

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

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; shrnuje 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 současnosti 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

Methods of moisture measurement in historical masonry with examples of use on archaeological sites under the 3rd courtyard of Prague Castle

ABSTRACT: The degradation of masonry of historically valuable structures is often linked to the presence of moisture which then affects saline, frost, and biogenic weathering or swelling of clay minerals. The article presents the use of selected methods for monitoring the presence of water in heritage properties, with emphasis on the use of these methods in conservation, summarizing their principles, advantages, disadvantages, and the possibilities of combining them. The selected methods (resistive, electromagnetic, infrared, probe using reactive dye) are presented and critically evaluated using a case study of moisture monitoring in the archaeological area under the third courtyard of Prague Castle. The microwave method with a greater depth range is recommended as the most suitable non-destructive method – on the contrary, electromagnetic probes with a lower depth of measurement are significantly distorted by the shape of the surface of the measured material and cannot be recommended. Resistivity methods are prone to error in saline materials, but are an adequate choice when funds are limited. Moisture content in the surveyed gaize (opuka) pillar of the early modern bridge below the Third Courtyard appears to be stagnant at present, but the measured time series are too short to draw responsible conclusions, and measurements are continuing.

KEYWORDS: masonry moisture; Prague Castle; resistivity method; capacitance method; microwave method; uranine probe method

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.

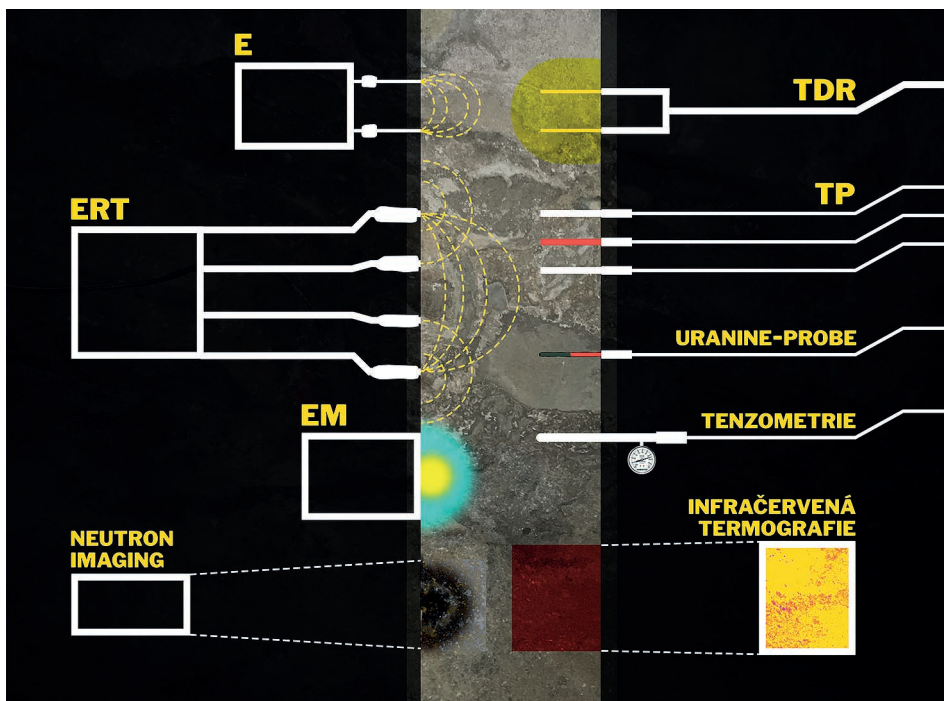
Voda vstupuje do materiálů buď ve fázi kapalné, a to z atmosférických srážek, kapilárním vztlínáním půdní či podzemní vody, případně různými průsaky z antropogenních úprav (trubky, stoky aj.), nebo ve fázi plynné ze vzdušné vlhkosti, a to buď vlivem kondenzace, nebo hygroskopicity materiálu dané přítomnými 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 2021.⁷

Pod III. nádvořím Pražského hradu je v současnosti přetrvávajícím problémem degradace opuk, která může být způsobena sedáním desky nádvoří, krystalizací rozpuštěných solí či dilatací materiálů v důsledku kondenzace vlhkosti.⁸ 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 nej přesnější metodou pro určování vlhkosti ve stavebním materiálu je gravimetrické měření, které spočívá ve stanovení vlhkosti z rozdílu hmotnosti odebraného a vysušeného vzorku.⁹ 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



1

získaných dat je proto 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.

