

# Zkoušení konsolidačních efektů na maltách a horninách

Miloš Drdácký

Konsolidace hornin a malt představuje jednu z nejsložitějších restaurátorských technologií a zásah, který významně ovlivňuje materiálové kvality historického objektu. Památková věda se snaží neustále produkovat nové a nové konsolidační prostředky, které jsou na trhu velmi žádané. Nicméně jejich zavedení do konzervátorské praxe vyžaduje pečlivé vyšetření jejich dopadů na historický materiál a památky z hlediska jejich trvanlivosti a souladu s potřebami a pravidly památkové péče.

Stejně tak zkoušení a hodnocení těchto dopadů na kulturní dědictví patří mezi nelehké úlohy, které většinou nemají ambice postihnout všechny možné vlivy nebo měřit absolutní hodnoty požadovaných parametrů, protože relativní údaje obvykle stačí pro přijetí konečných rozhodnutí. Ideálně by měly být zkoumány dopady konsolidantů na skutečných materiálech ve skutečných podmínkách jejich aplikace a budoucího působení. Místo toho jsou většinou testy prováděny v laboratořích s omezeným množstvím doplňkových testů v terénu. Jedním z důvodů je i to, že nejsou k dispozici vhodná zkušební zařízení a postupy pro přesné určení řady charakteristik *in situ*. Optimální rozsah zkoušek je pak obvykle omezen na studii nejkritičtějších efektů, které by mohly být v rozporu s požadavky kompatibility zásahu s ohledem na historický materiál a jeho stav i podmínky působení. Zkoušení tak většinou zahrnuje určování mechanických a jiných fyzikálních charakteristik konsolidací ovlivněných.

Tabasso a Simon (2006) publikovali kritický přehled zkušebních metod pro hodnocení vlastností hornin (kamene) před a po konzervačním zásahu, kde čtenář může najít užitečné informace o rozmanitých standardních i nestandardních postupech. Zkoušení hornin a vyhodnocování konzervačních zásahů včetně doporučení pro kritéria kompatibility bylo podrobně zkoumáno zejména v Německu (Sasse a Snethlage 1996, Snethlage a Pfanner 2013), kde také vznikla řada inovačních myšlenek. Na druhé straně bylo publikováno poměrně málo úspěšných a spolehlivých přístupů zkoušení konsolidačních efektů na maltách. Rozmanitost problémů plynoucí z různosti materiálů a ze široké škály forem jejich zvětvávání vyžaduje kreativní přístup k fyzickému modelování a zkoušení konsolidačních efektů. V této kapitole jsou prezentovány některé univerzální případy, zatímco další může čtenář nalézt v ukázkách případových studií.

Příprava programu hodnocení vlivů konsolidace musí uvážit i to, že zkoušení na původních historických materiálech není obvykle možné, neboť není dovoleno poškodit ošetřovanou památku a odebrat větší množství zkušebního materiálu. Z tohoto důvodu jsou konsolidační efekty typicky zkoušeny na modelových materiálech nebo výjimečně na originálním materiálu, získaném z prvků, které musely být vyměněny a nahrazeny novými z důvodu ztráty jejich další

funkční či estetické způsobilosti. Nicméně ani takový materiál nemusí být dostatečně reprezentativní pro širší studium vlivů konsolidačního zásahu kvůli značné variabilitě vlastností.

Různé normy doporučují zkoušet konsolidační vlivy na horniny na vzorcích kamenů uměle zestárých (např. italská NORMAL 1985) a pro umělé zvětvávání byla vyvinuta řada technik, např. cyklické zmrazování a tání, cyklické zahřívání nebo krystalizace solí. Pro účely porovnávacích zkoušek různých receptur jsou tyto přípravy většinou zbytečné a lze oprávněně použít zjednodušený přístup zkoušení na vhodných modelových materiálech, což navíc zaručuje lepší homogenitu substrátu a tím i spolehlivější výsledky.

Cílem zkoušení vlivů konsolidace je dosažení srovnatelných dat s minimem chyb a zde jsou potřebné přiměřeně homogenní vzorky s minimální variabilitou rozhodujících parametrů. U hornin jsou základní série zkoušek prováděny přednostně na zdravém materiálu, pokud možno vytěženém z původních historických zdrojů. Kámen lze více či méně snadno řezat pro výrobu zkušebních těles na rozdíl od malt. Pro jejich zkoušení je snazší a tudíž používanější vyrábět zkušební tělesa z čerstvých směsí s modelovými vlastnostmi nebo z prosté směsi agregátu jejím ztuhnutím (dusáním).

Dalším specifickým problémem, který je třeba řešit, je schopnost zkoumaného substrátu absorbovat impregnační látku. V každém případě je hloubka penetrace konsolidantu jedním z velmi kritických parametrů zkoušky a významně ovlivňuje plánování experimentů. Hloubka penetrace konsolidační látky typicky dosahuje hodnot od několika milimetrů do několika centimetrů v závislosti na velikosti a propojení pórů ve vztahu k velikosti částic nebo molekul této látky.

Zkušební program kombinuje destruktivní i nedestruktivní testy. Pro snížení vlivu variability substrátu je žádoucí zkoušet jednotlivé parametry na pokud možno identických tělesech, což musí být zajištěno pečlivým plánováním pořadí zkoušek. Nelze zapomenout na čas potřebný k průběhu chemických reakcí (zrání) jak u substrátů, tak u konsolidačních látek. Obecně procedura testování začíná nedestruktivními zkouškami a pokračuje destruktivními mechanickými zkouškami, po kterých stále ještě máme většinou k dispozici úlomky použitelné k dalším destruktivním nebo nedestruktivním zkouškám. Příklady jsou uvedeny níže.

## Zkušební tělesa pro materiálové zkoušky

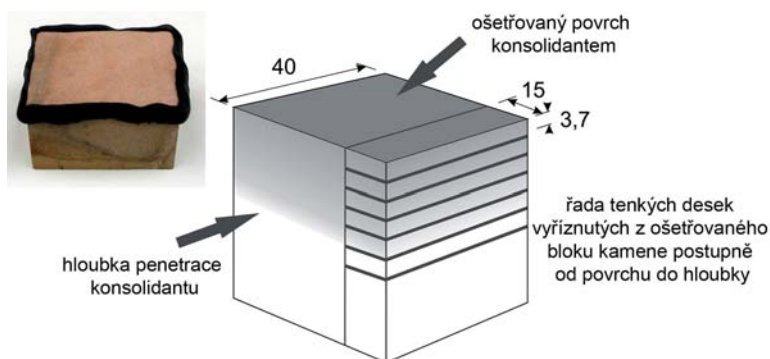
Pro zkoušení vlivů konsolidace na kámen jsou doporučovány tenké kruhové desky (Wittmann a Prim 1983), jejichž hlavní výhodou byla možnost přípravy z jádrových vývrtů, odebraných z reálných objektů. Zkoušení vyžaduje speciální přípravek pro podepření desek a jejich zatěžování (**obr. 195**). Typický poloměr kruhové podpory je 18 mm a zatěžovací kružnice 6,5 mm (Bourges 2006) nebo v přiměřeně modifikovaných rozměrech pro vzorky o průměru 80 mm (Frühwirt 2015). Pro extenzivní laboratorní zkoušky konsolidantů nejsou válcová tělesa praktická a zkoušení tenkých pravoúhlých destiček je mnohem efektivnější – **obr. 196** (Drdáček a Slížková 2008a), jak bude ukázáno později.<sup>1</sup>

