

Terénní měření nasákavosti porézních materiálů

Miloš Drdácký, Hana Hasníková, Pavel Zíma

Přírodní kámen, malta nebo omítka jsou typičtí představitelé porézních stavebních materiálů. Kámen byl v minulosti hojně využíván pro svou trvanlivost především ke stavbě významných monumentů nebo důležitých užitných konstrukcí, kterými jsou katedrály či mosty, ale také na drobnějších uměleckých předmětech – sochách či morových sloupech, na nichž se choval až do současnosti. Většina těchto objektů je předmětem památkové ochrany a k jejich správné údržbě je potřeba znát kromě mechanického chování také další vlastnosti.

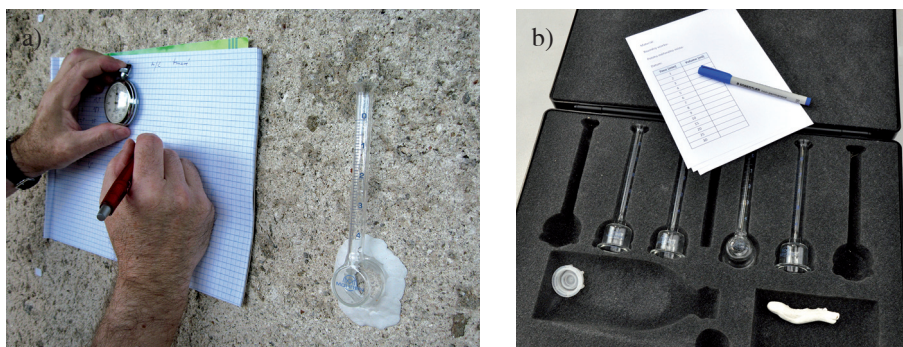
Kvalita povrchu a schopnost materiálů absorbovat tekutiny reprezentují některé z důležitých vlastností porézních materiálů. Zkoušení propustnosti povrchu a nasákavosti materiálů patří mezi základní a nepominutelné techniky v praxi restaurátora. V posledních desetiletích byla k tomuto účelu hojně využívána tzv. Karstenova trubice. Její použití je jednoduché, ovšem nese s sebou řadu komplikací. Proto byl v ÚTAM AV ČR, v. v. i., vyvinut pokročilejší systém, který nevýhody měření Karstenovou trubicí odstraňuje. Zařízení, tzv. mikrotrubice, umožňuje kontinuální měření s digitálním záznamem dat a jejich vyšší dosažitelnou přesností.

Přehled starších metod měření nasákavosti

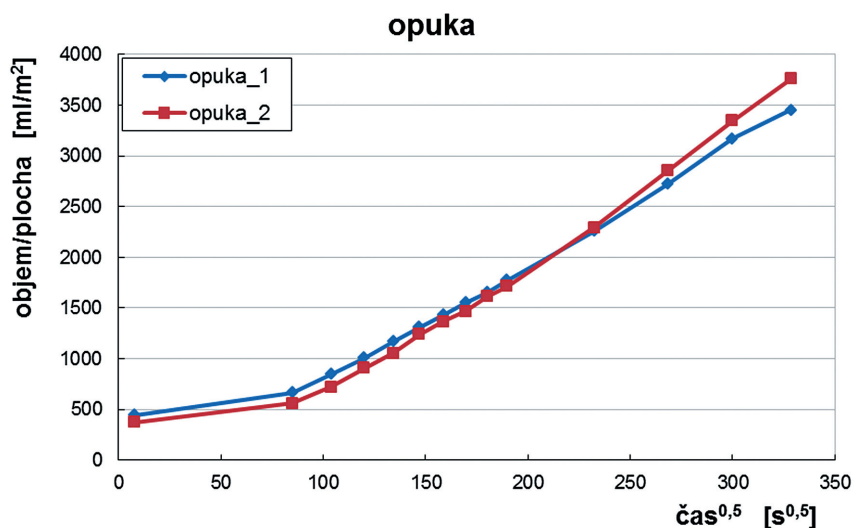
Karstenova trubice byla navržena profesorem Karstenem přibližně před 40 lety pro terénní zkoušení propustnosti fasádních povrchů pro větrem hnaný déšť. Později se stala standardním zařízením pro vyšetřování nasákavosti přírodního kamene. Nyní je užívána i pro odhad změn povrchových charakteristik historických materiálů v důsledku jejich konsolidace nebo hydrofobní úpravy, včetně posuzování efektivnosti či trvalosti těchto úprav.

Klasická Karstenova trubice je skleněná a skládá se z výtokové kruhové části o průměru 25 mm, která zajišťuje kontakt kapaliny s měřeným povrchem pro jeho smáčení a penetraci vody nebo impregnačního prostředku dovnitř hmoty. Na výtokovou část navazuje otevřená skleněná trubice s kalibrovanou stupnicí (4 ml) pro měření objemu kapaliny vsakované do materiálu, viz **obr. 42a**. Trubice je na povrch zkoumaného materiálu připevněna pomocí fixačního tmelu a odečet absorbovaného množství se provádí v periodických časových intervalech. Trubice a její užívání byly standardizovány několika institucemi, např. RILEM, ASTM a řadou národních normalizačních institucí.

