



Stanovení plošného rozložení vlhkosti zdiva mikrovlnnou metodou

Determination of Areal Humidity Distribution by Microwave Method

Olga Skružná^{a*}, Jan Válek^a, Leonard Hobst^b

^aAkademie věd České republiky, v. v. i., Ústav teoretické a aplikované mechaniky

^bVysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební

Abstrakt

Voda působí destruktivně na porézní stavební materiály. Získání přehledu o rozložení vlhkosti zdiva v objemu může být výhodné při hledání zdroje nežádoucí vlhkosti. Mikrovlnné stanovení obsahu vlhkosti je rychlá moderní nedestruktivní metoda. Článek shrnuje problematiku použití mikrovlnných sond a jejich úspěšnost dokládá na stanovení obsahu vlhkosti na historickém objektu, kde byla zvýšená vlhkost projevující se mokrymi mapami na omítce vázána na vysoký obsah vodorozpuštěných solí.

Klíčová slova: měření vlhkosti, obsah vlhkosti, mikrovlny, mikrovlnná sonda, porozita stavebních materiálů

Abstract:

Water affects porous building materials destructively. Assessment of moisture distribution in masonry can be useful when searching for a source of unwanted moisture. Microwave moisture measurement is a fast modern non-destructive method. The article summarises the issues related to the use of microwave probes and illustrates their successful application on a historic building where the high moisture content that caused wet maps on plasters was bound to the high content of water-soluble salts.

Keywords: moisture measurement, moisture content, microwaves, microwave probe, porous building materials

1. ÚVOD

Mikrovlnné stanovení vlhkosti zdiva představuje rychlou a spolehlivou technologii, která byla odzkoušena na různých materiálech [1, 2, 3]. Mikrovlnnou metodou lze snadno proměřit obsah vlhkosti v předem stanovené síti bodů, následně lze sestavit obraz rozložení vlhkosti v ploše zdiva a při použití sond měřících v různých hloubkách i v jeho objemu. Vytvořit tzv. vlhkostní mapu může být výhodné v případech, jako je hodnocení poškození budov při povodních, přezkoumání životnosti hydroizolace, ověření úspěšnosti sanace historických staveb nebo hledání zdroje nežádoucího zavlhčení.

2. NEDESTRUKTIVNÍ PRŮZKUM VLHKOSTI ZDIVA

2.1 Působení vlhkosti ve zdivu

Otevřená porozita stavebních materiálů (cihla, kámen, malta, beton) je důležitým parametrem z hlediska jejich odolnosti a trvanlivosti, pro jednotlivé materiály však může být porozita velmi odlišná. Jedním z nejvýznamnějších faktorů, bezprostředně související

s porozitou, je obsah vlhkosti, která se v porézním systému může nacházet, a ten je vždy v rovnováze s okolními podmínkami. V závislosti na teplotě a tlaku atmosférického prostředí se voda v porézních materiálech může vyskytovat v různém proměnlivém množství, a to jak v plynném, tak i v kapalném skupenství.

V každém materiálu je přítomna vázaná a volná vlhkost. Vázaná voda je poměrně pevně uchycena na stěnách pórů pomocí chemicko-sorpčních a fyzikálně-sorpčních sil a lze ji obvykle uvolnit pouze extrémními změnami okolního prostředí (vysoušením při velmi vysoké teplotě). Ve stavebních materiálech je vždy přítomna alespoň vázaná voda, nemají tedy nikdy nulový obsah vlhkosti. Volná vlhkost je přítomna v porézním systému v různém množství v závislosti na proměnách vnějšího klimatu a volně se v něm pohybuje díky kapilárním silám a gravitaci.

U staveb je možných několik příčin vlhnutí zdiva [4]; srážková vlhkost (déšť, sníh, kapičky vody z velkých vodních ploch, odstříkující voda), kondenzační vlhkost (kontakt teplého vlhkého vzduchu se studenějším povrchem), vztlínající vlhkost (z půdy do stavební konstrukce), voda působící hydrostatickým tlakem nebo poruchy kanalizace a vodovodního řadu.

