

Oprava vápenců umělým kamenem – postup při návrhu doplňků pro sochařská díla a prvky architektury

Renata Tišlová

Doplňování chybějícího materiálu se v rámci restaurátorského zásahu provádí zejména s cílem rehabilitovat výtvarné a estetické kvality historického objektu a obnovit tak jeho funkci a čitelnost v daných podmínkách (**obr. 232**). Druhé hledisko je materiálové; z jeho pohledu je cílem opravy zpomalit nebo zabránit poškození objektu, které by mohlo nastat v důsledku jeho špatného stavu nebo úbytku jeho částí.

V současné restaurátorské praxi jsou pro doplňování porézních stavebních materiálů nejčastěji používány systémy na bázi minerálních pojiv. Důvodem je zejména jejich bližší chemické a mineralogické složení k anorganickému typu substrátu oproti systémům na bázi syntetických polymerů. Jejich výhodou je jednoduchá příprava, aplikace a dobrá adheze k minerálnímu podkladu. Na rozdíl od syntetických pojiv se také většinou nemusí řešit jejich stálost a odolnost vůči působení světla a vlhkosti a jejich zpracovatelské vlastnosti. Texturu originálního porézního substrátu lze dobře adjustovat vůči originálu modifikací plniva, kterým může být např. rozdrčená hornina nebo kamenivo o přesné distribuci odpovídající mineralogické skladby, zrnitosti a distribuci zrn v tmelené hornině apod. V současné době se pro restaurování užívají materiály na bázi bílého vzdušného vápna a hydraulických pojiv (tj. přirozeně i latentně hydraulická vápna), naturální cementy, ale i modifikované směsi bílého vzdušného vápna s přísadkou hydraulických pojiv. Příkladem může být časté použití směsí vápna s bílým cementem nebo přirozeně hydraulickým vápnem. Běžnou praxí je i využívání tzv. hotových průmyslových směsí. I když nabídka těchto materiálů je v současné době velká a složení těchto směsí je přizpůsobeno nárokům památkové péče, nelze tyto produkty plošně doporučit bez předchozích zkušeností, podrobnější materiálové analýzy a testování fyzikálně-mechanických vlastností po vytvrdnutí.

Výběr opravné směsi/umělého kamene pro objekty s památkovou hodnotou

Při opravě/rekonstrukci historických objektů jsou uplatňovány odlišné principy obnovy než při opravě staveb. Oprava historických objektů je koncipována dle zcela odlišných principů založených na maximální reflexi originálu nesoucí historickou hodnotu i kvality, které je nutné v maximální míře dochovat v nepozměněné podobě. Jednotným cílem zásahu/opravy/doplnění je snaha prodloužit životnost památky, a to provedením zásahu, který prodlouží jeho životnost, ochrání jej, avšak v minimální možné míře zasáhne do jeho materiálové i estetické



OBRÁZEK 232: Rekonstrukce v umělém kameni, kutnohorský vápenec. Horní kašna, Kutná Hora. Stav v průběhu restaurování v roce 2015. (Foto: V. Douša. Archiv FR UPCE, Litomyšl)

podstaty. Z tohoto hlediska je možným řešením opravy i „nic neprovádět“ nebo „konzervovat“ ve stávající podobě. Oba zmíněné přístupy znamenají pro objekt zachování ve stávajícím stadiu degradace, ochrana však spočívá v úpravě podmínek, které vyvolávají poškození objektu (např. zastřešením, transfer památky do depozitu apod.), případně minimalistickou intervencí do objektu zajišťujícího charakteru.

Při komponování opravné směsi umělého kamene pro stavební, sochařská nebo architektonická díla je základním kritériem kompatibilita s originálem chápána v širokém kontextu hodnot objektu (viz v textu dále). Tyto hodnoty je v obecné rovině nutné chápat rovnocenně, i když v reálných podmínkách je závažnost dílčích hledisek nezbytné vážit individuálně vzhledem k objektu, jeho stavu, umístění i pojetí obnovy. Při technickém pojetí kompatibility se při výběru opravné směsi umělého kamene vychází ze základního požadavku, který uvádí i Benátská charta (Mezinárodní charta o konzervaci a restaurování památek a sídel), tj. že ideální „opravná malta pro doplňování přírodního kamene by měla být dostatečně trvanlivá, avšak měla by časem podléhat přirozenému stárnutí, a to rychleji než stárne originál“¹. Z tohoto hlediska je rozhodující složení opravné směsi, neboť určuje vlastnosti umělého kamene, které by měly být maximálně podobné materiálu tmelené horniny. Při jejím výběru je však nutné reflektovat stav tmeleného substrátu, který se, pokud je podklad zvětralý, může výrazně lišit od vlastností nepoškozené horniny. V takovém případě je nutné skladbu umělého kamene přizpůsobit jeho aktuálnímu stavu. Pro trvanlivost opravy jsou v neposlední řadě nezbytné také další požadavky, které rozhodují o kvalitě provedení opravy. Tyto požadavky zahrnují zejména splnění aplikačních požadavků a nároků na praktické provedení opravy. Nutné je vzít v úvahu také podmínky, ve kterých bude opravená památka dále fungovat. Z tohoto hlediska nás zajímá zejména účinek atmosférických vlivů prostředí na vyzrání minerální

¹ Informace na <http://www.icomos.cz/images/dokumenty/benatska-charta.pdf>.

opravné směsi i její dlouhodobé chování a odolnost v daných podmínkách expozice (Groot et al., 2005, van Hees 1999). Tento požadavek tak např. vylučuje použití dolomitického vápna nebo sádry ve vlhkém prostředí či prostředí se zdrojem vlhkosti. Zároveň částečně limituje užití opravných směsí na bázi bílého vzdušného vápna v exteriéru, které mají v silně znečištěných podmínkách atmosféry omezenou trvanlivost.

Základní kritéria při výběru opravného materiálu

Mezi nejdůležitější kritéria při opravě hornin patří bezesporu požadavek na zachování hodnot památky a její **autenticity**, a to v mnoha dílčích ohledech (např. požadavek na formu, provedení, techniky a umělecko-řemeslné tradice, materiály aj.). Kromě těchto hodnot je neméně důležité i hledisko, které souvisí s pojetím opravy (**konceptuální požadavek**) ve vztahu k originálu. Oprava by měla být vždy šetrná vůči originálu, v ideálním případě provedená materiály, které lze odstranit, příp. opravit v rámci budoucího zásahu (požadavek na odstranitelnost). Nedílnou součástí tohoto požadavku je i hodnocení vlivu opravy na stav a vlastnosti originálu, často velmi poškozeného; materiál použitý pro opravu by neměl negativně ovlivnit stav objektu a indukovat nová poškození. Tento „soulad“ však může nastat pouze v případě, že se opravná malta v daných podmínkách chová podobně jako originál. Stanovení vlastností originálu je v tomto případě nezbytné včetně popisu jeho stavu, míry poškození, příp. změny vlastností po jeho restaurování (konsolidaci); jeho charakteristika dílčím způsobem vymezí vlastnosti opravného materiálu.

