

# Materiály, technologie a metodická podpora restaurování památek

## Zpevňování omítek vápennou vodou

Miloš Drdácký, Zuzana Slížková

V nedávné minulosti probíhaly diskuse o možnostech konsolidace historických vápenných omítek jejich opakovaným napouštěním roztokem hydroxidu vápenatého obvykle nazývané ho vápennou vodou. Skutečně vědeckých poznatků o účinku vápenné vody (i jiných konsolidantů) bylo publikováno velmi málo, navíc mnohdy zmateně a nepřesně. Nebo byly výsledky, získané při určitých okrajových podmínkách, velmi libovolně interpretovány či dokonce „extrapolovány“ do podmínek, kde neexistují znalosti o jejich chování, tím méně důkazy o jejich platnosti. Autoři kapitoly realizovali výzkumný projekt na toto téma a před jeho zahájením zpracovali přehled publikovaných názorů a výsledků vědeckého výzkumu o aplikaci vápenné vody při restaurování stavebních a uměleckých památek.

Technika konsolidace vápennou vodou je považována za starou a možnost jejího použití pro konsolidaci degradovaných vápenných malt a vápenců je stále pro mnohé restaurátory lákavá. Neboť, řečeno slovy Clifforda Price, „co může být přirozenějšího, než dodat vápno (*rozuměj hydroxid vápenatý*) do vápence a pak nechat vzduch, aby ho přeměnil v uhličitán vápenatý, tedy materiál, který tvoří vápence?“. Metoda má proto vášnivě zastánce, ale i skeptiky a přesvědčené odpůrce. V nemnoha publikacích z tohoto oboru je možno nalézt podporující články, ale také zprávy o totálním selhání. Následující řádky shrnují dosud publikované názory a výsledky výzkumu zaměřeného na aplikaci vápenné vody při konzervaci a restaurování kamene a omítek.

### Poznámka na úvod

Rozbory historických malt ukazují, že jedním z hlavních pojítek vápenných malt je uhličitán vápenatý. Vazební a adhezni vlastnosti  $\text{CaCO}_3$  k ostatním složkám kompozitu jsou silně závislé na mikrostruktuře uhličitánu vápenatého a výzkum potvrzuje (Beruto et al. 2005), že tyto pojivové vlastnosti se výrazně zlepšují, pokud je mikrostruktura vytvářena pseudogelovou morfologií, odlišnou od pravidelně krystalizovaných zrn  $\text{CaCO}_3$ . Proces tvorby  $\text{CaCO}_3$  ve vápenných maltách je složitý a řada otázek dosud není uspokojivě vysvětlena, např. proč  $\text{CaCO}_3$  vysrážený z nasyceného vodného roztoku hydrogenuhličitánu vápenatého nemá takové pojivové schopnosti jako  $\text{CaCO}_3$  vytvořený při tunutí vápenné malty (Giordani a Beruto 1987).

Zdá se, že v přirozených podmínkách aplikace vápenné malty je vytvoření pevných vazeb v maltě výsledkem postupných reakcí a komplexních vztahů mezi vysycháním, smršťováním a chemismem vápenné kaše, použité pro přípravu malty (Beruto et al. 2005). Z tohoto hlediska je technika vlhčení staré omítky vodným roztokem hydroxidu vápenatého natolik odlišná, že stěží můžeme přisuzovat vysráženému  $\text{CaCO}_3$  stejné pojivové vlastnosti, jako tomu, který vzniká při tuhnutí malty. Zatím nikdo nepodal vědecké objasnění procesu, ke kterému dochází při opakovaném vlhčení staré vápenné malty vápennou vodou, kde potřebný sled procesů pro vytváření  $\text{CaCO}_3$  je nepřírodně ovlivněn technologií opakovaného máčení. I když vlhkost je obecně pro karbonataci nezbytná, proces tuhnutí vyžaduje i přiměřenou možnost vypařování a vysychání. A právě fáze tvorby vodní páry při vysychání je považována za nejdůležitější pro vytváření pevných vápencových vazeb. Na druhé straně přerušování dodávání vápenné vody do materiálu a tvorba krystalů v pórech zřejmě zhoršuje transportní podmínky a ovlivňuje efektivnost působení vápenné vody, jak bude ukázáno dále rozbořem práce I. Brajer a N. Kalsbeek (1999).

Ve starých maltách je však přítomna řada dalších látek, které přispívají k funkci matrice jako pojítka. Jedná se o látky, které byly buď do malty přidávány při výrobě, nebo vznikly později chemickými reakcemi s plyny obsaženými v ovzduší či s látkami použitými pro povrchové úpravy. Zejména rozpustné soli hrají důležitou roli v pojivovém systému vápenné malty. Řada badatelů přisuzuje právě těmto solím významné zpevňovací účinky na zvětřalých maltách či horninách.

Z výše uvedeného plyne, že před rozhodnutím o případné aplikaci vápenné vody je jedním z hlavních kritérií posouzení možných vlivů sycení kompozitu vodou na jeho chemickou reakci, které vyžaduje bezpodmínečné provedení podrobného chemického (chemické a mineralogické složení, obsah vodorozpustných solí, nebezpečnost vysokého pH pro organická pojítka) i fyzikálního (zejména pevnosti, nasákavosti a pórovitosti, přidržitosti k podkladu) rozboru stávající omítky v celém tloušťkovém profilu. Stejný rozbor je nutné provést i po ukončení aplikace vápenné vody.

## Historické poznámky o konsolidaci vápennou vodou

V české literatuře se většinou setkáváme s velmi obecnými, neurčitými a vlastním nebo převzatým vědeckým výzkumem či dlouhodobými zkušenostmi nepodloženými zmínkami o užívání vápenné vody, často i směřujícími nebo zaměřujícími pojmy „vápenná voda“ a „vápenný pačok“. Tak např. B. Štorm (1965) uvádí bez dalších referencí a technologických detailů, že *některé druhy kamene, hlavně pískovec, lze na krátký čas konzervovat napojením vápennou nebo barytovou vodou*. Dále pak již hovoří vždy jenom o vápenných nátěrech, které považuje za *nejdokonalejší konzervační prostředek, ať již jde o režné nebo omítané zdivo jakéhokoliv složení*. A hned v následující větě nenechává čtenáře na pochybách, že vápenným nátěrem rozumí *pačok* (vápenné mléko), tedy nikoliv vápennou vodu, ke které nepodává žádné reference a kterou, jak výše citováno, považuje za krátkodobě použitelnou pro konzervaci kamene.

Vápenný nátěr byl podle L. Lososa (1970) historicky používán jako běžná dokončovací povrchová úprava omítek. Tento autor píše: *Musíme si však uvědomit, že vlastní povrchovou úpravu u běžných středověkých omítek dotvářela ještě vrstva vápenného nátěru v různých*

*koncentracích, pohybujících se od lazujícího pačoku až po husté líčko. Zdá se, že v tomto smyslu píše o vápenné vodě i Millar (viz níže).*

Štorm zřejmě čerpá z práce F. Petra (1953), kde se uvádí vápenná (i barytová) voda mezi používanými *napájecími roztoky* na konzervaci památek s bližším vysvětlením, že se jedná o *konzervační prostředek od dávna používaný a také v mnoha případech osvědčený*. Nicméně Petr opět neuvádí žádnou referenci, vápennou vodou pouze doplňuje seznam prostředků sepsaný Friedrichem Rathgenem v roce 1898, kde vápenná voda doporučována není. V jiných člancích Petr pouze uvádí, jak se vápenná voda připravuje.