Dodáno do redakce: 7. 2. 2018

Recenzní řízení: od 14. 5. do 23. 5. 2018

*Korespondenční adresa: skruzna@itam.cas.cz

Voda, která se dostává do konstrukce z ovzduší nebo z půdy, obsahuje vodorozpuštěné soli nebo rozpuštěné plyny z atmosféry. V porézním systému funguje voda také jako médium pro transport různých nečistot. Zdivo prosycené hygroskopickými solemi zůstává vlhké i při relativně suchém počasí. Kyselé složky navíc způsobují chemickou korozi materiálů.

Obzvlášť nebezpečné mohou být cyklické změny vzdušné vlhkosti, které jsou však v našich klimatických podmínkách obvyklé. Změny relativní vzdušné vlhkosti způsobují krystalizaci některých solí a krystalizační tlaky mohou působit destrukci porézního systému stavebních materiálů. V zimních měsících navíc často klesá teplota pod bod mrazu, přítomná volná voda přechází do pevného skupenství, zvětšuje svůj objem přibližně o 10 % a v závislosti na druhu materiálu a charakteru jeho pórovitosti může působit nenávratná mrazová poškození.

Voda může zároveň také rozpouštět a vyplavovat pojivo (z betonu, vápenné nebo sádrové malty), čímž dochází ke snížení pevnosti materiálů a jejich postupné degradaci, nemluvě o nepálených zdicích prvcích, u kterých voda může způsobit velmi rychlou destrukci. Přítomnost vody je rovněž zásadní pro životnost biologického napadení zdiva.

Ke stanovení vlhkosti lze využít několik destruktivních nebo nedestruktivních metod [1, 4]. Nejběžnější destruktivní metoda (s nutností odebrat vzorek) je metoda gravimetrická, která je obvykle brána jako metoda referenční. Z nedestruktivních metod to jsou metody kapacitní, odporové, radiometrické nebo mikrovlnné. Každá z těchto metod má své výhody a omezení a pouze důkladná znalost možností jednotlivých metod umožňuje objektivní stanovení vlhkosti.

2.2 Mikrovlnná metoda stanovení obsahu vlhkosti

Z moderních nedestruktivních metod se stále více rozšiřuje použití přístrojů, využívajících mikrovlnné záření. K významným firmám, které se zabývají vývojem a výrobou přístrojů, využívajících mikrovlnné záření, patří i firma „hf sensor GmbH“, která má sídlo v Lipsku (<http://www.hf-sensor.de>). Ta vyvinula celou řadu elektronických vyhodnocovacích přístrojů a k nim připojených mikrovlnných sond, které se dají vhodně kombinovat. Přístroje jsou schopny stanovit vlhkost zdiva až do hloubky několika desítek cm v závislosti na použité sondě. Z bodových hodnot může pak být sestavena vlhkostní mapa. Takto jsou výsledky jednoduše publikovatelné a na jejich základě je možné určit hlavní zdroje nechtěné vlhkosti v konstrukci. Díky kombinaci sond s šířením mikrovln o různých vlnových délkách lze dokonce vytvořit 3D vlhkostní model [5]. Zpracování výsledků je však náročné na čas a mnohdy i na praktickou interpretaci.

2.2.1 Princip metody

Mikrovlnný proces patří do kategorie dielektrických měření vlhkosti, které využívají schopnosti vody polarizovat se ve vnějším silovém poli. Voda a stavební materiály mají velký rozdíl mezi hodnotami dielektrických konstant, je tedy možné stanovit i velmi malé množství vody obsažené v materiálu.

Mikrovlny jsou součástí spektra elektromagnetického záření o vlnové délce od 1 mm do 1 m, tj. o frekvenci 300 MHz až 300 GHz [6]. Tato záření se využívají k mnoha činnostem, nejznámější je ohřev potravin, dále to může být navigace, radiolokace, vysoušení materiálů, nebo dokonce tavba skla. Všechny využívané

aplikace jsou dány chováním jednotlivých materiálů při kontaktu s mikrovlnami. Záření některými materiály prochází (vzduch, sklo, nepolární látky), některé materiály jej pohlcují a přeměňují na teplo (voda, polární látky) a některé materiály záření odráží (kovy).

Voda je na rozdíl od stavebních materiálů polární látka. Molekuly vody jsou obvykle v neuspořádaném stavu a při působení vnějšího elektrického pole se uspořádají (kladná část k zápornému pólu). Při působení vysokofrekvenčního záření, jehož polarita se mění více než $3 \cdot 10^5$ krát za sekundu, dochází k oscilační vibraci až k rotaci polárních molekul. Ty se vzájemně třou a srážají a vzniká tak teplo. Polární molekuly kromě absorbování energie mikrovln část energie odráží zpět [2].