Měření probíhá při nízkém tlaku tlačícím kapalinu do materiálu, může být realizováno jak v laboratoři, tak v terénu. Trubice je dostupná ve dvou variantách, viz **obr. 42b**. První je určena pro měření na vodorovném povrchu a měří svislé pronikání kapaliny do materiálu – osy



OBRÁZEK 42: a) Karstenova trubice při terénním měření; b) typy Karstenovy trubice



OBRÁZEK 43: Vsařovací diagram – sediment opuka

výtokové části a měřicí části jsou totožné a svislé. Druhý typ je určen pro měření na svislých površích a sleduje vodorovný průnik kapaliny do materiálu nebo odolnost povrchu proti vnikání dešťové vody hnané větrem. Trubice má tvar L s osou vodorovně situované výtokové části kolmou na svislou osu měřicí části. Zkušební trubice se upevňuje k povrchu proužkem plastického fixačního tmelu vloženého mezi plochý okraj kruhového výtoku a měřený povrch. Adhese se dosahuje prostým přitlačením trubice. Voda se do trubice nalévá otevřenou horní částí tak dlouho, dokud hladina nedosáhne nulové rysky stupnice. Množství vsáknuté vody se pak přímo odečítá na stupnici trubice. Potřebná doba k provedení zkoušky je závislá na porositě zkoumaného materiálu. Obecně se užitečná data získávají v intervalech po 5, 10, 15, 20, 30 a 60 minutách. Výsledky zkoušky se obvykle zobrazují jako vsařovací diagram s objemy vsáknuté vody plochou určité velikosti vztažené k času, příklad je na obr. 43.

Měření Karstenovou trubicí je jednoduché, obnáší však řadu obtíží. Na nerovném hrubém povrchu jsou problémy s těsněním výtoku trubice, těžkou skleněnou trubicí je obtížné upevnit na svislé a především nakloněné plochy, ve většině případů musí obsluhovat trubicí dva operátoři - jeden sleduje pohyb hladiny v trubicí a čas, druhý zapisuje měřené hodnoty – těsnící tmel je mastný a znečišťuje historický povrch.

Jak prokázal Hendrix (2013), metoda funguje dobře, když je kontakt mezi Karstenovou trubicí a povrchem materiálu bezchybný. V případě nerovného povrchu nebo nesoudržného materiálu je však měření problematické. Přestože zkušební přístroj vypadá jednoduše, geometrické okrajové podmínky jsou složité a v mnoha případech vedou k nepřesným nebo nepoužitelným výsledkům (Pleyers a Sasse 1999). Je to způsobeno rostoucím penetračním objemem kolem kontaktního kruhového výtoku na povrchu. Pro dosažení přesnějších výsledků se přidává k válcovému objemu pod výtokem ještě čtvrtina anuloidu s poloměrem rovným hloubce hypotetického válce penetrované kapaliny (Wendler a Snethlage 1991). Byl vyvinut speciální software pro odpovídající výpočty za předpokladu ideálních geometrických podmínek a homogenního materiálu (Rapp et al. 1997). Problémy nastávají pro nehomogenní porézní systémy s trhlinami, poškozenými oblastmi, vodou nasycenými oblastmi nebo jinými heterogenitami. Předpokládá se, že 50 % terénních měření nemůže být správně vyhodnoceno pomocí ideálního matematického modelu, proto Pleyers (1997) zavedl a patentoval jinou metodiku.

Kapilární vlastnosti porézních materiálů mohou být měřeny i dalšími modifikovanými nástroji a metodami. Jednu z nich představuje tzv. Mirowského trubice ve tvaru uzavřené skleněné zahnuté trubice („lulky“) s objemem 10 ml, která se ukázala vhodnější pro měření *in situ*. Výtok této trubice je opatřen porézní houbou, která zprostředkuje rovnoměrný transport vody do zkoušeného materiálu. Plocha penetrace je menší než u klasické Karstenovy nebo RILEM trubice. Proces záznamu dat je obdobný jako u Karstenovy trubice.

Lehmann (2004) zavedl ve své diplomové práci vedené profesory Heinzem Leitnerem a Christophem Hermem podstatnou inovaci. Navrhl a vyzkoušel použití stupnicí opatřené skleněné kapiláry s výtokem o průměru 9 mm, který byl vyplněn cigaretovým papírovým filtrem sloužícím jako kontaktní materiál. Inovaci si přímo vyžádali restaurátoři, aby se zamezilo znečištění povrchů fresek zbytky těsnících tmelů nebo lepidel použitých k upevnění skleněných trubíc. Mädebach (2008) ve své diplomové práci vedené restaurátorem Thomasem Schmidtem a profesorem Christophem Hermem metodu dále rozvinul. Použil skleněnou kapiláru o objemu 120 μ l se stupnicí po 1 μ l při kontaktní ploše výtoku o velikosti 50 mm². Výtoková hubice byla spojena s kapilárou ohebnou hadičkou, což umožnilo měření na skloněných plochách kleneb, případně na stropech.

