbor parametrů, které měření ostatními metodami ovlivňují, by byl nad rámec zaměření tohoto článku, pro čtenáře jsou na řadě míst odkazy na odborné publikace, které se této problematice věnují hlouběji.



Obr. 1. Schématické znázornění metod k měření vlhkosti v historických stavebních materiálech: odporové metody (E – dvouelektrodové, ERT – elektrická odporová tomografie), elektromagnetické metody (EM, TDR), infračervená termografie (termokamera), heat-pulse (metoda tepelných pulsů), tenzometrie, uranine-probe (sonda využívající reaktivní barvivo) a neutronová zobrazovací metoda jako příklad dalších metod, kterými se tento článek nezabývá.

Odporové metody

Odporové metody využívají fyzikální veličinu elektrického odporu, která charakterizuje schopnost stavebního materiálu bránit v průchodu elektrického proudu. Elektrický odpor prostředí je mj. nepřímo závislý na vlhkosti a teplotě.⁸ Zásadním předpokladem úspěšného měření je zajistit dobrý kontakt mezi materiálem a elektrodou, která by měla na materiál těsně přiléhat.⁹ Elektrický kontakt je možné podpořit nejen mechanickým přichycením, ale i aplikací různých vodivých past nejčastěji na bázi grafitu.

Odpor materiálu se dá měřit buď v jednom místě odporovým měřičem vlhkosti s hroty, nebo v řezu sadou elektrod v definovaných vzdálenostech od sebe (tzv. elektrická odporová tomografie – ERT). Se zvyšujícím se rozstupem mezi elektrodami proudí totiž elektřina hlouběji do materiálu, což umožňuje výpočet prostorového rozložení odporu (a tedy vlhkosti) prostředí. ERT tedy umožňuje vizualizaci vlhkostních režimů, a to od hloubek jednotek centimetrů až metrů bez potřeby invazivních sond.

Odporové metody díky své relativně jednoduché konstrukci umožňují dlouhodobé automatické měření. Jejich nevýhodou je pak nižší přesnost a ovlivňování odporu jinými faktory než je vlhkost, jako jsou rozpuštěné soli, které výrazně snižují odpor oproti roztokům o nízké mineralizaci¹⁰, příp. přítomnost dalších vodivých materiálů, například hřebíků a dalších kovových komponent⁹. Zároveň je vhodné měření kalibrovat pro každý materiál dle jeho vlastností¹¹. Calamita et al. (2012)¹² ve svém porovnání odporových metod a metody TDR uvádí, že odporová metoda je co do provedení rychlejší a jednodušší než metody elektromagnetické (viz dále).

Elektromagnetické metody (georadar, metody kapacitní a mikrovlnné, TDR, FDR)

Tyto metody využívají elektromagnetické pole a měří dielektrické vlastnosti materiálu - tzv. relativní permitivitu prostředí (látková konstanta), která odráží přítomnost vody. Zatímco relativní permitivita přírodních porézních materiálů se běžně pohybuje od 3 do 5 (hodnota blízká volnému vzduchu - 1), tak relativní permitivita vody je okolo 80⁷. Tudíž i malé množství vody dokáže ovlivnit relativní permitivitu celého prostředí a na základě její hodnoty lze pak odvodit vlhkost materiálu^{11,13}.

Elektromagnetické metody můžeme rozdělit na neinvazivní, využívající senzory, které se přikládají na povrch měřeného materiálu, a invazivní, jejichž senzory je nutné vložit přímo do materiálu. Neinvazivní metody jsou známy pod názvy kapacitní nebo mikrovlnné v případě bodových měření a (geo)radarové v případě tomografie. Tyto metody využívají odrazu vysokofrekvenčního záření (10^6 - 10^9 Hz), kdy elektromagnetické vlny putují od zdroje k anténě, která je přijímá, přes svrchní vrstvu měřeného materiálu, a poskytuje tak informace o jeho relativní permitivitě.

Z metod invazivních je nejpoužívanější reflektometrie v časové oblasti (ang. Time Domain Reflectometry - TDR), která měří rychlost šíření impulsu v prostředí podél 1-3 čidel. Metoda reflektometrie frekvenční domény (FDR) obdobně jako TDR využívá měřený materiál jako kondenzátor a zjišťuje maximální rezonanční frekvenci, která je závislá na obsahu vody. Existují i invazivní kapacitní senzory, které jsou sice cenově dostupnější, ale jsou méně přesné než TDR/FDR a zcela nepřesné za přítomnosti solí, takže pro účely památkové péče nevhodné.

Elektromagnetické metody lze využít pro invazivní i neinvazivní měření a jejich výhodou je možnost vysokého časového rozlišení a možnost automatického kontinuálního měření. Metody nejsou omezeny strukturou materiálu a proti odporovým metodám jsou relativně málo citlivé na vliv solí při využití vyšších frekvencí (nad 50 MHz)^{11,14,15}.

Infračervená termografie (termometrie)

Změna skupenství vody z kapalného na plynné vyžaduje dodání energie, která se projeví snížením teploty. Ta se dá pozorovat nedestruktivní infračervenou tomografií, která měří tepelné vyzařování materiálu¹⁶. Metoda tedy neměří přímo vlhkost materiálu, ale lze díky ní rychle zjistit, v jakých místech dochází k relativně vyššímu výparu, který je na přítomnost vody vázaný. Tato metoda je tak vhodná spíše pro samotné odhalení přítomnosti vlhkosti bez jejího bližšího stanovení⁹. Infračervená termografie je však hůře použitelná ve vlhčím prostředí, kde jednak nedochází k výraznému výparu a jednak jsou zde změny teploty oproti suchému prostředí pomalejší kvůli vysoké měrné tepelné kapacitě vody¹⁶.

Metoda tepelných pulsů (angl. heat-pulse)

Další metoda využívající tepelné vlastnosti materiálu spočívá ve vysílání tepla a měření změny teploty materiálu. Vlhkost má totiž výrazný vliv na proudění tepla i tepelnou kapacitu materiálu. Měřicí sonda se obvykle sestává ze sondy vysílající tepelný puls a sondy měřící teplotu¹¹. Výhodou této metody je, že není příliš ovlivněna přítomností solí v materiálu a je aplikovatelná in-situ i laboratorně, nicméně částečně může být ovlivněna mikroklimatem¹¹. Kvůli nutnosti zavést sondy do materiálu je i tato metoda destruktivní, a potenciálním zdrojem chyb či nejistot měření mohou být nehomogenity v materiálu mezi oběma sondami⁹.

Tenzometrie

Pomocí tenzometrické metody se neměří přímo vlhkost materiálu, ale jeho sací tlak, z jehož hodnoty lze vlhkost odvodit na základě znalosti tzv. retenční křivky materiálu. Tato křivka udává obecný trend, že se snižující se vlhkostí materiálu vzrůstá sací tlak, a voda se stahuje do menších a menších pórů, až se stává prakticky nepohyblivou. Sací tlak tak o pohybu kapilární vody v porézním materiálu vypovídá lépe než samotná vlhkost¹⁷. Tenzometr se skládá z porézní keramické čepičky a trubičky, která je naplněna kapalinou a tlakovým čidlem. Čepička se vsune do libovolné hloubky studovaného materiálu¹¹ a protože kapalina ve vzduchotěsné trubici má tendenci skrze porézní čepičku vyrovnat rozdíl s vlhkostí měřeného okolního materiálu, tak díky ztrátě vody z trubice skrze keramickou čepičku dojde v tenzometru k poklesu tlaku. Tedy čím vyšší sací tlak v materiálu, a tedy v tenzometru, tím sušší je materiál a má větší tendenci do sebe vodu vázat. Nevýhodou je, že fungování této metody je omezeno tlakem od nuly do přibližně -1 atm. Toto tlakové rozpětí nemusí vždy postihnout všechnu vlhkost obsaženou v materiálu.