Kromě uvedených požadavků je při provedení opravy vždy nutné myslet na funkci objektu, který má být opraven (**funkční požadavek**). Funkčnost musí být uvažována jednak z pohledu samotného objektu, avšak také v rámci ostatních materiálů, které jej utváří v souvislostech objektu nebo jeho dílčí části. Toto hledisko například zahrnuje požadavek na trvanlivost opravy v daných podmínkách (agresivní atmosféra, soli, klima, vztlínající vlhkost). Z těchto důvodů se často přistupuje k použití moderních stavebních materiálů nebo prefabrikovaných směsí se standardizovanými vlastnostmi, které zajistí provedení opravy a splní její funkční nároky. Dalším příkladem je provedení opravy, které sleduje ochranou funkci (oprava ochraňuje originální horninu i materiály, které jsou součástí památky, a tak brání jejich poškození). Dobré fungování opravy a originálu je založeno na shodě v jejich materiálových vlastnostech (**technické hledisko/požadavky**). Kompatibilita je tak hodnocena na základě shody ve složení a vybraných vlastnostech, které popisují stav a chování originálu i doplnku v různých podmínkách (mikrostruktura, porozita, nasákavost vodou, pevnost, elasticita, teplotní roztažnost aj.). Její pojetí je však možné rozšířit i na požadavky při zpracování opravné směsi (zpracovatelnost, aplikační podmínky, dosažení požadovaného výtvarného efektu), vliv podmínek na zrání aj. Návrh složení opravného materiálu však nutně souvisí také s koncepcí obnovy i reflexí současné praxe založené na rozvoji nových materiálů pro obnovu, které nelze paušálně z použití historických materiálů vyloučit.

Z popisu výše uvedených hledisek je zřejmé, že při obnově kamenných památek je nutné uvažovat v širokém kontextu dané památky. Bezesporu hlavním východiskem je snaha „blížit se originálu“, kterou je nutné uvažovat v široké škále hodnot opravovaného objektu. Hodnocení opravy na bázi jednoho hlediska, v současné době často prováděné pouze na úrovni porovnání materiálových charakteristik nebo naopak zpracovatelských vlastností s použitím materiálů, se kterými „je zkušenost“, avšak bez reflexe originálu, je nepřesné a zcela mimo pochopení dané problematiky.

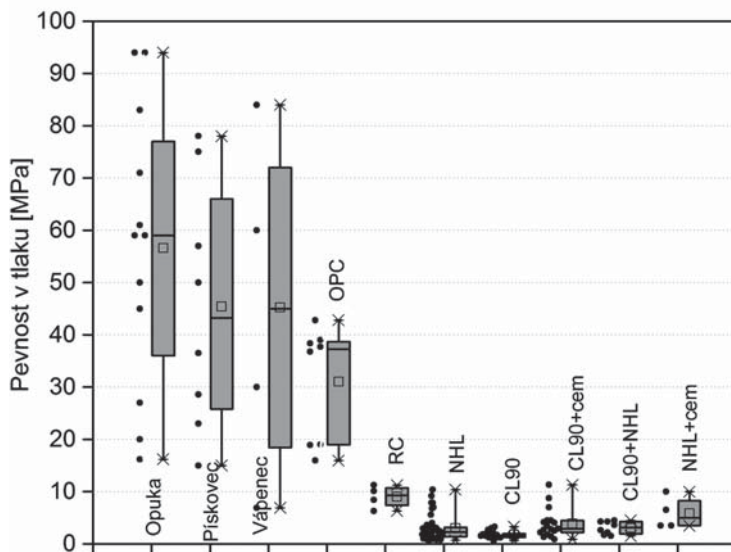
Požadavky na materiálové vlastnosti umělého kamene

Při doplňování hornin by mělo složení opravné směsi vycházet ze složení doplňované horniny, jehož charakterizaci je možné provést na základě podrobné analýzy. V případě hornin však na rozdíl od historických malt či omítek nastává značný problém navrhnout opravnou směs tak, aby zcela reflektovala složení originálu. Typickým příkladem je návrh umělého kamene na křemičité typy pískovců (např. maletínský, mšenský, královédvorský pískovec aj.), pro které ideální opravná směs, která by obsahovala pouze křemičité složky, neexistuje. U tohoto typu hornin, které jsou někdy extrémně pevné a houževnaté, se proto přistupuje k používání cementových doplňků s využitím křemičitého kameniva, díky kterému se vlastnosti doplňku mohou porovnávat s těmito typy hornin. Opačným příkladem, kdy je složení originální horniny možné při návrhu opravné směsi reflektovat, je např. kutnohorský vápenec. Tato hornina představuje porézní typ vápence biogenního původu, který kromě kalcitu obsahuje znečišťující příměsi křemičitého původu – křemen, glaukonit, živce (Ďoubal 2015). Pro opravu památek z tohoto typu horniny jsou dobré zkušenosti s využitím minerálních směsí na bázi přirozeně hydraulického vápna (NHL), které se mineralogicky velice podobá skladbě horniny (obsahuje kalcit, křemičitany vápenaté). Pro zlepšení plastických vlastností směsí se v praxi často využívá ve směsi se vzdušným vápnem. K docílení maximální shody s tmeleným substrátem horniny se jako kamenivo užívají drtě originální horniny, která ovlivňuje estetické vlastnosti i podobné chování tmelu hornin v atmosférických podmínkách.

Jak již bylo naznačeno, má při koncipování opravné směsi umělého kamene na minerální bázi určující vliv typ pojiva a použitého kameniva (Bochen a Labus 2013, Pavía a Treacy 2006). Ve skupině minerálních typů umělého kamene, který se pro doplňování hornin používá, jsou směsi na bázi vzdušného vápna méně pevné oproti hydraulickým pojivům (hydraulickým vápnům, cementům), avšak vyznačují se vyšší propustností pro vodu, vodní páru i elasticitu. **Tabulka 11** uvádí porozitu a nasákavost tuzemských hornin, které se tradičně využívaly na našem území k sochařským účelům. Pro porovnání byly shromážděny také data pevnosti v tlaku pro horniny a minerální opravné směsi, které se využívají pro jejich opravu (**obr. 233**). Z porovnání výsledků je zřejmé, že většina hornin se vyznačuje vysokou pevností a houževnatostí, které pomocí minerálních směsí u většiny hornin nelze docílit. Jediné směsi, které by v tomto ohledu mohly konkurovat, jsou směsi na bázi cementu (OPC). Jejich účinek na kámen jsou však všeobecně známé, zvláště v případech, kdy jsou použity na poréznější a nasákavější substráty.