Další z metod, které používají pro měření nasákavosti kontaktní médium, je tzv. sponge method („houbičková metoda“). Má mnoho modifikací podle typu použité houbičky, ale základní myšlenkou je vážení vlhké houbičky před a po měření, aby se zjistilo množství absorbované vody za určitý čas, po který je houbička v kontaktu s materiálem. Vandevoorde et al. (2011) zmiňují některé nevýhody, jako je potřeba perfektně uzavíratelné krabičky pro přepravu houbičky z terénu do laboratoře nebo přítomnost dostatečně citlivých vah při měření *in situ*.

Mikrotrubice ÚTAM AV ČR

V ÚTAM AV ČR, v. v. i., byl vyvinut další přístroj motivovaný snahou zpřesnit, zrychlit a ulehčit měření nasákavosti v terénu. Měřič nasákavosti s mikrotrubicí je zařízení používající malé množství vody, která se vsakuje do vyšetřovaného povrchu přes specifický kontaktní materiál o malé styčné ploše. Proto je zařízení šetrné k historickému objektu, na kterém se měření provádí. Konstrukčním provedením je přístroj určen pro měření *in situ* na těžko přístupných místech a tvarově složitých plochách. Jeho předností je možnost rychlého průzkumu stavu historických povrchů změřením velkého množství bodů.

Klíčovým problémem při vývoji zařízení je měření a záznam množství vsakované vody za časovou jednotku pro širokou škálu materiálů s různou rychlostí vsakování. Nakonec vznikla laboratorní a terénní varianta přístroje.

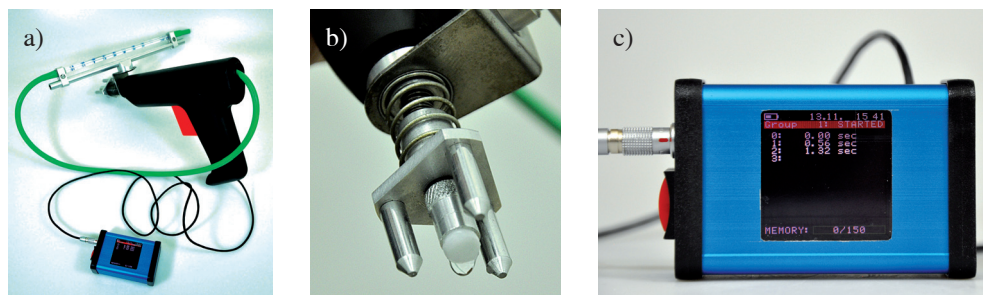
Varianta pro terénní měření

Pro terénní měření byla vyvinuta varianta přenosné mikrotrubice s digitálním záznamem měřených dat, viz **obr. 44a**. Během vývoje byla snaha použít poslední publikované poznatky a vyhnout se nevýhodám, které pozorujeme u Karstenovy trubice, např. znečištění fixačním tmelem v okolí kontaktu po ukončení měření nebo nemožnost umístit těžkou skleněnou trubicí na vertikální plochy. K obsluze nového poloautomatického zařízení navíc stačí pouze jeden operátor držící plastové tělo přístroje, které je velmi lehké.

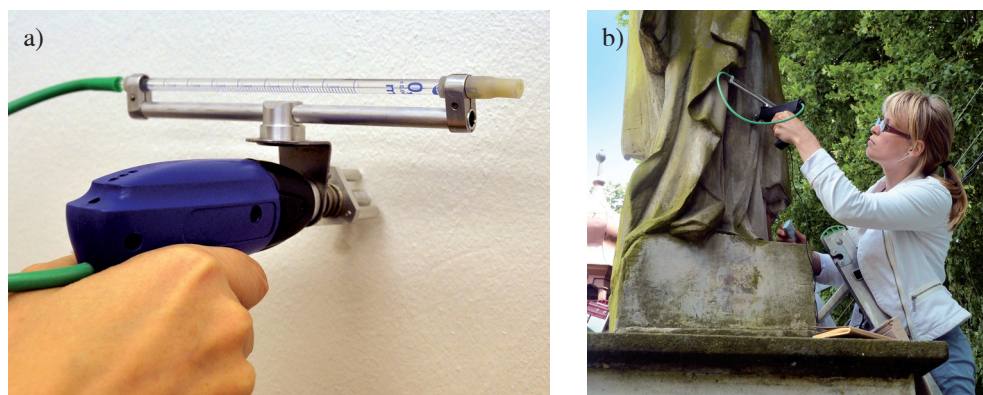
Skleněná mikrotrubice se stupnicí a objemem 0,1 ml (délky stupnice odpovídají 0,01 ml) je přichycená pomocí magnetu ke kovové otočné desce na těle plastové pistole, jejíž spoušť je změněna v mikrospínač. Tím operátor kontroluje záznam dat do paměti. Kovová destička, na kterou je umístěn magnet s mikrotrubicí, se může otáčet okolo hlavně tak, aby poloha vyhovovala aktuálně měřenému místu, tj. lze s její pomocí měřit i nakloněné plochy a dokonce stropy. Hlaveň pistole s průměrem 8 mm je vyplněna papírovými cigaretovými filtry, které zajišťují rovnoměrnou distribuci vody k povrchu materiálu, a je obklopena třemi kovovými hroty zajišťujícími její stabilitu během měření, detailně na **obr. 44b**. Z mikrotrubice je voda do hlavně vedena ohebnou plastovou hadičkou, jejíž délka umožňuje nastavení požadované polohy mikrotrubice.

