Příloha metodiky *Postup při stanovení složení opravné malty pro opravu štukových děl*

projektu MK ČR NAKI i.č. NAKI DF11P01OVV027 „**Vybrané památkové postupy pro zkvalitnění péče o sochařské a stavební památky**“, *dílčí úkol 1*, „*Historické techniky v renesančním štukatérství*“, dílčí cíl „*Znovuzavedení speciální technologie „taille directe“ používané v renesančním štukatérství do památkové péče*.“

Modelová studie – Návrh a optimalizace doplňků na renesanční štukový reliéf Poseidona z areálu SZ v Telči

V rámci metodiky byla vypracována modelová studie postupu při stanovení složení opravné malty na referenční objekt projektu, renesanční štukový reliéf Poseidona z areálu SZ v Telči (Obr. 1). Řešení problému návrhu a optimalizace opravných malt navazovalo na rozsáhlý restaurátorský průzkum, který byl podrobně zaměřen na komplexní výzkum původního štuku. Na něj v roce 2014 navázal restaurátorský zásah, při kterém měly být navrženy opravné malty pro opravu reliéfu. Řešení problému na reálném objektu mělo ověřit navrženou metodiku a upozornit na problémy a kritická místa při návrhu složení opravných malt.

Obr. 1Štukový reliéf Poseidona, Horní zahrada, SZ Telč. Stav v roce 2009. Foto: Renata Tišlová.

Jak již bylo naznačeno v obecné části metodiky, je provedení opravy dáno řadou dílčích aspektů. Hlavním východiskem je vždy složení opravné malty, které by mělo složením i vlastnostmi vycházet z originálu (viz. *kapitola 3* Obecné části metodiky). Provedení konkrétní opravy i složení materiálu pro opravu je však dále určováno dalšími vlivy. V daném případu obnovy byly určující zejména:

Stav památky – před zahájením průzkumných prací byl reliéf prezentován v podobě s druhotnými překryvnými vrstvami. Míra autentických povrchů a hmot byla zcela nezřetelná, zkreslená několika restaurátorskými zásahy. Orientační průzkumy prokázaly přítomnost několika opravných vrstev nanesených na renesanční modelaci. Samotný renesanční štuk byl z veliké části dochován bez původního povrchu, jen lokálně s vrstvou druhotné modelace, kterou lze jen velmi pozorným průzkumem odlišit od originálu. Tato rekonstrukce, pravděpodobně pocházející z přelomu 19. a 20. století, provedená v kvalitním štuku, má známky velmi jemné práce s drobnou vtlačovanou modelací, jako lze pozorovat na renesančních štukových dílech. Vzhledem ke kvalitě provedení byla tato modelace, pokud se nacházela v dobré stavu, ponechána jako doklad dobového přístupu k rekonstrukci renesančních děl. Druhým vážným důvodem pro ponechání je bezesporu fakt, že tato rekonstrukce je nositelem tvaru a modelace, který může být lépe rekonstruován. Stav samotného renesančního štuku je velmi špatný, vyznačující se vysokou mírou zvětrání ve hmotě i poškozením ve struktuře. Hmota štuku je značně rozpraskaná, avšak při detailním průzkumu je zřejmé, že praskliny ve štuku souvisejí s charakterem použité malty (pravděpodobně na vápenné bázi) a typem aplikace (nanášení velkých objemů, hmot, vrstvení, detailní popis je uveden dále). Přítomnost trhlin ve štukové maltě byla s největší pravděpodobností hlavní příčinou rozsáhlého poškození štukového reliéfu, které se projevilo s časem účinkem působení vnějších atmosférických vlivů. Jejich působením docházelo k postupné degradaci a následné ztrátě hmoty štuku, v jehož důsledku muselo docházet k opakovaným rekonstrukcím.