Sonda využívající reaktivní barvivo (ang. uranine-probe)

Tato relativně nová metoda měření vlhkosti ve zdivu byla vyvinuta některými autory článku¹⁸ a je určena pro měření přítomnosti kapilární vody v materiálu, což může výrazně pomoci při interpretaci výsledků získaných jinými metodami. Princip této metody je založen na reakci barviva sodného fluoresceinu s vlhkostí, která způsobí změnu jeho barvy. Do materiálu se vyvrtá otvor o průměru cca 2 mm, do kterého se umístí tenká sonda obalená barvivem, která se v materiálu ponechá 10-15 minut. Poté lze sondu vyjmout a vizuálně interpretovat výsledky, typicky tedy hloubku, ve které se začíná vyskytovat kapilární voda (tomu odpovídá změna barvy). Tato tenká hranice, která odděluje zónu kapilární vody ve větší hloubce od suché či výrazně sušší přívěrchové zóny, se nazývá výparová fronta a její pozice je naprosto klíčová pro zvětrávání materiálu, neboť na frontě dochází k výparu, a tedy k přednostnímu vysrážení destruktivních solí¹⁹. Metoda sondy obalené do barviva jako jediná z uvedených dokáže poměrně přesně (s rozlišením ~2 mm za nižší vlhkosti vzduchu) identifikovat hloubku výparové fronty¹⁸.

Jistou mírou nejistoty do měření vnáší přítomnost vzdušné vlhkosti, která při relativní vlhkosti vzduchu nad 73 % může reagovat s barvivem na sondě a tím negativně ovlivňovat přesnost měření. Přítomnost hygrokopických solí může také vést k nepřesnému či neprůkaznému měření. Výhodou této metody je poměrně nízká míra destrukce zkoumaného materiálu a ve srovnání s jinými metodami i dobrá cenová dostupnost.

Další metody pro měření vlhkosti

Existuje celá řada metod, které však z různých důvodů nejsou příliš vhodné nebo dostupné pro využití v památkové péči, často jsou použitelné pouze na odebraných vzorcích v laboratorních podmínkách, a tak zde uvádíme jen jejich stručnou charakteristiku. Jsou to metody využívající reakci neutronů (neutron imaging), atomů vodíku (nukleární magnetická rezonance – NMR), gama záření (gamma ray densitometry) nebo rentgenové záření (X-ray tomography) s prostředím⁸. Metody neutron imaging a NMR měří reakci s atomy vodíku obsaženými v molekule vody. Zato metody gamma ray densitometry a X-ray tomography slouží k přesnému měření hustoty a výsledná vlhkost se vypočítá z hustoty vysušeného vzorku. Výše uvedené metody byly již úspěšně použity při studiu přítomnosti a pohybu vlhkosti v jiných studiích na jiných lokalitách, pro detailní studium těchto metod a jejich

využití doporučujeme články: TDR^{20,21}; ERT a infračervená tomografie²², infračervená tomografie^{16,23}, přehled⁹ a heat pulse²⁴.

III. nádvoří Pražského hradu

Archeologický areál pod III. nádvořím Pražského hradu vznikl ve 20. letech 20. století v návaznosti na rozsáhlý archeologický výzkum vedený zprvu Karlem Fialou a od roku 1925 Pražskou archeologickou komisí v čele s Karlem Guthem a Státním archeologickým ústavem, jehož hlavním terénním pracovníkem byl Ivan Borkovský.²⁵

V roce 1918, po založení Československa, se Pražský hrad stal sídlem prvního československého prezidenta. S přeměnou z částečně zanedbané a opuštěné habsburské rezidence na moderní, reprezentativní, ale s respektem k historii a symbolice místa, bylo započato hned v listopadu 1918. Stavební práce se prakticky okamžitě dotkly III. nádvoří a při prvních průkopech byly objeveny pozůstatky románské architektury – chodby a jednolodní kaple. Postupně pak, pod vedením stavitele Karla Fialy byly až do roku 1925 zkoumány další památky – románské a gotické kamenné domy, fragmenty raně středověké dřevěné zástavby, fragmenty raně středověkých valových opevnění. Rozsah výzkumu překračoval možnosti tehdejšího vedení Stavební správy, a tak v roce 1925 se úkolu zhostila Pražská archeologická komise a Státní archeologický ústav, v terénu se prací ujali zprvu Jaroslav Böhm, Jaroslav Pasternak a Jan Filip, posléze Ivan Borkovský, který výzkum dokončil. Ještě v polovině 20. let bylo rozhodnuto nalezené památky nezasypávat, ale zakrýt železobetonovou deskou nesenou železobetonovou konstrukcí. Za tímto projektem stál architekt Josip Plečnik, architekt a technik Bedřich Hacar a stavitel Karel Fiala spolu s Ivanem Borkovským. Nejprve vznikl cihlový pavilon pro románskou jednolodní kapli dnes známou jako kostel sv. Bartoloměje a románskou chodbu ve východní části nádvoří. Postupně pak byl areál rozšířen na západ tak, že dnes zabírá celou jižní přibližně třetinu III. nádvoří.

Areál vedle kamenných konstrukcí a archeologických terénů uchovává i dřevěné konstrukce. Již od 30. let 20. století byly pozorovány procesy degradace, různé aspekty problémů s výkyvy vlhkosti (včetně růstu hub). Od nástupu Pavla Janáka do pozice architekta Pražského hradu začala ve spolupráci s Ivanem Borkovským systematická péče o tento archeologický areál.

Měření pod III. nádvořím: popis

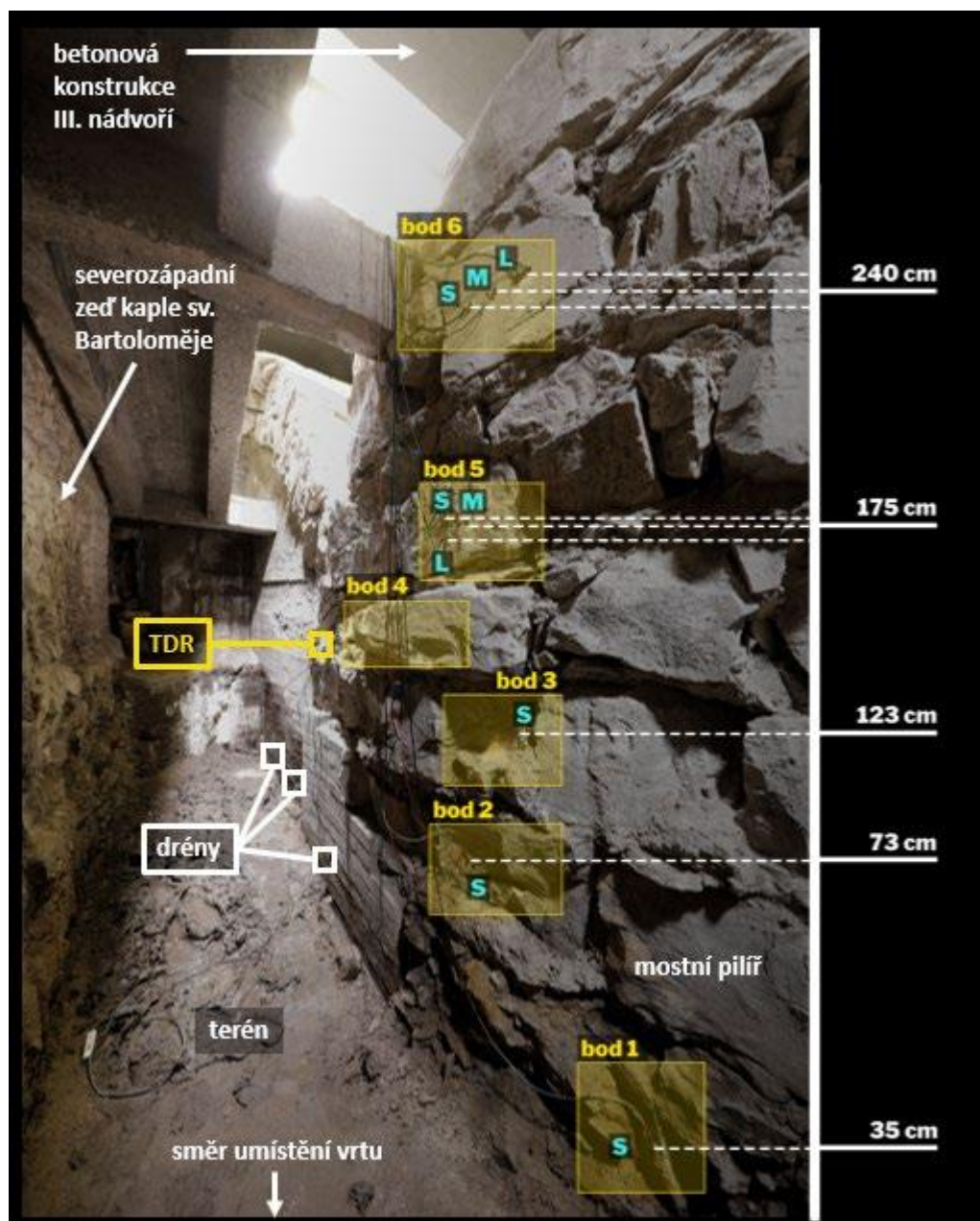
Pod třetím nádvořím se v centrální části nachází románská kaple sv. Bartoloměje. Severozápadně od ní leží zbytky pozdně středověké nebo raně novověké konstrukce tradičně označované jako most a jejíž základy sahají do historického terénu (dále terén, viz též obr. 2) a kterou tvoří kamenný oblouk a pilíř. Právě pilíř byl vybrán k detailnímu dlouhodobému monitoringu vlhkosti, a to kvůli specifickým vlhkostně-teplotním podmínkám lokality. Jedná se o nejvlhčí místo celého III. nádvoří, kdy je téměř celoročně přítomna podzemní voda v hloubce do 30 cm pod terénem a periodicky se vyskytuje i na úrovni terénu. Voda tak vzlíná po pilíři a zároveň udržuje u paty stěny vůči okolí relativně malé rozdíly teplot. Ve vrchní