Paměť se ukrývá v externí kovové krabičce, která je s tělem pistole spojena dostatečně dlouhým kabelem. Je vybavena baterií, dobíjenou při každém připojení k počítači přes USB rozhraní, a druhým mikrospínačem, který lze použít alternativně místo spouště pistole. Paměť zaznamenává čas a je schopná uložit 150 měřených bodů; data jsou později exportována ve formě např. *.xls* souboru. Na displeji se zobrazují aktuálně měřené hodnoty, obsazená kapacita paměti a stav baterie, viz **obr. 44c**.

Samotné měření nasákavosti začíná v momentě, kdy se cigaretový filtr dostane do kontaktu se zkoumaným materiálem – poprvé se zmáčkne spoušť. Poté pokaždé, když hladina v mikrotrubicí mine dílek stupnice, je spoušť stisknuta znovu. Přístroj zaznamenává pouze čas, tj. rozdíl dvou měření udává, jak rychle byl absorbován objem 0,01 ml. Malý průměr kontaktní plochy umožňuje měřit rozmanitější druhy povrchů než Karstenova trubice. Měření není omezeno výskytem trhlin, kterým se lze jednoduše vyhnout, a v materiálu lze přímo testovat i přítomné heterogenity. Měření je lokální, proto je nutné pro celkové korektní zhodnocení provést dostatečně širokou sadu měření, jež je vhodné podrobně dokumentovat.



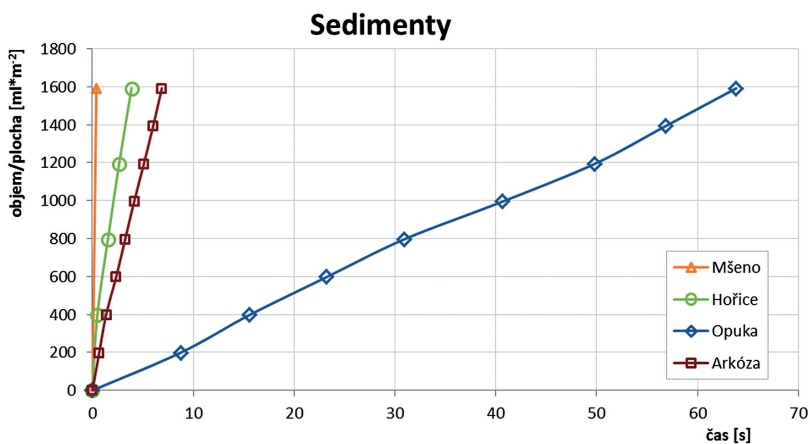
OBRAZEK 44: a) plastová pistole s mikrotrubicí a připojené záznamové zařízení; b) hlaveň s třemi opěrnými hroty naplněná cigaretovým filtrem; c) kovová krabička chránící paměť s uloženými daty



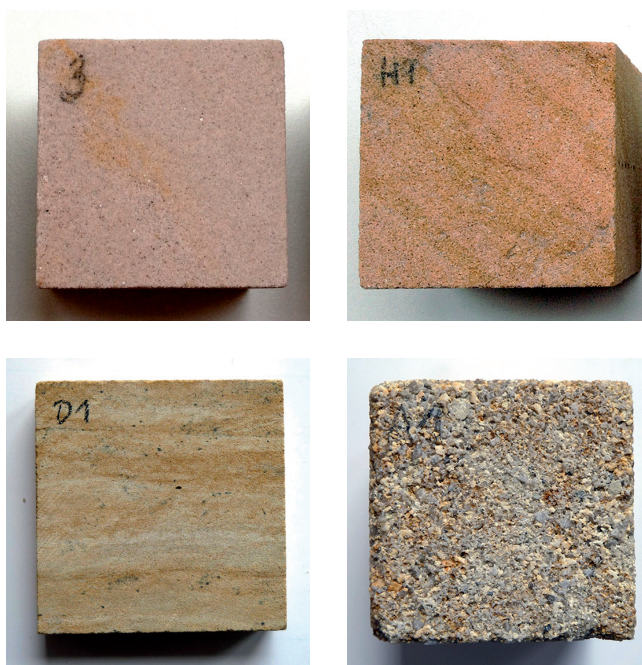
OBRAZEK 45: a) měření na ideálním povrchu; b) socha anděla posledního soudu v Pomezí

Při poměrně standardním měření na ideálně rovném, soudržném, homogenním povrchu bez trhlin (**obr. 45a**) stačí fotografie a údaje o rastru sítě měřících bodů. Většina zkoušek se však týká netypických povrchů, pro které byla mikrotrubice vyvíjena, jako jsou těžko přístupná místa, tvarově různorodá, místy biologicky znečištěná (**obr. 45b**). V takovém případě je pro správnou interpretaci výsledků důležité podrobné zaznamenání měřených bodů. Vyšší rychlost absorpce u jednoho ze sady měření může být způsobena skrytou trhlinou nebo lokální přítomností větších pórů, zvláště u heterogenních materiálů. Záznam může pomoci odhalit oblasti, na kterých nebyly/byly použity hydrofobizační nebo konsolidační prostředky, přestože dokumentace restaurátorského zásahu uvádí opak.