Při návrhu opravné malty pro rekonstrukci musí být stav štuku důsledně reflektován. Při výběru receptury opravné malty je hlavním principem přiblížit se maximálně složením i vlastnostem originálu, avšak v tomto případě je nutné vzít v úvahu také trvanlivost zásahu. Opravná malta s vlastnostmi originálu by pravděpodobně vůči daným podmínkám expozice nebyla dostatečně odolná a trvanlivá. V tomto případě by tedy mělo být hlavním východiskem složení malty, které bude, dle možností, respektovat originál; přiblížení ve vlastnostech bude však pouze vodítkem a orientačním hlediskem srovnání.

Koncepce obnovy – z restaurátorského průzkumu reliéfu byla navržena koncepce obnovy, která zahrnovala odkryv a odstranění sekundárních dožilých oprav na identifikovaný renesanční štuk. Některé části, zdařile rekonstruované na přelomu 19. a 20. Století, budou ponechány, neboť jejich pojetí i rekonstrukce jsou vysoce kvalitní, často kopírující modelaci originálu. Kromě jejich umělecko-řemeslných kvalit jsou tyto doplňky tvarově určující pro doplnění reliéfu. Koncepce doplňků bude vedena k úplné tvarové i modelační rekonstrukci zahrnující obnovu ploch i tvarů včetně povrchu v původním pojednání. Z tohoto hlediska je třeba koncipovat opravnou maltu; její základní receptura musí být relativně jednoduchá, aby mohla být použita pro rekonstrukci v takovém rozsahu, její koncipování by mělo dále směřovat k dvěma základním typům aplikace (jádrová malta i štuková malta pro finální úpravu povrchu). Složení obou typů malt by mělo vycházet z jedné receptury, pro povrchovou modelační maltu bude složení základní receptury modifikováno dle principu pojetí štukatérské techniky *´al antica´*.

Zpracování opravné malty, rozsah a typ opravy z navržené koncepce vyplývá, že opravný materiál musí vyhovovat dvěma základním oblastem použití: při rekonstrukcích v místě hlubokých a rozsáhlých defektů (doplňování jádrové hmoty) a také při úpravě povrchu, při které jsou žádoucí vysoce plastické schopnosti malty i docílení finálního charakteru povrchu (např. uhlazení, protlačováním, kletováním). Rekonstrukce bude provedena tradiční technologií *´al antica´*, také označovaná jako *´taille directe´*, při které dochází k postupnému nanášení a vrstvení štukových hmot. Tím vznikají vysoké nároky na plasticitu tvárné směsi, rozměrovou a tvarovou stálost při nanášení velkých objemů a hmot, možnost hrubé i finální modelace.

Charakterizace vlastností originální malty je dalším hlediskem při koncipování opravné malty. Celkový rozsah charakterizace popisuje obecná část metodiky společně s nástroji, které lze pro její určení použít. V reálných příkladech obnovy však nelze kompletní charakterizaci originálu většinou provést. Limitem většinou je, a to i v případě dané studie, množství vzorků, které lze odebrat z originálu. Jejich množství ovlivňuje rozsah charakterizace. Dalším problémem z hlediska posouzení kompatibility opravné malty je také stav originálu, k jehož vlastnostem se má doplněk blížit (viz. výše). Originál je většinou silně zvětralý s vlastnostmi, které nelze považovat za standardní. Při restaurování se jeho stav (vlastnosti) mohou ještě vyvíjet – materiál prochází konsolidací, zajištěním.

Uvedená východiska určila postup při návrhu receptury opravné malty pro reliéf Poseidona:

1. ***Charakterizace materiálového složení malty originálu***
2. ***Výběr opravné malty – varianty řešení zohledňující dva typy aplikace, nutnost modifikace zpracovatelských a aplikačních vlastností pro svrchní štukovou maltu, reflexe současné praxe, materiálů, jejich dostupnost, trvanlivost zásahu.***
3. ***Posouzení opravných směsí na základě zpracovatelských a aplikačních vlastností. Modifikace malt.***
4. ***Stanovení vybraných fyzikálně-mechanických vlastností originálu.***
5. ***Porovnání opravných malt v dílčích fyzikálně-mechanických charakteristikách. Nakolik jsou v daném případě určující?***
6. ***Optimalizace opravných směsí na základě hodnocení zpracovatelských vlastností při ateliérových testech a restaurování.***