TABULKA 11: Porovnání vlastností vybraných tuzemských typů hornin. Data byla naměřena autory na souboru vzorků nebo shromážděna z dostupných zdrojů (www.geology.cz, ČSN 733251, ČSN 721800)

Hornina	Pórovitost (%)	Nasákavost vodou (hm.%)	Pevnost v tlaku (MPa)
Hořícký pískovec	13,7	7,7–8,4	28,6–38,6
Maletínský pískovec	13,9	5,5–11,2	75,0–78,0
Kutnohorský vápenec	22,5	11,5–12,5	3,5–13,0
Opuky	13,7–40,1 (Přední Kopanina)	8,0–19,1	15,0–94,0



OBRAZEK 233: Celková porozita minerálních směsí/umělého kamene s různým typem pojiva. Data reprezentovaná body byla shromážděna z literatury nebo přímo naměřena autory. Šedá oblast reprezentuje hodnoty s nejvyšší četností. V grafu je označena střední hodnota (aritmetický průměr) a tzv. vážený průměr, který počítá průměr v závislosti na četnosti výskytu.

Plnivová složka ovlivňuje kvalitu umělého kamene a do určité míry i vlastnosti malt zvoleným mineralogickým složením, distribucí a tvarem částic. Při jejím výběru v případě doplňků na kámen je jeho skladba dána strukturou doplňované horniny. Nezbytné také je, aby navržené kamenivo opravné směsi vyhovovalo zpracovatelskými vlastnostmi, které zajistí kvalitní provedení opravy. Běžnou praxí, která zajistí maximální shody s tmelenou horninou, je využívání drcené horniny, které upraví strukturu i zpracovatelské vlastnosti doplňku a zajistí přiblížení materiálovým vlastnostem tmelené horniny. Základním požadavkem, který souvisí s volbou kameniva doplňku, je požadavek na rozměrovou stálost opravné směsi v čerstvém i zatvrdlém stavu. Problémy se vznikem trhlin nastávají nejčastěji při koncipování opravných směsí jemnozrnných hornin (např. opuky, jemnozrnné pískovce), kde je pro docílení odpovídající struktury horniny nutné využívat vysokého podílu jemnozrnného kameniva.

Kromě pečlivého výběru složek lze vlastnosti opravných směsí umělého kamene ovlivnit nastavením poměru jednotlivých složek, tj. pojiva a kameniva a dále množstvím záměsové vody. Navýšením obsahu pojiva i množstvím záměsové vody se zvyšuje porozita malty a mění se s ní související vlastnosti (nasákavost, pevnost aj.). Nadbytek vody nebo pojiva v maltě je také určující při smrštění opravných směsí, které se projevuje vznikem trhlin a prasklin v čerstvém i zatvrdlém stavu. Také podmínky přípravy tvárné směsi (příprava pojiva, zpracování směsi, čas a způsob míchání), následného zrání a expozice mohou zásadně ovlivnit vlastnosti opravné směsi a následně ovlivnit trvanlivost opravy (Lanas et al. 2004, Pozo-Antonio 2015).

Kritéria pro hodnocení umělého kamene

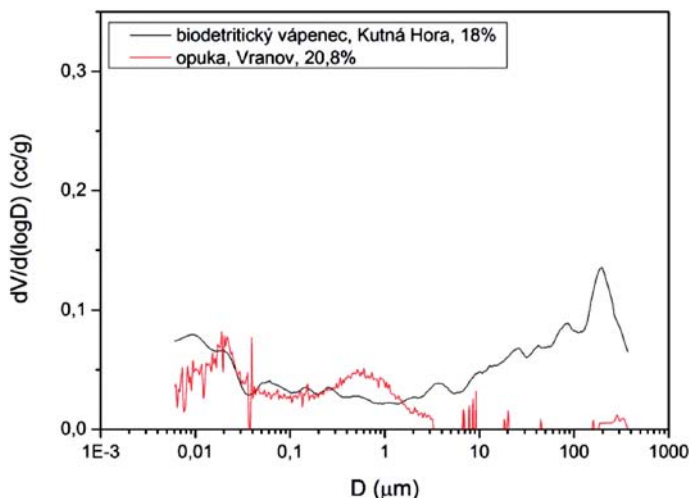
Při provádění oprav se zásah hodnotí z několika hledisek, která zahrnují zejména kritéria na shodu v estetických kvalitách opravy (barevnost, textura, vzhled povrchu), v materiálovém složení a shodě ve fyzikálně-mechanických vlastnostech navrženého opravného systému a tmeleného podkladu. Všechna uvedená hlediska musí vycházet z poznání tmeleného substrátu (horniny), zejména jeho chemického a látkového složení, mikrostruktury a aktuálního stavu.