Každý materiál nasáká různou rychlostí, což samozřejmě ovlivňuje i průběh jednotlivých měření. Někdy je možné zachytit pouze první a poslední bod stupnice na mikrotrubicí, když jí hladina proběhne velmi rychle, a je nutné toto zohlednit při zpracování výsledků. V druhé extrémní situaci, pro téměř nenasákavý materiál, je možné měřit i menší objem absorbované kapaliny. **Obr. 46** ukazuje, jak se mohou lišit výsledky na jednotlivých materiálech. Absorpční vlastnosti velmi dobře korelují s velikostí částic a pórovitostí. Všechny testované přírodní kameny jsou sedimenty vyskytující se v Čechách a velmi často používané v historických konstrukcích; mají různou pórovitost a velikost zrn. Všechny absorbovaly shodně

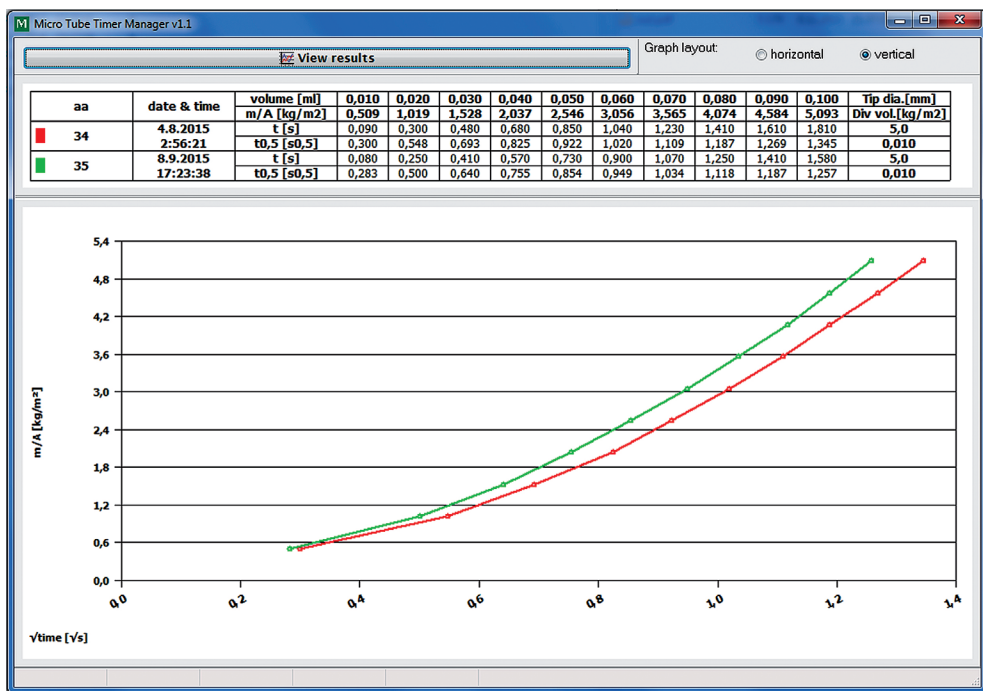


OBRÁZEK 46: Diagram znázorňující grafické vyhodnocení nasákavosti různých sedimentárních hornin



OBRÁZEK 47: Pískovce ze Mšena (nahore vlevo) a z Hořic (nahore vpravo), opuka (dole vlevo) a arkóza (dole vpravo)

množství vody, 0,08 ml, rozdíl je však v rychlosti absorpce. Dva běžné pískovce, těžené v Hořicích a Mšeném, nasákají vodu tak rychle, že je nemožné v mikrotrubicích zachytit přechod hladiny vody okolo každého dílku stupnice. Arkóza, sediment s největšími zrny a pórovitostí okolo 21 %, je ideálním materiálem pro tento typ měření – lze zachytit každý krok.



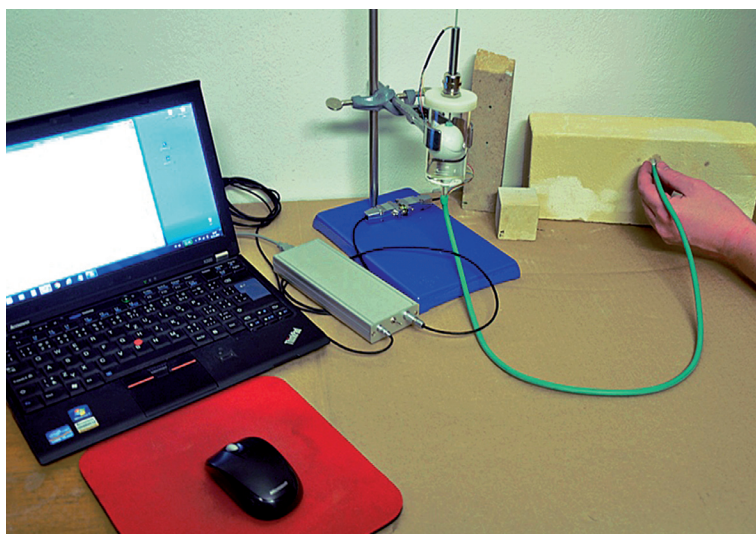
OBRÁZEK 48: Vyhodnocovací software pro měření pomocí mikrotrubice

Naopak opuka je materiál s velikostí zrn na hranici jílu a s průměrnou velikostí póru 0,22 μm , a proto je i absorpce vody pomalá. Makrostruktura všech sedimentů je patrná na obr. 47.