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.¹⁰ Zásadním předpokladem úspěšného měření je zajistit dobrý kontakt mezi materiálem a elektrodou, která by měla na materiál těsně přiléhat.¹¹ Elektrický kontakt je možné podpořit nejen me-

Obr. 1. Schematické znázornění metod k měření vlhkosti v historických stavebních materiálech: odporové metody (E – dvouelektrové, 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.

5 Richard Příkryl – Jiřina Příkrylová – 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.

7 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.

8 Příkryl – Příkrylová – Racek – Weishauptová – Kreislová (pozn. 5).

9 Thomas J. Smugge – Thomas J. Jackson – Harlan L. McKim, Survey of Methods for Soil Moisture Determination, *Water Resources Research* XVI, 1980, č. 6, s. 961–979.

10 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.

11 M. C. Phillipson – Paul H. Baker – Michael Davies – Zechen Ye – A. McNaughtan – G. H. Galbraith – R. C. McLean, Moisture measurement in building materials: an

■ Poznámky

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.

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.

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 (Scantronik)	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 (0–11 cm) Sonda PM 02181 (0–30 cm)	výkon MW 0,1 MW DM: hloubka penetrace 0–11 cm, objem měřeného materiálu – max. 2 l, rozsah 0–50 % (mokřý základ), 0–400 % (suchý základ) PM: hloubka penetrace 0–30 cm, objem měřeného materiálu – max. 15 l, rozsah 0–80 % (mokřý 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 %

Tab. 1. Použité metody a přístroje k měření vlhkosti a frekvence měření. Zpracovali: autoři článku, 2022.

chanickým 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 rozestupem mezi elektrodami proudí totiž elektrina 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 vlhkost, jako jsou rozpuštěné soli, které výrazně snižují odpor oproti roztokům o nízké mineralizaci,¹² případně přítomnost dalších vodivých materiálů, například hřebíků a dalších kovových komponent.¹³ Zároveň je vhodné měření kalibrovat pro každý materiál dle jeho vlastností.¹⁴ Calamita et al. (2012)¹⁵ 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), relativní permitivita vody je okolo 80.¹⁶ Tudíž i malé množství vody dokáže ovlivnit relativní permitivitu celého prostředí a na základě její hodnoty lze pak odvodit vlhkost materiálu.¹⁷

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 (angl. 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 má-

lo citlivé na vliv solí při využití vyšších frekvencí (nad 50 MHz).¹⁸

■ Poznámky

overview of current methods and new approaches, *Building Services Engineering Research and Technology* XXVIII, 2007, č. 4, s. 303–316.

¹² 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, *Geomorphology* CXVIII, 2010, s. 280–287.

¹³ Phillipson – Baker – Davies – Zechen Ye – McNaughtan – Galbraith – McLean (pozn. 11).

¹⁴ Lekshmi S. U. – Devendra Narain Singh – Maryam Shojaei Baghini, A critical review of soil moisture measurement, *Measurement* LIV, 2014, s. 92–105.

¹⁵ Giuseppe Calamita – Luca Brocca – Angela Perrone – Sarah Piscitelli – Vincenzo Lapenna – Florisa Melone – Tommaso 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.

¹⁶ Tomas J. Smugge – Tomas J. Jackson – Harlan L. McKim (pozn. 9).

¹⁷ Lekshmi S. U. – Devendra Narain Singh – Maryam Shojaei Baghini (pozn. 14). – 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>.

¹⁸ Lekshmi S. U. – Devendra Narain Singh – Maryam Shojaei Baghini (pozn. 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,

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 současně III. nádvoří Pražského hradu. Výška v cm vpravo je měřena od terénu. Foto: Jan Gloc, 2021.