Na základě mineralogického složení se většinou určí jednotlivé složky substrátu, které slouží pro výběr pojivového systému opravné malty/umělého kamene. Na základě znalosti mikrostruktury a textury opravované horniny se připravují směsi s různým obsahem pojiva a plniva, které jsou kromě testování fyzikálně-mechanických vlastností hodnoceny i po stránce zpracovatelských vlastností. Na základě nich jsou následně vytipovány složky opravné směsi a jejich vzájemný poměr, u nich se dále testuje jejich shoda v materiálových charakteristikách se substrátem. Pro porovnání originálu a umělého kamene není nutné provádět stanovení všech materiálových charakteristik. Pro zjištění jejich interakce jsou zásadní zejména charakteristiky, které popisují mikrostrukturu a interakci s vodou, příp. odezvu vůči změnám vnějších podmínek. Nezbytné je také určení chování při mechanickém namáhání, které má blízký vztah k odolnosti materiálu vůči různým vnějším vlivům. Při řešení opravy hornin pomocí minerálních směsí však porovnání na základě posouzení mechanických charakteristik většinou ztrácí smysl (odlišný původ materiálů) a využívá se spíše pro ohodnocení trvanlivosti navrženého opravného materiálu. Z tohoto hlediska je významnějším parametrem pro srovnání např. dynamický modul pružnosti nebo rychlost ultrazvukové transmise. Modul pružnosti je mírou odezvy materiálu na vnější změny a měl by být při dobré interakci u obou materiálů maximálně podobný. Rychlost ultrazvukové transmise představuje novou možnost posouzení shody opravného materiálu vzhledem k substrátu, neboť je mírou stavu materiálů, jejich porézní struktury a v neposlední řadě také kompaktnosti, tj. objemové hmotnosti. Přehled charakteristik pro srovnání uvádí **tab. 12** společně s kritérii na doplňky/umělý kámen (tzv. kritéria pro pozitivní hodnocení). Tyto intervaly, které byly shromážděny z relevantní odborné literatury, reprezentují možnou odchylku vlastností doplňku od tmeleného substrátu, která nezpůsobí jeho poškození (Delgado Rodrigues a Grossi 2007, Silva et al. 2015). Opravné materiály s vlastnostmi mimo tyto intervaly, lze považovat za nevhodné a poškozující. Při doplňování hornin s různorodou skladbou a vlastnostmi je navržený postup hodnocení opravného systému často velice náročný, neboť vyžaduje individuální řešení pro každý typ horniny i provedení náročných zkoušek materiálů. V praxi lze z důvodů časové a finanční náročnosti tento přístup uplatňovat pouze v ojedinělých případech nebo modelových projektech restaurování/obnovy. V současné praxi se proto řešení doplňků provádí spíše použitím „osvědčených“ materiálů a receptur, které více či méně reflektují vlastnosti substrátu. Hojně se také používají tzv. prefabrikované směsi, které mají svá pozitiva spočívající v dobré zpracovatelnosti, aplikaci, standardní kvalitě. Nevýhodou je však často složení maltových směsí; většinou se jedná o komplikovanou směs pojiva, kameniva, přísad a aditiv, které upravují vlastnosti malty, avšak nelze u nich předpovědět efekt na doplňovaný substrát ani průběh stárnutí.

TABULKA 12: Indikátory kompatibility a stupně hodnocení dle Silva et al. (2015), Delgado Rodrigues a Grossi (2007)

Charakteristika	Indikátor kompatibility	Hodnocení kompatibility (kritéria pro hodnocení)
Chemické a mineralogické složení	substrát (S) pojivo, kamenivo (oprava) (R)	S a R (substrát a oprava) stejně → 0 odlišné → 10 nebo stejně → 0 částečně odlišné → 5 zcela odlišné → 10 (hodnocení lze upřesňovat na základě shody v obsahu jednotlivých složek, vyžaduje přesnou znalost složení originálu)
Porézní systém	distribuce (S, R)	S a R (substrát a oprava) odlišné o méně než 10% → 0 10–30% → 2 30–50% → 5 více než 50% → 10
Hydrofilní vlastnosti (hygričké vlastnosti)	koefficient kapilární absorpce vysychání (S, R) propustnost pro vodní páry (S, R)	
Mechanické vlastnosti	pevnost v tlaku (S, R) dynamický modul pružnosti (S, R)	

Látkovou i mikrostrukturní charakterizaci horniny lze provádět nejlépe pomocí mikroskopických technik, zejména optické mikroskopie v polarizovaném a nepolarizovaném světle užívané nejčastěji ve spojení se skenovací elektronovou mikroskopií s EDX mikrosondou (SEM-EDX), která upřesní informace získané optickou mikroskopií o látkovou charakterizaci (složky substrátu). Další možností je využití rentgenové difrakce (RTG) nebo termické analýzy. Kromě informace o mineralogickém složení poskytují tyto metody informaci o stavu materiálu, korozních fenoménech, příp. sekundárních změnách v porézním systému (např. přítomnosti solí, jílových složek, konzervačních látek aj.). Metody optické mikroskopie navíc doplňují důležitou informaci o mikrostruktuře a porozitě, kterou lze stanovit také jinými metodami, např. rtuťovou porozimetrií. Metodami se charakterizují vlastnosti, které ovlivňují absorpci a transport vody a vodní páry materiálem: celková pórovitost, velikost pórů a jejich distribuce, spojitost pórů, přítomnost sekundárních látek v porézním systému. Celková porozita a informace ke skladbě pórů, jejich velikosti a zastoupení se stanovují rtuťovou porozimetrií, která není v restaurátorské praxi pro charakterizaci materiálů běžně využívána, pravděpodobně z důvodu komplikované interpretace dat vyžadující odbornou znalost principu metody a jejich výstupů. Její důležitost spočívá v popisu porézní struktury materiálů související s hodnocením transportního chování vody v substrátu a opravném materiálu; z hlediska interakce materiálu s vodou jsou nejzásadnější tzv. kapilární póry s velikostí 0,1–5 mm, které se podílejí na transportu vody v porézním systému. Ideální je proto navrhnout doplněk tak, aby se se substrátem v zastoupení kapilárních pórů maximálně shodoval. Význam a přínos metody ilustruje **obr. 234**, ve kterém je skladba pórů dvou typů tuzemských hornin, které se využívají pro sochařské i stavební účely – opuka a kutnohorský vápenec. Obě srovnávané horniny se vyznačují přibližně stejnou celkovou porozitou cca 20%, avšak skladba jejich



OBRÁZEK 234: Distribuce velikosti pórů dvou typů tuzemských hornin (kutnohorský vápenec, opuka) se stejnou celkovou porozitou. Rozdíly v distribuci pórů ovlivňují rozdílný transport vody (nasávání i vysychání) materiály

pórů je zcela odlišná. Opuka obsahuje střední až drobné póry, naopak vápenec je charakteristický přítomností, tzv. makropórů. Přítomnost spíše menších pórů v opuce je rozhodující pro vysokou rychlost nasákání, naopak při vysychání tato hornina déle zadržuje vlhkost a vysychá velmi pozvolna.

Se skladbou pórů a jejich přístupností souvisí i chování materiálů při styku s vodou. Mezi nejdůležitější patří kapilární absorpce, která se měří jako koeficient kapilární absorpce vody a vyjadřuje se jako množství vody, které je schopné daný materiál pojmout v rámci časového intervalu. Kapilární nasákavost zjednodušeně souvisí s kapilární aktivitou materiálu a její poznání je zásadní pro hodnocení chování materiálu při jeho zavlhčení a naopak vysychání. Z uvedeného je zřejmé, že při návrhu opravného materiálu je důležité zajistit podobnou interakci doplňku s vodou v porovnání s doplňovaným substrátem.