Podrobný návod na použití vápenné vody při konzervaci omítek podává Hošek a Muk (1989). Popis je identický s textem Stena Petersona (1982), který se tak zdá být „apoštolem teoretického podkladu“ propagace užívání vápenné vody pro konsolidaci omítek u nás. Tvrzení J. Hoška, že se jedná o *tradiční velmi účinný způsob zpevňování omítek*, není nijak vědecky ani technicky dokázáno. Sám Peterson ve své stati uvádí, že je obtížné vědecky dokázat účinnost metody a že ani neexistují publikace o metodě a technologických postupech, neboť *staří řemeslníci užívali pouze svoji zkušenost zděděnou z otců na syny a zřídka psali*. Aniž bychom zpochybňovali předávání zkušeností tradicí, musíme trvat na tom, že *zmiňovaná velká účinnost* při zpevňování by měla být snadno měřitelná a objektivně prokazatelná. Restaurátor Peterson popisuje použití vápenné vody zejména pro konsolidaci nástěnných maleb, tedy omítek, které jsou většinou málo zvětralé, jsou převážně umístěny v interiérech a jejich složení či úpravy pod malbu jsou většinou velmi odlišné od běžných fasádních omítek. Jeho práce proto nevypovídá nic o zkušenostech s používáním vápenné vody pro konsolidaci vnějších omítek. Pro úplnost uvedme v překladu jeho návod na přípravu a aplikaci vápenné vody pro zpevňování omítek:

*Vápenná voda (Ca(OH)<sub>2</sub>) je čirý nasycený roztok obsahující 1700 mg Ca v jednom litru vody při 20 °C, pH je přibližně 9<sup>1</sup>. Pro přípravu se vezme 1 díl vápenné kaše a 6–8 dílů čisté vody (objemově). Směs musí být velmi dobře rozmíchána a ponechána odstát nejméně 24 hodin. Po této době se usadí přebytečné vápno na dně nádoby a nad ním je čirý nasycený roztok vápenné vody, velmi brzy s tenkým škrálopem kalcitu na hladině. Před nalitím vody do rozprašovače je nutno plovoucí krustu odstranit a opatrně odebrat čirou tekutinu z nádoby.*

Peterson sice obecně píše, že metodu lze použít pro konsolidaci křehkých nebo drolivých omítek, ale zřejmě s touto aplikací má zkušenosti pouze v případech restaurování nástěnných maleb, tedy na omítkách relativně pevných. Svědčí pro to i jeho některá doporučení, jak zlepšit vsakování vápenné vody do omítky, pokud nemá podklad dobrou nasákavost (čištění, postřík čistou vodou). Doporučuje provádět aplikaci vápenné vody nejpozději dva měsíce před příchodem mrazů.

Peterson neuvádí, odkud čerpá své návody na přípravu vápenné vody. Zdá se však, že jsou založeny na klasické práci Morových (Mora et al. 1977) či na jejich zdrojích (Denninger 1958).

Zajímavá zkušenost je tradována a snad někde i používána ve Francii<sup>2</sup>. Staří francouzští řemeslníci znají na zpevňování porézního pískovce a vápence vápennou vodu, připravenou z jednoho dílu vápna a 10 dílů vody. Podmínkou úspěchu prý je použití pasty z 6 až 7

<sup>1</sup> Podle odborné literatury je při 20 °C rozpuštěné množství menší (viz např. dále citovaný Lewis a Walter, 1986 nebo Chemické a analytické tabulky, Vohlídal, Julák, Štulík 1999: 1600 mg/l při 20 °C), pH je podle měření autorů článku 12–12,5. Literární údaje o rozpustnosti i kyselosti roztoku se velmi liší.

<sup>2</sup> Loits, A.: soukromé sdělení (private communication).

let starého vyhašeného vzdušného vápna uloženého pod vodou. Vápenný hydrát nebo mladší pasta jsou považovány za nevhodné. Opět se však jedná pouze o spekulaci, která není vědecky nijak ověřena či potvrzena<sup>1</sup>. Podstatné je snad jenom to, že za tradiční technologii se zde považuje užívání hašeného vzdušného vápna, uloženého delší dobu pod vodou. Nicméně, renomovaná francouzská badatelka v oboru zpevňování kamene V. Verges-Belmin popírá, že by se podobná technologie ve francouzské restaurátorské praxi používala<sup>2</sup>. Neznáme podrobnější návod na použití výše popsané tekutiny, pokud by však byla aplikována v uvedené koncentraci (1:10 obj.), pak vzhledem k rozpustnosti „vápna“ ve vodě se opět nejedná o vápennou vodu, nýbrž vápennou suspenzi (pačok).

V anglosaské literatuře patří mezi starší zmínky o vápenné vodě krátký odstavce v Millarově práci z roku 1897 „Plastering (plain & decorative)“<sup>3</sup>, kde se praví, že vápenná voda má především účinky dezinfekční, neboť *omítkáři jsou většinou zdraví a netrpí infekčními chorobami*. A dále, že vápenná voda použitá jako pačok nebo řídký nátěr (*wash*)<sup>4</sup> zpevňuje maltové odlitky. Také se prý užívá ke zpevnění povrchu při finální úpravě vrchní vrstvy omítky (*when scouring and trowelling setting stuff*).

Jeden z nejrozhodnějších článků proti používání vápenné vody pro konzervaci kamene napsal Nicholas J. T. Quayle z Cliveden Conservation Workshop Ltd. (1996). Článek se v podtitulu nazývá „marnost konsolidace kamene pomocí hydroxidu vápenatého“ a protože je názorem zkušeného praktika, stojí za podrobnější prezentaci. Autor uvádí, že příběh o narození této metody slyšel poprvé jako kamenický učeň v Yorku: *Jednou mladý tovaryš se svým mistrem bílili vápnem kostel. Každý večer vyplachovali své štětky ve vodě a potom jimi pleskali o zvětralý kamenný práh, aby odstranili vodu ze štětín. Po čase si bystrý mladý tovaryš všiml, že se práh stal tvrdším a odolnějším než okolní plochy drobného vápence na kostele. Aha, pomyslel si s velkou chápavostí, vápenná voda musí působit jako konsolidant na zvětralé kamenné prvky. A tak dnes následujeme příklad dobrého tovaryše a pleskáme vápennou vodu na plochy zvětralého vápence ve snaze zpevnit ho a chránit*. Quayle hodnotí tento příběh jako velmi nepravděpodobnou pohádku, která stojí pouze za vyprávění u krbu za dlouhých zimních večerů. Toto tvrzení podpírá následujícími argumenty.

*Nejprve připomeňme, že vápenná voda je roztok hydroxidu vápenatého ve vodě a aplikuje se tradičně štětkou nebo nověji mlžením (jemným postřikem) na zvětralé plochy kamene. Hydroxid vápenatý je rozpustný ve vodě, přičemž se obvykle lépe rozpouští při nižších teplotách než vyšších (konsolidace by se měla provádět studenou vodou). Při teplotě 0 °C obsahuje vápenná voda kolem 1,8 g rozpuštěného hydroxidu vápenatého v jednom litru (Lewis a Walter 1986), při teplotě 15 °C pouze kolem 1,4 g l<sup>-1</sup>. Teoreticky po aplikaci vápenné vody, absorbované drobným kamenným povrchem, přítomný hydroxid vápenatý reaguje se vzdušným kyslíčkem uhličitým a vytvoří uhličitán vápenatý. Předpokládá se pak, že se tato sloučenina váže kolem částec vápence, vyplňuje póry a zpevňuje rozpojenou látku. Potud teorie, která*

<sup>1</sup> Ve světle nedávných výzkumů vápenných nanočástic (viz níže) by se zde snad mohl příznivě projevat vliv zvýšené teploty při hašení vzdušného vápna na velikost částic Ca(OH)<sub>2</sub>.