Zkušební tělesa jsou řezána jako tenké destičky z kvádrů. Vlastnosti kvádrů jsou před zkouškou proměřeny ultrazvukem. Kvádr je impregnován aplikací konsolidantu na jedné stěně, např. způsobem podle **obr. 196**, a po vyzrání konsolidantu je obvykle zjišťována

<sup>1</sup> Kruhová deska zatěžovaná mezikružím v analogii čtyřbodového ohybu při zkouškách trámečků je namáhána čistým momentem a ve výsledku zohledňuje i u hornin častou anisotropii. To samozřejmě pravoúhlá destička nepostihuje.



**OBRÁZEK 195:** Příklad úpravy zatěžovacího zařízení pro zkoušení kruhových desek

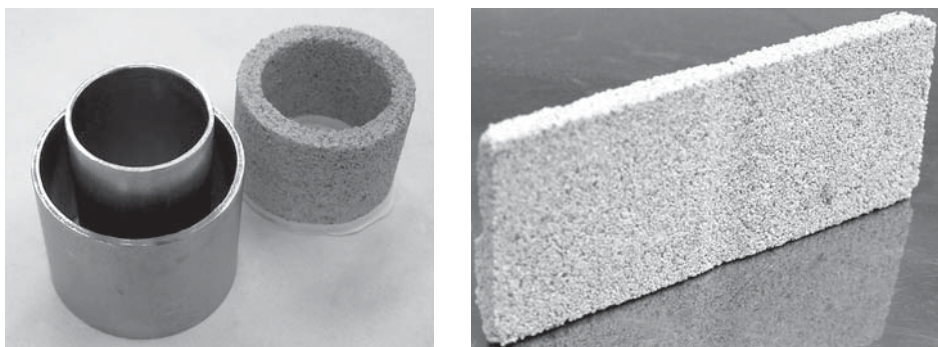


**Obrázek 196:** Princip přípravy vzorků pro zkoušení konsolidace na kvádrech

hloubka penetrace měřením rychlostí průchodu ultrazvukového signálu napříč kvádrem, kolmo na směr penetrace. Následně je kvádr rozdělen na dvě části – z jedné jsou nařezány tenké destičky o rozměrech cca 15–20 × 40 mm<sup>2</sup> pro řadu fyzikálních zkoušek a druhá je připravena pro případnou výrobu těles ke zkouškám v tlaku.

Řezání tenkých destiček umožňuje studovat také vzorky odebrané ze stávajících konstrukcí a staveb, včetně zkoušení vlivu jejich povrchové degradace zvětráváním (Drdácký et al. 2015), což je mnohem spolehlivější a má vyšší vypovídací hodnotu v popisu změn parametrů kamene než jakékoliv jiné metody. Tlakové zkoušky na horninách pro zjišťování vlivu konsolidace nejsou příliš často používány kvůli obtížím s plnou a rovnoměrnou impregnací celého objemu tělesa i jejich většinou nízké informační kapacitě.

Zkoušení konsolidačních vlivů na maltách nemůže využít výše zmíněný postup, protože spolehlivé řezání tenkých destiček je u tohoto materiálu prakticky nemožné. Pokud nechceme



**OBRÁZEK 197:** Tenkostěnné maltové vzorky pro zkoušení konsolidačních vlivů

ztratit výhodu tenkostěnného vzorku, spočívající zejména v jeho rovnoměrné a plné impregnaci, musíme vyrábět zkušební tělesa z maltových směsí jejich formováním v plastickém stavu. Tenké desky pro tahové zkoušky jsou dusány do ploché formy, tenkostěnná trubková tělesa pro tlakové zkoušky jsou vyráběna dusáním do formy ve tvaru mezikruží nebo mohou být připravena jako kvádrové bloky – zde ovšem riskujeme výše zmíněné problémy s nedokonalou impregnací (**obr. 197**).

Tenké krátké roury mohou být snadno impregnovány s využitím gravitace, jako v případě destiček, pokud je umístíme na otáčivou podporu (viz **obr. 154** v kapitole „Zpevňování omítek vápennou vodou“). Formování vzorků ze speciálních směsí umožňuje navrhnout a vyrábět zkušební tělesa z materiálů různých kvalit, imitující skutečné substráty. Například ve výše uvedené kapitole byla využita chudá maltová směs, připravená v poměru 1:9 – vápenné pojivo ku písku – (Drdácký a Slížková 2012). Taková malta pak ještě zvyšuje citlivost pozorování konsolidačních a zesilujících vlivů impregnace. U tahového vzorku může být na **obr. 197** patrné ztenčení vypuštěno kvůli zjednodušení výroby. Tělesa pro ohybové zkoušky nejsou v tomto případě potřeba, neboť kombinace vzorků zkoušených v tlaku a tahu je pro popis mechanických vlastností dostatečná.

Degradované malty nebo dokonce kámen lze modelovat i prostým zhutněním drti z agregátu o vhodném rozložení velikostních frakcí jeho zrn. Hlavní výhodou tohoto materiálu je zkrácení přípravy vzorků vyloučením času potřebného pro zrání pojiva, pokud není dusaná směs lehce zpevňována např. vápnem, dále pak jeho vysoká otevřená porozita umožňuje velmi dobrou penetraci a, podobně jako u chudé malty, velmi nízká koheze výrazně zvyšuje demonstraci konsolidačních efektů. Jedním z nejlepších příkladů využití tohoto modelového materiálu je práce Price (1984), kde je také uvedena sofistikovaná procedura aplikace konsolidační látky. Příprava těles z drti nebo ze zhutněného písku je relativně snadná a tento modelový materiál je vhodný pro rychlé zkoušení během vývoje nových konsolidačních produktů.<sup>1</sup> Nicméně zkušební tělesa jsou velmi křehká a musí se s nimi zacházet velmi šetrně při dopravě a manipulaci. Důležitým rozhodnutím je výběr stupně zhutnění suché směsi, ze které můžeme vyrobit širokou škálu modelových materiálů – od velmi křehkých až po kámen, pokud zvolíme vibrolisování. Pro zkoušení konsolidantů jsou přirozeně preferovány a užitečné materiály křehčí. Zde není třeba mít tenkostěnná zkušební tělesa a běžně se pro tlakové

<sup>1</sup> Byly např. využívány autorem pro pilotní zkoušky při vývoji produktů CaLoSiL.

