

Měření podpovrchové soudržnosti historických materiálů

Miloš Drdácý

Zkoušení koheze historických povrchů hornin a omítek trpí nedostatkem vhodných nedestrukčních metod. Přitom se jedná o velmi důležitou charakteristiku nezbytnou pro posouzení rozsahu a intenzity degradace povrchu stejně jako posouzení efektivnosti a kvality konsolidačního zásahu na zchátralém povrchu.

Mělká podpovrchová koheze omítek a hornin může být spolehlivě měřena pomocí lepicí pásky (v anglické terminologii tzv. peeling test nebo Scotch tape test¹). Metoda byla původně navržena a užívána pro zkoušení soudržnosti nátěrových vrstev s podkladem. Pro tento účel je definována jako *metoda pro hodnocení adheze povrchové úpravy k podkladu. Na přitlačení citlivá lepicí páska je přiložena na povrchovou vrstvu, která je křížem nařezána do obrazce mřížky*². Adheze je vyhovující, pokud při odstranění pásky nedošlo k odloučení částí povrchové vrstvy³.

Do oboru restaurování a konzervace byla metoda zavedena pravděpodobně poprvé pro zkoušení kohezní kvality historických materiálů, zejména malt a hornin, P. Morou a G. Torracou (1965). Nicméně po dlouhá léta nebyla aplikace metody podepřena žádnou normou nebo ověřeným návodem k užívání v památkové péči. Byla aplikována bez potřebných znalostí a porozumění, což vedlo k měřením, která nebyla srovnatelná, reprodukovatelná a spolehlivá, v mnoha případech i s nesprávnými výsledky. Proto byl proveden výzkum⁴ s cílem stanovit meze pro aplikaci spolehlivého postupu měření a navrhnout standardní protokol pro zkoušení charakteristické soudržnosti křehkých a kvazikřehkých materiálů, hlavně kamene (Drdácý et al. 2012) a malt (Drdácý et al. 2015). V citované publikaci (Drdácý et al. 2012) je i vyčerpávající rešerše k tématu s uvedením řady variantních aplikací, které používali jednotliví autoři.

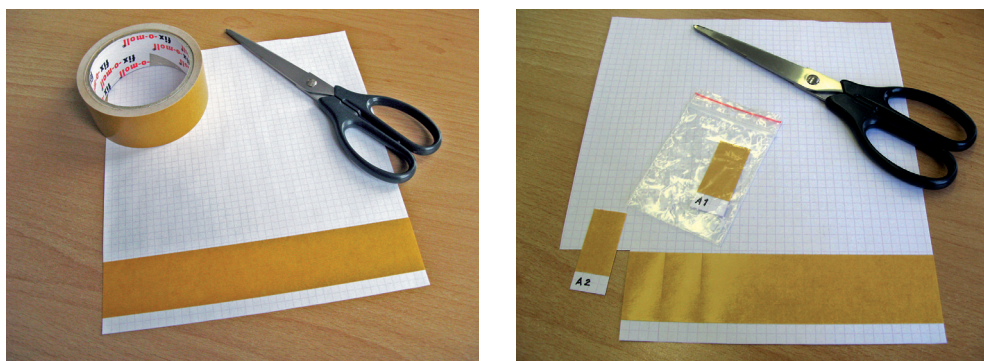
Protokol navržený a používaný v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR odstraňuje především nedostatek nesprávnosti jediného měření, které nestačí pro zjištění skutečné podpovrchové soudržnosti. Jediné měření je zkresleno řadou faktorů a nevypovídá téměř nic o skutečné soudržnosti a zejména o její změně po aplikaci konsolidačního zásahu. Množství

¹ Pozor na záměnu s termínem „tape test“, který má specifický význam v lékařství.