Mezi další rozhodné parametry patří i vlastnosti související s pevností materiálu a jeho elasticitou, tj. pevnost v tlaku R_c , příp. tahu za ohybu R_f a dynamický modul pružnosti E_d . Z ověřovacích studií provedených autory i poznatků z literatury však vyplývá, že pevnostní charakteristiky jsou rozhodně pouze v případech hodnocení doplňků omítek nebo malt opravnými maltami, nikoliv však při doplňování hornin. Horniny představují substrát se zcela odlišnými mechanickými vlastnostmi, které jsou dané odlišným původem a mineralogií přírodního substrátu oproti minerálním doplňkům.

Návrh doplňků pro biotritické vápence – příklad řešení z praxe

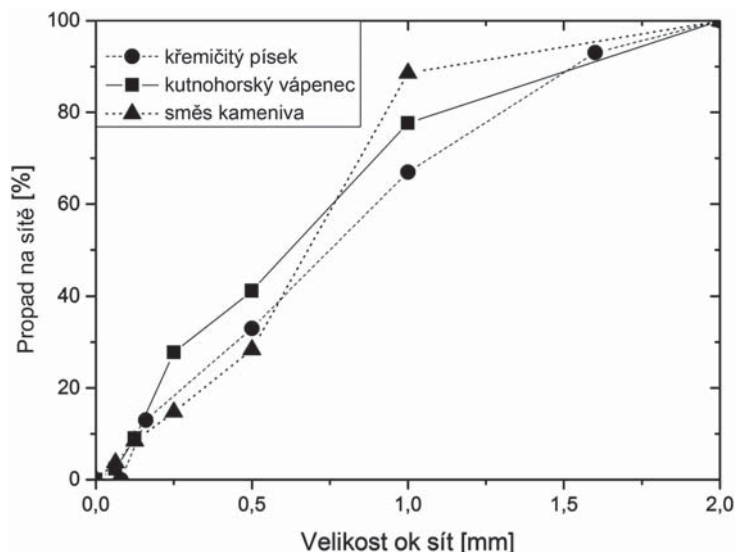
Biotritické nebo také biogenní vápence patří do skupiny organogenních hornin druhohorního nebo třetihorního stáří, které vznikaly usazením původem biogenní kalcitové klastiky a následným stmelením. Dle původu a způsobu diagenese má tento typ hornin charakteristické mineralogické složení i mikrostrukturu; horniny lze klasifikovat jako vápnné pískovce až pískové vápence s proměnlivým obsahem kalcitu a ostatních minoritních složek zejména

křemene, živců nebo úlomků metamorfovaných hornin, příp. glaukonitu. Na našem území se biodetritické vápence historicky těžily v okolí Kutné Hory. Zdejší kámen, též všeobecně známý jako „mušlák“ či „řasák“ druhohorního stáří, se hojně využíval jako stavební i dekorativní kámen zejména v Kutné Hoře a jejím blízkém okolí. Další, k našemu území blízkou, lokalitou výskytu tohoto typu hornin je jižní Morava, kam se biogenní vápence částečně importovaly z blízkého Dolního Rakouska z lomů v pohoří Leitha Gebirge – tzv. Leithakalkstein (Gryndlová 2007). Oba typy vápenců byly velice oblíbené a díky svým vlastnostem a snadné opracovatelnosti hojně využívané od období gotiky až do 18. století pro stavební i dekorativní účely. Kvůli chemickému složení však tento typ hornin snadno podléhá degradaci zvláště v silně znečištěných podmínkách atmosféry. Poškození se projevuje vymýváním kalcitové složky horniny nebo naopak stmelením povrchu (v důsledku chemické přeměny kalcitu na chemicky rozpustnější formy), které se projevuje vznikem tmavých krust ve srážkových stínech. V důsledku chemické přeměny nastává rychlý úbytek hmoty horniny zvláště patrný na místech přímo vystavených působení srážek. Při obnově děl s historickou hodnotou z tohoto typu materiálu (kamenné plastiky, části architektury, prvky zdiva) je jedním z možných řešení opravy doplnění/náhrada poškozených částí umělým kamenem. Při formulaci umělého kamene na tento typ hornin se v současné době používají maltové směsi s různým typem minerálního pojiva, nejčastěji přirozeně hydraulického vápna (NHL).

Tato studie představuje vlastnosti vybraných opravných směsí/umělého kamene pro kutnohorský vápenc i vybraný litavský vápenc pocházející z lokality St. Margarethen, které byly koncipovány v rámci obnovy západního průčelí kostela sv. Jakuba v Kutné Hoře. Při obnově/restaurování byly řešeny náhrady dožilých nebo zvětralých částí stavebních nebo architektonických prvků, na které byl původně použit kutnohorský vápenc, který se při náhradách nahrazoval importovaným vápencem z lokality St. Margarethen. Umělý kámen byl koncipován pro opravu chybějících nebo zvětralých částí, doplnění nerovností horniny, ale i pro vyplnění spár a sjednocující úpravu povrchu originálu i doplňkové horniny. Při výběru vhodného systému umělého kamene testovali autoři tvárné maltové směsi na bázi přirozeně hydraulického vápna (NHL), které svými zpracovatelskými i optickými vlastnostmi vyhovuje typu tmeleného podkladu (výborná zpracovatelnost, okrová barva tmelů, přirozený vzhled, subjektivně dobré vlastnosti v průběhu opracování). Výběr pojivového systému nebyl náhodný, kromě výše uvedených pozitiv jsou s těmito typy vápen dlouhodobě dobré zkušenosti v podmínkách exteriéru. Vlastnosti opravných směsí byly upravovány typem použitého kameniva. Z hlediska provedení opravy je ideální využití drčené horniny (drtě vápence), avšak při takové modifikaci složení může dojít ke změně vlastností zatvrdlých směsí např. v porovnání s křemičitými typy kameniva. Shoda ve vybraných vlastnostech je prezentována na základě charakterizace mikrostruktury hornin i opravných malt a měření vybraných fyzikálních a mechanických vlastností.

Materiály opravných malt

Při návrhu tvárných směsí umělého kamene bylo vybráno celkem 8 receptur, jejichž složení uvádí **tab. 13**. Směsi byly koncipovány s cílem ohodnotit faktory, které ovlivňují vlastnosti umělého kamene v zatvrdlém stavu, na základě nichž by bylo možné navrhnout složení opravné směsi, které maximálně odpovídá typu tmelené horniny. Hodnocen byl vliv typu pojiva, kameniva i úprava receptury (změna obsahu pojiva).