Kromě přítomnosti vody ovlivňují sílu odraženého signálu také změny homogenity materiálu ve zdivu. Různá hustota nebo rozdíly v materiálovém složení zdiva negativně zkreslují naměřené hodnoty. Dalším rizikem jsou praskliny, které mohou zesílit intenzitu odraženého svazku záření. Problémem může být například i odchylující se nátěr na zdi [2]. Na rozdíl od jiných metod je mikrovlnné stanovení obsahu vlhkosti téměř nezávislé na obsahu vodorozpuštěných solí [7].

2.2.2 Měření mikrovlnnou sondou

Mikrovlnné sondy mohou pracovat na třech principech: průchodovém, odrazovém a rezonančním. V průchodovém uspořádání je vysílač a přijímač umístěn na opačné straně materiálu, takže je měřena ztráta energie procházejícího mikrovlnného záření. V odrazovém uspořádání je vysílač i přijímač na stejné straně materiálu a měří ztrátu energie mikrovln odražených v materiálu. Nejkomplikovanější jsou rezonanční sondy, které jsou uspořádány stejně jako odrazové, avšak vytvářejí pole, do kterého vstupuje materiál, zatímco sonda měří vznikající rozdíl a počítá přesný obsah vlhkosti. Toto uspořádání téměř odstraňuje vliv hustoty různých materiálů, je však nejsložitější a finančně nejnákladnější [6].

Sonda k dosažení správných výsledků vyžaduje rovný a pokud možno hladký povrch. Sonda (anténa) musí být v těsném kontaktu s povrchem, aby nedošlo k oslabení vysílaného záření, které je způsobeno jeho disperzí a interferencí s paprskem odraženým od povrchu. Stejně interference mohou způsobit také vnitřní praskliny [2].

Při stanovení obsahu vlhkosti je nutné zvolit správnou sondu a postup měření. Měření je úspěšné pouze tehdy, když je zkoumaný materiál širší než hloubka průniku mikrovln. Pokud nedojde k úplné absorpci záření, paprsek se odrazí od zadní strany materiálu, čímž se posílí odražený signál, a předpokládaný obsah vlhkosti vzroste [2]. Maximální hloubka průniku se snižuje, pokud je materiál velmi provlhlý [7].

2.2.3 Správná kalibrace

Přímý výstup z mikrovlnného měření je bezrozměrný vlhkostní index, který je pouze relativní hodnotou úměrnou množství vlhkosti v měřeném materiálu. Chceme-li stanovit obsah vlhkosti ve hmotnostních procentech vztažených k suchému materiálu, je potřeba znát kalibrační vztah mezi různě vlhkým materiálem a vlhkostním indexem naměřeným konkrétní sondou. Pro tyto účely jsou většinou výrobci dodávány obecné kalibrační křivky pro běžně známé materiály (např. beton nebo pórobeton).

Použití přednastavených kalibračních dat podle měřeného materiálu ale nevede vždy u všech přístrojů k přesným výsledkům [1], jelikož z principu nemohou pokrývat široké spektrum

přirozených rozdílů v materiálech. Zejména pokud se jedná o materiály, kde byly použity nestandardní výrobní postupy, či materiály historické.

Pokud je to možné, vždy je lepší provést kalibraci pomocí gravimetrického stanovení obsahu vlhkosti (vysušení vzorku odebraného např. vývrtem při $100 \pm 5^\circ\text{C}$). Gravimetrické stanovení provádíme pro několik vzorků s různým obsahem vlhkosti, kdy zahrneme maximální a minimální zavlhčení, které je přítomné na měřeném zdivu. V normě ČSN P 93 0610 [8] je doporučena hloubka odběru vzorků 10–15 cm, pokud jsou však použity mikrovlnné sondy pro jiné hloubky, je vhodné odebrat vlhkostní vzorky z hloubek odpovídajících danému rozsahu sond. Těsně před odběrem změříme relativní vlhkost pomocí příslušné mikrovlnné sondy a na základě těchto hodnot sestavíme kalibrační křivku mezi vlhkostním indexem a skutečným obsahem vlhkosti. Po odběru vzorky uzavřeme do vzorkovnice se šroubovacím uzávěrem (předem zvážené a odzkoušené na paropropustnost), a co nejrychleji dopravíme do laboratoře k analýze.