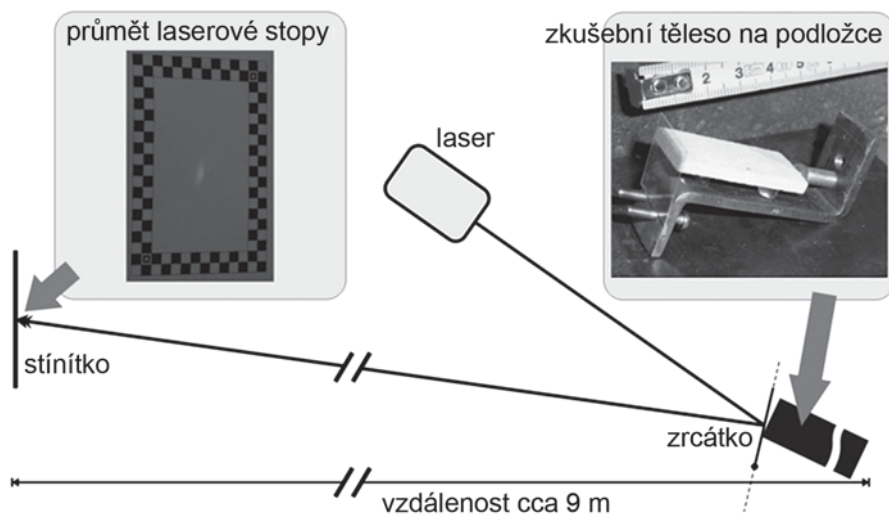
zkoušky připravují standardní krychle ( $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ ), pro ohybové zkoušky trámečky redukované velikosti ( $20 \times 20 \times 120 \text{ mm}^3$ ). Dají se vyrobit i tenké destičky pro tahové zkoušky a pro ohybové zkoušky může být využita i metoda protézování, popsána v první kapitole této knihy (Drdáček 2011).

## Laboratorní zkoušení vlivu konsolidace na kámen

Vliv konsolidace je zkoumán sekvencí testů na připravených blocích a tenkých destičkách (viz výše). Studium materiálových změn je důležité, protože významně ovlivňují kompatibilitu a trvanlivost restaurátorských zásahů. Sleduje se hloubka penetrace, teplotní a vlhkostní roztažnost – hygrická i hydrická, pevnosti materiálu, obrusnost, modul pružnosti, paropropustnost, mikrostruktura (porozita, distribuce a propojení pórů) a hustota. U historických materiálů je důležitá i změna barvy či textury na viditelném povrchu, rychlost přijímání vody i celková absorpce, úhel smáčivosti, čas potřebný k saturaci vodou i rychlost vysychání, ale tyto parametry je většinou třeba zkoušet na větším tělese, než je tenká destička. Sekvence zkoušek začíná nedestruktivními testy, mezi které patří zejména měření barevnosti, UZ měření hloubky penetrace (rychlosti průchodu UZ signálu), případně zjišťování dynamického modulu pružnosti. Na nařezaných destičkách se měří dilatační vlastnosti. Poté jsou destičky zatěžovány třibodovým ohybem do porušení zlomením v laboratorním prostředí  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $65 \text{ \% RH}$ . Během zatěžování je měřen průhyb destičky pod působící silou a z naměřených dat je vyhodnocován modul pružnosti. Zlomky destiček po zkoušce jsou využity pro měření paropropustnosti metodou suchého nebo mokrého kelímku, dále pro analýzu pórovitosti. Tento sled zkoušek zajišťuje, že jsou všechny parametry zjišťovány na identickém zkušebním tělese, což výrazně zlepšuje spolehlivost korelací a statistických analýz. Navíc data ze souboru destiček, které jsou odebrány podél hloubkového profilu, poskytují přímo údaje o hloubce penetrace a změně dopadů konsolidace na objekt směrem do hloubky od povrchu.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat hodnocení dilatačních vlastností. Pro měření teplotní roztažnosti lze využít komerční dilatometr, ale šířka destičky musí být zmenšena podle velikosti komory pro vložení vzorku, což komplikuje, až znemožňuje další výše popsany postup. Při zachování šířky destičky však můžeme použít levnou laboratorní náhradu měření teplotní roztažnosti, vyvinutou v ÚTAM (Drdáček a Slížková 2008a). Při zkoušce se měří velmi subtilní změny rozměrů, které jsou menší než nepravidelnosti tvaru i povrchu tělesa. Proto musí měření proběhnout bez manipulace se vzorkem. U některých hornin, např. u pískovců, totiž typická zrna ukotvená v matici mají průměr kolem  $0,1 \text{ mm}$ . Měřená dilatace však dosahuje řádu několika mikrometrů, takže jedinou možností měření změny délky je kontinuální sledování relativního prodloužení nebo zkrácení vzorku při změně teploty.

Změny délky malé kamenné destičky (cca  $15 \times 40 \times 3 \text{ mm}^3$ ) se měří při chladnutí z předehřátého stavu na teplotu laboratoře nebo u zkoušky hygrické dilatace ze saturovaného stavu do stavu rovnovážné vlhkosti v podmínkách laboratoře. V obou případech je zkušební těleso položeno na jednoduchou podložku, zajišťující stabilní polohu a umožňující dilataci volného konce (**obr. 198**). Změna délky je registrována jako změna polohy odrazu laserového paprsku od kyvně uloženého a pružinkami k destičce přitlačovaného zrcátka, které délková změna destičky naklání (otáčí kolem jeho podpory). Tento velmi malý pohyb je optickou pákou násoben a promítán na stínítko, kde je změna automaticky zaznamenávána periodickým