OBRÁZEK 235: Srovnání křivek zrnitosti použitých kameniv

Při míchání zkušebních záměsí byla použita přirozeně hydraulická vápna (NHL2, 3,5 a 5) o různé pevnosti (hydraulickém modulu). Pro jejich modifikaci bylo použito vzdušné vápno, vápenný hydrát CL 90, které se do směsí umělého kamene používá zejména kvůli zlepšení a prodloužení zpracovatelnosti a plasticity tvárných směsí v čerstvém stavu. Ve zkušebních záměsích byly použity 3 typy kameniva s cílem ohodnotit vliv různého typu kameniva na vlastnosti zatvrdlých malt. Jako základní byla použita drť kutnohorského vápence. Toto kamenivo nejlépe vyhovuje požadavkům umělého kamene pro daný typ hornin. Normovaný křemičitý písek, který vychází z normy EN 196-1, reprezentuje standardní čistě křemičitý typ kameniva navržený tak, aby malty, v nichž je tento typ kameniva použit, dosahovaly maximálních mechanických vlastností. Třetím typem kameniva byla směs navržená restaurátory, která obsahuje směs obou typů plniv (křemičitý písek Střeleč a drcený vápenec z Vápenky Čertovy schody). U všech typů kameniva byla provedena úprava frakce tak, aby zrnitost odpovídala struktuře tmelených hornin. Z kameniva byly odstraněny hrubší frakce přesátím ($D < 2$ mm). U použitých kameniv byla provedena síťová analýza (obr. 235).

Příprava vzorků

Opravné malty byly shodně míchány ve dvou různých objemových poměrech pojivo:kamenivo (1:2 a 2:1, obj.). První receptura reprezentuje klasickou recepturu umělého kamene pro daný typ horniny. Druhá, charakteristická vysokým podílem pojivové složky se využívá při doplňování míst, kde je požadována vysoká tvárnost směsí. Do testování byla zařazena s cílem ohodnotit vliv změny receptury. Množství vody přidávané do záměsí bylo u různých směsí odlišné, cílem bylo připravit směsi o stejné konzistenci odpovídající konzistenci vhodné pro tmelení (rozliv 140 ± 10 mm). Konzistence čerstvé malty byla zkoušena dle ČSN EN 1015-3. Testování proběhlo po 3 měsících uložení v podmínkách, které stanovuje pro tento typ malt norma ČSN EN 1015-11.

TABULKA 13: Složení tvárných směsí umělého kamene. Receptura označuje objemový poměr pojivo: kamenivo

Směs	Receptura	Kamenivo			Pojivo				w
		Kutnohorský vápenc	Křemičitý písek	Směs kameniv	CL 90	NHL 2	NHL 3,5	NHL 5	
1	1:2	2	-	-	-	1	-	-	0,28
2	1:2	2	-	-	0,5	0,5	-	-	0,26
3	1:2	2	-	-	-	-	1	-	0,28
4	1:2	-	-	2	-	-	1	-	0,23
5	1:2	2	-	-	-	-	-	1	0,28
6	2:1	1	-	-	1	1	-	-	0,28
7	2:1	-	1	-	-	2	-	-	0,28
8	2:1	-	1	-	1	1	-	-	0,28

Posouzení na základě rozhodných charakteristik

Pro porovnání originálu a umělého kamene není nutné provádět stanovení všech materiálových charakteristik. Pro zjištění jejich interakce jsou zásadní zejména charakteristiky, které popisují mikrostrukturu a interakci s vodou, příp. odezvu vůči změnám vnějších podmínek. Z vlastností, které charakterizují mechanické vlastnosti materiálů, byly stanoveny dynamický modul pružnosti a rychlost ultrazvukové transmise. Přehled charakteristik pro srovnání uvádí **tab. 14** společně s odkazem na platné normy nebo metody zkoušení, dle kterých byly vlastnosti stanoveny. Při posuzování kompatibility doplňků byla použita kritéria hodnocení, která uvádí **tab. 12**.

TABULKA 14: Přehled testovaných charakteristik a doporučení pro jejich stanovení

Zkoušky	Typ zkoušky	Označení	Jednotky	Normy a postupy pro stanovení
charakterizující porézní systém	Nasákavost vodou za atm. tlaku	-	[%]	ČSN EN 13755
	Otevřená pórovitost	P ₀	[%]	ČSN EN 1936
	Celková pórovitost	P	[%]	Rtuťová porozimetrie
související s mechanickými vlastnostmi	Objemová hmotnost zatvrdlé malty	ρ _v	[kg·m ⁻³]	ČSN EN 1015-10
	Dynamický modul pružnosti	E _D	[MPa]	ČSN 14146
	Ultrazvuková transmise	v	[km/s]	ČSN EN 14579

Výsledky – vlastnosti hornin

Oba typy vápenců se vyznačují značně nehomogenními vlastnostmi souvisejícími s jejich heterogenní strukturou (**tab. 15, 16**). Společnými znaky jsou vysoká, i když u obou hornin odlišná porozita (22–35 %) a nasákavost vodou (10–12 %), které přispívají k jejich degradaci v podmínkách atmosféry. Oba parametry přitom souvisí s porézní skladbou, která je u obou hornin lokalizována přibližně ve stejné oblasti středních až makropórů, charakteristické velikostí 10–100 μm. Vyšší porozita u vápence St. Margarethen souvisí se zastoupením středních

pórů, které je u této horniny vyšší, stejně jako četnost těchto pórů (**obr. 236**). Při porovnání ostatních charakteristik je patrný rozdíl v objemové hmotnosti i modulu pružnosti; vyšší hodnoty obou parametrů u vápence rakouské provenience souvisejí pravděpodobně s vyšší mírou a typem diagenese (stmelení) horniny. Vysoká hodnota porozity pravděpodobně souvisí s tzv. intrapartikulární porozitou (porozita zrn neboli klastů).

Vlastnosti opravné malty/umělého kamene – odezva materiálů na interakci s vodou

Z naměřených hodnot vybraných charakteristik vyplývá, že vlastnosti umělého kamene na bázi NHL vyhovují požadavkům na tmelení biogenního typu vápenců. Jejich vlastnosti lze však do jisté míry ovlivňovat úpravou složení tvárné směsi. Překvapivě nejmenší vliv má typ pojiva (typy NHL i přídavek CL 90). Naopak nejvýznamnější vliv na vlastnosti zatvrdlých směsí má receptura, tj. poměr složek, ale především typ kameniva.