1 Charakterizace historického štuku reliéfu Poseidona

1.1 Odběr vzorků maltoviny, metody průzkumu

Z jasně identifikovatelných částí originálu byl odebrán úlomek maltoviny v množství ca 20 g. Malé množství vzorku určilo omezení rozsahu prováděných analýz. Z předchozích výsledků vyplynulo, že komplexní informaci o chemickém a mineralogickém složení jednotlivých komponent malt je schopna poskytnout kompletní *mikroskopická analýza*, zahrnující optickou

mikroskopii v nepolarizovaném i polarizovaném světle (mikroskop Nikon LV100), doplněná o *rastrovací elektronovou mikroskopii a EDX mikroanalýzu* (REM-EDX; rastrovací elektronový mikroskop Mira3 Tescan s EDS systémem Bruker Quantax) umožňující prvkovou a obrazovou analýzu. Zvláště polarizační mikroskopie představuje techniku, která je při analýze malt, přes svůj velký potenciál, podceňovaná. Tato metoda je schopna poskytnout detailní informace o mineralogickém složení pojiva, kameniva, příp. jiných komponent malty. S cílem určit poměr a zastoupení jednotlivých složek malty (receptura) byla obrazová analýza provedena z výpočtu poměru ploch jednotlivých komponent (kameniva a pojivové složky) v definované ploše vzorku. Tento poměr lze, při určitých zjednodušeních (homogenní distribuce složek, pravidelný tvar částic plniva), považovat za poměr objemů jednotlivých složek.

Fragmenty štukové malty byly odebrány v rámci průzkumu objektu a pro účely mikroskopie zpracován do formy leštěného výbrusu zalitím vzorku do modré kontrastní epoxidové pryskyřice pro zvýraznění porézního systému. Pro upřesnění výsledků získaných mikroskopickými technikami *byla provedena fázová rentgenová difrakční* analýza, která doplnila informaci o mineralogickém složení malt. Analýza byla provedena ve spolupráci s Mgr. Daliborem Všianským z Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity, z Ústavu geologických věd. Měření bylo provedeno na přístroji Bruker D8 s Cu-anodou (λ Kα = 0,15418nm, 40 kV, 40 mA), práškové difraktogramy byly naměřeny v intervalu 2-80° úhlu 2Θ, krok měření byl 0.04°2Θ, 188 s/krok. Kvantitativní fázová analýza byla provedena pomocí Rietveldovy metody s CaF_2 jako vnitřním standardem.

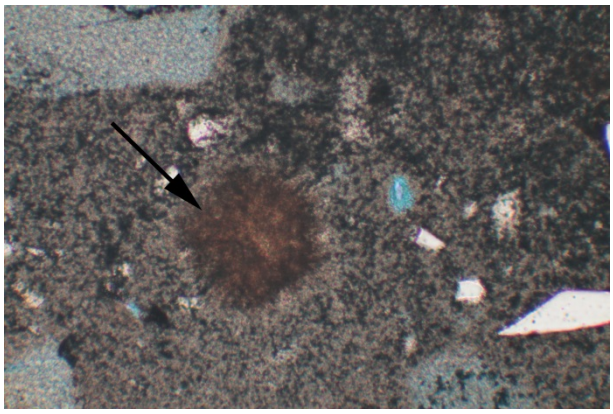
Obr. 2 a, b Okrová barevnost renesančního štuku. a) Stav po odkryvu na renesanční štuk, míra dochování, b) makrofoto příčného řezu maltou, snímek ze stereomikroskopu Nikon SZ-100 v odraženém světle. Na povrchu příčného řezu patrná bílá oprava z 20. století. Foto: a – Jana Waisserová, b – Renata Tišlová.