2.3 Příklad využití metody

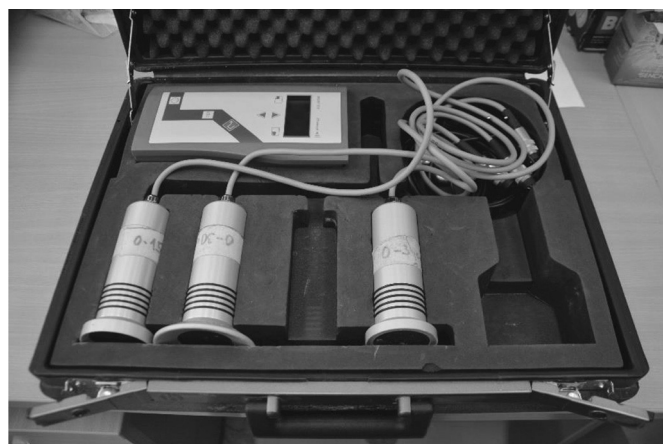
Stanovení vlhkosti pomocí mikrovlnné odrazové sondy bylo uplatněno při průzkumu historické budovy v centru Prahy. Zdivo budovy je převážně opukové, zděné na vápennou maltu, místy jsou použity cihly. Dům stojí v bývalé záplavové oblasti. Po realizaci nových omítek došlo po šesti měsících k výskytu tmavých vlhkostních map. Zdivo bylo izolováno chemickou clonou ve výšce cca 10–30 cm nad terénem a do výšky 2–3 m byla v interiéru a v exteriéru použita sanační omítka, která nevykazovala po 6 měsících viditelné defekty. Poškozené omítky ve výšce 2–5 m byly před provedenou analýzou většinou odstraněny (obr. 2, 5).

Současně s mikrovlnným měřením byly odebrány vzorky vývrtem pro gravimetrické zjištění vlhkosti a pro stanovení obsahu vodorozpuštěných solí z hloubek 0–3, 3–13 a 13–30 cm [3]. Stupeň zasolení zdiva byl zjištěn velmi vysoký, hlavní složku tvořily

dusičnany, které jsou vysoce hygroskopické, dobře rozpustné ve vodě a tedy i dobře mobilní v porézním systému zdiva.

K měření byla použita souprava firmy „hf sensor“ s označením MOIST 210B (obr. 1), sestávající z elektronického vyhodnocovacího přístroje MOIST 210 a dvou mikrovlnných odrazových sond, a to MOIST R1 pro rozsah do 3 cm a MOIST P do 30 cm.

Vlhkostní mapy (obr. 3, 4, 6, 7) získané pomocí mikrovlnných sond potvrdily, že mokrá místa na fasádě byla způsobena hlavně přítomností solí, v konstrukci nedocházelo k významnému prosakování vlhkosti z podloží. V uvedených vlhkostních mapách jsou zobrazeny bezrozměrné vlhkostní indexy, jejich kalibrační vztah ke hmotnostním procentům obsahu vlhkosti je uveden v tab. 1. Díky přesné kalibraci pomocí gravimetrické metody bylo zjištěno, že povrchová vrstva není výrazně sušší ani vlhčí než zdivo do hloubky 30 cm, zasolení v hloubkovém profilu je tedy zřejmě poměrně rovnoměrné, což bylo potvrzeno analýzou koncentrací vodorozpuštěných solí ve výluhu z několika odebraných vzorků. V exteriéru se jevila stěna vlhčí, což bylo pravděpodobně způsobeno momentálními klimatickými podmínkami (24 hodin před měřením se v místě vyskytovaly přeháňky).



Obr. 1 Přepavní kufřík s mikrovlnným vlhkoměrem se třemi sondami s maximální hloubkou průniku do 3, 15 a 30 cm.

Fig. 1 Case with microwave probes with maximum penetration depth 3, 15 and 30 cm.