Data z měřiče lze přenést do počítače připojením přes USB rozhraní a pomocí aplikačního programu „Micro Tube Timer Manager“ je rychle zpracovat do tabulek a dále do požadovaných grafů (viz obr. 48).

Varianta pro laboratorní měření

Zařízení se skládá z kalibrované nádržky na kapalinu, která je vybavena plovákem určujícím výšku hladiny. Zdola je k nádržce napojena pružná hadička, na jejímž konci je výtoková oblast definovaná kovovým kroužkem s průměrem 8 mm. Do něj se opět vkládá jako kontaktní médium pro rovnoměrný přechod kapaliny do materiálu papírový cigaretový filtr (obr. 49). Kontaktní plocha je stejná jako v případě přenosné varianty mikrotrubice. Měření objemu absorbované vody je založeno na registraci pohybu plováku v nádržce. Snímač polohy je přes pětižilový kablík spojen s elektronickou jednotkou, která napájí snímač a vyhodnocuje jeho výstupní signál. Převádí jej na digitální hodnotu polohy plováku. Přes USB rozhraní je do počítače přenášén v reálném čase údaj o pohybu plováku a přesném čase v okamžiku měření. Díky uživatelskému programu běžícímu na připojeném počítači je možné sledovat zaznamenávaná data - čas od začátku měření a aktuální polohu snímače. Výhodou zařízení je také možnost připojení výtokové hubice o různé velikosti, možnost připojení přídatné nádoby pro větší objemy vsákané tekutiny a případně možnost regulace tlaku podporujícího penetraci.



OBRÁZEK 49: Laboratorní varianta přístroje pro měření nasákavosti materiálu

Metodika měření

Výsledky měření s mikrotrubicí jsou ovlivněny prací operátora zařízení. Správné zacházení s prototypem přenosného měřiče nasákavosti s mikrotrubicí vyžaduje pečlivou práci a trochu zručnosti, kterou však lze získat krátkým tréninkem. Uživatel musí zabezpečit dobrý kontakt cigaretového filtru s měřeným materiálem, což nemusí být na nerovných površích snadné. Dále je potřeba pozorně sledovat pohyb hladiny v mikrotrubicí a rychle reagovat při záznamu. Při přípravě měření je potřeba zajistit, aby se při naplňování mikrotrubice vodou odstranily všechny bubliny vzduchu a cigaretový filtr přesně zapadl do kovové objímky.

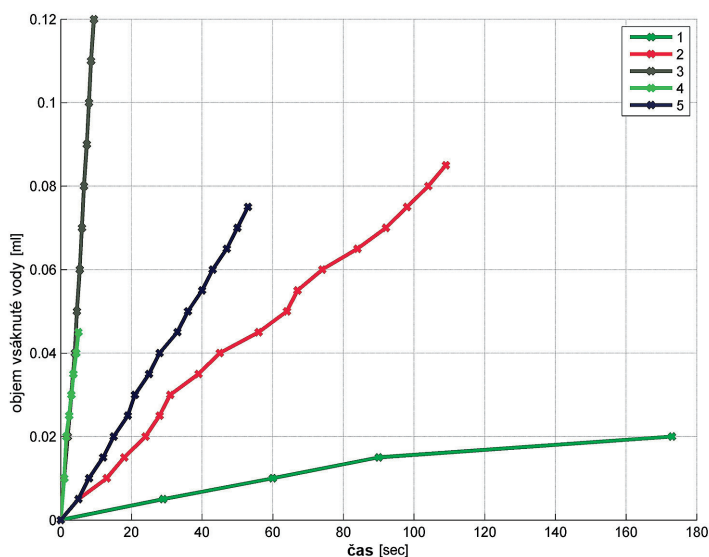
Drdácký et al. (2012) určili chybu metody na základě opakovaného měření vzorků homogenních materiálů – keramiky a hořického pískovce. Výsledky statistického vyhodnocení byly úspěšně srovnány se standardizovanými zkouškami měření nasákavosti vztlávnosti (ČSN EN 1925) a publikovanými výsledky jiných badatelů.

Citlivost měření

Rychlost vsakování kapaliny do materiálu je citlivým indikátorem jeho porosity, pokud měříme na místech bez větších poruch, zejména trhlin. Nicméně i stav degradace lze měřením zachytit, jak ukazuje **obr. 50** z měření na opukové zdi Strahovského kláštera v Praze.

Metoda je i dostatečně citlivá na kontrolu efektivnosti konsolidace porézních materiálů různými typy konsolidačních látek. **Obrázek 51** představuje měření na historických maltách a omítkách zříceniny kláštera Porta Coeli, kde byla testována účinnost aplikace nanovápna - suspenze nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholech. Obrázek je možno porovnat s výsledky odlučovací metody na **obr. 39** a **40**.