Charakteristika renesanční malty Poseidona

Reliéf Poseidona je vytvořen technikou vrstveného štuku z velmi tvrdé maltoviny v okrové barevnosti (Obr. 2). Vizuálně odlišné zbarvení a nehomogenní mikrostruktura malty byly první indicie při posouzení pojiva štukové malty. V rámci průzkumu byly popsány základní komponenty štukové malty – pojivo a kamenivo; analýzou malty byl vyloučen obsah některých přísad (zejména anorganického původu, s puzzolánovou aktivitou).

Pojivo

Na základě mineralogické analýzy provedené polarizační mikroskopií i fázové (mineralogické) rentgenové difrakční analýzy (Tab. 1) je *pojivem* jádrové štukové malty z Poseidona přirozeně hydraulické vápno s nízkým obsahem Mg v matrici, který je v maltách značně nehomogenně distribuován (mol. poměr Ca/Mg se přibližně pohyboval v intervalu 4-19) (Obr. 3).



Obr. 3 Lokálně přítomné dolomitické fáze ve štukové maltě Poseidona, PLM, II nikoly. Foto: T. Köberle.

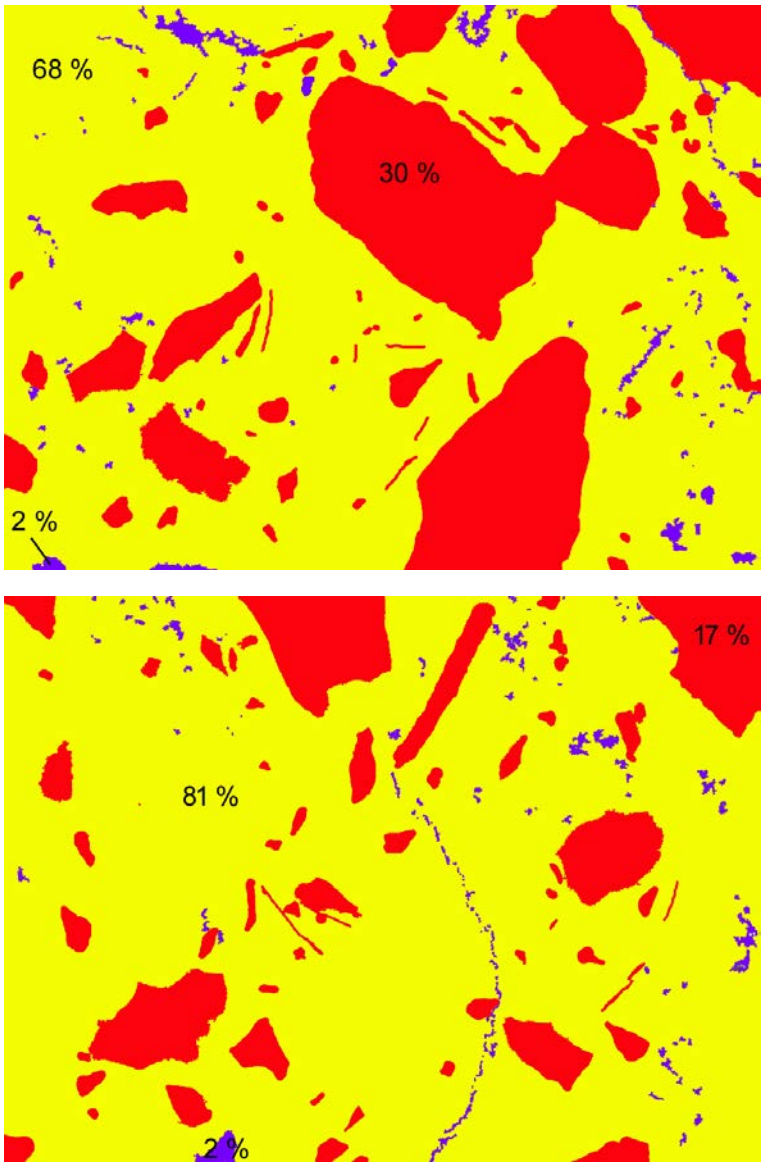
Vzorek	Mineralogické složení (dle XRD) hm.%					
	kalcit	křemen	illit+slídy	živec	sádrovec	amorfní podíl
TP Poseidon	35,9	20,5	3,0	8,5	1,4	30,7

Tab. 1 Mineralogické složení štukové malty Poseidona stanovené pomocí rentgenové difrakční analýzy.