TABULKA 15: Vlastnosti přírodních hornin – vlastnosti charakterizující pórezní systém a hygrické vlastnosti

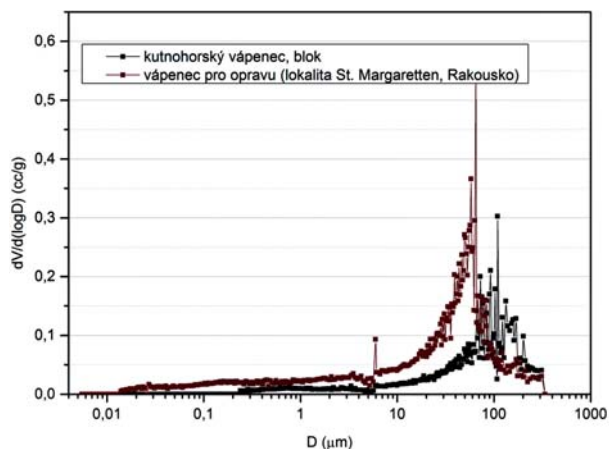
Typ horniny	Nasákavost [hm. %]	Otevřená pórovitost [%]	Celková pórovitost [%]	Střední velikost pórů [%]
kutnohorský vápence	11,5–12,5	21,5	22,5	10–300*
St. Margarethen	10,4–20,8	36,5	35,1	10–100

* stanoveno rtuřovou porozimetrií

TABULKA 16: Vlastnosti přírodních hornin – vlastnosti související s mechanickými charakteristikami

Typ horniny	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Dynamický modul pružnosti [MPa]	Ultrazvuková transmise [km/s]
kutnohorský vápence	1640–1850	2,1–7,8	1,6–2,3
St. Margarethen	1900–2120	20,0–23,8	3,4–3,7

Je všeobecně známo, že typ pojiva utváří vlastnosti a chování malty – mikrostrukturu, pevnost, interakci s vodou či odezvu vůči změnám vnějších podmínek (teplotě, vlhkosti, napětí). Obecně platí, že vzdušná vápenná pojiva vytváří malty s otevřenou, vysoce porézní strukturou (charakteristicky 25–35 %), s vysokou nasákavostí vodou a nižší pevností (Bochen a Labus 2013, Pavía a Treacy 2006). S rostoucím hydraulickým charakterem klesá porozita malt a naopak roste její odolnost při mechanickém namáhání (Lanas a Alvarez-Galindo 2003, Marques et al. 2006). Z tohoto hlediska by mělo platit, že malty s rostoucím hydraulickým modulem by měly vykazovat podobný model chování, tj. směsi s pojivem NHL 3,5 (3) a NHL 5 (5) by měly mít nižší porozitu, nasákavost a vyšší míru stmelení, která se projeví na objemové hmotnosti, modulu pružnosti i rychlosti ultrazvukové transmise. V předkládané studii se však daný trend nepotvrdil; malty s NHL 2 (1), NHL 3,5 (3) i NHL 5 (5) jsou prakticky stejně porézní a nasákové (**tab. 17**), jejich mírné odlišnosti lze spatřovat pouze v hodnotách modulu pružnosti a rychlosti UZ transmise, které potvrzují mírně vyšší pevnost těchto směsí, i když v minimálním odstupu od směsi s NHL 2 (**tab. 18**). Tento výsledek je značně překvapivý, avšak



OBRAZÉK 236: Srovnání skladby pórů biodetritických vápenců z Kutné Hory a z lokality St. Margarethen (Rakousko)

ne v rozporu s publikovanou literaturou, která se odlišnými typy hydraulických vápen a jejich srovnáním v zatvrdlém stavu zabývá (Gullota et al. 2013, Grilo et al. 2014). Některé studie ukazují na malý rozdíl v chování hydraulických vápen a potvrzují výrazný účinek kameniva, jehož vlastnosti modifikují malty. Z možných příčin podobného chování studovaných malt lze jednoznačně vyloučit krátkou dobu tvrdnutí; malty byly testovány po 3 měsících, při delší době zrání malt se však jejich vlastnosti zásadně nemění. Možným vysvětlením tedy zůstává účinek kameniva, které bylo použito při přípravě základních směsí (KH drtě). Ukazuje se, že drcená hornina zásadně mění vlastnosti malt. Malty s tímto typem kameniva výrazně zvyšují porozitu, nasákavost vodou a snižují elasticitu, objemovou hmotnost a rychlost UZ transmise, které jsou mírou stmelení (např. směsi 6 a 8). Vysvětlení spočívá v charakteru samotného kameniva. Drť horniny se vyznačuje vysokou sypanou hmotností (1370 kg/m^3) a nasákavostí (36,4 %) oproti křemičitému písku (1690 kg/m^3 a 22,3 %) nebo hodnotám naměřeným na směsném typu kameniva (1520 kg/m^3 a 24,9 %). Při hodnocení účinku pojiva je nutné také zmínit účinek přídavku vápna, které má jen nepatrný vliv na většinu zkoumaných vlastností, s výjimkou modulu pružnosti, který mírně zvyšují – malty jsou více elastické (např. směsi 1, 2 nebo 7, 8). V každém případě musí být účinek typu a vlastností kameniva dále ověřen.

Účinek množství pojiva u maltových směsí je diskutován v několika studiích, v nichž se shodně uvádí, že množství pojiva v minerální směsi (maltě) ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti. Malty s vyšším obsahem pojiva jsou více pevné v porovnání s klasickými recepturami, které se připravují v objemovém poměru pojiva:kameniva 1:2 – 1:4, obj. (Lanas et al. 2004, Lanas a Alvarez-Galindo 2003). Nárůst pevnosti je však patrný jen do určitého množství pojiva; výrazné zvýšení pojiva ve směsi vede k poklesu pevnosti pravděpodobně z důvodu vzniku mikroskopických trhlin, které vznikají v pojivu při tuhnutí a tvrdnutí zvláště v maltách s vápennými pojivy (vzdušnými i slabě hydraulickými). Účinek množství pojiva v maltě také závisí na jeho typu. V případě studovaných směsí se prokázal účinek obsahu pojiva u obou studovaných receptur – směsi připravené v poměru pojiva a kameniva 1:2 jsou méně porézní a nasákové oproti všem studovaným tvárným směsím 2:1. Vyšší obsah pojiva

ovlivňuje zásadně objemovou hmotnost (klesá podíl kameniva), avšak evidentně nemá zásadní vliv na modul pružnosti a rychlost transmise UZ signálu, které jsou více funkcí typu pojiva než jeho množství.