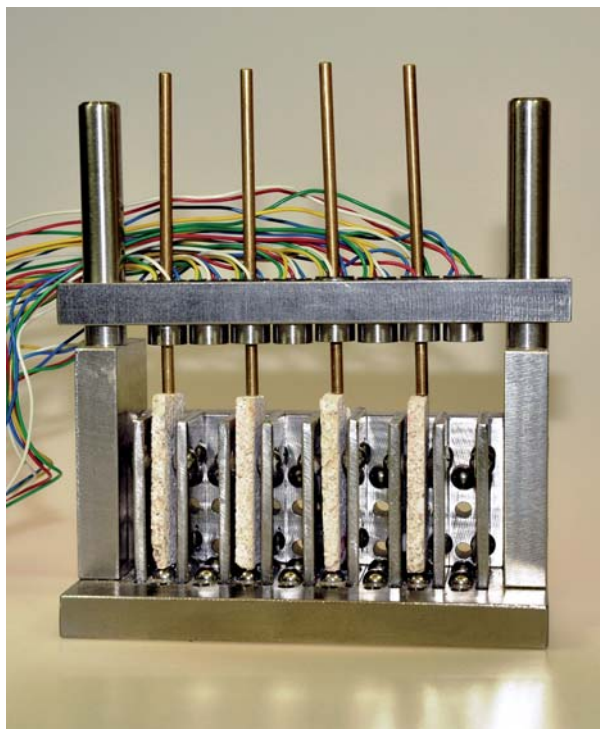
**OBRAZEK 198:** Jednoduchá laboratorní sestava pro měření teplotní a vlhkostní dilatace (návrh a obrázek J. Valach)

snímáním digitálním fotoaparátem s rozlišením jednoho pixelu, což odpovídá posunu skvrny na stínítku o velikosti 0,06 mm. Zároveň je termokamerou sledována změna teploty povrchu destičky. Při vyhodnocování jsou obě měření časově synchronizována a spojeny údaje z měření změny délky s údaji z teplotních (vlhkostních) záznamů pomocí speciálně vyvinutého softwarového nástroje. Poloha laserového odrazu na stínítku je definována těžištěm světlých bodů, vážených jejich intenzitou. Teplotní změna je typicky zaznamenávána v intervalech 10 sekund po dobu deseti minut, což odpovídá teplotnímu intervalu 20 až 80 °C. Ze snímaných termogramů jsou vypočteny průměrné teploty, protože během přirozeného chladnutí vzniká na skloněné destičce teplotní gradient s rozsahem několika stupňů Celsia.

Pro měření vlhkostních dilatačních parametrů je účinnější využít přímého měření elektrickými snímači deformací na vzorcích, umístěných v nádobě s možností zaplavení vodou nebo udržování definované relativní vlhkosti vzduchu. Jedno takové zařízení, které umožňuje testovat až 8 destiček najednou, znázorňuje **obr. 199**. Zařízení vyvinul Ing. P. Zíma a umožňuje zkoušet tělesa různých tvarů, protože přepážky mezi vzorky jsou vyjímatelné a posuvný příčník, nesoucí LVDT snímače, je navržen pro délky od min. 25 do 100 mm. Změnu délky měří LVDT snímače s rozsahem do 1 mm a proces bobtnání je spolu s časem ukládán do paměti měřicí ústředny.

Měření je velmi jemné, a když je nádoba s rámem zaplavována, vznikají vztlakové síly, které mohou pohnout destičkami a ovlivnit měření. Proto se doporučuje fixovat bodově destičky ke dnu nádoby a pomalu napouštět nádobu vodou odspodu nahoru.

Po zkouškách dilatace mohou být zahájeny destruktivní testy. Na malých vzorcích ( $15 \times 40\text{--}50 \times 3,7 \text{ mm}^3$ ) se typicky zkouší ohybová pevnost a Youngův modul pružnosti. Destičky jsou řezány po vyžrání konsolidantu postupně od povrchu dovnitř vzorku. Vzdálenosti řezů jsou praktické v roztečích 5 mm, což obvykle dává destičky přibližně 3,7 mm tlusté (prořez 1,3 mm). Tělesa jsou zkoušena většinou třífázovým ohybem po 24 hodinách vysoušení



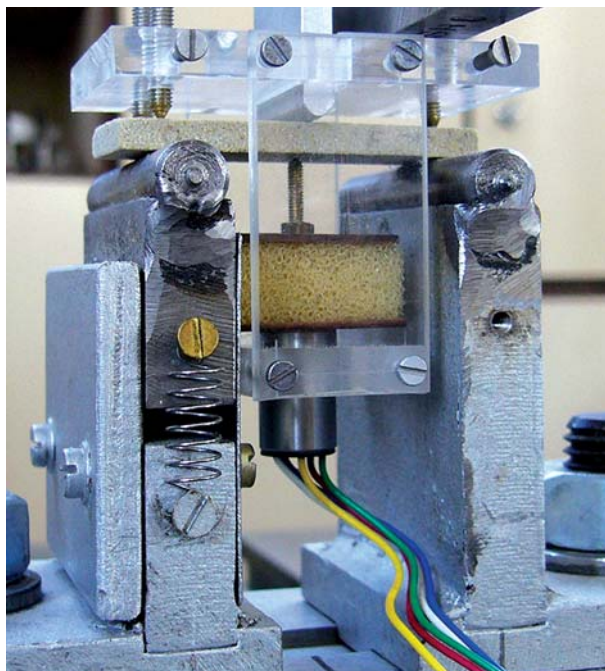
**OBRAZEK 199:** Rám pro současné měření hydrického/hygrického dilatačního koeficientu až u osmi vzorků (Foto P. Zíma)

při teplotě 60 °C a po 12 hodinách temperování v laboratorním prostředí. Během zatěžování se měří průhyb pod břemenem pomocí snímače LVDT a ukládá se do měřicí ústředny k dalšímu zpracování (**obr. 200**).

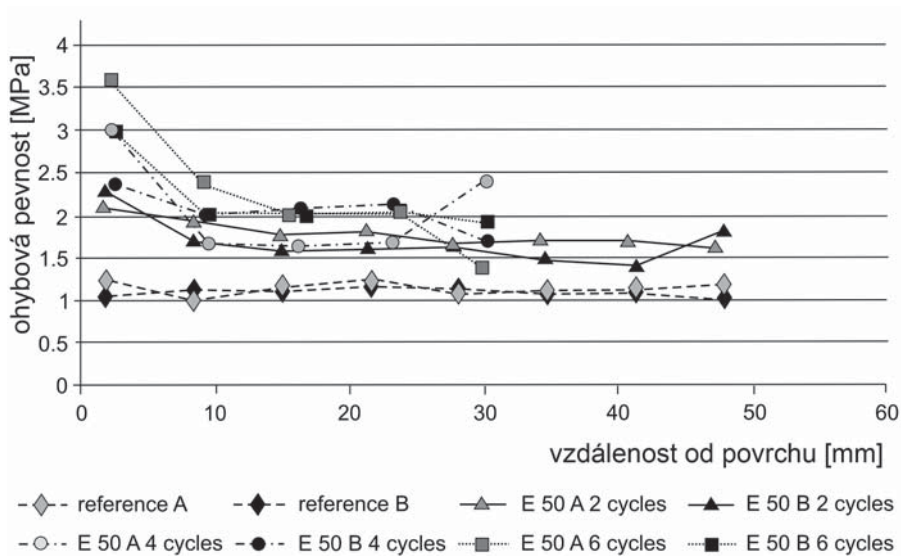
Typické výsledky zkoušek ukazuje **obr. 201**, kde je dobře patrný nárůst ohybové pevnosti maastrichtského vápence po aplikaci vápenného nanosolu CaLoSiL E50 (Slížková a Frankeová 2012). Hloubka penetrace, i když nepravidelná, a změna ohybové pevnosti jsou dobře patrné. Maastrichtský kámen je používán jako vhodný materiál pro testování kvůli své nízké pevnosti a vysoké porozitě. Hloubka penetrace může být zjišťována i pomocí jiných materiálových charakteristik, např. měřením koheze při zkoušce obrusem (Sassoni et al. 2015).