<sup>2</sup> Verges-Belmin, V.: soukromé sdělení (private communication).

<sup>3</sup> Reprint vydaný nakladatelstvím Donhead Publishing Ltd., 1998, str. 51.

<sup>4</sup> Toto konstatování je terminologicky nejasné a ukazuje opět na velmi libovolné a nepřesné používání termínu „vápenná voda“ i v odborné literatuře.

se v praxi zdá někdy fungovat a někdy ne. Spíše častěji nefunguje a ukazuje se, že vápenná voda nemá žádný efekt. Podle věhlasných odborníků na konzervaci památek Johna a Nicolly Ashurstových (Ashurst a Ashurst 1988a) „se pokusy zaznamenat či kvantifikovat tento jev (zpevnění) potkaly s rozčarovávajícími neúspěchy...“. Quayle uvádí vlastní zkušenost obtížné předpovědi dosažení zpevňovacího efektu, nicméně připouští, že u měkčích typů vápenců lze někdy pozorovat příznivé změny (vápenc z Bath, Doulting, Chilmark), u tvrdších (např. Portlandského) metoda nefunguje vůbec. Nicméně i u kamene, kde lze pozorovat zpevnění, se často nedosahuje žádaného efektu v celé ploše kamene. To je první argument proti používání vápenné vody jako zpevňovače. Konzervátor či restaurátor totiž může zjistit, že po dlouhé době strávené aplikací vápenné vody (obvykle 40 postřiky) byla jeho snaha částečně nebo úplně marná. Nepomohou zde ani zkoušky na menší ploše, protože případný úspěch na vybrané ploše nezaručuje fungování techniky na celém díle. Konsolidace vápennou vodou je ve výsledku natolik nepředpověditelná a náhodná a příliš často zcela selhávající, že neposkytuje spolehlivou a hospodárnou odpověď na řešení problému konsolidace zvětralého vápence. V dalším Quayle uvádí negativní výsledky Clifforda Price, získané právě pro měkčí typy vápence (Doulting, Monks Park), které popisujeme na jiném místě.

Druhým Quayleovým argumentem je přirozená obava z nadměrného máčení kamene. *Vlhkost je bezesporu největším nepřítelem kamene a většiny stavebních materiálů. Praxe převzatá od Petersona používá 30–40 aplikací vápenné vody. Množství absorbované vody se výrazně mění v závislosti na porozitě kamene a stupni vyschnutí před další aplikací. Kámen by v ideálním případě neměl zcela vyschnout, neboť začínající proces karbonatace by mohl bránit hlubšímu pronikání hydroxidu do látky<sup>1</sup>. Nicméně právě opakované máčení či vlhnutí materiálu je hlavním mechanismem, který způsobuje jeho degradaci. Je známo, že chátrající stavební hmoty často obsahují rozpustné soli. Opakované máčení tyto soli rozpouští a transportuje, v kameni obvykle směrem k povrchu při vysychání. Soli pak štátně rekrystalizují buď na povrchu, nebo pod ním. My konzervátoři tak vystavujeme kámen opakovaným útokům jeho nejvražednějšího nepřítele v hluboké víře, že ho chráníme proti postupující degradaci. K destruktivním účinkům krystalizace solí přičiňují další zhoubné procesy. Jsou to cyklické objemové změny spojené s bobtnáním a smršťováním některých minerálů, opakovaně absorbujících a ztrácejících vodu. Tyto rovněž uvolňují vazby držící látku pohromadě. Dále jakékoliv residuální jílové či silikátové minerály mohou podléhat hydrataci a živce i hydrolyze. Stopy kysličníků železa v kameni mohou být též předmětem hydratace a následné konverze na hydroxidy železa (Ollier 1984). Tyto chemické procesy, přestože v malých objemech, jsou dostatečnou příčinou dalšího rozvolňování a rozpadu oslabeného materiálu. Opakovaným máčením povrchu tak můžeme podporovat komplexní fyzikální a chemické změny, o nichž je známo, že vedou k přímému rozpadu kamene. Zkoušet konsolidovat materiál s nepochybným vědomím, že zrychlujeme proces rozpadu, je víc než nerozumné – je to šilenství.*

Třetím argumentem Quayle proti vápenné vodě je viditelné poškození, vyvolané opakovaným máčením. *Vápenná voda je většinou aplikována na svislé plochy a architektonické prvky. Ti z nás, kdo používali vápennou vodu, pozorovali se zoufalstvím, jak je uvolněný materiál viditelně splavován po povrchu kamene (Ashurst a Ashurst 1988b). S každou sprškou*

<sup>1</sup> Toto je jeden z nejméně prozkoumaných jevů. Na jedné straně zcela jistě nedochází k uzavření pórů a dá se předpokládat, že postupná karbonatace je pravděpodobně i efektivnější, na druhé straně zkušenosti I. Brajera a N. Kalsbeck mluví o opaku (pozn. autorů).

vápenné vody zrna kamene kloužou po stěně do propasti. Ale když takto vymyjeme většinu uvolněné látky, zřejmě nám na konci zůstane odolnější vrstva. Když kamenický tovaryš pleskal štětka do schodu každý večer, zcela jistě mechanicky odstranil všechny uvolněné drolivé části a odkryl pevný kámen. Kde je teorie teď? V památkové péči není místo pro slepé objevy svěhlavého mládří.

V poslední části článku klade Quayle logickou otázku o mechanické účinnosti dosazeného množství vápna do degradovaného materiálu. Vychází přitom z vlastního pozorování, že někdy dochází ke zpevňovacímu efektu na povrchu. Poznává, že hlubší výzkum těchto případů ukazuje, že se obvykle vytváří pouze tenká krusta, která kryje stále drolivé jádro. Dále uvádí výsledky C. Price, o kterých referujeme na jiném místě a které podrobně studovaly jak malou hloubku penetrace, tak neměřitelný mechanický efekt. Quayle uzavírá svůj článek prohlášením, že používat vápennou vodu jako konsolidant znamená dělat si problémy. Její nepředpověditelné a často neefektivní výsledky, vysoké náklady na aplikaci, nepochybné poškozování kamene, které způsobuje, mizivě malé množství vápenného depositu – to všechno ji činí zcela nevhodnou pro konsolidaci kamene.

K problému se vyjádřil v ČR i P. Kotlík (2006) poměrně skeptickým názorem na pojivovou schopnost nově vzniklého uhličitanu vápenatého. Jako nevýhodu uvádí již zmíněnou malou odolnost nového kalcitu vůči kyselým exhalátům z atmosféry. Upozorňuje na riziko aktivity solí ve zdivu a dočasné ztěžknutí zchátralých omítkových vrstev při procesu opakované aplikace vápenné vody. Připomíná, že objektivní vyhodnocení charakteru vzniklého uhličitanu, jeho pojivové schopnosti apod. dosud v odborné literatuře nebylo zveřejněno.