Infračervená termografie (termometrie)

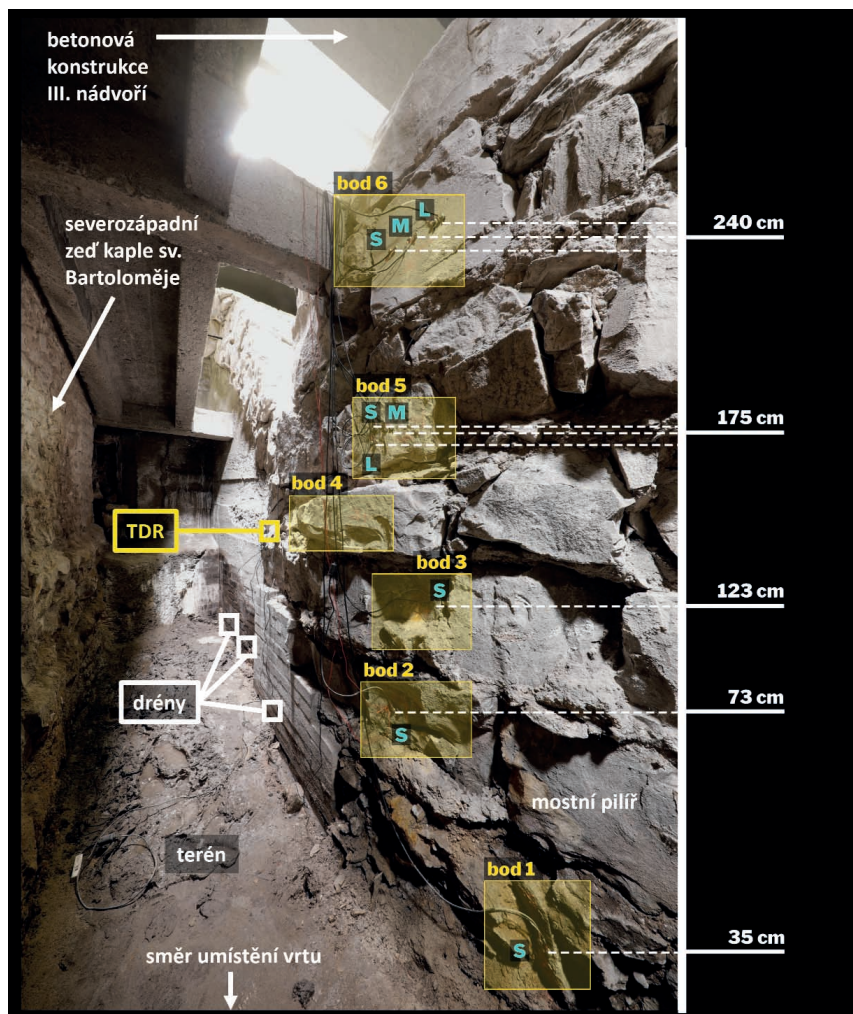
Změna skupenství vody z kapalného na plynné vyžaduje dodání energie, která se projevuje snížením teploty. Tu lze pozorovat nedestruktivní infračervenou tomografií, která měří tepelné vyzařování materiálu.¹⁹ Metoda tedy neměří přímo vlhkost materiálu, ale lze díky ní rychle zjistit, v jakých místech dochází k relativně vyššímu výparu, který je na přítomnost vody vázaný. Tato metoda je tak vhodná spíše pro samotné odhalení přítomnosti vlhkosti bez jejího bližšího stanovení.²⁰ 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 vody.²¹

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 obvykle sestává ze sondy vysílající tepelný puls a sondy měřící teplotu.²² Výhodou této metody je, že není příliš ovlivněna přítomností solí v materiálu a je aplikovatelná in situ i laboratorně, nicméně částečně může být ovlivněna mikroklimatem.²³ Kvůli nutnosti zavést sondy do materiálu je i tato metoda destruktivní a potenciálním zdrojem chyb či nejistot měření mohou být nehomogeneity v materiálu mezi oběma sondami.²⁴

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 vlhkost.²⁵ Tenzometr se skládá z porézní keramické čepičky a trubičky, která je naplněna kapalinou a tlakovým čidlem. Čepička se vsune do libovolné hloubky studovaného materiálu,²⁶ a protože kapalina ve vzduchotěsné trubici má tendenci skrze porézní čepičku vyrovnat rozdíl s vlhkostí měřeného



2

okolního materiálu, díky ztrátě vody z trubice skrze keramickou čepičku tak 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 (angl. uranine-probe)

Tato relativně nová metoda měření vlhkosti ve zdivu byla vyvinuta některými autory článku²⁷ 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 které-

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.