Poloviny tenkých desek, vzniklé zlomením při ohybové zkoušce, jsou dostatečně dlouhé pro zkoušení paropropustnosti, např. užitím metody mokrého kelímku v řízených laboratorních podmínkách (45 % RH a 25 °C). Při této metodě se měří ztráta vody výparem v uzavřeném kelímku se 100% relativní vlhkostí průchodem přes membránu, vytvořenou tenkou kamennou deskou. Paropropustnost se pak vypočítá ze ztráty hmotnosti a ze známé velikosti plochy kamenného víčka (**obr. 202**). Je možné samozřejmě použít i variantu suchého kelímku.

Další nedestruktivní i destruktivní zkoušky, např. měření porozity, lze provádět na zlomených částech tenkých destiček. Výše popsaný sled zkoušek na stejném vzorku snižuje při korelacích chyby plynoucí z velké rozdílnosti materiálových charakteristik hornin, které jsou značně nehomogenní a jejich vlastnosti se mohou měnit i v relativně malém objemu.

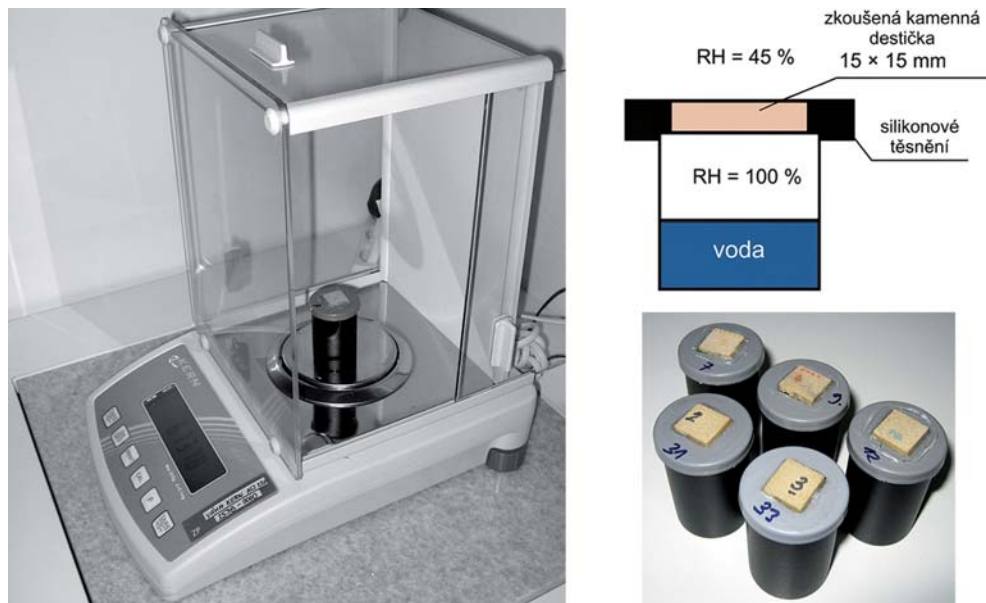


**OBRÁZEK 200:** *Uspořádání ohybové zkoušky tenké kamenné destičky. Přípravek z plexiskla je držákem senzoru pro měření průhybu.*



**OBRÁZEK 201:** *Ohybová pevnost tenkých desek z maastrichtského vápence – neošetřené vzorky (označené jako referenční) a ošetřené napouštěním nanosolu CaLoSiL E50 aplikací ve 2, 4 nebo 6 opakováních (cyklech)*





**OBRÁZEK 202:** Princip a uspořádání zkoušky paropropustnosti pomocí metody mokrého kelímku (jako kelímky jsou využity použité obaly z kinofilmů, do jejichž víček jsou vyříznuta okénka pro vlepění kamenných čtvercových destiček)

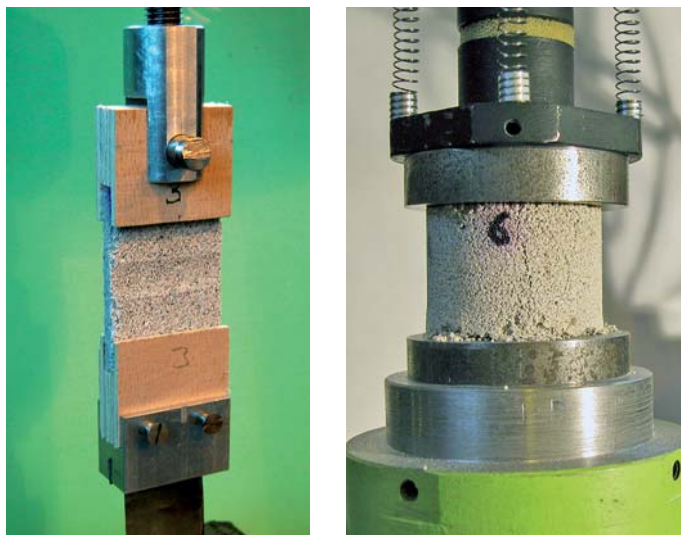
## Laboratorní zkoušky konsolidačních vlivů na maltách

Výhody zkoušení tenkých těles potvrzené při testování hornin podporovaly myšlenku přijetí podobných postupů i pro zkoušení malt. Základní motivací byly dále negativní zkušenosti Clifforda Price (1984), získané při zkouškách účinnosti vápenné vody a hovořící o špatně měřitelném efektu. Proto autor navrhl tenkostěnné vzorky, provedené z málo pevné maltové směsi v očekávání eliminace problémů s plnou a rovnoměrnou penetrací a zároveň zvýšení měřitelnosti efektu konsolidace. Tato očekávání se naplnila, a proto dnes doporučujeme testovat konsolidační látky na tenkých deskách při tahovém zatížení a na krátkých tenkostěnných rourách při tlakovém zatížení (**obr. 203**).

Destičky pro tahové zkoušky jsou opatřeny koncovkami z překližky pro možnost upevnění speciálních čelistí, umožňujících rychlou výměnu a zároveň zajišťujících perfektní souosost systému, která je nutná pro vyloučení vzniku excentricity zatížení a parazitních ohybových momentů.