části pilíře naopak dochází v rámci roku k významným teplotním extrémům, neboť na dlažbu nádvoří nad tímto místem v letních měsících dopadají sluneční paprsky. Pro orientaci v archeologických areálech pod III. nádvořím odkazujeme na specializovanou mapu Databáze stavebních prvků (www.calcarius.cz/gis-calcarius/mapa_stavebnich_prvku)²⁶, kde je mostní pilíř označen jako “opěrná zed’ – přemostění”.

Na pilíři byly od srpna 2020 do května 2021 měřeny vlhkostní charakteristiky řadou metod (viz tab. 1) v 6 výškových úrovních od současného terénu. Na každé výškové úrovni byla měřena hloubka kapilární vody pomocí sondy využívající reaktivní barvivo (metodika měření¹⁸) a vlhkost invazivními i nedestruktivními odporovými a elektromagnetickými metodami. Přístrojem *Material moisture gigamodule* se měřil odpor na některých výškových úrovních v několika hloubkách (viz obr. 2). U přístrojů, které umožňovaly automatický záznam, byla frekvence měření několikrát za den, manuální měření byla prováděna cca jednou za 21 dní (viz tab. 1). Kromě měření vlhkosti pilíře opukového mostu byla měřena také relativní vlhkost a teplota vzduchu a ve stejné výškové úrovni také teplota opuky mostního pilíře (obr. 2).

Tabulka 1: Použité metody a přístroje k měření vlhkosti a frekvence měření

Typ metody	Použitý přístroj	Charakteristika přístroje	Frekvence měření	Přesnost měření dle výrobce
Sonda využívající reaktivní barvivo	uranine-probe (metodika viz Weiss et al., 2020)	rozsah 1-120 mm	nepravidelně (cca 21 dní)	± 1 mm za ideálních podmínek
Odporová metoda	Material moisture gigamodule (Scanntronik)	rozsah 10 kOhm - 100 GOhm napětí 9 V	6 hod	-
Odporová metoda	Greisinger GMR 110	napětí 9 V proud 1,8 mA rozlišení 0,1 (při <19,9); 1 (při >20) rozpětí hrotů	nepravidelně (cca 21 dní)	0,2 %
Elektromagnetická metoda	METER TEROS12	rozsah 0 - 100 % frekvence 70 MHz dosah 1010 ml	1 hod	<1 %
Elektromagnetická metoda	MOIST 210B Sonda DM 0175 (0-11cm) Sonda PM 02181 (0-30cm)	Výkon MW 0,1 MW DM: hloubka penetrace 0-11 cm, objem měřeného materiálu - max. 2 l, rozsah 0-50 % (mokrý základ), 0-100 % (suchý základ) PM: hloubka penetrace 0-30 cm, objem měřeného materiálu - max. 15 l, rozsah 0-80 % (mokrý základ), 0-400 % (suchý základ)	nepravidelně (cca 21 dní)	0,2-0,5 % podle druhu materiálu
Elektromagnetická metoda	Vegetronix VG METER 200	rozsah 0-100 %	nepravidelně (cca 21 dní)	2 %



Obr. 2: Měřený profil na zájmovém mostním pilíři (vpravo) s vyznačenými místy měření - body 1 až 6 a umístění TDR. Vlevo nahoře je vidět betonový chodník původně plánovaný pro veřejnost, zcela nahoře pak vystupuje betonová konstrukce, na které je současné III. nádvoří Pražského hradu. Výška v cm vpravo je měřena od terénu. Fotografie Jan Gloc.

Před započítím vlastního měření jsme si stanovili následující hypotézu, kterou následně srovnáváme s výsledky měření. Vzhledem k přítomnosti podzemní vody u paty mostního pilíře, a dokonce občasnému zaplavování terénu skrze drény (obr. 2) se dá předpokládat, že vlhkost pilíře bude postupně klesat s výškou nad terénem. V měřicím bodě 1 (ca 35 cm nad terénem, viz obr. 2) předpokládáme téměř nasycený materiál, zatímco v bodech 5 a 6 (ca 175 a 240 cm od terénu) očekáváme alespoň v letních měsících výrazně nižší hodnoty vlhkosti.

Měření pod III. nádvořím: výsledky

V této kapitole prezentujeme dosavadní měření vlhkosti pilíře barokního mostu pod III. nádvořím. Měření však nadále pokračuje, prezentované výsledky ani jejich interpretace tak zatím nejsou dokončeny. K zodpovědné formulaci závěrů ohledně proudění vody a jejího vlivu na materiál bude zapotřebí delších časových řad a materiálových analýz, společně s dalším měřením jinými metodami nad rámec tohoto článku. Přesto již teď může měření posloužit jako ukázka využití metod měření přítomnosti a pohybu vody v památkové péči.