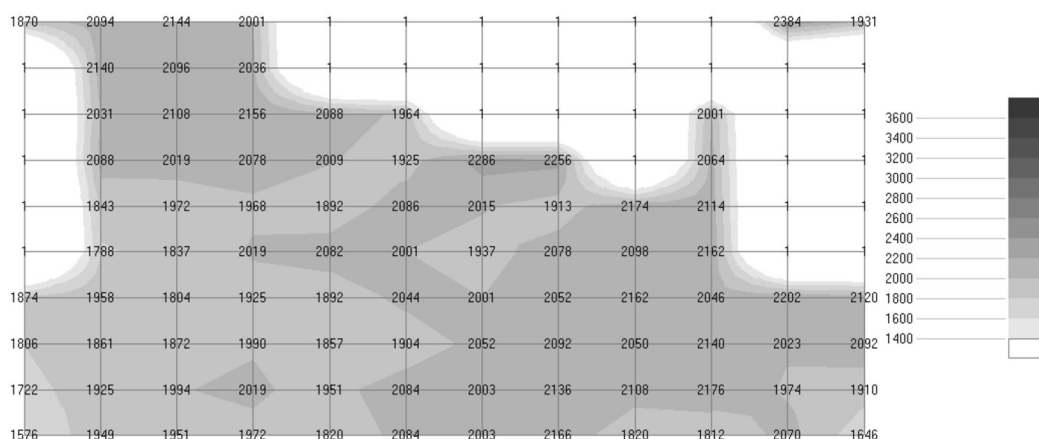
Obr. 2 Interiérová strana zkoumané poškozené zdi. Body vyznačují místa měření mikrovlnnou sondou.

Fig. 2 Interior side of the assessed damaged wall. The points mark places of measurement with the microwave probe.

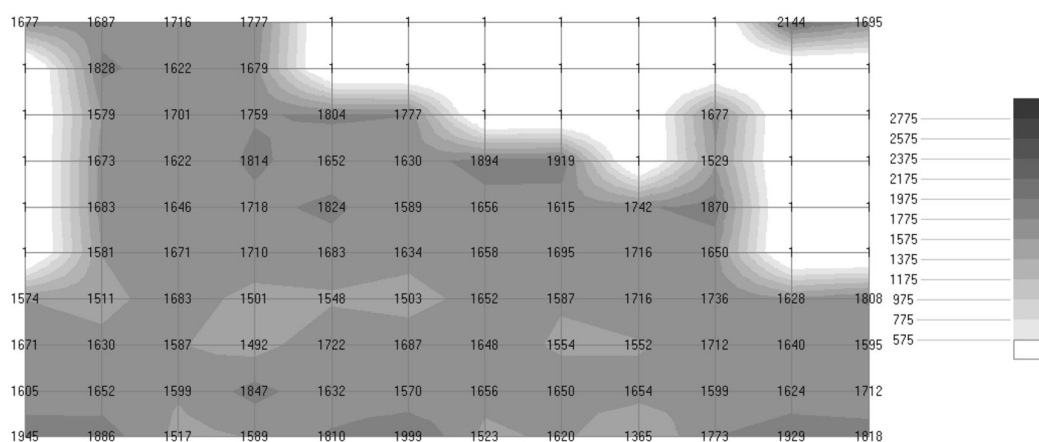
Tab. 1 Orientační kalibrační vztah mezi vlhkostním indexem uváděným ve vlhkostních mapách a obsahem vody v hmotnostních procentech.

Tab. 1 Calibration relationship between the moisture index used in the maps of moisture content and the water content in weight percent.

Vlhkost	Sonda 0–3	Sonda 0–30	Barevná stupnice
hm. %	index	index	
7,9	3600	2775	
7,1	3400	2575	
6,4	3200	2375	
5,7	3000	2175	
5,0	2800	1975	
4,3	2600	1775	
3,5	2400	1575	
2,8	2200	1375	
2,1	2000	1175	
1,4	1800	975	
0,7	1600	775	