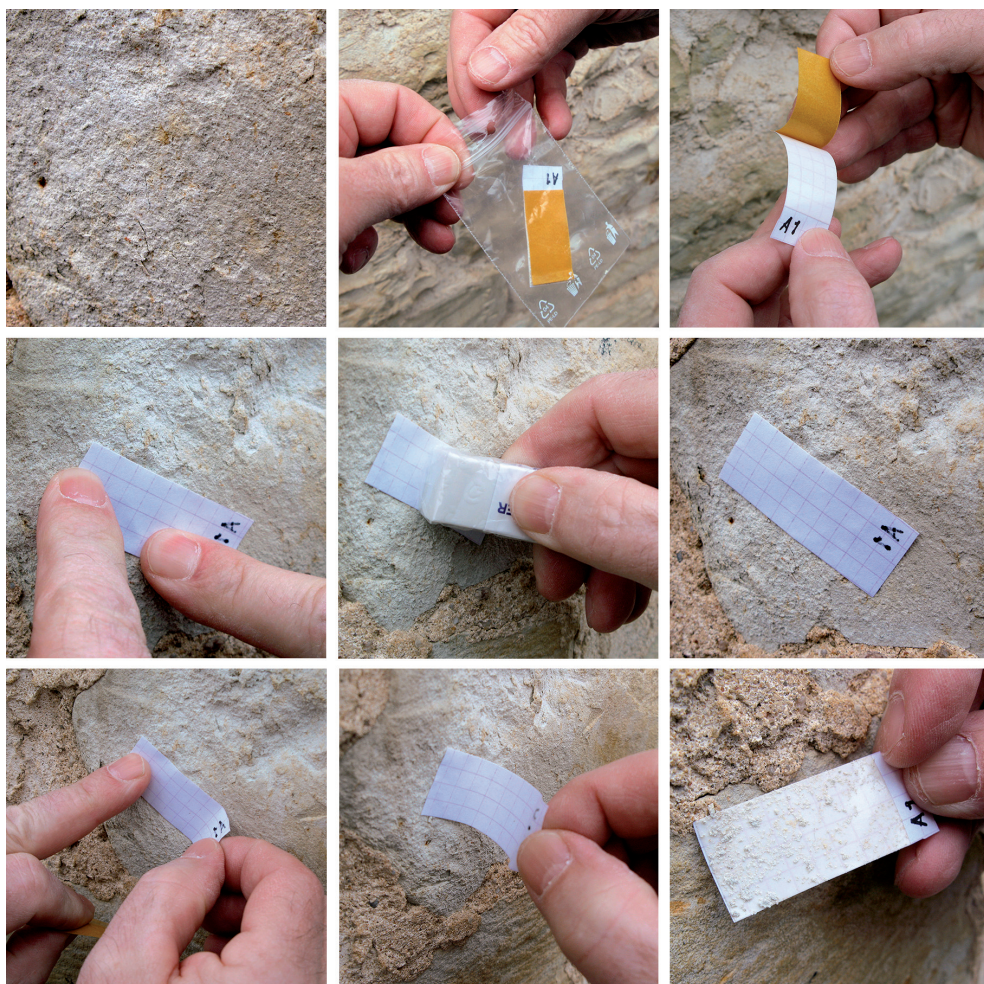
² Nařezání se nepoužívá u povrchů bez povrchové vrstvy, např. u kamene a malt.

³ Definice <http://composite.about.com/library/glossary/s/bldef-s4726.htm> Copyright ©1989 CRC Press LLC. All rights reserved.

⁴ SME-cílený společný výzkumný projekt „Stone conservation for refurbishment of buildings“, podpořený grantem No. 213651 v rámci EC 7th Framework Programme, koordinovaný Prof. Dr. Geraldem Ziegenbalgem, IBZ Freiberg, Germany.



OBRÁZEK 31: Příprava vzorkovacích pásek 20 × 50mm pro měření v terénu (Drdácký et al. 2012)



OBRÁZEK 32: Postup aplikace metody lepicí pásky na opukovou kamennou zeď – jednotlivé kroky bez opětovného pokrytí lepicí vrstvy ochrannou fólií a vložení zpět do plastového sáčku

odloučené hmoty z povrchu je totiž silně ovlivněno charakterem degradace okolí povrchu směrem do hloubky a historií dotýkání se povrchu při konsolidaci či při prostém čištění povrchu ometáním. Každým dotykem se totiž odloučí menší a menší množství materiálu, takže po několika dotycích se dostaneme na úroveň skutečné podpovrchové soudržnosti, což může být chybně interpretováno jako zdánlivý konsolidační efekt. Proto je navrženo aplikovat odlučovací zkoušku lepicí páskou ve sledu opakovaných měření na stejném místě tak dlouho, až se množství odlučované hmoty ustálí nebo kolísá kolem konstantní průměrné hodnoty. Pro dosažení tohoto stavu není v praktické situaci potřeba více než deseti měření, obvykle stačí i méně.

Výběr techniky měření závisí na tom, zda je možno měřit množství odloučené hmoty přímo v terénu nebo jsou vzorkovací pásky převáženy do laboratoře a tam zkoumány a vyhodnocovány. Preferujeme druhý případ, při kterém je ovšem třeba vyřešit problém bezpečného transportu pásky s nalepeným materiálem z terénu do laboratoře. Vlastní měření je možno provádět použitím dvoustranné lepicí pásky, ze které se vyrobí vzorkovače nalepením pásky nechráněnou vrstvou na papírovou podložku a dopravují se v plastovém sáčku. Použití v terénu je popsáno níže. Nebo lze provádět měření pomocí jednostranné lepicí pásky, pak je třeba pro přepravu použitých pásek zajistit přepravní box (viz níže).