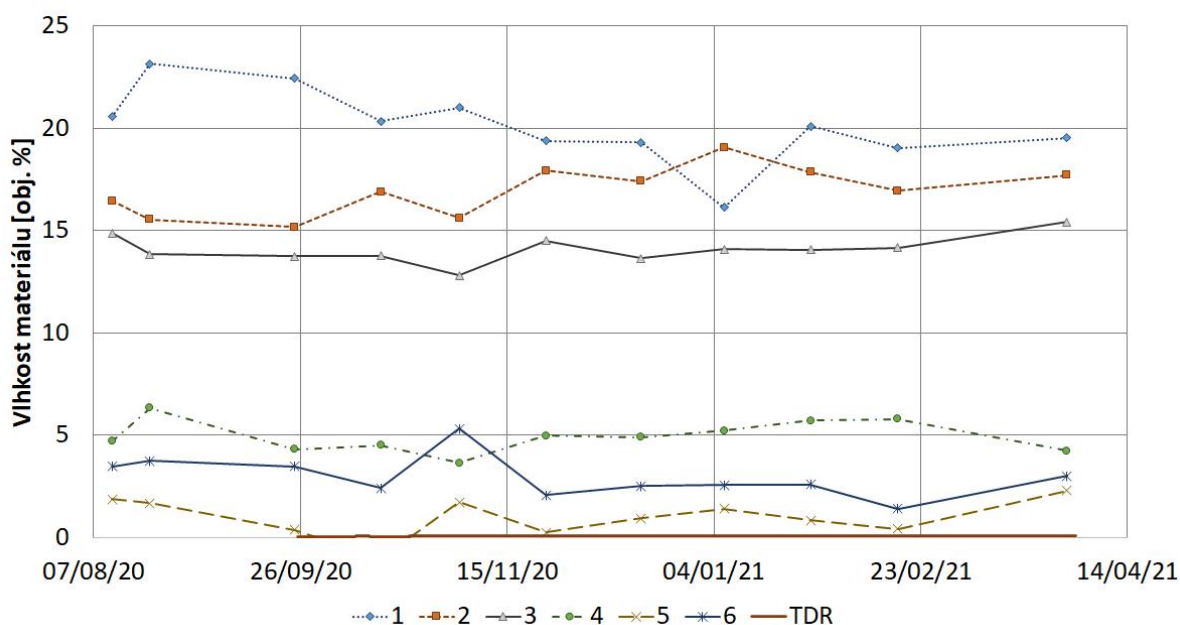
Většina využitých metod měření vlhkosti vyžaduje kalibraci, protože metody neměří přímo vlhkost, ale jinou fyzikální vlastnost materiálu, ze které na vlhkost materiálu usuzují. Elektromagnetickou (MOIST) a odporovou metodu (GMR 110) jsme tedy kalibrovali na opuku přítomnou pod III. nádvořím, a to 4 dvojicemi bodů pro každý přístroj. Objemová vlhkost o hodnotě 0 byla přiřazena nejnížší naměřené hodnotě přístrojem, saturovaná objemová vlhkost byla stanovena změřením pórovitosti materiálu ²⁷ a zbylé dvě hodnoty objemové vlhkosti (3.8 % a 10.6 %) byly změřeny gravimetricky v laboratoři na odebraném vzorku opuky přítomné pod III. nádvořím. Vzhledem k tomu, že velké množství naměřených hodnot objemové vlhkosti je nad 10 %, a dle ČSN 73 0610 tak spadá do kategorie “velmi vlhké”, hodnoty i jejich popis (vlhký/suchý) objemové vlhkosti prezentované v této kapitole hodnotíme pouze relativně vůči sobě.

Elektromagnetické metody

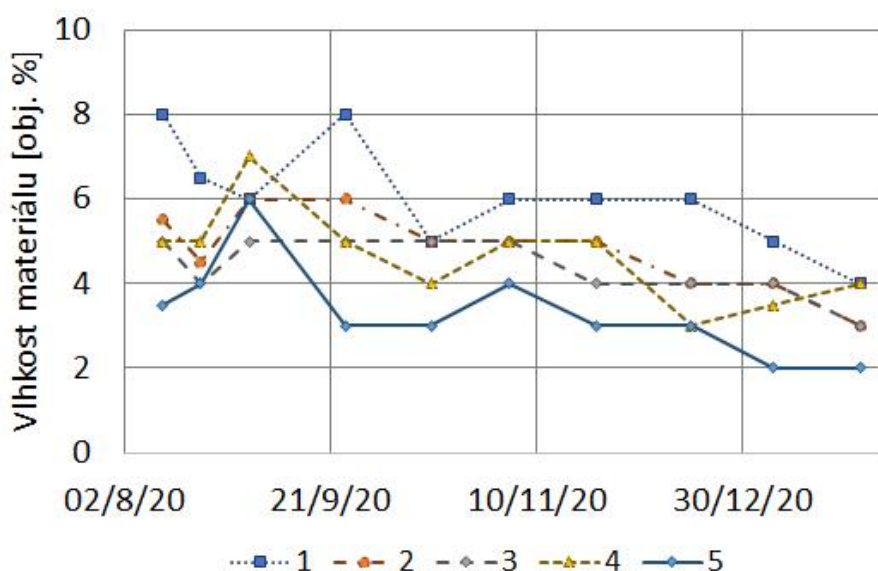
Všechny tři použité elektromagnetické metody (MOIST, VGmeter, TDR) ukazují, že vlhkost materiálu se v průběhu roku nijak významně nemění. Zejména měření přístrojem MOIST potvrzují předpoklad, že se vlhkost opuky obecně snižuje s výškou. Nejvlhčí je bod zcela dole (1) s 16-23 % objemové vlhkosti, a spolu s bodem 2 a 3 tvoří skupinu nejvlhčích bodů do výšky 120 cm nad povrchem, kam by dle velikosti pórů opuky měla voda vyvzlínat z vlhké zeminy u paty stěny. Body, které jsou nejvýše (4, 5, 6) jsou znatelně sušší s vlhkostí 0-6 %. Podobné závěry vyplývají i z výsledků přístroje VGmeter (obr. 4), kdy průměrné hodnoty naměřené vlhkosti obecně postupně klesají s výškou (od 6 % do 3 %), jen pro body 2-5 je změna zanedbatelná. Výsledky z měření TDR jsou pouze z jednoho bodu ve výškové úrovni bodu 4 až 5 (viz obr. 2) s více méně konstantní hodnotou vlhkosti 0,5 %.

Záznam vlhkosti na obr. 3 je vždy průměrem z měření dvou hlavic přístroje MOIST 210 B (viz tabulka 1), které dle výrobce měří vlhkost v hloubce 0-11 cm a 0-30 cm. Měřili jsme také za pomoci hlavice měřící přípovrchovou vlhkost v 0-3 cm, jejíž výsledky zde ale neuvádíme kvůli neúspěšné kalibraci. Přístroj VGmeter po několika měsících přestal fungovat, a tak zde dostupné výsledky prezentujeme v hodnotách kalibrace od výrobce (obr. 4), stejně tak jsme použili kalibraci od výrobce pro měření TDR.

Měření neinvazivními elektromagnetickými přístroji je značně ovlivněno přípovrchovou situací a umístěním na měřený materiál. Z toho důvodu je pro monitoring vlhkosti elektromagnetickými přístroji vhodné volit takový, který má vyšší hloubkový dosah – alespoň vyšší jednotky cm. Tyto metody mají značnou výhodu ve své nedestruktivnosti, ale přístroje s vyšším hloubkovým dosahem jsou dražší (viz tab. 2).



Obr. 3. Výsledky z měření elektromagnetických metod MOIST a TDR, číslice v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2).