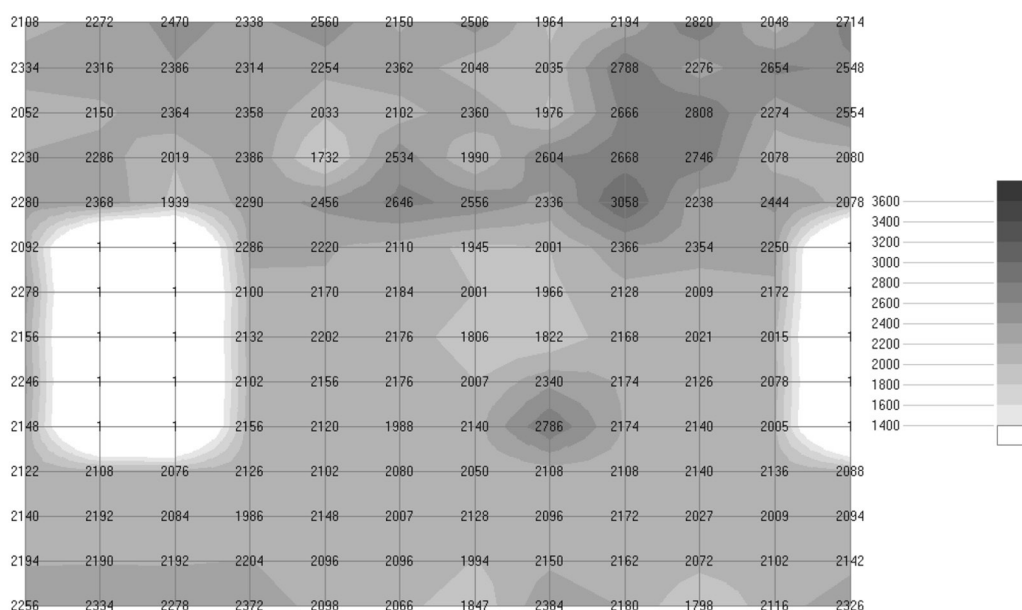
Obr. 3 Mapa obsahu vlhkosti (zobrazen jako hodnoty vlhkostního indexu) v hloubce 0–3 cm na interiérové straně zdi.
Fig. 3 Map of moisture content distribution (presented as values of moisture index) in the depth of 0–3 cm on the interior wall.



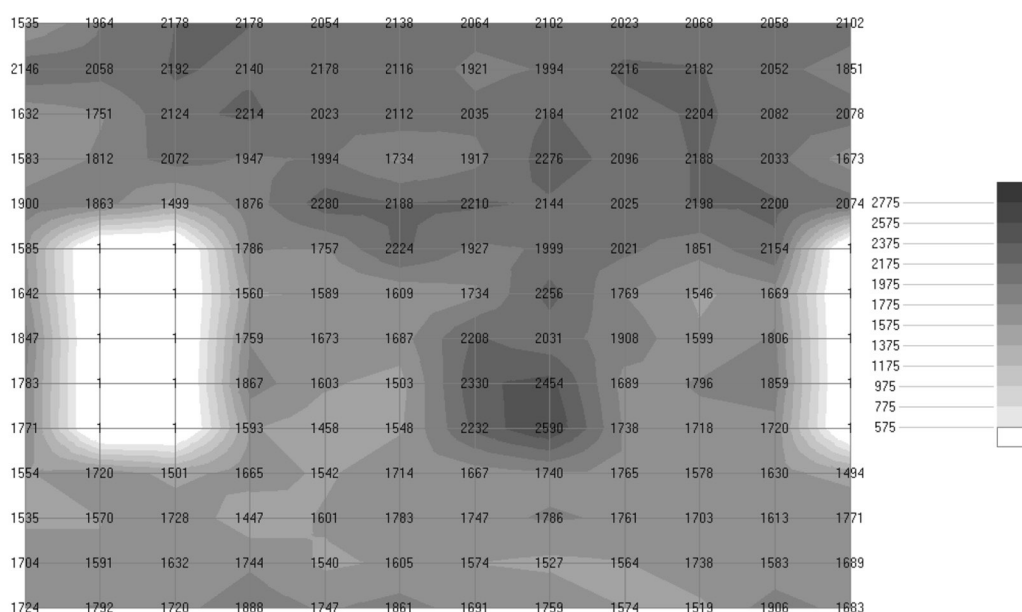
Obr. 4 Mapa obsahu vlhkosti (zobrazen jako hodnoty vlhkostního indexu) v hloubce 0–30 cm na interiérové straně zdi.
Fig. 4 Map of moisture content distribution (presented as values of moisture index) in the depth of 0–30 cm on the interior wall.



Obr. 5 Exteriérová strana zkoumané postižené zdi. Body vyznačují místa měření mikrovlnnou sondou.
Fig. 5 Exterior side of the assessed damaged wall. The points mark places of measurement with the microwave probe.