TABULKA 17: Vlastnosti přírodních hornin a směsí umělého kamene charakterizující interakci materiálů s vodou

Receptura	Nasákavost [hm. %]	Otevřená pórovitost [%]	Celková pórovitost [%]
kutnohorský vápence	11,5–12,5	21,5	22,5
St. Margarethen	10,4–20,8	36,5	35,1
1	18,8	31,5	31,1
2	17,1	28,5	30,3
3	18,4	31,5	-
4	15,0	24,5	28,4
5	21,7	36,2	32,4
6	29,3	49,8	45,9
7	23,3	38,8	33,7
8	24,7	39,9	35,1

TABULKA 18: Vlastnosti přírodních hornin a směsí umělého kamene související s mechanickými vlastnostmi

Označení receptur	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Dynamický modul pružnosti [MPa]	Ultrazvuková transmise [km/s]
kutnohorský vápence	1640–1850	2,1–7,8	1,6–2,3
St. Margarethen	1900–2120	20,0–23,8	3,4–3,7
1	1690	3,0	1,5
2	1710	3,7	1,6
3	1680	3,2	1,6
4	1800	5,2	1,9
5	1600	3,2	1,6
6	1450	2,6	1,6
7	1590	4,4	2,3
8	1580	4,8	1,9

Jednoznačně nejvíce určující vliv má typ zvoleného kameniva. Účinek drtě kutnohorského vápence na vlastnosti tvárných směsí byl již zmíněn; podobný trend lze však také spatřit u kameniva, kde byla část křemičitého kameniva nahrazena vápencovou drtí odlišného původu – vápenka Čertovy schody (směsi 3 a 4). Z výsledků lze v dané studii odvodit obecný závěr, že křemičitý typ kameniva přispívá ke zvýšení pevnosti a houževnatosti malt a snižuje jeho porozitu a nasákavost vodou. Naopak více porézní a nasáková kameniva působí opačným účinkem. Vliv distribuce kameniva nebyl v dané studii diskutován, stejně jako chemické

a mineralogické složení, i když je všeobecně jejich možný účinek znám. Odlišnosti v distribuci užitých kameniv považují autoři za minimální a jejich účinek v tomto případě za marginální oproti diskutovanému účinku charakteru kameniva.

Shrnutí

Při koncipování opravných směsí umělého kamene je důležité přizpůsobit jeho vlastnosti opravovanému typu horniny. V této studii byly analyzovány doplňky na bázi minerálních pojiv pro dva typy tzv. biogenních vápenců, které se historicky využívaly pro sochařské i stavební účely na našem území. Směsi jsou určeny pro opravu a doplnění památek v případě, že jsou z různých důvodů poškozeny. Pro tmelení byly vybrány tmely na bázi přirozeně hydraulického vápna, které se v minulosti osvědčily a vyhovují komplexním nárokům na opravné materiály pro opravu kamenných objektů s historickou hodnotou. Studie prokázala, že při koncipování opravné směsi je nutné brát v úvahu několik faktorů, které mohou ovlivnit jeho vlastnosti v zatvrdlém stavu. Zejména je to typ kameniva, úprava receptury a v neposlední řadě také typ použitého pojiva. Do opravných směsí lze použít širokou škálu kameniv, avšak použití drcené horniny (vápencové drtě) nejlépe vyhovuje estetickým požadavkům na kvalitu a vzhled doplňků. Studie však ukázala, že tento tradiční způsob modifikace směsí může zásadně ovlivnit vlastnosti doplňků v zatvrdlém stavu. Přídavkem porézní drtě vápence se neúměrně zvyšuje porozita a nasákavost doplňku, což ovlivňuje i jeho pevnost a v konečném důsledku se může zkracovat životnost opravy. Stejný účinek lze zaznamenat v případě, pokud se zvýší obsah pojivové složky v tvárné směsi. Snížení porozity a nasákavosti doplňků lze docílit úplnou nebo částečnou náhradou vápencového kameniva křemičitým pískem. Jeho obsah lze upravovat v závislosti na typu opravované horniny. Zajímavým výsledkem jsou minimální rozdílné vlastnosti doplňků s různým typem hydraulického vápna (NHL2-5).

Poděkování

Kapitola byla vytvořena s podporou projektu Ministerstva kultury ČR, Program aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity (NAKI) „Podmínky a požadavky kompatibilní péče o historické anorganické porézní materiály“, 2012–2015, id. č. projektu DF12P01OVV018.

Použitá literatura

- Bochen, J. a M. Labus. Study on physical and chemical properties of external lime-sand plasters of some historical buildings. *Construction and Building Materials*. 2013, 45, 11-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.086>
- Delgado Rodrigues, J. a A. Grossi. Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions. *Journal of Cultural Heritage*. 2007, 8(1), p. 32-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2006.04.007>
- Řoubal, J. *Kamenné památky Kutné Hory: restaurování a péče o sochařská díla*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-905-0.

- Grilo, J., A. Santos Silva, P. Faria, A. Gameiro, R. Veiga a A. Velosa. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2014, 51, 287-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045>
- Groot, C. Characterisation of old mortars with respect to their repairs: a state of the art. In: Groot, C., G. Ashall a J. Hughes (eds.). *Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair – Final Report of RILEM TC 167-COM*. [S. l.]: RILEM publications SARL, 2004, 57-76. <https://doi.org/10.1617/2912143675.005>
- Gryndlová, K. *Současný stav a provenience lithothamniových vápenců historických památkových objektů města Brna*. Diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita, PŘF, 2007.
- Gulotta, D., S. Goidanich, C. Tedeschi, T. G. Nijland a L. Toniolo. Commercial NHL-containing mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: compositional and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*. 2013, 38, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.029>
- van Hees, R. P. J. Damage diagnosis and compatible repair mortars. In: Bartos P., C. Groot a J. J. Hughes (eds.). In: *Historic mortars: characteristics and tests*. Cachan: RILEM Publications, 1999, 27-35.
- Lanas, J. a J. I. Alvarez-Galindo. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behaviour. *Cement and Concrete Research*. 2003, 33(11), 1867-1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
- Lanas, J., J. L. Pérez Bernal, M. A. Bello a J. I. Alvarez Galindo. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(12), 2191-2201. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.005>
- Marques, S. F., R. A. Ribeiro, L. M. Silva, V. M. Ferreira a J. A. Labrincha. Study of rehabilitation mortars: construction of a knowledge correlation matrix. *Cement and Concrete Research*. 2006, 36 (10), 1894-1902. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.005>
- Pavía, S. a E. Treacy. A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures*. 2006, 39(3), 391-398. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9033-4>
- Pozo-Antonio, J. S. Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*. 2015, 77, 472-478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>
- Silva, B. A., A. P. Ferreira Pinto a A. Gomes. Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works. *Construction and Building Materials*. 2015, 94, 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.058>