¹⁹ Nicolas Peter Avdelidis – Antonia Moropoulou, Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *Journal of Cultural Heritage* 2003, č. 5, s. 119–127.

²⁰ Phillipson – Baker – Davies – Zechen Ye – McNaughtan – Galbraith – McLean (pozn. 11).

²¹ Avdelidis – Moropoulou (pozn. 19).

²² Lekshmi S. U. – Devendra Narain Singh – Maryam Shojaei Baghini (pozn. 14).

²³ Ibidem.

²⁴ Phillipson – Baker – Davies – Zechen Ye – McNaughtan – Galbraith – McLean (pozn. 11).

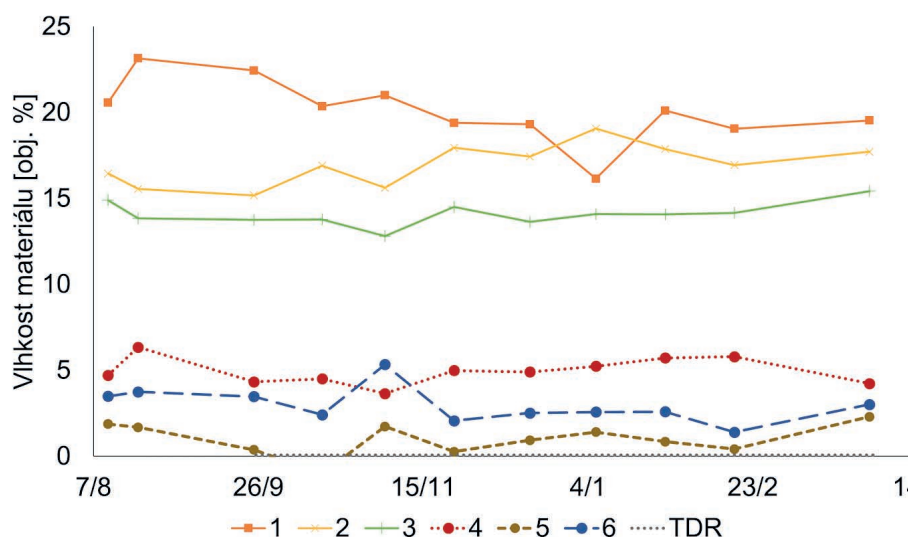
²⁵ James A. Tindall – James R. Kunkel – Dean E. Anderson, *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*, Prentice Hall, 1998, s. 187.

²⁶ Lekshmi S. U. – Devendra Narain Singh – Maryam Shojaei Baghini (pozn. 14).

²⁷ 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, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135339>.

■ Poznámky

Vadose Zone Journal VII, 2008, č. 1, s. 358–389. – Jan Válek – Sabine Kruschwitz – Jens Wöstmann – Thomas



Obr. 3. Výsledky z měření elektromagnetických metod MOIST a TDR, číslce v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2). Zdroj: autoři, 2022.

Obr. 4. Výsledky z měření přístrojem VGmeter, číslce v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2). Zdroj: autoři, 2022.