Obr. 6 Mapa obsahu vlhkosti (zobrazen jako hodnoty vlhkostního indexu) v hloubce 0–3 cm na exteriérové straně zdi.
Fig. 6 Map of moisture content distribution (presented as values of moisture index) in the depth of 0–3 cm on the exterior wall.



Obr. 7 Mapa obsahu vlhkosti (zobrazen jako hodnoty vlhkostního indexu) v hloubce 0–30 cm na exteriérové straně zdi.
Fig. 7 Map of moisture content distribution (presented as values of moisture index) in the depth of 0–30 cm on the exterior wall.

3. ZÁVĚR

Mikrovlnné stanovení obsahu vlhkosti patří k moderním nedestruktivním metodám, které umožňují rychle a přesně určit vlhkost zdiva v různých hloubkách. Metoda je známá a využívána pro různé stavební materiály, v tomto případě byla úspěšně použita na historické budově, u níž se do půl roku po realizaci nových omítek objevila v exteriéru i v interiéru vlhká místa. Díky plošnému zobrazení distribuce obsahu vlhkosti byla lokalizována nejvlhčí místa, která odpovídala místům s nejvyšší koncentrací dusičnanů. Stupeň zvlhčení se ve dvou měřených hloubkách od povrchu výrazně neměnil. Zároveň spodní soklová část zdiva vykazovala nižší obsah vlhkosti než vyšší partie, nejvyšší hodnoty byly zjištěny

ve výšce 3–4 m nad zemí. Tento stav zdiva byl způsoben nedávno provedenou hydroizolační infuzní clonou a vysokým stupněm zasolení dusičnany v hloubce zdiva. Metoda stanovení obsahu vlhkosti pomocí mikrovlnné sondy se osvědčila jako jednoduchý a rychlý nástroj k analýze postižené zdi s potřebou odběru minimálního počtu vzorků pro gravimetrické stanovení obsahu vlhkosti a případně stanovení koncentrace vodorozpustných solí.

4. PODĚKOVÁNÍ

Článek vznikl na základě výzkumu provedeného v rámci projektu Vápenné materiály pro restaurování a konzervování autentických

prvků historických staveb (DG16P02H012), financovaného z programu NAKI Ministerstva kultury České republiky v letech 2016–2020.

5. LITERATURA

- [1] VÁLEK, J., KRUSCHWITZ, S., WÖSTMANN, J., KIND, T., VALACH, J., KÖPP C., LESÁK, J. Non-destructive investigation of wet building materials: multi-methodical approach. *Journal of Performace of Constructed Facilities*, 2010, 24(5), 462–472. ISSN 0887-3828.
- [2] CAMUFFO, D., BERTOLIN, C. Towards standardisation of moisture content in culture heritage materials. *E-Preservation Science*, 2012, 9, 23–35. ISSN 1581-9280.
- [3] NUNES, C., SKRUŽNÁ, O., VÁLEK, J. Study of nitrate contaminated samples from a historic building with the hygroscopic moisture content method: Contribution of laboratory data to interpret results practical significance. *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 30, 57–69. ISSN 1296-2074.
- [4] ANTON, O., BLAŽKOVÁ, V., HOBST, L. Měření vlhkosti v praxi soudního inženýra. *Soudní inženýrství*, 2005, 16(3), 175–178. ISSN 1211-433X.
- [5] KURIK, L., KALAMEES, T., KALLAVUS, U., SINIVEE, V. Influencing factors of moisture measurement when using microwave reflection method. *Energy Procedia*, 2017, 132, 159–164. ISSN 1876-6102.
- [6] SPITZLEI, M. Choosing a method for measuring your material's moisture content. *Powder and Bulk Engineering*, 2000, 14, 39–52. ISSN 0897-6627.
- [7] PAZDERKA, J., HANÁKOVÁ, E. Použití odporové metody ke stanovení vlhkosti zdiva historických budov. *Stavební obzor*, 2014, 5–6, 89–94. ISSN 1210-4027.
- [8] ČSN P 73 0160. *Hydroizolace staveb – Sanace vlhkého zdiva – Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2000.

Správná citace:

SKRUŽNÁ, O., VÁLEK, J., HOBST, L. Stanovení plošného rozložení vlhkosti zdiva mikrovlnnou metodou. *Soudní inženýrství*, 2018, 29(2), 31–36. ISSN 1211-443X.