Ideální vzorkovač lze připravit z dvoustranné lepicí pásky 40 mm šířky, kterou nalepíme na čtverečkový papír a následně nastříháme na pásky 10–20 mm široké a 50 mm dlouhé (**obr. 31**). Přesah papíru se použije pro číslování vzorkovačů. Vzorkovače očíslováme a vložíme do plastových uzavíratelných sáčků. Sáček s vzorkovačem zvážíme na laboratorních váhách s citlivostí 0,1 mg a hodnotu zapíšeme do připravené tabulky.

Při použití jednostranné lepicí pásky tato příprava odpadá, neboť pásku stříháme přímo v terénu z cívky po odstranění nepoužitelných dvou kompletních závitů před začátkem série měření v terénu. Pásku z cívky odvineme plynulým tahem bez cukání a pak ustříhneme na potřebnou délku. Zde se používají delší pásky (více než cca 100 mm) kvůli snadnější přepravě do laboratoře.

Pro vlastní měření je vhodné vybrat na zkoumaném povrchu místo bez hrubých vad a nedokonalostí. Povrch by měl být přirozeně suchý (bez vody v kapalně formě) a reprezentující zkoušený materiál, tj. přiměřeně čistý. Měření může být ovlivněno extrémní relativní vlhkostí a teploty, neboť plastová páska i lepidlo jsou obvykle citlivé na tyto podmínky.

V dalším kroku nalepíme pásku na povrch. U vzorkovače z dvojstranné lepicí pásky nejdříve vyjmeme vzorkovač z plastového sáčku, odstraníme ochrannou fólii z lepidivé vrstvy a uschováme si ji pro opětovnou adjustaci po sejmutí pásky z povrchu. Při použití jednostranné pásky prostě nalepíme ustříženou pásku na povrch.

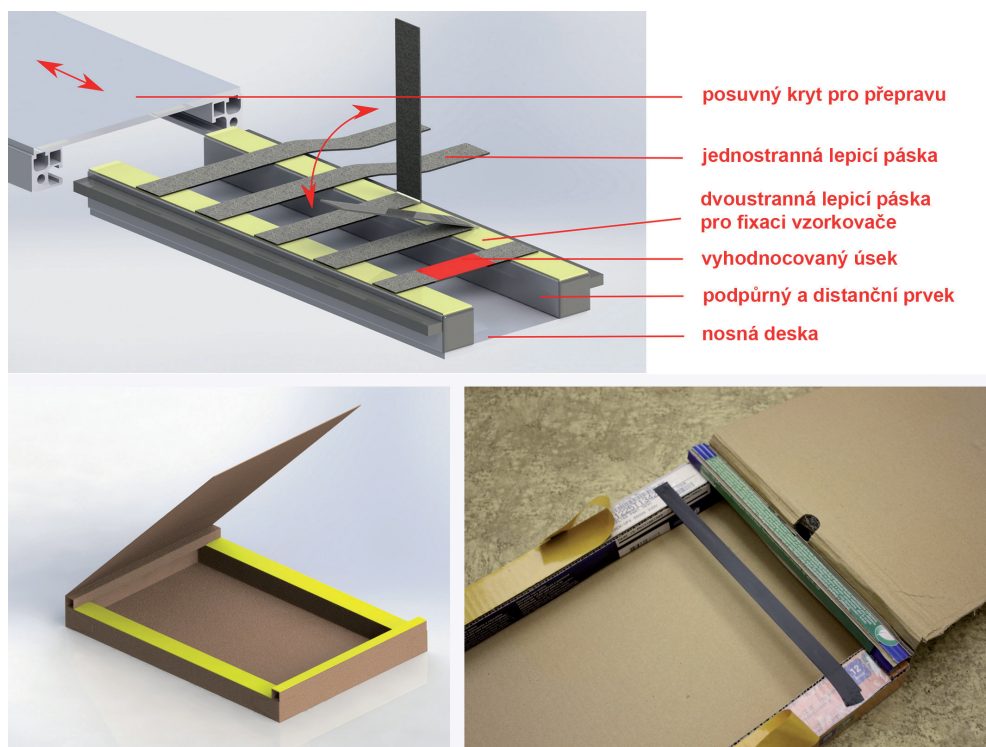
Přihladíme pásku prstem nebo měkkou gumou v celofánovém obalu k povrchu.

Přibližně po 90 vteřinách po nalepení můžeme pásku odlepit uchopením za volný konec papíru a plynulým tažením (bez cukání) rychlostí cca 10 mm/s a v ideálním sklonu odtažené části pásky kolmo k povrchu.

Nasadíme zpět na lepidlou vrstvu s odloučeným materiálem ochrannou fólii, vložíme do plastového sáčku a uzavřeme zip. Nyní je vzorkovač připraven k transportu do laboratoře, kde je pak zvážen. Celý postup je názorně zobrazen na **obr. 32**.