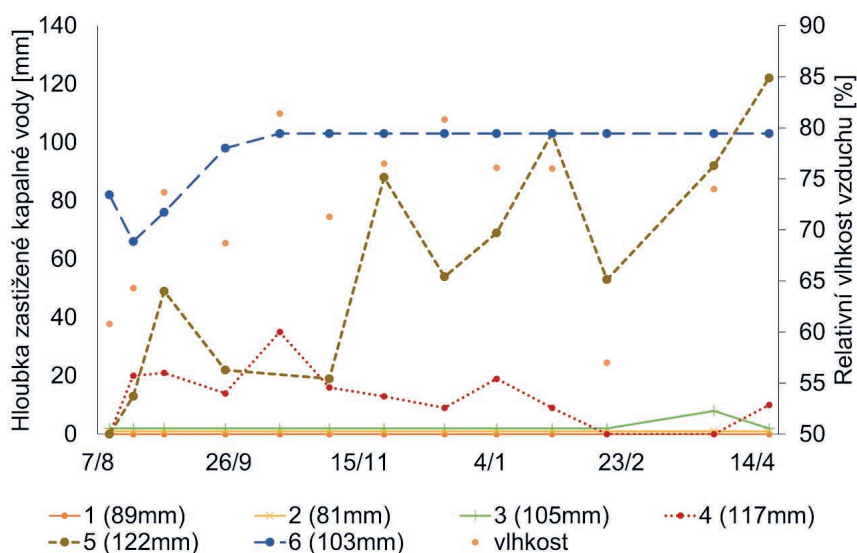
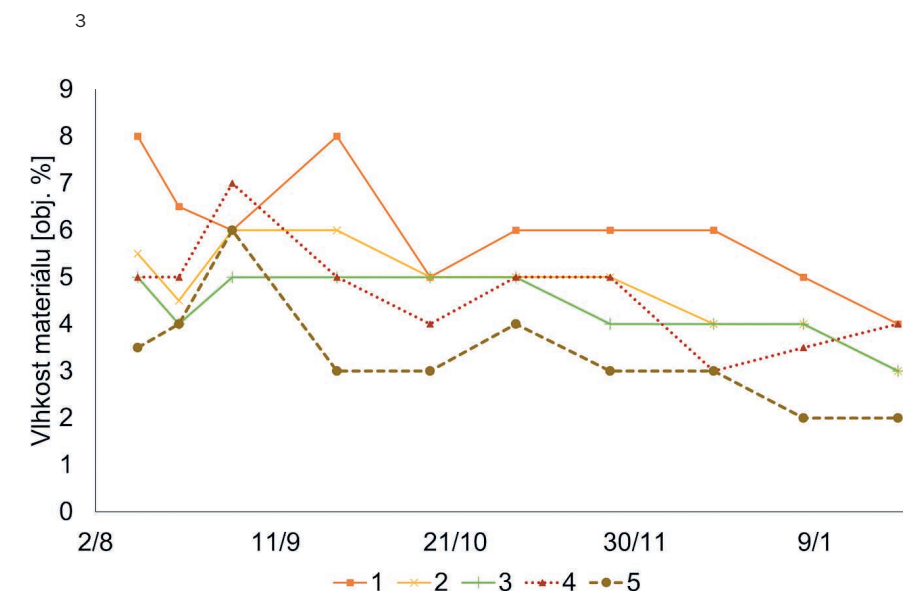
Obr. 5. Výsledky z měření metodou uranine-probe. Hodnoty z měrných bodů 2 a 3 jsou posunuty o 1, resp. 2 procentní body vlhkosti tak, aby byly všechny v grafu čitelné. Zdroj: autoři, 2022.

ho 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 solí.²⁸ Metoda sondy obalené do barviva jako jediná z uvedených dokáže poměrně přesně (s rozlišením ~2 mm za nižší vlhkosti vzduchu) identifikovat hloubku výparové fronty.²⁹

Jistou míru 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 hygroskopických 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 prostředím.³⁰ Metody neutron



Poznámky

²⁸ Henk Huinink – Leo Pel – Klaas Kopinga, Simulating the growth of tafoni, *Earth Surface Processes and Landforms* XXIX, 2004, č. 10, s. 1225–1233.

²⁹ Weiss – Mareš – Slavík – Bruthans (pozn. 27).

³⁰ 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.