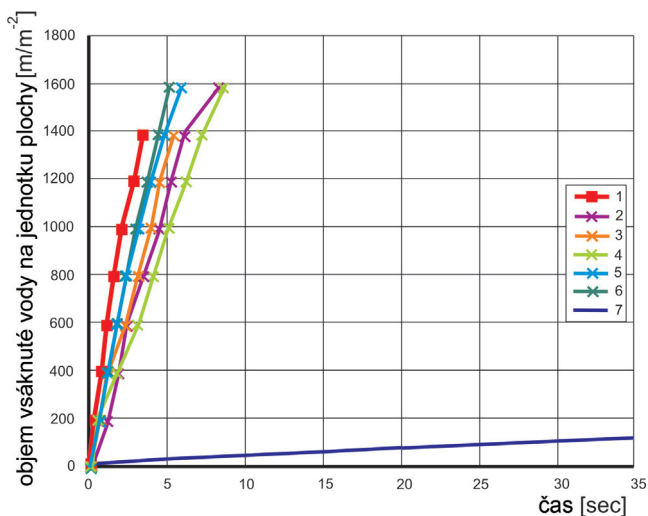
Z **obrázku 51** je vidět, že impregnace nanovápnem příliš nemění prostupnost materiálu pro kapalnou vodu. Je však třeba uvážit, že u vlivu etylsilikátu se projevuje i hydrofobní účinek aplikace (Drdácký a Slížková 2013).



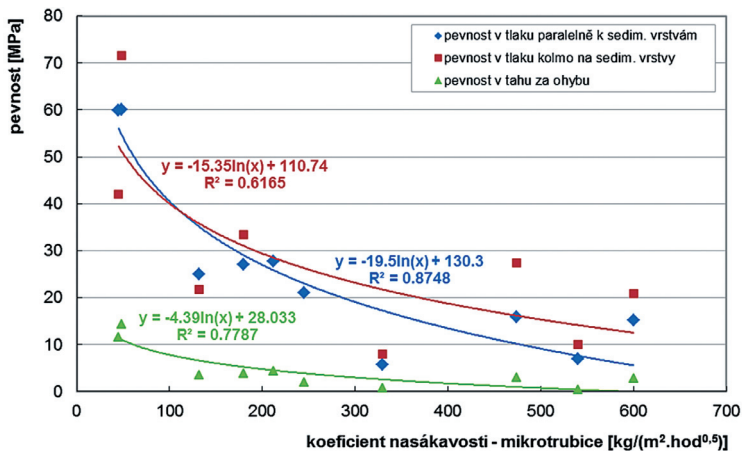
OBRÁZEK 50: Rychlosti vsakování vody do různě zvětralé opuky. Měřená místa jsou na fotografii označena čísly, která odpovídají číslům grafů: 1 – zdravý kámen; 2 – lehce zvětralý kámen; 3 a 4 – silně zvětralý kámen s prasklinami; 5 – identický kámen jako ad 1, ale s trhlinami

Korelace s dalšími materiálovými charakteristikami

Měření rychlosti vsakování je ovlivněno porozitou, která velmi dobře koreluje s mechanickými vlastnostmi porézních materiálů. Lze proto očekávat, že i měření rychlosti vsakování bude s mechanickými vlastnostmi, zejména pevnostmi, korelovat. **Obr. 52** ukazuje pozitivní výsledky a podporuje výše uvedenou hypotézu. Pevnosti je tedy možné hrubě odhadovat i na základě měření rychlosti vsakování. Ta je v grafu reprezentována koeficientem nasákovosti – množstvím vody absorbované zkoušeným vzorkem přes smáčenou plochu za určitý časový

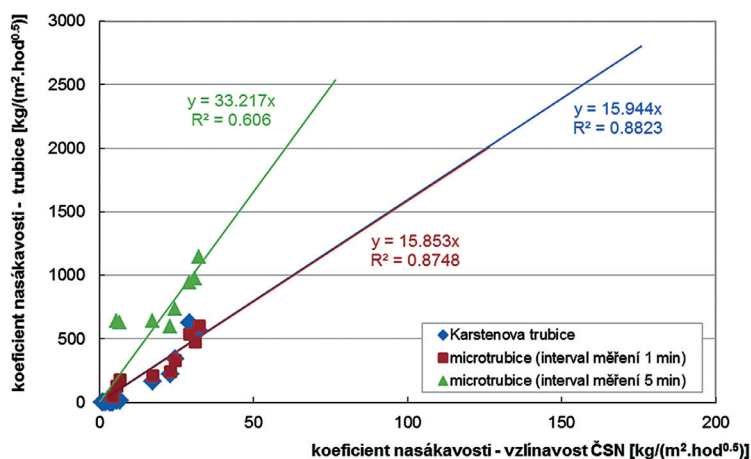


OBRÁZEK 51: Rychlosti vsakování vody do omítky po impregnaci různými prostředky: 1 – neošetřovaný materiál; 2, 3 a 4 – omítka ošetřená nanosolem CaLoSiL E25; 5 – omítka ošetřená nanosolem CaLoSiL E50; 6 – omítka ošetřená nanosolem CaLoSiL Ip25; 7 – omítka ošetřená etylsilikátem Fungosil 500