Měření se opakuje desetkrát na stejném místě.

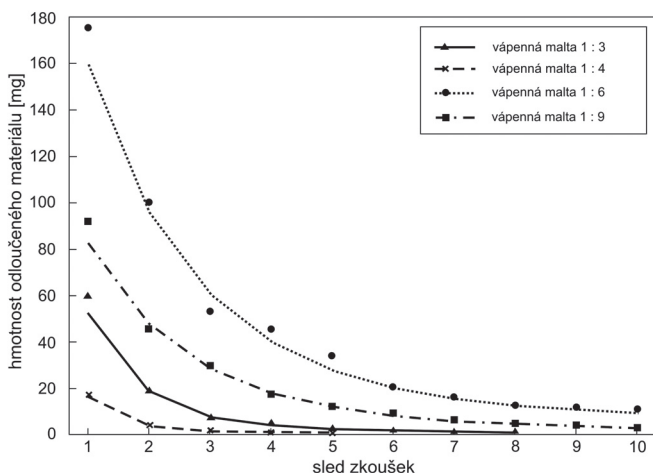
Celá procedura se pak opakuje na dalších místech zkoumaného povrchu. Počet zkoušených míst závisí na kvalitě povrchu a jeho proměnlivosti v celé vyšetřované ploše. Obvykle stačí vyzkoušet soudržnost na třech místech.



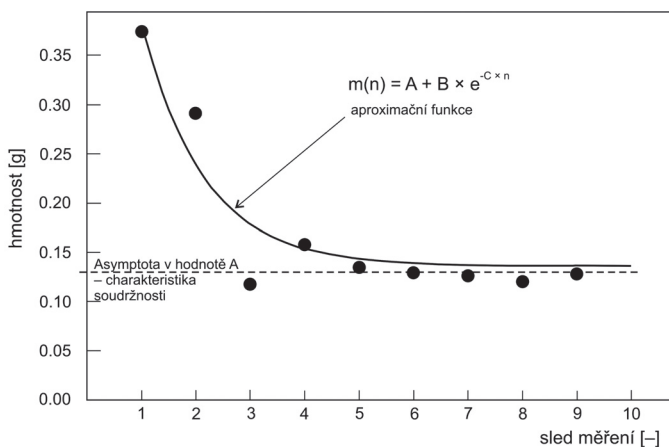
OBRÁZEK 33: Přepravní box z aluminiových profilů pro jednostranné dlouhé pásky (vlevo nahoře) a cenově výhodnější varianta ze skládané papírové lepenky (dole) – vizualizace (vlevo) a funkční model (vpravo), návrh Tomáš Fíla a Miloš Drdácký (Drdácký a Slížková 2015)

Při použití jednostranné pásky se páska po sejmutí přeloží na polovinu tak, aby lepi-
vá vrstva s odloučeným materiálem zůstala po přeložení uvnitř a pro přepravu do laborato-
ře se umístí do speciálního přepravního boxu (**obr. 33**). Z přeložené pásky se pak v laborato-
ři odstříhne přesná délka požadovaná pro vyhodnocení. Jednostrannou pásku není třeba vážit
před aplikací, neboť je vyráběna se zanedbatelnými rozdíly v tloušťce a hmotnosti vzhledem
k hmotnosti odloučeného materiálu. Toto zjednodušení podstatně zrychluje měření a činí me-
todu více přátelskou pro aplikace, než výše uvedené použití dvojstranné pásky. Místo plasto-
vé pásky lze použít i průmyslově vyráběné papírové štítky s chráněnou lepicí vrstvou, pokud
nehrozí nebezpečí jejich zvlhnutí (Drdácký et al. 2015, Drdácký a Slížková 2015).

V laboratoři jsou vzorky s odloučeným materiálem zváženy. Opakování měření na stej-
ném místě odstraňuje zkreslení výsledků, neboť uvolněné částice na „čerstvém“ povrchu ne-
jsou charakteristické pro podpovrchovou soudržnost. Při opakování měření pozorujeme sni-
žování objemu a hmotnosti odlučovaného materiálu z povrchu, což vypadá jako zpevňování.
Stejný problém vzniká, když chceme posuzovat efektivitu konsolidačního zásahu na degra-
dovaných plochách. Po několika opakováních se začne odlučovat téměř konstantní množ-
ství materiálu a získáváme data pro hodnocení podpovrchové soudržnosti materiálu. **Obr. 34**
ukazuje, že metoda je dostatečně citlivá na to, aby postihla rozdíly v soudržnosti vápenných
malt různé kvality a tudíž i různé pevnosti.