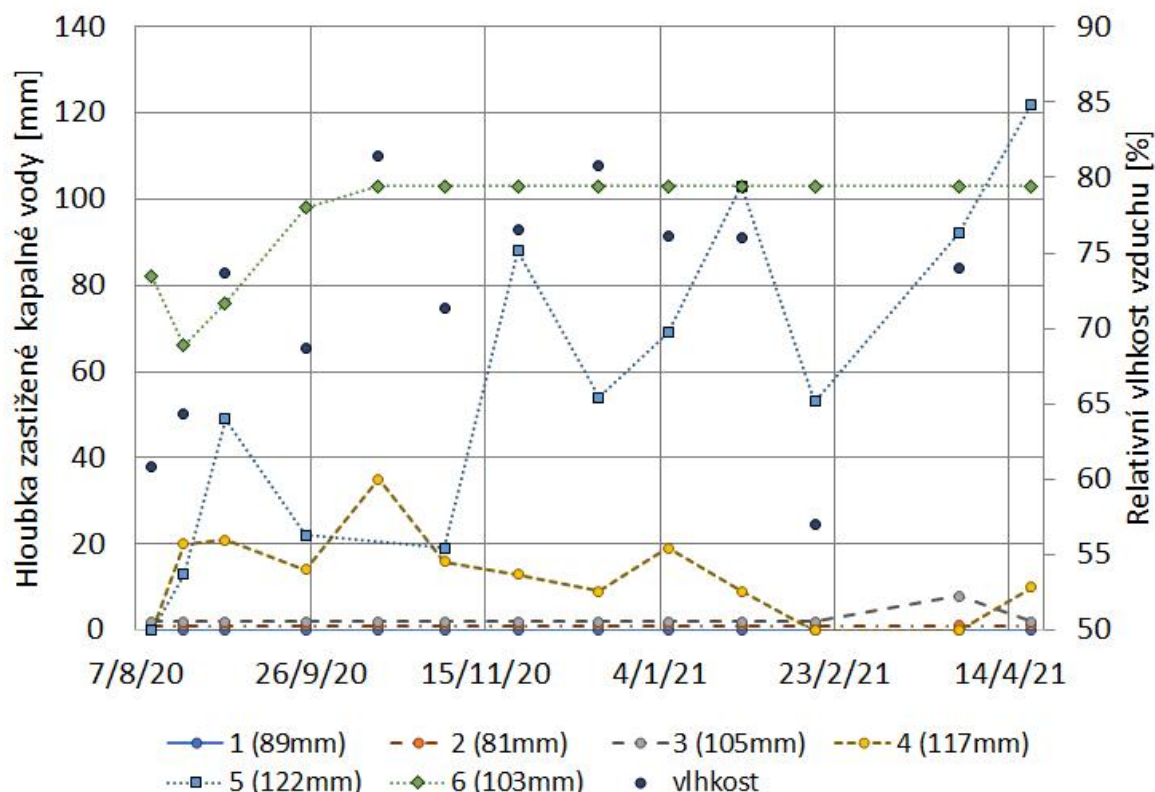


Obr. 4. Výsledky z měření přístrojem VGmeter, číslice v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2).

Uranine-probe

Při měření hloubky zastižené kapalné vody pomocí metody uranine-probe a podle výše zmíněné metodiky (Obr. 5) byla ve třech nejnižše položených bodech voda pozorována už na povrchu materiálu (body 1, 2 a 3). Nejvýše položený bod byl naopak při většině měření dle metody suchý, zatímco u druhého nejvyššího bodu (5) jsme zaznamenali kolísání od zcela

vlhkého materiálu, kdy byla kapalná voda zastižena až na povrchu, po suchý materiál, kdy se kapalná voda nevyskytovala ani v 10 cm pod povrchem. Některé z prezentovaných výsledků však mohou být ovlivněny vysokou vzdušnou vlhkostí, která se na místě pohybuje mezi 61-82 % a způsobuje snížení přesnosti metody, která se dle výsledků pohybuje v rozmezí ± 1 cm. Přesto tato metoda potvrzuje předpoklad, že měřicí body u paty mostního pilíře jsou vlhčí kvůli vztlínání, zatímco ty výše položené jsou ovlivněny vysoušením vlivem výparu, který je daný místními mikroklimatickými podmínkami.

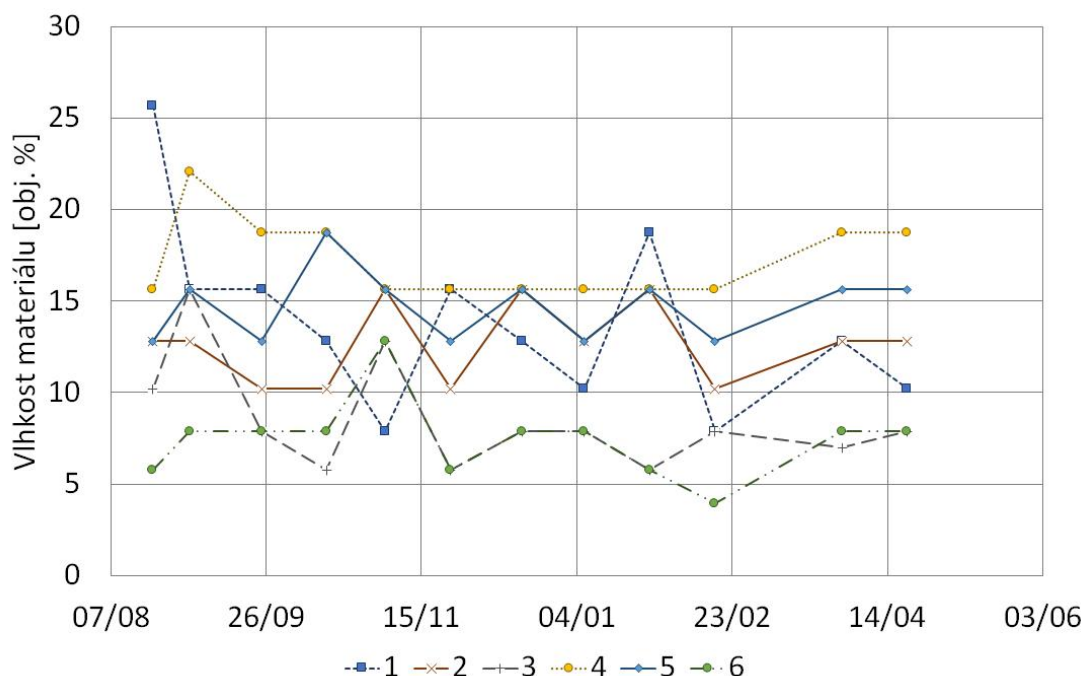


Obr. 5 Výsledky z měření metodou uranine-probe. Hodnoty z měrných bodů 2 a 3 jsou posunuty o 1, resp. 2, procentní body vlhkosti tak, aby byly všechny v grafu čitelné.

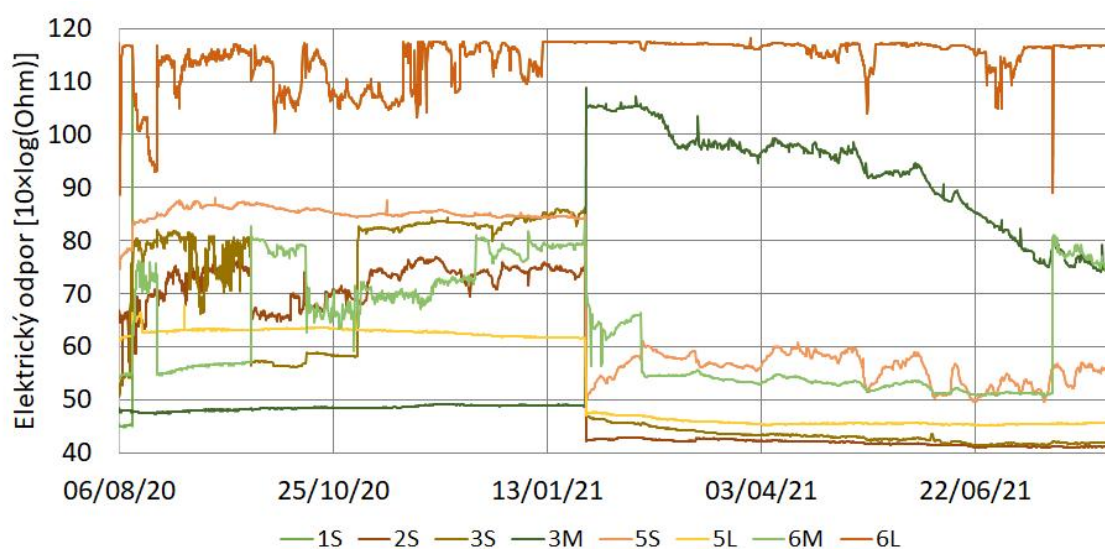
Odporové metody

Jak povrchové (obr. 6) tak podpovrchové (obr. 7) měření elektrického odporu materiálu vykazuje vysokou variabilitu ukazující na poměrně vysokou chybovost měření. U povrchového odporového měření nelze ukázat, že by se vlhkost materiálu snižovala s výškou nad terénem, kdy průměrně nejvlhčí (17 %) je měřicí bod 4, následovaný body 5, 1 a 2 (13-15 %) a zdánlivě nejsuššími jsou body 6 a 3 (7-9 %). Výsledky z podpovrchového měření jednoznačně ukazují význam kontaktu mezi elektrodou a zdivem, což je nejlépe vidět 28/1/2021 (zhruba uprostřed grafu), kdy byly elektrody doplněny elektricky vodivou grafitovou pastou, která u většiny elektrod významně zvýšila elektrický kontakt. Výsledky z tohoto měření však také průkazně neukazují na jasné rozdíly mezi výše a níže položenými měřicími body. Pokud vezmeme hodnoty z měření v červenci 2021 (na grafu zcela vpravo), tak se sice jako nejvlhčí jeví níže položené body 2 (1-2 cm) a 3 (1-2 cm) a zároveň nejvýše položený bod 6 vykazuje nejvyšší odpor (pro 15-19 cm i 4-5 cm). Zároveň ale hodnoty mezi těmito extrémy neodpovídají výšce měření – body 5 (15-19 cm a 1-2 cm), 1 (1-2 cm) a 3 (4-5 cm). Takto vysoká variabilita v měření je pravděpodobně daná nejen různou kvalitou