Krátké tenkostěnné maltové trubky jsou zatěžovány ve směru své osy tlakem. Pro ověření metodiky byly dosažené tlakové pevnosti porovnány s pevnostmi získanými na souboru maltových kvádrů ze stejně chudé malty (písek:pojivo = 9:1). Průměrná tlaková pevnost neošetřených maltových rour byla 0,260 MPa, zatímco měřené pevnosti na nízkých kvádrech dosahovaly průměrné hodnoty 0,549 MPa, což odpovídá standardní krychlené pevnosti 0,365 MPa po korekci na nízkou štiřlost vzorku (Drďáček 2011).

<sup>1</sup> Těsnost použitého lepidla byla zkoušena vlepěním kontrolní hliníkové destičky a měřením ve stejném režimu jako ostatní vzorky.

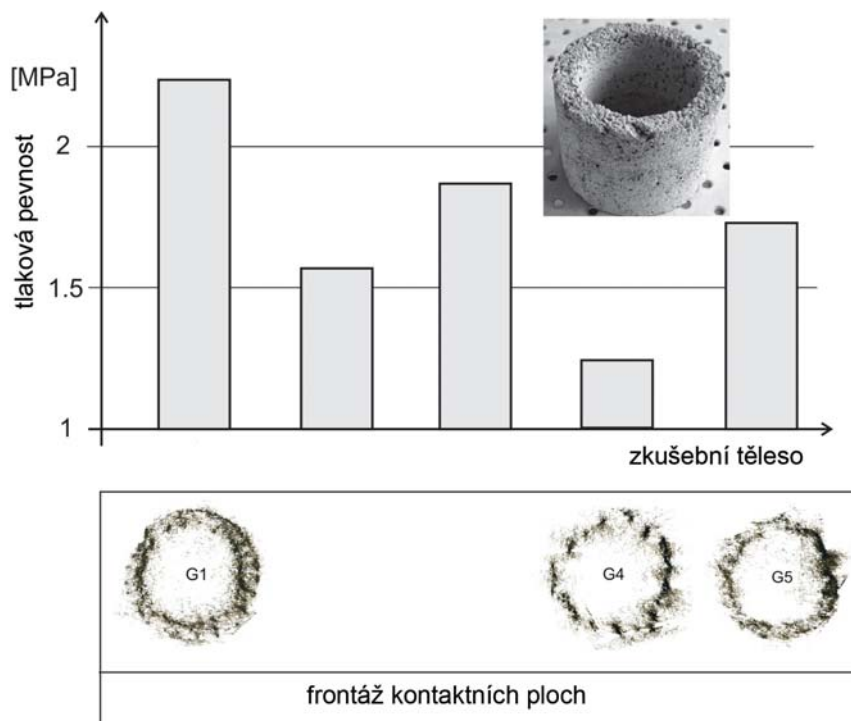


**OBRAZEK 203:** *Uspořádání tahové (vlevo) a tlakové zkoušky (vpravo) (Foto M. Drdácý, P. Zíma)*

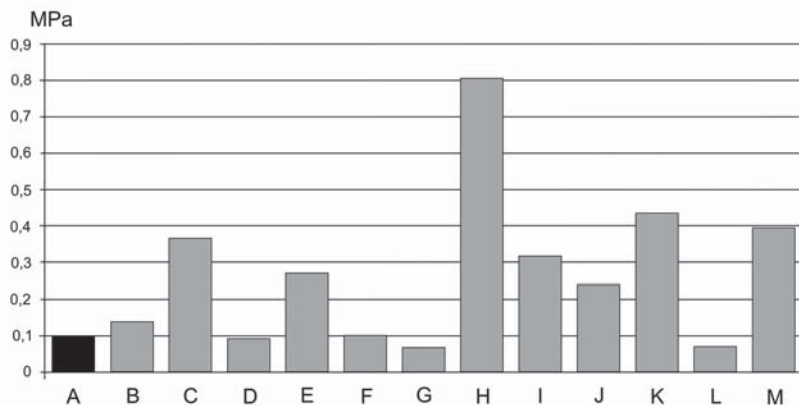
Tento model chudé malty nebyl navržen, aby imitoval rozpadající se degradovanou maltu, protože zkušební tělesa byla velmi dobře zhutněna, což se o rozpadavé maltě říci nedá. „Nakypření“ při pískovatění malt je vlastnost, která se běžně nezkoumá, přestože je jednou ze základních podmínek úspěšnosti konsolidace impregnací. Nicméně i tato malta je velmi citlivá na způsob ošetření při zrání, které se obvykle provádí šetrným postřikem destilovanou vodou. U tenkostěnných trubek postřik může způsobit erozi kontaktní plochy pro přenos zatížení, což se odráží v dosažených pevnostech (**obr. 204**). Tento vliv byl detailně studován pomocí techniky otisku kontaktní plochy a porovnáním imperfekcí s dosažovanými pevnostmi. Podle očekávání bylo nejvyšších pevností dosahováno u vzorků s dokonalou kontaktní plochou. Nicméně zarovnávaní dosedacích ploch, tzv. „koncevání“, nezlepšilo výrazně variabilitu výsledků zkoušek s nižšími pevnostmi, i když absolutní hodnoty pevností se u koncevaných těles lehce zvýšily. Proto není nutné koncevání provádět, neboť podstava zůstává perfektní i při postřiku, který by měl být velmi jemný.

Výše uvedená metodika byla verifikována i pro jiné materiály včetně hliněných malt. Při výzkumu nanovápna byla metodika využita pro komparativní testy vlivu různých konsolidačních prostředků na vápenné nebo hliněné malty (Drdácý a Slížková 2012, Slížková et al. 2014). Jeden ilustrativní příklad je uveden na **obr. 205**.

Využití ohybových zkoušek pro studium efektivnosti konsolidačních zásahů není příliš užitečné, zejména pokud se používají standardní velikosti ohýbaných trámečků. Pro zlepšení dosažení použitelných výsledků by neměla velikost trámečku překročit průřez  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  a délka by v takovém případě měla dosahovat min. 120 mm.