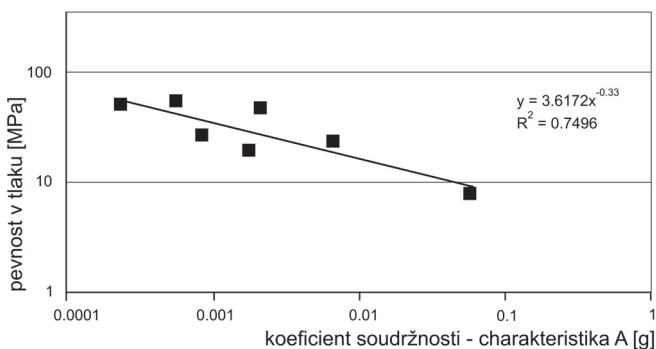
OBRAZEK 34: Hmotnosti odloučeného materiálu při jednotlivých krocích měření na vápenných maltách připravených ze směsí s různými poměry mísení vápna k písku (1:3, 1:4, 1:6 a 1:9)



OBRAZEK 35: Nelineární aproximační model pro sekvenci měření

Pro vyhodnocení měření hmotností byl přijat nelineární aproximační model (**obr. 35**). Je potřebný zejména v případech, kdy měřená data konvergují k jisté pozitivní tedy nenulové hodnotě. Aproximační funkce vyjadřuje vztah mezi množstvím odloučeného materiálu $[m(n)]$ v jednom kroku testovací sekvence k počtu sekvencí (n). Určená asymptota aproximační funkce je právě charakteristikou podpovrchové soudržnosti. Tato hodnota A [g] poměrně dobře koreluje s mechanickými charakteristikami materiálu (**obr. 36**).

Jiným měřitelným parametrem může být síla potřebná k odtržení pásky od povrchu. Do konce byl pro měření této hodnoty vyvinut i speciální přístroj italskou firmou SINT. Tento přístup je dosti nepraktický, ale síla, potřebná k odtržení pásky, rovněž dobře koreluje s mechanickými vlastnostmi podkladu.



OBRAZEK 36: Korelace charakteristik soudržnosti A s tlakovou pevností různých typů pískovce

Aplikace metody je závislá na zručnosti operátora a jeho osobním přístupu, nicméně, rozptyl výsledků měření prováděných jedním operátorem je zanedbatelný. Kromě vlivu operátora jsou výsledky zatíženy dalšími vlivy. Je třeba si však uvědomit, že tyto vlivy sice mají dopad na výši absolutní hodnoty konstanty A, ale v případech srovnávacích měření nemusí být kritické.

Významný vliv na aplikovatelnost metody má homogenita podpovrchové vrstvy. V případech vrstevnaté omítky tvořené pevnou krustou a částečně rozpadlou podpovrchovou vrstvou nelze provést objektivní měření soudržnosti a tudíž ani nelze použít diskutovanou metodu pro posouzení úspěšnosti konsolidačního zásahu, pokud není použito velmi silného zpevnění.

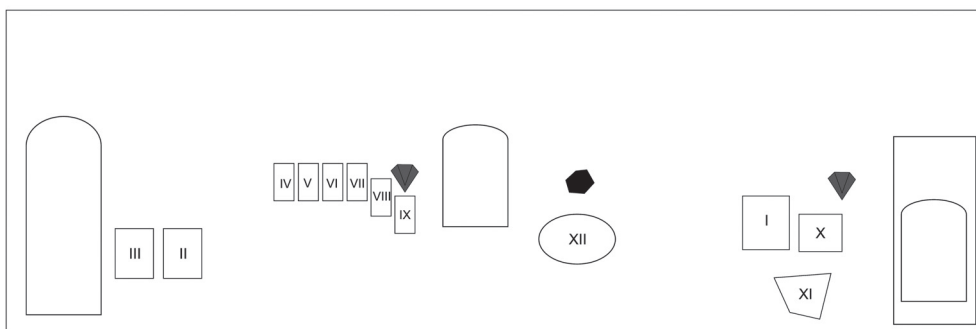
Drsnost povrchu ovlivňuje měření dvěma protichůdnými způsoby a navíc vždy v interakci s kvalitou lepicí vrstvy pásky. Pásky s tenkou lepicí vrstvou lépe přilnou k hladkým rovným plochám než k povrchům s ostrými výčnělky jednotlivých zrn. To může způsobit, že v prvních krocích dojde k odloučení menšího množství materiálu a „otevření“ povrchu pro vyšší odběr v následujících krocích. V takovém případě aproximace rovnicí $m(n) = A + B \times e^{-Cn}$ není vhodným modelem pro vyhodnocení dat. Nicméně, většina materiálů vykazuje rozumné chování a po dostatečném počtu opakování odlučovací zkoušky mohou být měření vyhodnocena standardním modelem po odstranění rušivých dat. Pásky s tlustší vrstvou lepidla dobře přilnou k vystupujícím zrnům a naopak. Zde je více materiálu uvolněno v prvních krocích sledu měření a opakované testy vyhlazují povrch a uvolňují méně materiálu.