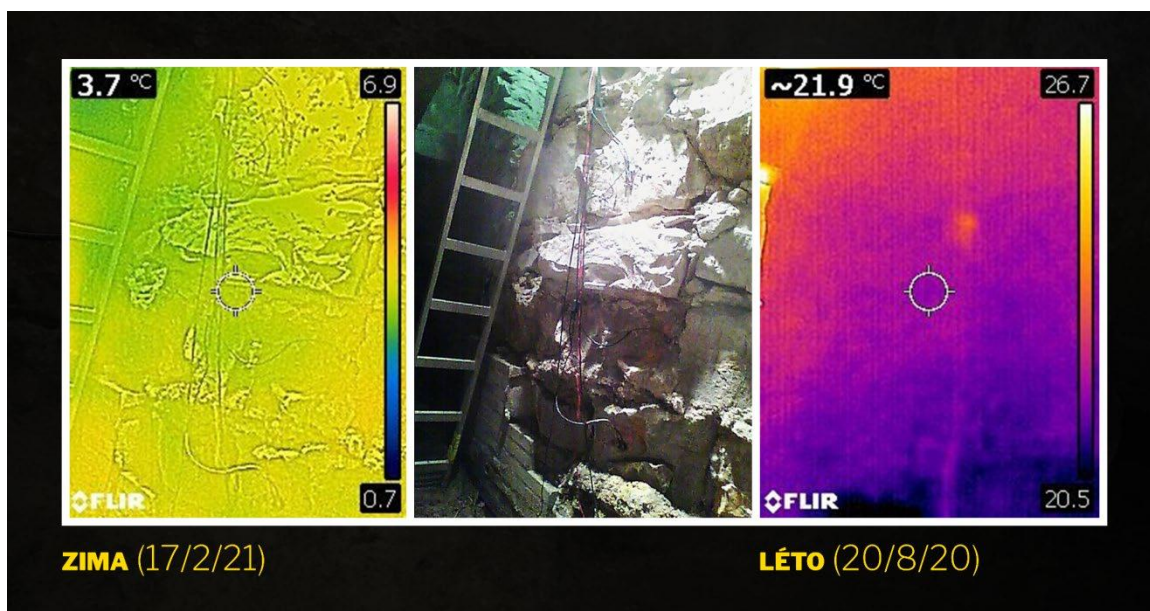
kontaktu elektrod s materiálem, ale i přítomnými solemi (jejichž výskyt není homogenní – zjištěno odebráním a analýzou vzorků prachu, details jsou však nad rámec této studie), různorodostí materiálu a rozdílnými vzdálenostmi mezi elektrodami (maximálně v řádu nižších jednotek mm). Odporové metody jsou tak vhodné pouze pro určení relativního vývoje vlhkosti v daném místě měření, ale pro srovnání absolutních čísel vlhkosti v různých místech historického zdiva se jeví jako nevhodné.



Obr. 6. Výsledky vlhkosti z povrchového měření odporu, číslice v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2).



Obr. 7. Výsledky podpovrchového měření odporu. Naměřené hodnoty jsou uvedeny formou $10 \times \log(\text{odpor} [\text{Ohm}])$, tj. např. hodnota “80” na obr. odpovídá 100 MOhm (10^8 Ohm). Číslice v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2).



Obr. 8. Vybrané termometrické snímky měřené lokality typické pro zimní a letní období.
Fotografie Tomáš Weiss.

Kromě vlastní vlhkosti materiálu jsme měřili i teplotu infračervenou tomografií (obr. 8), která je vhodná pro prvotní lokalizaci vlhkých míst. V rámci roku jsme pozorovali významné teplotní rozdíly, kdy v létě teplota klesá směrem k terénu a v zimě jsou rozdíly ve vertikálním směru zanedbatelné. V létě lze vidět vysoký gradient teploty způsobený jednak ohříváním desky III. nádvoří, ale poukazující i na přítomnost vody v nižších partiích, která díky relativně vysoké tepelné kapacitě snižuje tepelnou variabilitu v rámci roku.

Měření pod III. nádvořím: vlhkostní situace v mostním pilíři

Většina použitých metod potvrdila předpoklad, že vlhkost měřeného mostního pilíře postupně klesá s výškou. Zároveň však měření ukazují, že vlhkost materiálu se v průběhu roku příliš nemění. Vzhledem k pozorovaným vysráženým solím v nižších partiích pilíře je zjevné, že voda kapilárně stoupá z vlhkého a občasně zcela nasyceného terénu až do výšky cca 120 cm (4 bod), kde dochází k výparu na povrchu opuky. Voda s sebou v roztoku nese rozpuštěné ionty, které se ve výšce bodů 1-4 sráží na povrchu ve formě solí, které mohou způsobovat postupnou destrukci materiálu. Naměřená konstantní vlhkost v celém profilu pilíře znamená, že jde z hlediska proudění vody ve zdivu o relativně ustálený stav, kdy dochází ke kontinuálnímu kapilárnímu nasakování vody do mostního pilíře z okolního terénu. Aby se zabránilo krystalizaci solí, tak pravděpodobně nejvhodnějším dlouhodobě udržitelným zásahem je drenáž vody z terénu u paty pilíře.

Měření pod III. nádvořím: zhodnocení vhodnosti metod

Nejlépe předpokládanému vlhkostnímu gradientu se snižující se vlhkostí s výškou odpovídala měření přístrojem MOIST, konkrétně senzory s proklamovanou hloubkou měření 0-11 a 0-30 cm. Tato elektromagnetická metoda má nespornou výhodu v tom, že lze senzor přikládat na povrch bez nutnosti do materiálu zasahovat. Z použitých metod měření vlhkosti pod III. nádvořím tak můžeme doporučit metody elektromagnetické, které mají větší hloubkový dosah

(alespoň vyšší jednotky cm). Senzory s nižším dosahem jsou příliš ovlivněny tvarem povrchu zkoumaného materiálu, kdy nerovnosti způsobují měření nejen vlastního materiálu, ale i prostoru mezi senzorem a materiálem. To pak vede ke zcela nepřesnému měření.

V případě cenově dostupnějších nedestruktivních senzorů lze využít odporové přístroje, které využívají dvou elektrod. Odporové měření je ale velmi náchylné na přítomnost solí, a tak jejich použití můžeme doporučit jen v případě, že se dá předpokládat, že soli jsou na povrchu zastoupeny zanedbatelně. U odporových metod je podstatné zajistit co nejtěsnější kontakt mezi elektrodou a materiálem – například silným přitlačením elektrod na materiál a opakovaným měřením na jednom místě a zaznamenávat nejvyšší naměřenou hodnotu, jak udává výrobce.

Jako prvotní přiblížení přítomnosti vlhkých míst lze použít infračervenou tomografii (termokameru). Ta však nemůže zastoupit kontaktní měření vlhkosti, protože zmapováním teploty povrchu zjistíme pouze místa s relativně větším výparem. Infračervená tomografie je doporučeníhodná v interiérech. Její využití v exteriéru je velmi omezené kvůli významným změnám teplot v důsledku denního cyklu a oslunění. V případě měření v exteriéru doporučujeme měřit přes noc, kdy je teplota stabilnější než během dne.