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 studích na jiných lokalitách, pro detailní studium těchto metod a jejich využití doporučujeme články: TDR,³¹ ERT a infračervená tomografie,³² přehled³³ a heat pulse.³⁴

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.³⁵

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 sídlo prezidenta, 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 jednodolní 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 nezasylovat, ale zakrýt železobetonovou deskou nesenou železobetonovou konstrukcí. Za tímto projektem stáli architekt Josip Plečnik, architekt a technik Bedřich Hacar a stavitel Karel Fiala spolu s Ivanem Borkovským. Nejprve vznikl cihlový pavilon pro románskou jednodolní 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 funkce architekta Pražského hradu

začala ve spolupráci s Ivanem Borkovským systematická péče o tento archeologický areál.

Měření pod III. nádvořím: popis

Pod III. 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, 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 vlhkosně-teplotním podmínkám lokality. Jedná se o nejvlhčí místo celého III. nádvoří, kde 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),³⁶ kde je mostní pilíř označen jako „opěrná zeď – přemostění“.

Na pilíři byly od srpna 2020 do května 2021 měřeny vlhkosní 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 měření)³⁷ a vlhkost invazivními i nedestruktivními odporovými a elektromagnetickými metodami. Přístrojem *Material moisture gigamodule* se měřil odpor na některých výškových úrovních v několika hloubkách (obr. 2). U přístrojů, které umožňovaly automatický záznam, byla frekvence měření několikrát za den, manuální měření byla prováděna cca jednou za 21 dní (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).

Před započítáním 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 zaplávání terénu skrze drény (obr. 2) se dá předpokládat, že vlhkost pilíře bude postupně klesat s výškou nad terénem. V měřicím bodě 1 (cca 35 cm nad terénem, viz obr. 2) předpokládáme téměř nasycený materiál, zatímco v bodech 5 a 6 (cca 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 přístomnou pod III. nádvořím, a to 4 dvojicemi bodů pro každý přístroj. Objemová vlhkost o hodnotě 0 byla přiřazena nejnižší hodnotě naměřené přístrojem, saturovaná objemová vlhkost byla stanovena změřením pórovitosti materiálu³⁸

■ Poznámky

31 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. – 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.

32 Avdelidis – Moropoulou (pozn. 19). – 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, s. 97–104.

33 Phillipson – Baker – Davies – Zechen Ye – McNaughtan – Galbraith – McLean (pozn. 11).

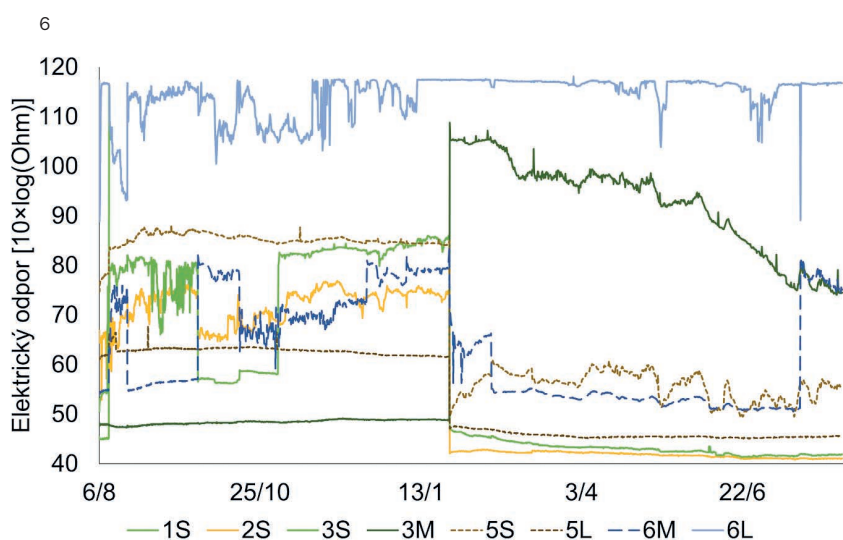
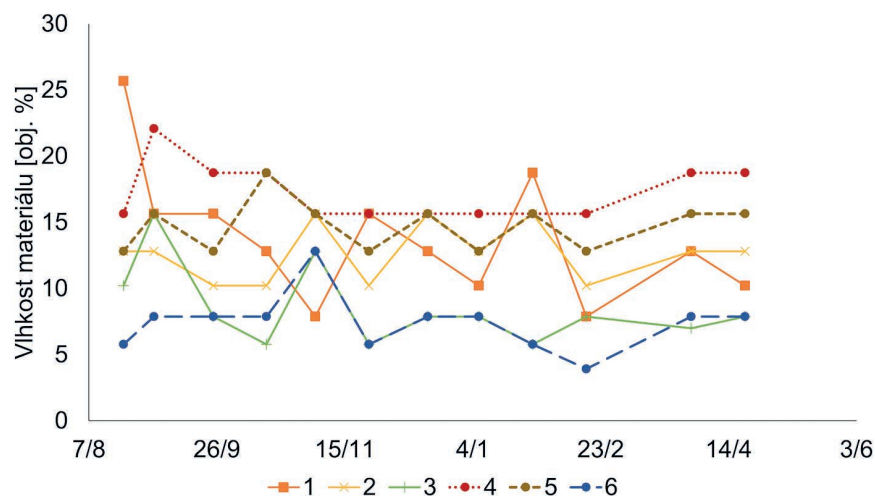
34 Hailong He – Miles F. Dyck – Robert Horton – Tusheng Ren – Keith L. Bristow – Jialong Lv – Bingcheng Si, Development and Application of the Heat Pulse Method for Soil Physical Measurements, *Reviews of Geophysics* LVI, 2018, č. 4, s. 567–620.