Pro odlučovací testy se obvykle nepředepisují žádné speciální typy pásky z hlediska jejich tuhosti a lepicí vrstvy. Je to dáno tím, že se obvykle provádí pouze relační měření soudržnosti bez snahy nalézt korelační vztahy k pevnostním charakteristikám. Výsledkem zkoušek je odpověď typu zpevněno – nezpevněno, případně kolikrát se zvýšila kohezní konstanta A. Tuhost pásky má také vliv na výsledek, jak je patrné i z **obrázku 37**.

Z výsledků měření bylo zjištěno, že dlouhá páska byla díky své vyšší ohybové tuhosti méně citlivá a ulpívalo na ní méně materiálu než na dvojstranné pásce nalepené na papírové podložce. Výběr pásky je obvykle založen na provedení zkušebního testu a na zkušenosti operátora. Samozřejmě pro relační zkoušky je třeba používat jeden typ pásky nejlépe ze stejné výrobní šarže. Pro dosažení lepších výsledků na hrubých površích jsou vhodnější měkčí pásky s tlustší vrstvou lepidla. Takové pásky byly např. použity při měření konsolidačních účinků na omítkách zříceniny kláštera *Rosa Coeli* v Dolních Kounicích u Brna.



OBRAZEK 37: Dva typy pásek aplikované pro měření na historických omítkách hradu Pernštejna



Zkoušené plochy a jejich ošetření

J ← → S

OBRAZEK 38: Zkoušené plochy západní strany ambitu s těmito konsolidačními zásahy: I – CaLoSiL E25, II – CaLoSiL E25 (s předvhlčením), III – CaLoSiL E25 (jednoduchá aplikace), IV – CaLoSiL E50, V – CaLoSiL IP25, VI – Funcosil 300, VII – Funcosil 500, VIII – Porosil RZ, IX – Porosil ZTS, X – neošetřováno, I – původní románsko/gotická omítka, XII – neošetřovaná plocha (Machačko et al. 2011)

Uvedme praktický příklad použití odlučovacího testu na výše uvedeném klášteře pro posouzení účinků konsolidace středověkých omítek různými nanosuspenzemi hydroxidu vápenatého a jejich srovnání s účinky etylsilikátové impregnace (Brysejcn et al. 2010, Machačko et al. 2011). Celkový pohled na zkoušené plochy je vidět na **obr. 38**. Kromě zpevňovaných zkušebních ploch byla měření provedena i na dalších referenčních omítkách, které nebyly při experimentech nijak ošetřovány. Nelze však vyloučit, že byly v minulosti kontaktovány, což může ovlivnit výsledek měření.

Pro zkoušky byly vybrány pásky s relativně tlustou vrstvou lepidla a vysokou adhezní kapacitou, danou v tomto případě výrobcem deklarovanou nominální smykovou únosností úsekem pásky o délce 150 cm a hodnotě zátěže o hmotě 50 kg. Použité vzorkovače měly rozměr 50 × 19 mm². Měření proběhlo typicky desetkrát na stejném místě (výjimečně

6–7× s jiným typem pásky – označené grey). Charakteristické hodnoty A, B, C, které popisují kvalitu podpovrchové soudržnosti, byly vypočteny z těchto měření a jsou uvedeny v následující tabulce.

TABULKA 1: Odhadované parametry funkcí nejlépe vystihujících kvalitu soudržnosti

Odlučovací test	Plocha	Odh. parametr A	Odh. parametr B	Odh. parametr C
A red	Ia	0,000	0,160	0,044
C red	II	0,072	0,285	1,684
D red	III	0,136	0,607	0,891
G red	IV	0,042	0,469	9,207
H red	V	0,053	0,038	0,516
F grey	VI	0,070	0,000	3,198
E grey	VII	0,056	0,000	2,524
B red	XII	0,160	0,148	0,400
E2 + F2 grey	XII	0,131	5,097	3,350

Hodnota A je základní charakteristikou mělce podpovrchové soudržnosti – čím je A menší, tím soudržnější je materiál. Význam dalších parametrů je menší a ne tak jednoznačný. B může být chápáno jako míra degradace povrchu a C se vztahuje k hloubce degradace. Pro oba parametry vyšší hodnoty znamenají vyšší stupeň degradace.