Pokud potřebujeme zjistit hloubku výparové fronty, tj. kde dochází k případné krystalizaci solí, tak jediná metoda, která toto v současnosti dokáže, jsou sondy využívající reaktivní barvivo (uranine-probe). Využití těchto sond v památkové péči může být však problematické, neboť současná verze sond způsobuje obarvení studovaného materiálu. Tato nevýhoda by však měla být v dohledné době vyřešena (web.natur.cuni.cz/uhigug/moistureprobe).

Tabulka 2.

Název metody	Invazivnost (popis invazivnosti)	Měření	Výhody	Nevýhody	Běžná cena (Kč)
Mikrovlákná (elektromagnetická)	Ne (měření na povrchu)	Různé vlnové délky ovlivňující hloubkový dosah.	Neinvazivnost, vysoká přesnost v případě měření přístroji s větším hloubkovým dosahem	Velká citlivost na tvar povrchu a místo měření zejména u cenově dostupnějších přístrojů.	5 000-100 000
TDR (elektromagnetická)	Ano (zasunutí sondy do materiálu)	Měření lze provádět opakovaně i jednorázově	Možnost kontinuálního měření, metoda není omezena strukturou materiálu	Nepřesné měření při vysokém zasolení	10 000-20 000

Infračervená tomografie	Ne (měření teploty povrchu)	Lze provádět bez dodání tepla, nebo s cílenou změnou teploty	Neinvazivnost, dobrá mobilita	Nevhodná pro kvantitativní stanovení vlhkosti	20 000-200 000
Metoda tepelných pulsů	Ano (zasunutí sondy do materiálu)	Lze provádět jednorázově, případně periodicky	Kvalita měření není ovlivněna přítomností solí	Možné ovlivnění okolním mikroklimatem	5 000-20 000
ERT (odporová)	Ano (zasunutí sondy do materiálu)	Možnost dlouhodobého (kontinuálního) měření	Hloubkový dosah kontrolovaný vzdáleností elektrod	Nepřesnost v zasolených materiálech	100 000-200 000
Tenzometrie	Ano (vyvrtaný otvor, nebo jiný existující otvor)	Spíše jednorázová měření	Získáme představu o pohybu kapilární vody v materiálu	Při nízkém tlakovém rozpětí přístroj nepostihuje všechnu vlhkost v materiálu, nevhodné pro sušší materiál	2 000-20 000
Sonda využívající reaktivní barvivo	Ano (je nutné vyvrtat do materiálu otvory), možné obarvení okolí bodu měření	Opakovaná jednorázová měření, spíše jako doplňkové měření	Možnost opakovaných měření (určení výparové fronty)	Možné ovlivnění okolním mikroklimatem (vysoká vlhkost vzduchu)	50 (za sondu)

Závěr

Voda ve stavebních materiálech má zásadní vliv na jeho zvětrávání, ať už solné, mrazové nebo vlivem bobtnání jílových minerálů. Znalost přítomnosti vody tak může být potřebná pro tvorbu doporučení péče o památkově chráněné objekty.

Možných metod měření vlhkosti je několik. Naše doporučení by se dalo shrnout takto: Jako nejvhodnější nedestruktivní metoda se jeví metoda označovaná jako mikrovlnná (zde MOIST, EM na obr. 1). Senzory s větším hloubkovým dosahem (alespoň 10 cm) mají výhodu v interakci vysílaného signálu s větším objemem materiálu. Výsledky povrchově měřící sondy jsou více zatíženy chybou z nedokonalého kontaktu mezi sondou a materiálem (elektromagnetický signál se vzduchem šíří výrazně rychleji než v měřeném materiálu, vlhkost naopak šíření signálu v materiálu zpomaluje). Pro hrubé povrchy tak nedoporučujeme elektromagnetické sondy s nižší hloubkou penetrace (0-3 cm). Výsledky se ukazují jako silně zkreslené vlivem nerovnoměrnosti povrchu, jež způsobuje příliš velkou chybu měření. V případech omezených finančních zdrojů doporučujeme použít odporovou metodu s dvěma

elektrodami (E na obr. 1), která je však náchylná k chybnému měření v přítomnosti solí, takže je vhodnější pro exteriéry nebo v kombinaci s dalšími metodami. Pro zjištění místa podpovrchového výparu, kde dochází ke krystalizaci solí, je možné použít sondy využívající reaktivní barvivo, které však způsobují zabarvení materiálu, a tak je třeba počkat na v současnosti vyvíjenou verzi, která tento problém bude eliminovat (web.natur.cuni.cz/uhigug/moistureprobe).

Tento článek se zabývá pouze měřením vlhkosti vlastního stavebního materiálu, ale z pohledu studia vlhkosti v interiérech staveb je kritická vlhkost vzduchu. Voda v plynné fázi může na stavebním materiálu kondenzovat, což se děje v případě, že teplota materiálu je nižší než teplota rosného bodu, při které je vzduch maximálně nasycen. Z tohoto důvodu doporučujeme v interiérech vždy měřit teplotu a vlhkost okolního vzduchu a teplotu stavebního materiálu.

Poděkování

Článek vznikl za podpory Technologické agentury ČR v rámci projektu číslo TL03000603 “Skryto pod povrchem. Archeologické terény Pražského hradu, jejich ochrana a prezentace v moderním světě”. Děkujeme Zuzaně Slížkové za analýzu solí, Kristýně Kotkové a Petru Kozlovcevi za poskytnutí naměřených dat přístrojem MOIST a Blance Adlerové za grafické výstupy. Také jsme vděční Dr. Kostecké a dvou anonymním recenzentům za zpětnou vazbu, díky níž publikace dosáhla vhodných změn.