## Vědecký výzkum o konzervačních účincích vápenné vody

Aplikace vápenné vody při zpevňování anorganických poréznicích materiálů s vápennou maticí byla v minulosti vědecky zkoumána zejména pro restaurování vápencových památek. Příkladem jediné publikované dlouhodobě úspěšné aplikace vápna při konzervaci vápencových soch je restaurování soch na katedrále ve Wellsu v Anglii. Pro restaurování byl použit velmi složitý proces, vyvinutý profesorem R. Bakerem. Stručně řečeno sestává ze tří kroků: 1) Nejprve se na předem zvlhčený povrch nanese pasta z horkého čerstvě vyhašeného vápna (hydroxid vápenatý) ve vrstvě tlusté od 20 do 30 mm, která se přikryje polyethylenovou fólií. Tato pasta (vápenný obklad) zůstává na objektu dva až tři týdny a je pravidelně denně vlhčena, aby nevyschla. Potom je vápenný obklad opatrně sejmuto, kámen je postříkán vodou a jemně přebroušen kvůli odstranění zbývajících nečistot. 2) Následně je kámen zvlhčen 40krát vápennou vodou (čirý nasycený roztok hydroxidu vápenatého), litou na povrch v průběhu několika dní. 3) V poslední fázi – po případném zatmelení poškozených částí vápennou maltou – je kámen opatřen ochranným krycím nátěrem, vyrobeným z vápna, písku a kamenného prachu.

C. A. Price (1984) podrobně zkoumal vliv výše zmíněného procesu na konsolidaci vápence. Petrologickým šetřením v mikroskopu nebyly zjištěny žádné deposity vápence či hydroxidu vápenatého, což samozřejmě neznamená, že se žádný neuložil do struktury, neboť petrologická metoda nemusí být dosti citlivá na velmi malá množství. Proto Price provedl další podrobnější výzkum při použití radioaktivně značkováného vápníku  $^{45}\text{Ca}$ , který pak byl snáze detekovatelný (Price et al. 1988). Tento druhý výzkumný projekt ukázal, že se nějaké množství vápna (*some lime*) přece jenom uloží do degradovaného vápence a stopy byly

detekovatelné až do hloubky 26 mm. Ve všech případech však nejméně polovina vápna zůstala ve 2 mm vrstvě u povrchu. Dále bylo zjištěno, že máčení vápennou vodou je přibližně 5krát efektivnější než obklady vápennou kaší. Zdá se, že tyto obklady snad mohou zlepšit pozdější pronikání vápenné vody do vápence.

Pro naši diskusi je zajímavější zkoumání vlivu vápna uloženého do kompozitu na zpevnění ošetřovaného materiálu. Price (1984) použil měření pomocí abraze křemenným pískem tryskaným tlakem 276 kPa na povrch a měřením objemu vytvořené díry o různých hloubkách od 10 do 50 mm. Nejistil žádné zlepšení pevnosti, což nepřekvapí, když vezmeme v úvahu hloubku možného významnějšího depozitu do 2 mm (viz výše citovaný Price et al. 1988) s množstvím uloženého vápence v jednotlivých vrstvách: 1,19 % 0 až 1 mm, 0,73 % 1 až 2 mm, 0,28 % 2 až 3 mm, 0,14 % 3 až 4 mm, 0,10 % 4 až 5 mm, 0,04 % 5 až 7 mm, 0,03 % 7 až 9 mm, 0,02 % 9 až 11 mm. Taková množství jsou pro anorganické pojivo většinou zanedbatelná a jakýsi vliv bychom mohli očekávat pouze v hloubce do 2 mm.

Price (1984) tento dosti negativní experiment doplnil dalším pokusem konsolidovat drčený vápenc. Vycházel přitom z předpokladu, že drčená směs nemá žádnou počáteční soudržnost a tudíž jakékoliv sebemenší zlepšení soudržnosti po úpravě vápennou vodou bude okamžitě patrné. Tříděná směs měla následující proporce zůstatku na sítích: 2,36 mm 10 %, 1,18 mm 20 %, 600  $\mu$  20 %, 300  $\mu$  20 %, 150  $\mu$  15 % a 10 % propadlo sítím 150  $\mu$ . Tato směs byla zvlhčena a vložena do trychtýře s filtračním papírem, vysušena a zvážena. Potom byl ponořen spodek trychtýře do vápenné vody 2 °C teplé, dokud nedošlo k viditelnému zvlhčení drti. Tento úkon trval 5–10 minut a postup vyloučil vymytí nejjemnějších částic z drti ke dnu, ke kterému by došlo, kdyby byla vápenná voda nalévána shora. Následně byla drť ponechána při pokojové teplotě až do vyschnutí, což obvykle trvalo několik dní a nikdy méně než 24 hodin. Cyklus vlhčení a vysychání byl opakován 30krát a trval 6 měsíců a byl doprovázen stejným procesem na drti s použitím destilované vody pro vytvoření referenčního vzorku. Po skončení zkoušky bylo zjištěno zvýšení hmotnosti vzorku o 0,38 % a 0,40 % pro dva zkoušené typy vápence. Nicméně nebyl pozorován sebemenší konsolidační efekt. Z toho plyne, že silně zvětralou maltu nelze vápennou technologií úspěšně konsolidovat.

Jak tedy vysvětlit „zázrak z Wellsu“, kde je vidět nesporně pozitivní efekt na sochách ošetřených vápennou technologií? Price uvádí tři možné důvody.

Proces probíhající *in situ* se může lišit od modelované situace v laboratoři tím, že zvětralý kámen obsahuje významnější množství síranu vápenatého, vytvořeného reakcí s kyslíčkem síry obsaženými v ovzduší. Konsolidační efekt pak může být výsledkem rozpuštění a opětovné depozice síranu vápenatého<sup>1</sup>. Tuto teorii podporuje známý fakt, že i opakovaná aplikace destilované vody může mít podobné zpevňovací účinky jako vápenná voda (Clarke a Ashurst 1972). Laboratorní pokus mohl být ovlivněn i nižší vlhkostí vzduchu při schnutí než *in situ*.

Druhou možností je blahodárný vliv tenké povrchové krusty, která mohla být vytvořena vápennou vodou. Laboratorní pokusy byly zaměřeny na zpevnění materiálu do hloubky, nikoliv na povrchový efekt, ke kterému může snadno docházet *in situ*.

Třetí vysvětlení může být závěr, že dosažení úspěchu na sochách ve Wellsu vůbec nesouvisí s vápennou vodou, ale je výsledkem pečlivé práce restaurátora a pokrytí soch ochrannou vrstvou (nátěrem). Toto vysvětlení Price opakuje i v řadě dalších svých článků.

<sup>1</sup> Později ukážeme, že se tento předpoklad nenaplnuje.

Výše uvedené příklady zkoumání vlivu vápenné vody na konsolidaci kamene patří mezi nejserióznější práce v této oblasti. Výzkum na vápenných maltách v podobném rozsahu a vědecké kvalitě nebyl v minulosti publikován a pravděpodobně nikde ani realizován. Z uvedených údajů však přinejmenším vyplývá to, že spolehlivé a přesné měření velmi malého vlivu aplikace vápenné vody je velmi obtížné a kontrola účinnosti nemůže být prováděna bez dostatečného časového odstupu, potřebného k rozvoji karbonátace.

Vliv vápenné vody na impregnaci nástěnných maleb typu *secco* studovala Isabelle Brajer s Nicoline Kalsbeek (1999). Tato práce patří bezesporu mezi nejvýznamnější v oblasti výzkumu vlivu vápenné vody na malty a omítky. Nicméně, cílem použití vápenné vody byla fixace uvolněné vrstvy malby k podkladní omítce a nikoliv zpevnění omítky samotné. Této fixace bylo podle autorek dosaženo. Jedná se o klasický problém studia konsolidačního efektu vápenné vody, v daném případě malby provedené na vrstvě vápenného pačoku (*lime-wash*) technikou „*kalkmalerei*“, tedy o zcela jiný problém, než je konsolidace omítky. Cílem je konsolidovat uvolněné částičky pigmentu ve vrstvě malby, nikoliv zvýšit pevnost nebo soudržnost narušené omítky. Pro tento účel se vápenná voda s oblibou a zřejmě i úspěšně užívá zejména v Dánsku.