OBRÁZEK 52: Korelace koeficientu nasákavosti změřeného mikrotrubicí s pevností v tahu za ohybu a tlakovými pevnostmi různých hornin (převážně sedimentů – pískovců a vápenců)

interval $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hod}^{-0.5}]$ – který je definován normou ISO 15148:2002. Jeho pomocí je možné srovnávat různé metody měření nasákavosti (viz **obr. 53**). Zkoušenými vzorky byly opět sedimentární horniny vyskytující se v historických konstrukcích v našem regionu, několik druhů pískovců a vápenců. Srovnávanými metodami bylo měření nasákavosti vztlávaností, které je standardizováno národní normou (ČSN EN 1925), měření pomocí Karstenovy trubice a mikrotrubice (v obou variantách). Výpočet koeficientu nasákavosti je vztažen k časovému úseku měření, pro mikrotrubici byly určeny dva – interval 1 a 5 minut (Hasníková a Zíma 2012).



OBRÁZEK 53: Korelace koeficientu nasákavosti několika metod měření nasákavosti (měřeny byly převážně sedimenty – pískovce a vápence)

Další vývoj

Obě výše uvedené varianty přístroje již byly Úřadem průmyslového vlastnictví zapsány jako užité vzory – Laboratorní přístroj pro měření nasákavosti materiálu a Přenosný měřič nasákavosti (pracovní název Měřič nasákavosti s mikrotrubicí). V současné době (listopad 2015) probíhá konečná fáze patentového řízení na vývojově poslední technické řešení přenosného měřiče nasákavosti s elektronickým automatickým odečtem množství vsakované vody. Tato varianta umožňuje oproti dosud používanému typu automatický záznam dat, který eliminuje chybu operátora, a dále zpřesňuje výsledky měření. Finální prototyp přístroje je v současné době používán k vytvoření databáze referenčních vzorků materiálů používaných na historických objektech a v budoucnu bude následovat publikace certifikované metodiky měření prezentovanými přístroji.

Mikrotrubice pomáhá restaurátorům zhodnotit kvalitu porézních materiálů a je výhodná také ke srovnávacím měřením před a po aplikaci hydrofobizačních nebo konsolidačních prostředků. Lze měřit velké množství bodů, a nasákavost tak může být detailně zmapována v rámci celého objektu. Přínos přenosného zařízení je v jeho všestrannosti a jednoduchosti, jejichž výsledkem jsou nízké provozní náklady.

Na webových stránkách www.arcchip.cz/meab je zveřejněn a uživatelům přístroje poskytnut ke stažení aplikační software na automatické zpracování naměřených dat „MTT Manager“.

Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu DF11P01OVV001 programu NAKI MKČR „Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví“ a projektu 7. RP EK „STONECORE“.

Použitá literatura

- Drdáček, M., H. Hasníková, J. Lesák a P. Zíma. Innovated water uptake measurements on historic stone surfaces. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. New York: Columbia University, 2012.
- Drdáček, M. a Z. Slížková. Enhanced affordable methods for assessing material characteristics and consolidation effects on stone and mortar. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2013, 10(6), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/6/064005>
- Hasníková, H. a P. Zíma. Comparative testing of natural stones used as a building material. In: Jiroušek, O. a D. Kytýř (eds.). *Experimental Methods and Numerical Simulation in Engineering Sciences*. Praha: Czech Technical University, Faculty of Transportation Sciences, 2012, 11–14. ISBN 978-80-01-05062-0.
- Hendrickx, R. Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials. *Material and Structures*. 2013, 46(8), 1309–1320. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9975-2>
- Lehmann, M. *Die Gewölbemalereien in der Krypta der Stiftskirche St. Servatius in Quedlinburg*. Thesis. Dresden: Hochschule für Bildende Künste, 2004, 33–34.
- Mädebach, J. Privátní komunikace s prof. Hermem, 2008. Pleyers, G. *Verfahren und Vorrichtung zur Prüfung der Flüssigkeitsaufnahme poröser Baustoffe*. German Patent: 197 48 777.7, 1997.
- Pleyers, G. a H. R. Sasse. Non-destructive determination of the penetration depth of impregnation materials. In: Lauren B. Sickles-Taves (ed.). *The use of and need for preservation standards in architectural conservation*. West Cornshohocken (PA): ASTM, 1999, 90–100. ISBN 0-8031-2606-9.
- Rapp, K., E. Wendler a R. Snethlage. Zerstörungsfreie Messung der Wasseraufnahme– Verbessertes Auswerteverfahren für die Messmethode nach Karsten. *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft. Beihefte zum European Journal of Mineralogy*. 1997, 9(1), 288.
- Vandevoorde, D., V. Cnudde, J. Dewanckele, M. N. Boone a E. Verhaeven. Contact-Sponge Method: Performance compared with capillary rise, Karsten tube and Mirowski pipe. In: Krüger, M. (ed.). *Cultural heritage preservation. European Workshop on Cultural Heritage Preservation, EWCHP 2011. Proceedings*. Stuttgart: Fraunhofer, 2011. ISBN 978-3-8167-8560-6.
- Wendler, E. a R. Snethlage. *Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Messwerte*. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Forschungsbericht Nr. 3, 1991, 23–24.