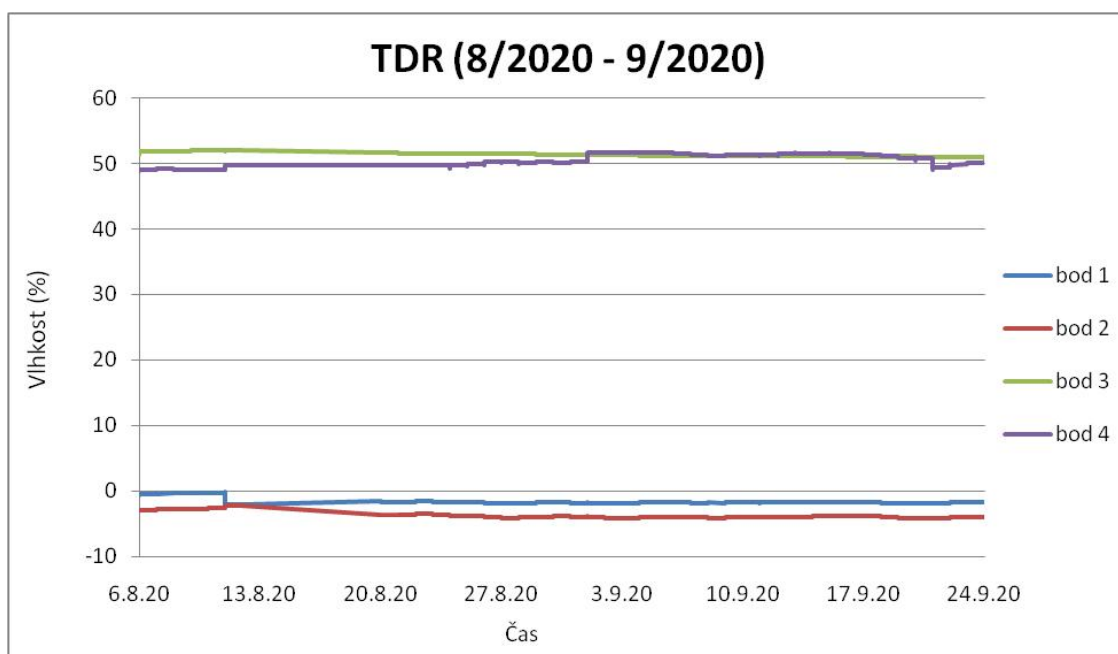
Literatura

1. Robert J. Flatt, Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth*, 2002, č. 242, s. 435–454.
2. Joseph S. Walder - Bernard Hallet, The physical basis of frost weathering: toward a more fundamental and unified perspective. *Arctic and Alpine Research* XVIII, 1986, č. 1, s. 27–32.
3. Thomas Warscheid - J. Braams, Biodeterioration of stone: A review. *International Biodeterioration and Biodegradation* XLVI, 2000, č. 4, s. 343–368. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00109-8](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00109-8)
4. Joerg Ruedrich - Tobias Bartelsen - Reiner Dohrmann - Siegfried Siegesmund, Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environmental Earth Sciences* LXIII, 2011, č. 7, s. 1545–1564. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0767-0>
5. Richard Přikryl - Jiřina Přikrylová - Martin Racek - Zuzana Weishauptová - Kateřina Kreislová, Decay mechanism of indoor porous opuka stone: a case study from the main altar located in the St. Vitus Cathedral, Prague (Czech Republic). *Environmental Earth Sciences* LXXVI, 2017, č. 7, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6596-7>
6. Asuncion Elena Charola, Salts in the deterioration of porous materials: An overview. *Journal of the American Institute for Conservation* XXXIX, 2000, č. 3, s. 327–343. <https://doi.org/10.1179/019713600806113176>
7. Tomas J. Smugge - Tomas J. Jackson - Harlan L. McKim, Survey of Methods for Soil Moisture Determination. *Water Resources Research* XVI, 1980, č. 6, s. 961–979.
8. Lisa Mol - Heather A. Viles, Exposing drying patterns: using electrical resistivity tomography to monitor capillary rise in sandstone under varying drying conditions. *Environmental Earth Sciences*. LXVIII, 2014, s. 1647–1659.
9. M. C. Phillipson - Paul H. Baker - Michael Davies M - Zechen Ye - A. McNaughtan - G. H. Galbraith - R. C. McLean, Moisture measurement in building materials: an overview of current methods and new approaches. *Building Services Engineering Research and Technology* XXVIII, 2007, č. 4, s. 303–316. <https://doi.org/10.1177/0143624407084184>
10. Lisa Mol - Heather A. Viles, Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa. *Geomorphology* CXVIII, 2010, s. 280–287
11. Susha Lekshmi S. U. - Devendra Narain Singh - Maryam Shojaei Baghini, A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* LIV, 2014, s. 92–105
12. Giuseppe Calamita - Luca Brocca - Angela Perrone - Sarah Piscitelli - Vincenzo Lapenna - Florisa Melone - Tomasso Moramarco, Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test sites. *Journal of Hydrology*, č. 454 - 455, 2012, s. 101–112, ISSN 0022-1694.
13. Zbigniew Suchorab - Dariusz Majerek - Przemysław Brzyski - Henryk Sobczuk - Andrzej Raczkowski, Estimation of water absorption coefficient using the TDR method. *AIP Conference Proceedings* MDCCCLXVI, 2017, č. 1, 040038. <https://doi.org/10.1063/1.4994518>
14. David A. Robinson - Colin S. Campbell - Jan W. Hopmans - Brian K. Hornbuckle - Scott B. Jones - R. Knight - Fred L. Ogden - John S. Selker - Ole Wendroth, Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale

- Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal* VII, 2008, č. 1, s. 358–389.
<https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>
15. Jan Válek - Sabine Kruschwitz - Jens Wöstmann - Thomas Kind - Jaroslav Valach - Christian Köpp - Jaroslav Lesák, Non-destructive Investigation of Wet Building Material: Multimethodical Approach. *Journal of Performance of Constructed Facilities* XXIV, 2010 č. 5, s. 462-472.
 16. Nicolas Peter Avdelidis - Antonia Moropoulou, Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, č. 5, 2003, s. 119-127.
 17. James A. Tindall - James R. Kunkel - Dean E. Anderson, Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers, *Prentice Hall*, 1998, s. 187.
 18. Tomáš Weiss - Jakub Mareš - Martin Slavík - Jiří Bruthans, A microdestructive method using dye-coated-probe to visualize capillary, diffusion and evaporation zones in porous materials. *Science of The Total Environment* DCCIV, 2020. 135339, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135339>.
 19. Henk Huinink - Leo Pel - Klaas Kopinga, Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms* XXIX, 2004, č. 10, s. 1225–1233.
<https://doi.org/10.1002/esp.1087>
 20. Samuel L. Hokett - Jenny B. Chapman - Charles E. Russell, Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock. *Journal of Hydrology* CXXXVIII, September 1992, s. 89-96, ISSN 0022-1694.
 21. Tomáš Vogel - Jaromír Dušek - Michal Dohnal - Michal Sněhota, Moisture regime of historical sandstone masonry. *Journal of Cultural Heritage* XLIV, 2020, č. 5, s. 99-107. ISSN 1296-2074. DOI:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000056
 22. Scott Allan Orr - Lucie Fusade - Maureen Young - Dawson Stelfox - Alick Leslie, - Joanne Curran - Heather A. Viles, Moisture monitoring of stone masonry: A comparison of microwave and radar on a granite wall and a sandstone tower. *Journal of Cultural Heritage* XLI, 2019, s. 61-73.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.07.011>.
 23. Ermano Grinzato - Nicola Ludwig - Gianluca Cadelano - Michele Bertucci - Marco Gargano - Paolo Bison, Infrared Thermography for Moisture Detection: A Laboratory Study and In-situ Test. *Materials Evaluation* LXIX, 2011, č. 1
 24. Hailong He - Miles F. Dyck - Robert Horton - Tusheng Ren - Keith L. Bristow - Jialong Lv - Bingcheng Si, Development and Application of the Heat Pulse Method for Soil Physical Measurements. *Reviews of Geophysics* LVI, 2018, č. 4, s. 567 - 620.
<https://doi.org/10.1029/2017RG000584>
 25. Jana Maříková-Kubková - Iva Herichová, Svědkové 20. století, výzva pro 21. století. Význam a trvalá udržitelnost archeologických areálů Pražského hradu. S licenciou 007, *Zborník príspevkov k 70. narodeninám Petra Baxu*, 2020, Bratislava.
 26. Geografický informační systém. Databáze stavebních prvků [databáze online]. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v. v. i., Archeologický ústav AV ČR, Praha, v. v. i., 2020, dostupné z: <http://www.calcarius.cz/gis-calcarius>
 27. Zuzana Slížková - Radek Ševčík - Jan Válek, Výzkumná zpráva č. 2021/107 Rozbor materiálů z architektonického fragmentu pod 3. nádvořím Pražského hradu. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Praha, 2021.

Příloha 10 - TDR

Měření pomocí metody TDR probíhalo od 7/2020 do 9/2020 a to automaticky s časovým krokem 1 hodina. Měření byla ukončena z důvodů stálosti vlhkosti v měřených bodech a také z důvodu potřeby měřicí aparatury na jiné lokalitě. Výsledky měření jsou znázorněny v grafu níže (Obr. 74). Ačkoli měření probíhala poměrně krátce z výsledků je patrné, že hodnoty vlhkosti jsou v měřených bodech ustálené a mění se v řádu desetin procent vlhkosti. Čidla 1 a 2 (Obr. 6, 74) byla umístěna na zdi, naměřené hodnoty přístrojové měření vykazalo jako záporné, pravděpodobně z důvodu velmi nízké vlhkosti v místě měření, čidla 3 a 4 zaznamenávala vlhkost v půdě (Obr. 6), která se pohybovala okolo 50 %. Měření byla ukončena z důvodů stálosti vlhkosti v měřených bodech a také z důvodu potřeby měřicí aparatury na jiné lokalitě.



Obr. 72 - Vývoj obsahu vody v měřených bodech 1, 2, 3 a 4 (2020), umístění bodů viz Obr. 6.