Práce I. Brajer a N. Kalsbeek (1999) je cenná zejména proto, že podrobně popisuje technologii aplikace vápenné vody a její výsledky při restaurování kostela v Avnsø v Dánsku, tedy v podmínkách, kdy se mohly uplatňovat všechny fyzikální vlivy včetně staveniště (kapilarita, hydrofilní nebo elektroosmotické působení, difuze a vypařování, stavební podkladová konstrukce a její okolí). Výzdoba kostela je provedena jednobarevnou malbou s užitím na prach drceného dřevěného uhlí smíchaného s vápnem. Podklad tvoří tenká vrstva vápenného pačoku, natřená na 2 cm tlusté vápenné omítce, z heterogenní směsi jemného písku a drobných kamínků. Přílnavost podkladní vrstvy k omítce byla dobrá, pouze částice pigmentu byly uvolněné tak, že při lehkém přetření malby bavlnou došlo k jejímu znečištění. Obsah solí byl velmi nízký (pod  $0,05 \text{ mol.kg}^{-1}$ ), v maltě byly zjištěny stopy proteinů a podklad byl velmi nasáklavý.

Při restaurování byly zkoumány tři rozdílné aplikace: i) stříkání povrchu vápennou vodou až do úplného nasycení podkladu tak, že podklad nemohl ani částečně vyschnout, ii) stříkání povrchu destilovanou vodou stejným způsobem jako v případě i) a iii) stříkání povrchu vápennou vodou s přestávkami, umožňujícími povrchové vyschnutí. První dvě procedury užívaly jemný aerosolový sprej a aplikace roztoku byla přerušena, jakmile se objevilo stékání vápenné vody po povrchu. Pokračovalo se dále ve chvíli, kdy byl podklad opět schopen absorbovat tekutinu. Množství aplikované tekutiny bylo váženo a časy přerušení aplikace zaznamenávány. Je zřejmé, že bylo nutno pracovat 24 hodin denně. Při stříkání s přerušením byl použit stejný způsob vlhčení, pouze s tím rozdílem, že přestávky byly delší (přibližně 12 hodin) a umožňovaly vyschnutí povrchové vrstvy, což bylo kontrolováno změnami barvy vlhkého a suchého povrchu. Práce probíhaly 10 dní v srpnu při průměrné teplotě  $17^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti 75 %.

Výsledky byly vyhodnocovány 14 a 80 dní po ukončení ošetřování malby. Opět bylo použito stírání povrchu bavlněnou buničinou. Kromě toho byl odebrán vzorek omítky pro mikroskopická šetření a další analýzy. Vzorek obsahoval i část se zachovanou informací původního stavu před ošetřováním. Během deseti dnů ošetřování došlo k 70 aplikacím vápenné i destilované vody bez přerušení k vyschnutí a ke 20 aplikacím vápenné vody s vysycháním. Malba s podkladem přijala



30 l.m<sup>-2</sup> vápenné vody a 25,5 l.m<sup>-2</sup> destilované vody. Při umožnění vysýchání bylo do podkladu vpraveno 10,57 l.m<sup>-2</sup> vody během 20 cyklů a deseti dnů. Třiceti litry vody lze do jednoho metru čtverečního omítky teoreticky dopravit cca 69 g.m<sup>2</sup> uhlčitanu vápenatého, pokud pracujeme při nízké teplotě prostředí a zreaguje nám všechna vápenná voda se vzdušným kyslíčkem uhlíčitým. Samozřejmě toto množství je závislé i na nasákavosti podkladu.

Po 14 dnech nebyl na ošetřovaných plochách pozorován žádný vliv jak při makroskopickém, tak při mikroskopickém (SEM) zkoumání. Po 80 dnech jsou na ploše ošetřené bez možnosti vysýchání pozorovatelné nové krystaly kalcitu a malba byla fixována. Autorky připouští, že tento efekt může nastat i dříve v intervalu mezi 14 a 80 dny. Na vzorcích ošetřených s přestávkami na vysýchání nebyly zaznamenány na SEM žádné nové krystaly ani po 80 dnech. Z těchto pozorování a dalších analýz autorky dospěly k závěru, že je nutné aplikovat vápennou vodu pro fixaci malby kontinuálně bez přestávek na vysýchání. Podle názoru pisatelů této zprávy není takovýto závěr zcela prokázán. Množství vápenné vody, dopravené 20 cykly s vysýcháním, je přibližně stejné jako množství vápenné vody dopravené do podkladu kontinuálními 20 aplikacemi. Bylo však pozorováno, že při vysýchání se množství vody s každou následující aplikací snižuje rychleji než u kontinuálního syčení, a tak by celkové množství po 70 cyklech s vysýcháním mohlo být skutečně značně nižší. Na druhé straně je postup s vysýcháním šetrnější, neboť méně zatěžuje omítkovou vrstvu. Dalším významným závěrem je konstatování, že aplikace vápenné vody je technologie velmi náročná, vhodná pouze pro specifické podmínky a vyžadující velmi kvalifikovaný návrh postupu práce v závislosti na podrobném rozboru konkrétní situace.

V České republice již došlo k řadě aplikací metody opakovaného vlhčení omítek bez vědecky spolehlivě prováděného monitoringu a následného vyhodnocení s uvážením všech možných a známých vlivů. Obvykle uváděné zpevnění měřené odlučovacím testem (tzv. „peeling test“ nebo „scotch tape test“) na omítkách je zatíženo velmi silným zkráslením a je pravděpodobně ve většině případů z podstatné části zdánlivé, neboť je významně ovlivněno postupným opakovaným „smýváním“ nedostatečně zakotvených zrn plniva a zvětřalého pojiva<sup>1</sup>.

Problémem je dále v textu několikrát zmíněné matení pojmů vápenná voda versus vápenný nátěr (pačok) a nedůsledné rozlišování aplikace na zpevnění maleb (tenké povrchové pigmentové vrstvy) versus zpevnění omítek. Nemůžeme se vyhnout míšení těchto pojmů ani v předkládaném přehledu literatury, jenom je třeba dávat pozor, jaké výsledky mohou být užitečné pro posouzení účinnosti vápenné vody při konsolidaci omítek.

Pro úplnost uvedme, že k vápenné vodě se často uvádí ještě varianta použití nasyceného roztoku hydrogenuhličitanu vápenatého (kalcium bikarbonátu) /Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> nebo CaCO<sub>3</sub>. H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ obsahující 1100 mg CaCO<sub>3</sub> v jednom litru vody při 20 °C. Ve srovnání s nasyceným roztokem Ca(OH)<sub>2</sub> má tento roztok nižší pH, proto je uváděn v souvislosti s konsolidací temperových částí maleb, které jsou příliš citlivé na alkalické působení vápenné vody. Podle materiálů Scottish Lime Center (SLC 2006) lze vyrábět kalcium bikarbonát v pivních sudech pod tlakem a aplikovat také pro konsolidaci jádra pláštového zdiva. Podrobnější citace na výzkumné práce nebo výsledky materiálových zkoušek však SLC neposkytl<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Nejnovější výsledky výzkumu v této oblasti jsou známy teprve v posledních letech – viz kapitola Měření povrchové soudržnosti historických materiálů.

<sup>2</sup> Při osobním rozhovoru autorů této kapitoly v SLC v květnu 2007 bylo zjištěno, že takové údaje nejsou k dispozici.