**Obrázek 204:** Vliv kvality kontaktních ploch pro přenos tlakové síly na dosažené pevnosti



A – referenční těleso (ve stáří těles zkušebných 50 cyklů napouštění, B – vápenná voda – napouštění s vysycháním (119 cyklů), C – barytová voda - napouštění s vysycháním (53 cyklů), D – síranová voda – napouštění do sucha (53 cyklů), E – oxalát 5% s vysycháním (53 cyklů), F – oxalát 2,5% s vysycháním (36 cyklů), G – vápenná voda + metakaolin (53 cyklů), H – CaLoSiL 25 (40 cyklů), I – CaLoSiL 15 (40 cyklů), J – SiO<sub>2</sub> + CaLoSiL 25 (3 + 6 cyklů), K – etylsilikát NT40 (2 cykly), L – SiO<sub>2</sub> (5 cyklů), M – SiO<sub>2</sub> + vápenná voda 53 cyklů)

**OBRÁZEK 205:** Porovnání vlivů různých konsolidačních zásahů na tahovou pevnost chudé vápenné malty (vápno:písek – 1:9)



**OBRÁZEK 206:** *Uspořádání zkoušky ohybem na protézovaném vzorku (vlevo), tlakové zkoušky (střed) a tahové zkoušky (vpravo) na tělesech ze zhutněného písku nebo kamenné drti (Foto M. Drdáčký, P. Zíma)*

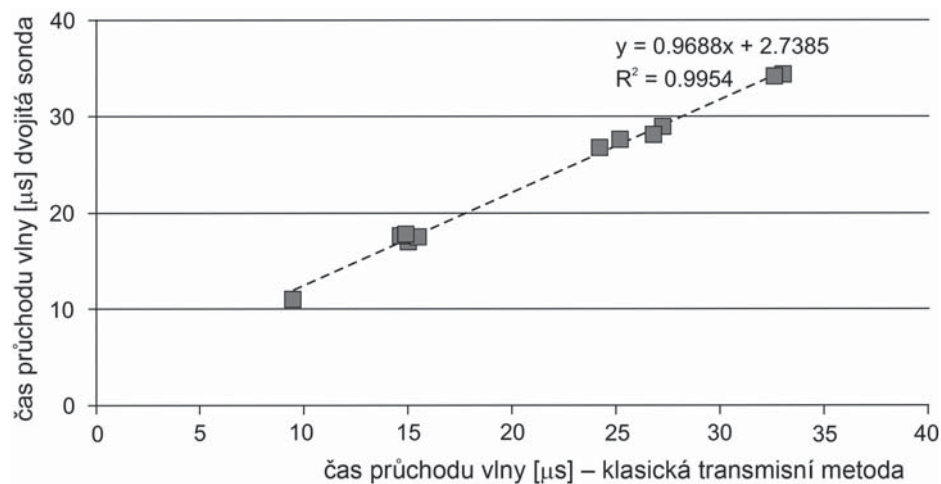
### Laboratorní zkoušky konsolidace na zhutněném písku nebo drti

Jak již bylo napsáno výše, jsou zhutněný písek nebo kamenná drť výhodným modelovým materiálem. Na vzorcích z nich vyrobených mohou být prováděny téměř všechny typy zkoušek. Nicméně materiál je velmi křehký a obtížně se z něj vyrábí standardní trámečky. Proto jsou pro ohybové zkoušky preferovány dlouhé trámečky o průřezu  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ , které jsou připraveny technikou protézování. Střední část je ze zhutněného písku a přilepené konce tvoří dřevěné protézy (**obr. 206**). Nekonsolidovaný materiál často nevydrží manipulaci a vzorky se zlomí před vyzkoušením. Zde může technika protézování zachránit takové zlomky původních zkušebních těles pro další zkoušky. Pro tlakové zkoušky se užívají standardní zkušební krychle používané pro zkoušení malt o rozměrech  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  (**obr. 206**). Tělesa ze zhutněného písku mohou být zkoušena i v tahu při použití destiček obvykle 10 mm tlustých a 40 mm širokých.

Zhutněný písek nebo drť díky svému dobrému zhutnění při nízké kohezi vykazuje nejzřetelnější konsolidační efekty, které velmi dobře korelují s kvalitou konsolidační látky. Jako příklad uveďme výsledky zkoušek na tělesech připravených ze zhutněné směsi písku, mramorového prachu a vody. Tento modelový materiál velmi dobře ukázal kapacitu konsolidačního efektu nanovápenných prostředků typu CaLoSiL. Výchozí hodnoty pevnosti v tlaku jsou 0,12 MPa, v ohybu a tahu pouze průměrně 0,07 MPa. Impregnační nanovápnem byly tyto pevnosti výrazně zvýšeny a dosáhly následujících hodnot. Tlaková pevnost se zvýšila s přípravkem CaLoSiL IP25 po 5 napouštěcích cyklech o +1717 % a po deseti cyklech o +3994 %, s CaLoSiL E25 po 5 cyklech o +2875 % a po 10 cyklech o +4695 %. Zvýšení pevností v ohybu představovalo pro CaLoSiL IP25 po 5 napouštěcích cyklech o +507 % a po deseti cyklech o +692 %, s CaLoSiL E25 po 5 cyklech o +635 % a po 10 cyklech o +1041 %. Konsolidační přípravky zlepšily i pevnosti v tahu pro CaLoSiL IP25

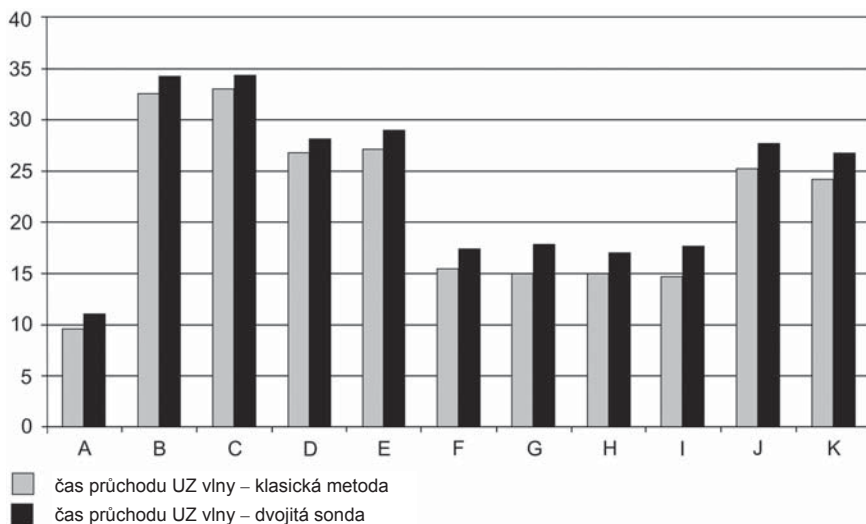


**OBRÁZEK 207:** Přenosná ultrazvuková dvojitá sonda pro měření materiálových vlastností v hloubkovém profilu a hodnocení hloubky penetrace v povrchové vrstvě mezi dvěma vyvrtanými otvory (Foto J. Valach)



**OBRÁZEK 208:** Porovnání časů průchodu UZ vlny [μs] získaných klasickou technikou transmisního modu UZ měření a dvojitou sondou pro pískovec (aditivní časová konstanta – 2,7385 μs – je specifická pro danou sondu a může být snadno odečtena z výsledků pro získání správných dat)

po 5 napouštěcích cyklech o +1270 % a po deseti cyklech o +2782 %, s CaLoSiL E25 po 5 cyklech o +1348 % a po 10 cyklech o +3025 %. V daném případě výsledky ukazují, že nano vápno CaLoSiL v ethanolu dává lepší zesílení než CaLoSiL v isopropanolu.