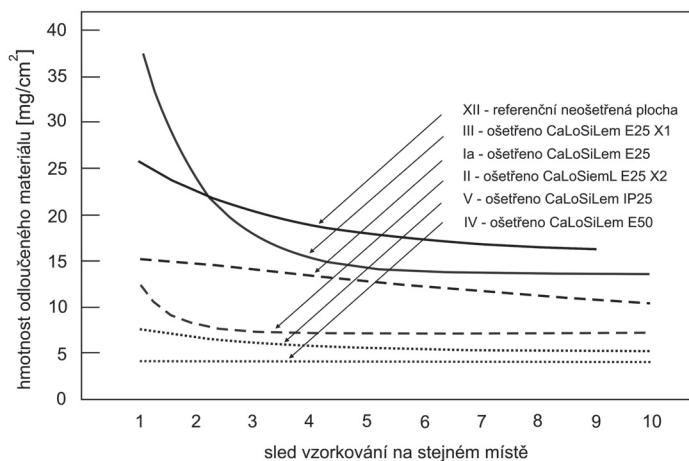
Měřené hodnoty jsou uváděny v množstvích odloučeného materiálu na jednotku plochy. Výsledky jsou ukázány i na ilustrativních **obrázcích 39 a 40**.

Kvalita soudržnosti získaná při odlučovacím testu dává spolehlivé odhady povrchového a mělce podpovrchového zpevnění po aplikaci různých konsolidačních postupů a zobrazuje zde jasné rozdíly mezi různými druhy ošetření povrchu¹. Výsledky ilustrují citlivost odlučovací metody, pokud je správně aplikována. Samozřejmě vždy je nutné očekávat jistý rozptyl výsledných charakteristik soudržnosti s uvážením toho, že referenční body nejsou v totožných místech, některé plochy mohly být dotýkány před experimenty a uvolněná zrna písku mohla být odstraněna bez ohledu na zpevňovací proceduru².

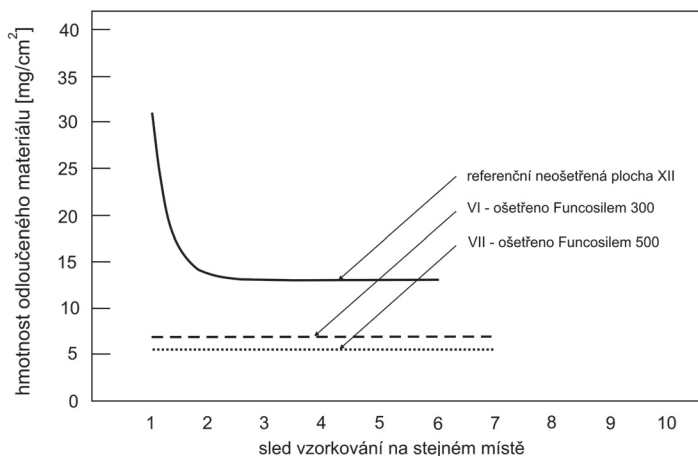
Množství odloučeného materiálu jsou pouze přibližná a nemohou být jednoduše převedena na odhad jiných mechanických charakteristik zkoušených malt. Je však užitečné mít pro srovnání další údaje pro porozumění odhadovaným parametrům naměřeným na jiných omítkách stejnými vzorkovači. Jako příklad uvádíme **obrázek 41**, kde jsou uvedena měření na současné 20 let staré omítce z vápeno-cementové malty. Korelace charakteristiky

¹ Výsledek ukazuje, že vápenná nanosuspenze CaLoSiL E50 [obsahující 50 g/l of Ca(OH)₂ v etylalkoholu] dává podle očekávání nejlepší výsledky, lepší než CaLoSiL IP25 [25 g/l Ca(OH)₂ v iso-propanolu], což je srovnatelné s účinky Fungosilu 300 a 500. Existuje malý rozdíl mezi těmito zpevňovači a CaLoSiLem E25 [25 g/l Ca(OH)₂ v etylalkoholu], který byl aplikován ve třech cyklech – první dva bez předvlhčení a třetí s předvlhčením ethanolem. CaLoSiL E25 jednoduše aplikovaný ve dvou cyklech a při třetím s předvlhčením ethanolem má malý účinek.

² Např. porovnání výsledků na plochách II a III ukazuje značný rozdíl, který je obtížně vysvětlitelný. Ostatní měřená data nicméně velmi dobře korespondují s očekávanými účinky.



OBRÁZEK 39: Výsledky jednotlivých sad měření (páska označená red)