## Konsolidační účinky vápenné vody podle výzkumu v ÚTAM

Výše uvedená rešerše ukazovala, že se v minulých výzkumech nepodařilo prokázat technicky významné zvýšení pevnosti či soudržnosti omítek nebo hornin v důsledku aplikace opakovaného máčení vápennou vodou. „Technicky významné“ znamená měřitelné a vyčíslitelné v hodnotách užívaných mechanických charakteristik a prokazatelně ovlivňující životnost a funkceschopnost stavebního prvku (omítky). Dále bylo zjištěno, že v závislosti na chemickém složení povrchové krusty může opakovaným vlhčením naopak docházet i k poškození historického povrchu. Proto byl v ÚTAM AVČR realizován speciální výzkum k hlubšímu poznání některých z těchto závislostí. Všechny poznatky a zkušenosti popsané výše byly využity pro plánování studie a experimentů.

Pro konsolidaci byly použity následující prostředky: destilovaná voda, vápenná voda ve dvou režimech aplikace – s napouštěním do stále vlhkého substrátu vedle režimu, kdy další množství bylo aplikováno až po vyschnutí substrátu – a síranová voda se stejnými dvěma režimy jako vápenná voda. Existuje mnoho variant kombinací jednotlivých konsolidačních prostředků, jejich koncentrací v roztocích nebo suspenzích a mnoho možností aplikačních technik. Studie nemohla postihnout všechny, výběr byl proveden tak, aby se prozkoumaly některé z otázek minulých výzkumů. To byl i případ použití destilované a síranové vody, kde se zkoumal jejich případný nezávislý vliv na konsolidaci, neboť tyto látky jsou nebo mohou být při praktických úlohách přítomné, protože opakované vlhčení krust může rozpouštět sírany. Ty pak mohou migrovat hlouběji do omítkových vrstev.

Z výzkumu C. Price plyne, že konsolidační efekt vápenné vody je obtížně měřitelný, proto byly vyvinuty speciální experimentální metody, které jsou podrobně uvedeny v kapitole Zkoušení konsolidačních efektů na maltách a horninách. Zde jen uvedme, že pro zkoušení vlivu napouštění vápennou vodou byla použita tenkostěnná zkušební tělesa – krátké válcové roury pro zkoušení materiálových vlastností v tlaku (**obr. 150**) a tenké destičky pro tahové zkoušky (**obr. 151**). Zkušební tělesa byla vyrobena z malty s nízkým obsahem pojiva. Maltovou směsí byla naplněna forma z trubkových mezikruží z nerezové oceli bez použití separátorů a poté dobře zhutněna, což umožnilo vytlačení nadusané čerstvé maltové roury z formy okamžitě po zhutnění a vyloučilo vznik trhlin vlivem smrštění při tuhnutí. Trubkový tvar zvýšil výrazně poměr plochy povrchu ku ploše průřezu v porovnání s válcovým tělesem a umožnil tak téměř rovnoměrnou depozici hydroxidu vápenatého v celém průřezu zkušebního tělesa. Tím se znásobila měřitelnost konsolidačního efektu. Vzorky jsou vždy napouštěny pouze z vnějšího povrchu a tím se u objemných těles snižuje množství uloženého konsolidačního prostředku podél hloubkového profilu. Tenké stěny zkušebních vzorků a vynechání separátorů pro odformování zlepšuje výrazně penetraci prostředku a podmínky pro jeho zrání.

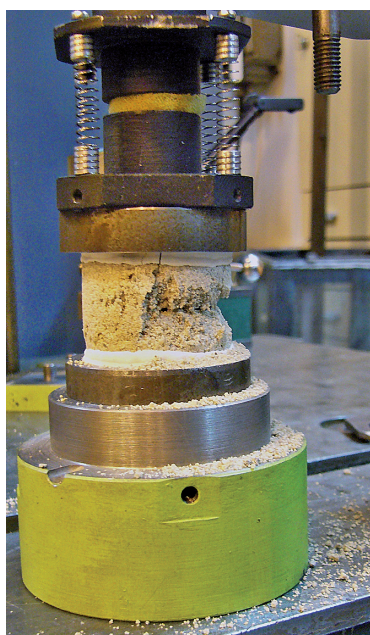
Tělesa vyrobená z vápenné malty byla ošetřována šetrným postříkem destilované vody po dobu jednoho měsíce, což mělo lehce škodlivý erozní vliv na kvalitu kontaktních ploch trubky. Tyto geometrické nedokonalosti samozřejmě způsobují rozptyl výsledků a vyšší hodnoty pevností jsou měřeny na tělesech s perfektním kontaktem mezi tlačnou deskou a maltovou rourou. Nicméně experimentálně zjištěný vliv zarovnání okrajů sádrou nepřinesl významné zlepšení v rozptylu výsledků (**obr. 152**) a tak zkoušky probíhaly většinou na tělesech pouze s vyrovnanou geometrií podstavy. Tenké destičky pro tahové zkoušky byly opatřeny překlízkovými koncovkami pro spolehlivé uchycení do speciální ohebné spojky, která zajišťovala správnou



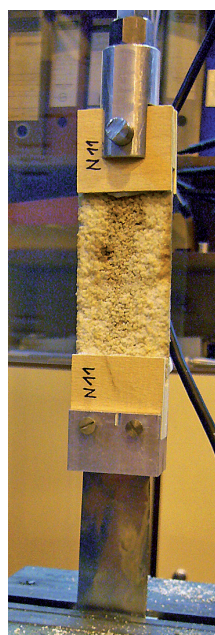
OBRÁZEK 150: Těleso pro tlakové zkoušky



OBRÁZEK 151: Tenká deska pro tahovou zkoušku



OBRÁZEK 152: Zkouška pevnosti v tlaku



OBRÁZEK 153: Zkouška pevnosti v tahu

sousost bez excentricity a bez rušivých vlivů ohybových momentů (**obr. 153**). Všechny vzorky byly před zkouškou uloženy v prostředí s 20 °C a 65 % relativní vlhkosti.

Vápenná malta pro zkušební tělesa byla vyrobena ze směsi mletého hydrátu vzdušného vápna a říčního písku v poměru 1:9 objemově. Tělesa zrála šest měsíců před aplikací konsolidačních látek. Po aplikaci konsolidantů byla tělesa ponechána v klidu k dalšímu zrání po dobu 60 dní, aby mohla proběhnout karbonatace hydroxidu vápenatého. Úroveň karbonatace



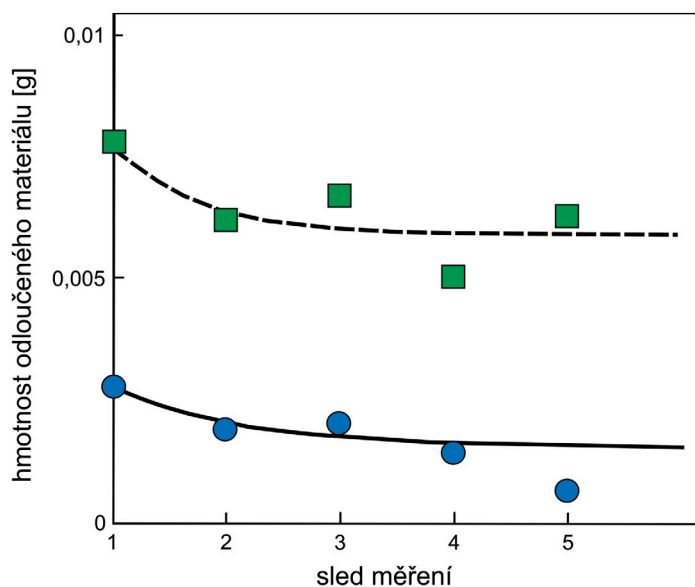
**OBRÁZEK 154:** Penetrování tenkostěnných rour pro tlakové zkoušky

byla kontrolována fenolftaleinovým indikátorem pH (1% roztok v etylalkoholu) jak v tělese před konsolidací, tak po vyzrálé konsolidaci. V obou případech byla reakce testu negativní a tělesa byla považována ze zkarbonatovaná a připravená ke zkouškám mechanických vlastností.