35 Jana Maříková-Kubková – Iva Herichová, Svědkové 20. století, výzva pro 21. století. Význam a trvalá udržitelnost archeologických areálů Pražského hradu, in: Peter Bisták – Jana Maříková-Kubková – Katarína Válová (edd.), *S licenciou 007, Zborník príspevkov k 70. narodeninám Petra Baxu*, 2020, Bratislava 2020, s. 167–179.

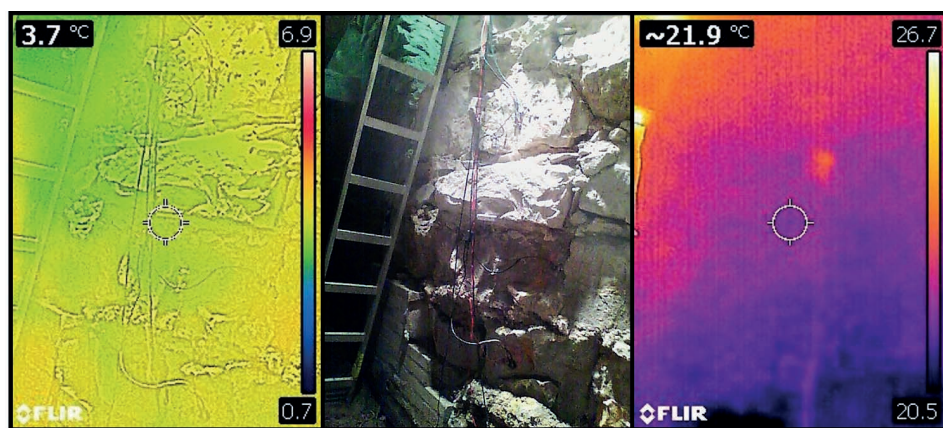
36 Geografický informační systém. Databáze stavebních prvků [databáze online]. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Archeologický ústav AV ČR, Praha, v. v. i., 2020, dostupné z: <http://www.calcarius.cz/gis-calcarius>, vyhledáno 12. 3. 2022.

37 Weiss – Mareš – Slavík – Bruthans (pozn. 27).

38 Zuzana Slížková – Radek Ševčík – Jan Válek, Výzkumná zpráva č. 2021/107 Rozbor materiálů z architektonického



7



zima (17/2/21)

léto (20/8/20)

8

Obr. 6. Výsledky vlhkosti z povrchového měření odporu, číslce v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2). Zdroj: autoři, 2022.

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 MΩ (10^8 Ohm). Číslce v legendě odpovídají měřeným bodům (řazeno od terénu – viz obr. 2). Zdroj: autoři, 2022.

Obr. 8. Výbrané termometrické snímky měřené lokality typické pro zimní a letní období. Foto: Tomáš Weiss, 2021.

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.