**Obrázek 209:** Porovnání časů průchodu UZ vlny [μs] získaných klasickou technikou transmisního modu UZ měření a dvojitou sondou pro různé materiály: A – ocelový válec; B – smrkový hranol – napříč vláken; C – smrkový hranol – napříč vláken; D – suchá opuka; E – vodou nasycená opuka; F – suchý pískovec; G – vodou nasycený pískovec; H – suchý pískovec; I – vodou nasycený pískovec; J – suchá cihla; K – vodou nasycená cihla. (Aditivní časová konstanta – 2,7385 μs – z předchozího obrázku vysvětluje časové rozdíly)

## Terénní zkoušky konsolidačních dopadů na kámen a maltu

Pro zkoušení konsolidačních efektů na reálných konstrukcích a stavbách lze používat pouze nedestruktivní nebo velmi šetrně destruktivní (polo-destruktivní) metody. Obvykle se požaduje ukázat a dokázat konsolidační efekt kvantitativně a zde se neobejdeme bez některého typu zkoušení mechanických vlastností. Metody terénních zkoušek popsané v některé z předchozích kapitol, zejména odlučovací test (Scotch tape), patří mezi techniky dobře použitelné a jejich popis zde neopakujeme.

Jedna speciální metoda byla vyvinuta firmou Geotron ve spolupráci s autory v rámci projektu Stonecore pro ultrazvukové měření průchozího signálu podél hloubkového profilu (**obr. 207**). Přístroj tvoří dvě sondy – vysílač ultrazvukového signálu a přijímač – které se vkládají do otvorů o průměru 20 mm, vyvrtaných do povrchové vrstvy zkoumaného prvku ve vzdálenosti do 100 mm od sebe a hloubky 60 mm. Zařízení je navrženo tak, že umožňuje reprodukovatelná vkládání sond do vyvrtaných otvorů, aby se daly provádět série měření pro výzkum materiálových změn.

Zařízení je přenosné a plně kompatibilní s ultrazvukovými laboratorními přístroji, takže operátor může využívat všech dříve získaných znalostí a dovedností při vyhodnocování dat. Přístroj je robustní a výborně přizpůsoben obtížným podmínkám práce v terénu. Poskytuje dříve nedosažitelnou možnost měřit v terénu na skutečných objektech vlastnosti materiálů v průchozím modu ultrazvukového signálu do několika centimetrů pod povrch. Studie provedená J. Valachem potvrdila vynikající soulad mezi výsledky, získanými klasickým UZ měřením a novým přístrojem na pískovci (**obr. 208**) i na dalších typických stavebních materiálech (**obr. 209**).

Kapitola ukazuje základní možnosti spolehlivého a dostatečně komplexního zkoušení vlivů konsolidačních látek, které by mělo být provedeno při zavádění nových produktů na trh a je užitečné i pro výběr optimálního konzervačního zásahu. V práci restaurátora se vyskytuje řada úloh, které si žádají návrh dalších speciálních postupů, které činí tuto oblast památkové vědy živou a trvale zajímavou.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“ a v rámci společného evropského projektu STONECORE.

## Použitá literatura

- Bourges, A. *Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment*. Dissertation. München: Fakultät für Geowissenschaften der Ludwigs-Maximilians-Universität, 2006.
- Drdáček, M. Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*. 2011, 5(4-5), 383-394.  
<http://dx.doi.org/10.1080/15583051003717788>
- Drdáček, M., D. Frankeová a Z. Slížková. Ancient sandstone condition assessment in relation to degradation, cleaning and consolidation phenomena. In: *EGU General Assembly 2015*. Wien: European Geoscience Union, 2015.
- Drdáček, M. a Z. Slížková. Lime-water consolidation effects on poor lime mortars. *APT Bulletin*. 2012, 43(1), 31-36.
- Drdáček, M. a Z. Slížková. Mechanical characteristics of historical mortars from tests on small-sample non-standard specimens. *Material Science and Applied Chemistry (Materiálzinātne un lietišķā ķīmija)*. 2008, 17, 20–29. ISSN 1407-7353.
- Drdáček, M. F. a Z. Slížková. Performance of glauconitic sandstone treated with ethylsilicate consolidation agents. In: Lukaszewicz, J. a P. Niemcewicz (eds.). *Proceedings of the 11th International Congress on deterioration and conservation of stone*. Torun: Nicolaus Copernicus University Press, 2008, 1205-1212.
- Frühwirt, T. *Biaxial flexural strength test device* [online]. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg [cit. 27.04.2015].  
Dostupné z: <https://tu-freiberg.de/fakult3/gt/feme/labor/la-weit.en.html>
- NORMAL 20/85. *Conservazione dei materiali lapidei: manutenzione ordinaria e straordinaria*. Rome: Istituto Centrale per il Restauro (ICR), 1985.
- Price, C. A.: The consolidation of limestone using a lime poultice and limewater. In: *Studies in Conservation*. 1984, 29(Supp.1) 160-162.  
<http://dx.doi.org/10.1179/sic.1984.29.Supplement-1.160>
- Sasse, H. R. a R. Sneathlage. Evaluation of stone consolidation treatments. *Science and Technology for Cultural Heritage*, 1996, 5(1), 85-92.
- Sassoni E., G. Graziani a E. Franzoni. An innovative phosphate-based consolidant for limestone. Part 1: Effectiveness and compatibility in comparison with ethyl silicate. *Construction and Building Materials*. 2016, 102(1), 918-930.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.026>

- Slížková, Z., M. Drdácý a A. Viani. Consolidation of weak lime mortars by means of saturated solution of calcium hydroxide or barium hydroxide. *Journal of Cultural Heritage*. 2015, 16(4), 452-460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.003>
- Slížková Z. a D. Frankeová. Consolidation of porous limestone with nanolime laboratory study. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. New York: Columbia University, 2012. <http://iscs.icomos.org/pdf-files/NewYorkConf/slizfran.pdf>
- Snethlage, R. a M. Pfanner. *Leitfaden Steinkonservierung*. Stuttgart: Fraunhofer, 2013.
- Tabasso, L. M. a S. Simon. Testing methods and criteria for the selection/evaluation of products for the conservation of porous building materials. *Reviews in Conservation*. 2006, 7, 67-82.
- Wittmann, F. H. a P. Prim. Mesures de l'effet consolidant d'un produit de traitement. *Matériaux et Constructions*. 1983, 16(4), 235-242. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02473688>