Každý konsolidant byl do zkušebních těles vpravován kontinuálně po kapkách pomocí injekční stříkačky kolmo k vodorovné poloze povrchu – roury byly navlečeny na otáčivou podporu (**obr. 154**) a destičky byly umístěny horizontálně na podložkách. V obou případech byla penetrace kapaliny podporována gravitací a kapilárními silami. Byly použity dva způsoby aplikace: impregnace s periodickým vysycháním zkušebního vzorku před každou další aplikací a impregnace stále vlhkého tělesa. V prvním případě byla tělesa ponechána schnout 12 hodin před další aplikací, ve druhém případě byla nová dávka aplikována, jakmile ji byla malta schopná přijmout a ještě nebyla vyschlá (vlhký substrát byl impregnován kapalinou). V tomto druhém případě byl typický interval pro novou aplikaci 8 hodin. Vzhledem k očekávanému efektu byly zvoleny dva režimy opakování – 50 až 58 cyklů a 161 až 163 cyklů. Impregnace byla prováděna velmi pečlivě bez ohledu na neděle a svátky či den a noc v pravidelných intervalech.

Po vyzrání konsolidantů byly zjišťovány fyzikální charakteristiky zkušebních těles. Pro zkoušení mechanických vlastností konsolidovaných povrchů v terénu nejsou vyvinuty jiné přímé metody než výše zmíněný odlučovací test pomocí lepicí pásky. Korektní postup této zkoušky je popsán v kapitole „Měření podpovrchové soudržnosti historických materiálů“ a byl také použit pro testování účinnosti impregnace zkušebních těles vápennou vodou. **Obr. 155** ukazuje, že po 50 cyklech napouštění vápennou vodou nebyl pozorován žádný významný vliv tohoto ošetření, zatímco po 160 cyklech již vliv pozorován byl.

Při destruktivních zkouškách byly tenkostěnné válcové roury zatěžovány ve směru jejich osy (**obr. 152**), tahové zkoušky (**obr. 153**) byly provedeny jenom na malém vzorku zkušebních těles a zjištěné tahové pevnosti jsou pouze informativní. Pro zjištění vlivu tvaru zkušebního tělesa byly na rourách dosažené tlakové pevnosti porovnány s pevnostmi, měřenými na kvádrech pro neimpregnovaná tělesa. Výsledky ukazují, že tlakové pevnosti měřené na rourách vykazují přibližně 70 % hodnoty zjištěné na nestandardních kvádrech o rozměrech  $40 \times 40 \times 27 \text{ mm}^3$ . Průměrná tlaková pevnost malty určená na neošetřených krátkých rourách

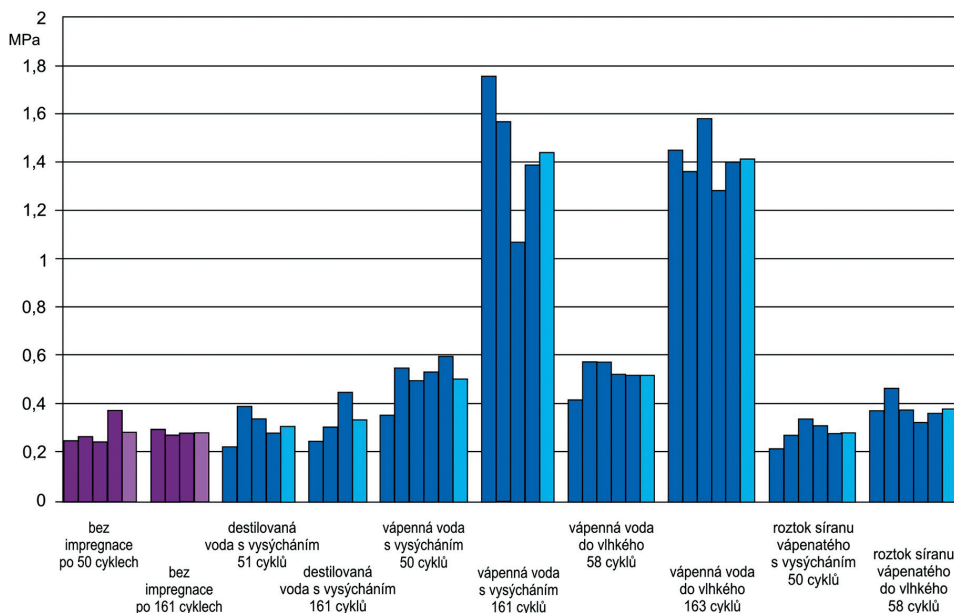


**OBRÁZEK 155:** Soudržnost měřená odlučovacím testem po napouštění vápennou vodou – čárkovaná čára označuje výsledek po 50 cyklech napouštění, plná čára po 160 cyklech napouštění, čtverečky a kroužky označují průměry z pěti měření po příslušných cyklech napouštění

byla 0,260 MPa a průměrná tlaková pevnost zjištěná na kvádrech ze stejné maltové směsi dosahovala 0,365 MPa (po korekci na malou štíhlost podle kapitoly „Nestandardní laboratorní zkoušky malt a hornin“ této knihy). Pro účely testování vlivu různých konsolidantů porovnávacími zkouškami převod na standardní pevnosti nepotřebujeme znát, pokud máme zkušební tělesa ze stejného materiálu a o stejném tvaru a zajímá nás porovnání celkové odezvy. Nicméně znalost zkoušky kvádrů nám v tomto případě pomohly odhadnout, v jakém vztahu je zvolený modelový materiál (chudá malta) k obvyklým degradovaným historickým maltám. Pro hodnocení zkoušek je si však třeba uvědomit, že malta byla sice chudá, ale materiál byl velmi dobře zhutněn a působil celistvě, takže tento model nebyl vytvořen k tomu, aby napodobil typickou granulární desintegraci (pískovatění) degradovaných malt. Spíše odpovídal materiálu s vyplaveným pojivem. Nicméně, přes dobré zhutnění a kohezi zkoušené malty byl při aplikaci vápenné vody pozorován značný odpad zrn z ošetřovaného povrchu, i když napouštění bylo prováděno velmi jemně. Stejný efekt byl pozorován při terénní aplikaci vápenné vody na historické povrchy<sup>1</sup>. Měřené tlakové pevnosti jsou porovnány v **obr. 156**.

Grafy na **obr. 156** ukazují výsledky dvou souborů neošetřených zkušebních těles vždy stejného stáří, jako byly impregnované vzorky v okamžiku provádění zkoušky. První soubor odpovídá tělesům napouštěným 50 cykly vápenné vody s vysycháním a byl zkoušen s dalšími tělesy (50–58 cyklů) napouštěnými destilovanou vodou, síranovou vodou a vápennou vodou v režimu impregnace vlhkého substrátu 60 dní po posledním cyklu. Podobně druhý

<sup>1</sup> Drdácý, M., Slížková, Z. (2006): Nedestruktivní průzkum nezpevňovaných a zpevňovaných historických omítek na hradě Pernštejně – I. etapa, Zpráva ÚTAM AVČR, 28 s., ÚTAM AVČR Praha, srpen 2006.