1. 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 4–5 (obr. 2) s více méně konstantní hodnotou vlhkosti 0,5 %.

Záznam vlhkosti na obr. 3 je vždy průměrem z měření dvou hlavice přístroje MOIST 210 B (tab. 1), které dle výrobce měří vlhkost v hloubce 0–11 cm a 0–30 cm. Měřili jsme také za pomoci hlavice měřící přepovrchovou 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.

■ Poznámky

fragmentu pod 3. nádvořím Pražského hradu. Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Praha 2022.

Měření neinvazivními elektromagnetickými přístroji je značně ovlivněno přípoверхovou 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 (tab. 2).

II. Uranine-probe

Při měření hloubky zastižené kapalně vody pomocí metody uranine-probe (obr. 5) a podle výše zmíněné metodiky byla ve třech nejníže 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.

III. 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 nejsušší 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), jeví se sice jako nejvlhčí 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, detaily 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.

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, ale v zimě jsou rozdíly v teplotě 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 občasné zcela nasyceného terénu až do výšky cca 120 cm (bod 4), 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, jež 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, je pravděpodobně nejvhodnějším dlouhodobě udržitelným zásahem drenáž vody z terénu u paty pilíře.

Měření pod III. nádvořím: zhodnocení vhodnosti metod

Předpokládanému vlhkostnímu gradientu se snižující se vlhkostí s výškou nejlépe odpovídala měření přístrojem MOIST, konkrétně senzory s proklamovanou hloubkou měření 0–11 cm 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 citlivé 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 doporučená 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, jsou jedinou metodou, která to v současnosti dokáže, sondy využívající reaktivní barvivo (uranine-probe). Využití těchto sond v památkové péči však může být problematické, neboť současná verze sond způsobuje obarvení studovaného materiálu. Tato nevýhoda by však měla být v dohledné době vyřešena.³⁹

Závěr

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

■ Poznámky

³⁹ Viz web.natur.cuni.cz/uhigug/moistureprobe, vyhledáno 12. 3. 2022.

Tab. 2 název metody	invazivnost (popis invazivnosti)	měření	výhody	nevýhody	běžná cena (Kč)
mikrovlňná (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 bodů měření	opakovaná jednorázová měření, spíše jako doplňkové měření	možnost opakovaných měření (určení výparové fronty)	možné ovlivnění okolním mikroklimatem (vysoká vlhkost vzduchu)	50 (za sondu)

Tab. 2. Přehled použitých a analyzovaných metod. Zpracovali: autoři článku, 2022.

Možných metod měření vlhkosti je několik. Naše doporučení by se dalo shrnout takto: Jako nejvhodnější nedestruktivní metoda se jeví metoda označovaná jako mikrovlňná (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 případě 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.⁴⁰

Tento článek se zabýval 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.

Článek vznikl za podpory Technologické agentury ČR v rámci projektu číslo TL0300-0603 „Skryto pod povrchem. Archeologické terény Pražského hradu, jejich ochrana a prezentace v moderním světě“. Děkuje Ivě Herychové za podnětné diskuse a celkovou podporu, 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 dvěma anonymním recenzentům za zpětnou vazbu, díky níž publikace doznala vhodných změn.

■ Poznámky

40 Ibidem.

Mgr. et Mgr. Tomáš WEISS
Přírodovědecká fakulta UK
tomas.weiss@natur.cuni.cz

Bc. Kateřina KALIANKOVÁ
Přírodovědecká fakulta UK
katerina.kaliankova@natur.cuni.cz

Mgr. Martin SLAVÍK, Ph.D.
Přírodovědecká fakulta UK
martin.slavik@natur.cuni.cz

Mgr. Jakub MAREŠ
Přírodovědecká fakulta UK
kubamara@seznam.cz

Mgr. Jana MAŘÍKOVÁ-KUBKOVÁ, Ph.D.
Archeologický ústav AV ČR, v. v. i.
jana.marikova.kubkova@gmail.com

Ing. Jan VÁLEK, Ph.D.
Ústav teoretické a aplikované mechaniky
AV ČR v. v. i.
valek@itam.cas.cz