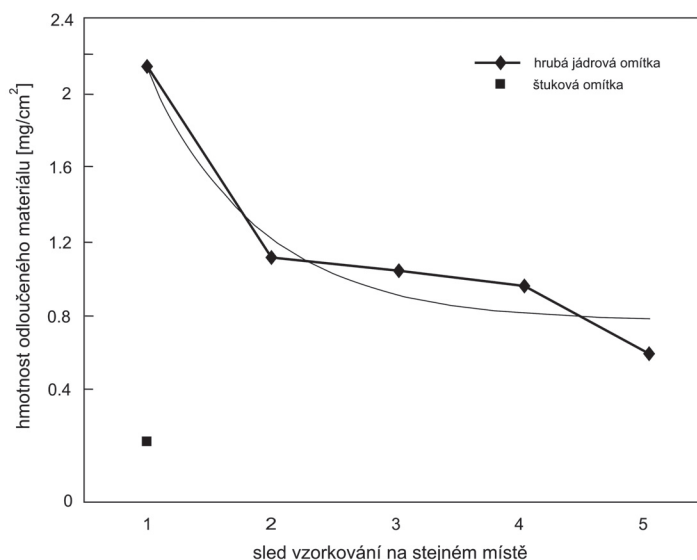


OBRÁZEK 40: Výsledky jednotlivých sad měření (páska označená grey)

soudržnosti A s tlakovou pevností různých typů pískovce byla představena na **obr. 36**, čtenář může nalézt další příklady korelací odlučovacího testu s mechanickými charakteristikami např. v publikacích Drdácý et al. (2012, 2015), Slížková et al. (2013).

Jak již bylo řečeno, kvalita lepicí vrstvy je jedním z nejdůležitějších parametrů, ovlivňujících množství odloučeného materiálu. Problém byl teoreticky diskutován např. v práci Chiche et al. (2005). Tito autoři zdůrazňují, že síla, potřebná k odstranění pásky z homogenního povrchu není konstantní a podporuje standardní požadavek potlačení vlivu fluktuační síly při konvenčním odlučovacím testu povrchových úprav¹ statistickým vyhodnocením výsledků. Tento teoretický závěr vede k požadavku měřit odlučování v několika místech na relativně malé ploše.

¹ ASTM 1999 Standard test method for peel or stripping strength of adhesive bonds, *ASTM Standard 903-98*.



OBRAZEK 41: Odloučený materiál na současné vápeno-cementové omítce po 20 letech účinků povětrnosti

Dále doporučují dodržovat při odtrhávání standardní úhel 90° s působením síly kolmo ke zkoušenému povrchu. Zvýšení úhlu na 180° , což je doporučováno v některé literatuře, může vést k aplikaci větší síly a tudíž k efektivnějšímu odlučování. Je však obtížně dosažitelné v řadě praktických situací.

Rychlost odtrhávání ovlivňuje rovněž dosti významně velikost síly působící odlučování materiálu. Výše zmínění autoři toto zvýšení potvrdili při rychlostech odtrhávání v mezích od $7 \mu\text{m/s}$ do 7mm/s pro různé typy pásky. Je proto třeba zachovávat při testech konstantní rychlost odtrhu.

Všechny tyto poznatky byly využity při návrhu výše uvedené metodiky Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR pro měření podpovrchové soudržnosti historických materiálů.

Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu 7. RP EK „STONE-CORE“ a projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

Použitá literatura

Brysejcn, J., M. Drdáký, J. Valach a P. Zíma. *Testing of CaLoSiL treatment effectson historic rendering at Rosa Coeli Monastery in Dolní Kounice*. Research Report –FP7 NMP-STONECORE Project. Praha: ÚTAM AV ČR, 2010, 44.

- Drdácký, M., J. Lesák, K. Niedoba a J. Valach. Peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of mortar and render surfaces. *Materials and Structures*. 2015, 48(6), 1947–1963. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0285-8>.
- Drdácký, M., J. Lesák, S. Rescic, Z. Slížková, P. Tiano a J. Valach. Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. *Materials and Structures*. 2012, 45(4), 505–520. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9778-x>.
- Drdácký, M. a Z. Slížková. In situ peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristic of historic plaster and render surfaces. *Studies in Conservation*. 2014, 60(2), 121–130. <https://doi.org/10.1179/2047058413Y.0000000116>
- Chiche, A., W. Zhang, C. M. Stafford a A. Karim. A new design for high-throughput peel tests: statistical analysis and example. *Measurement Science and Technology*. 2005, 16(1), 183–190. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/1/024>
- Machačko, L., B. Kolinkeová, D. Macounová a K. Bayer. A few notes on research and restoration works carried out at the University of Pardubice within the frame of the EU project STONECORE. In: Krüger, M. (ed.). *Cultural heritage preservation. European Workshop on Cultural Heritage Preservation, EWCHP 2011. Proceedings*. Stuttgart: Fraunhofer, 2011, 246–253. ISBN 978-3-8167-8560-6.
- Mora, P. a G. Torraca. Fissativi per dipinti murali. In: *Bollettino Istituto Centrale del Restauro*, Roma: Istituto Superiore per la Conversazione ed il Restauro, 1965, 109–132.
- Slížková, Z., D. Frankeová a M. Drdácký. Strengthening of poor lime mortar with consolidation agents, In: Hughes, J. (ed.). *The 3rd Historic mortars conference*. Glasgow: University of the West of Scotland, 2013. ISBN 978-1-903978-44-3.