**OBRAZEK 156:** Porovnání vlivu různých impregnací na tlakovou pevnost chudé vápenné malty

soubor neošetřovaných těles odpovídá stářím tělesům napouštěným 160 cykly. Tento pečlivý plán experimentů vyloučil přítomnost neznámých vlivů zvýšení pevnosti v důsledku časově závislých chemických změn v maltě spojených s postupem karbonatace. Z grafu je patrné, že obavy byly správné a pozorované průměrné zvýšení pevnosti dosáhlo 12,5 %, když při výpočtu průměru byly vyloučeny nejnižší a nejvyšší dosažené pevnosti. Pokud bychom uvažovali o všech výsledcích, dosahuje průměrné zvýšení pevnosti 15 %.

Mírné zvýšení pevnosti těles napouštěných vápennou vodou (12,5 %) je v souladu se staršími publikovanými výsledky. Nicméně, závěry Clarka a Ashurst (1972) jsou podepřeny pouze vizuálním pozorováním a byly pravděpodobně založeny na množství odlučitelného materiálu (zrn) z povrchu malty. V naší studii je zvýšení pevnosti pravděpodobně výsledkem „léčení“ malých poruch a mikrotrhlin rekrystalizací částečně rozpouštěného uhličitanu vápenatého.

Impregnace 50 cykly napouštění vápennou vodou s vysycháním a 58 cykly v režimu aplikace do stále ještě vlhkého substrátu vedlo ke zvýšení tlakové pevnosti zkušebních rour o 80 %, respektive 86 %. Takové zvýšení není nutně pozorovatelné při zkoušení standardních maltových krychlí, protože je detekovatelné pouze ve velmi tenké povrchové vrstvě. V našem případě byl napouštěný profil pouze 4 mm tlustý a víceméně kompletně nasycen konsolidantem, takže můžeme prohlásit měřený vliv za dobře definovaný. Výsledky dále neukazují na významný rozdíl mezi režimem napouštění vápennou vodou s vysycháním a do stále ještě vlhkého substrátu. Zdá se, že u druhého režimu dochází při větším počtu cyklů k menšímu rozptylu výsledků.

Bylo dosaženo 497,7 % zvýšení tlakových pevností chudé vápenné malty po aplikaci 161 cyklů vápenné vody s periodickým vysycháním a 485,5 % po 163 cyklech do vlhkého podkladu, což představuje významný zesilující efekt.

Tahová pevnost se zvýšila o 42,7 % po 119 cyklech impregnací vápennou vodou.<sup>1</sup>

Krystalizace síranu měla zanedbatelný vliv při aplikaci s periodickým vysýcháním. Napouštění do vlhkého podkladu a následná krystalizace vyvolala jisté zesílení, které dosáhlo 34,6 % po 58 cyklech a zůstalo mnohem nižší než efekt vápenné vody. Z toho plyne, že v úvodní části uvedený předpoklad C. Price o zpevňujícím vlivu rekrystalizace rozpouštěných síranů byl potvrzen pouze částečně a neměl by být uvažován jako významný při ošetřování vápennou vodou. Impregnace sulfátem snížila mírně tahovou pevnost (o 7,3 %), což nepřekvapilo vzhledem k očekávanému vzniku mikrotrhlin generovaných krystalizací rozpínavých sloučenin.

Z hlediska makroskopického pohledu mění větší počet opakovaných napouštění povrchu vápennou vodou jeho vzhled. Na povrchu se vytváří bílý zákal, který může tuto metodu diskvalifikovat pro aplikaci na sgrafita a omítky s nástěnnou malbou nebo barevné povrchy.

### Závěrečné doporučení

Opakované napouštění povrchu vápennou vodou může poskytnout přijatelné výsledky pro určitou třídu historických vápenných omítek jak z technického, tak z estetického hlediska. Ošetřované omítky by měly být dostatečně soudržné, celistvé a zároveň porézní bez kompaktní povrchové krusty. Nevhodné jsou zejména omítky a malty s granulárním rozpadem - pískovatěním. Významnější konsolidační efekt je dosažitelný jen s vysokým počtem opakovaného napouštění – obvykle 100 cyklů a více, při kterém však typicky dochází k uvolňování a odpadu zrn písku i pojiva z originálních povrchových vrstev. Tento jev mění texturu historických povrchů i jejich vzhled, navíc v kombinaci se vznikajícím bílým zákalem při větším počtu cyklů. Technika je doprovázena i rizikem mobilizace rozpustných solí na povrchu i uvnitř omítky, a proto je třeba rozhodovat na základě pečlivého průzkumu substrátu, aby se zabránilo případným poškozením.

### Poděkování

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

### Použitá literatura

- Ashurst, J. a N. Ashurst. *Practical building conservation: stone masonry*. New York: Wiley, 1988, 83.
- Ashurst, J. a N. Ashurst. *Practical building conservation: mortars, plasters and renders*. New York: Wiley, 1988, 56.
- Beruto, D. T., F. Barberis a R. Botter. Calcium carbonate binding mechanisms in the setting of calcium and calcium-magnesium putty limes. *Journal of Cultural Heritage*. 2005, 6(3), 253-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2005.06.003>

<sup>1</sup> Naopak A. Hladíková („Porovnání účinnosti konsolidantů při zpevňování vápenných omítek“, Diplomová práce VŠCHT v Praze, 2006) uvádí, že pozorovala po aplikaci vápenné vody snížení ohybové pevnosti při zkouškách standardních maltových zkušebních trámečků.

- Brajer, I. a N. Kalsbeek. Limewater absorption and calcite crystal formation on a limewater-impregnated secco wall painting. *Studies in Conservation*. 1999, 44(3), 145-156. <http://dx.doi.org/10.1179/sic.1999.44.3.145>
- Clarke, B. L. a J. Ashurst. *Stone preservation experiments*. Watford: BRE; London: Directorate of Ancient Monuments and Special Services, 1972.
- Denninger, E. Die chemischen Vorgänge bei der Festigung von Wandmalereien mit sogenannten Kalksinterwasser. *Maltechnik*. 1958, 64, 67-69.
- Giordani, M. a D. Beruto. Effect of vaporization rate on calcium carbonate nucleation from hydrogen carbonate aqueous solution. *Journal of Crystal Growth*. 1987, 84(4), 679-682. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248\(87\)90060-1](http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248(87)90060-1)
- Hošek, J. a J. Muk. *Omítky historických staveb*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1989. ISBN 80-04-23349-X.
- Kotlík, P. Zpevňovače – konsolidanty kamene, omítek apod. In: *Průzkum zpevňovačů minerálních materiálů*. Praha: STOP, 2006, 2-4.
- Lewis, M. a G. Walter. *Thinking Chemistry*. Oxford: Oxford University Press, 1986, 295.
- Losos, L. Omítky v památkové praxi (dokončení). *Obnova památek*. 1970, 4, 137-144.
- Mora, L., P. Mora, P. a J. Philippot. *La conservation des peintures murales*. Bologna: Compositori, 1977, 259-260.
- Oilier, C. *Weathering*. London: Longman, 1984.
- Peterson, S. Lime water consolidation. In: *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*. Roma: International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property, 1982, 53-59.
- Petr, F. Několik kapitol z technologie konservačních prací. *Zprávy památkové péče*. 1953, 13(1), 13-19.
- Quayle, T. The Case Against Lime Water (or, the futility of consolidating stone with calcium hydroxide). *Conservation News (United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works)*. 1996, 59, 68-70.
- SLC. *Notes on use of lime water and Calcium Bi-carbonate*, September 2006.
- Štorm, B. *Základy péče o stavební památky*, Praha: SÚPPOP, 1965, 39.