Matrice je kompaktní s přítomností makropórů, bez výrazných trhlin charakteristických pro vzdušná pojiva. Z makroskopického hlediska se matrice vyznačuje značnou anisotropií s lokální přítomností nehomogenit; charakteristická je přítomnost nedopálených částic původní horniny, částic s koncentrovaným pojivem a částic s hydratačním lemem, které jsou indicií pro hydraulická pojiva. Molární poměr Ca/Si v matrix činí 2,5-5,0 resp.Ca/Al 14,0-20,0. Analýzou nerozmíchaných částic pojiva bylo zjištěno, že surovinou pro výpal vápna byl přirozeně znečištěný vápenec s lokálním obsahem alumosilikátů, pravděpodobně jílových minerálů s obsahem Si, Al, Mg, Ti, lokálně i Fe. Tyto částice se po výpalu mění na typické reaktivní částice s charakteristickým vznikem zón s různou distribucí prvků (uprostřed Al, Si, K, koncentrace Ca naopak roste směrem k hranicím částice).

Z obrazové analýzy vzorku vyplynul poměr složek pojiva a kameniva; obrazová analýza byla pro přesnější určení stanovena ve dvou částech vzorku (Obr. 4). Z výsledků je zřejmé, že v původní maltě převažuje pojivová složka, poměr obsahu pojiva a kameniva byl stanoven

v intervalu 2 : 1 - 4 : 1, obj. Poměr 2 : 1 byl ve fázi přípravy opravných malt vybrán pro základní recepturu.

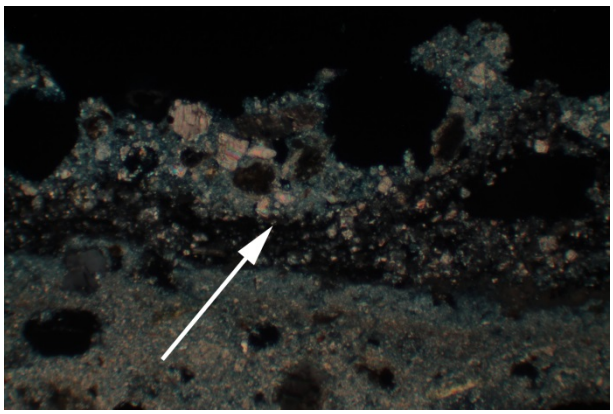


Obr. 4 Obrazová analýza vzorku štukové malty z reliéfu Poseidona. Poměr pojiva a kameniva odpovídá objemovým poměrům 2 : 1 (nahoře) – 4 : 1 (dole).

Kamenivo

Charakter kameniva byl popsán na základě obrazové analýzy mikroskopickými technikami. Malé množství vzorku neumožnilo jiný typ analýzy např. sítovou analýzu, která je v tomto ohledu nejpřesnější. Z mikroskopické charakteristiky lze použité *kamenivo* popsat jako angulární s homogenní distribucí všech frakcí a velikostí zrna kameniva maximálně do 2,5 mm. Použitý písek je pravděpodobně lokální s vysokým zastoupením úlomků hornin a křemene, z minoritních minerálů jsou zastoupeny živce a slídy. Na rozdíl od štuků v kapli Všech svatých malta neobsahuje jiné plnivo (drcený vápenec nebo mramor). Na povrchu se nachází tenká bílá vrstva nebo její zbytky, která může představovat součást původního

provedení a mohla imitovat bílý vzhled „bílého římského štuku“ (Obr. 5). Její přítomnost, i když je dochovaná pouze ve fragmentech, je zřejmá, neboť obsahuje příměs mramorové moučky, která je mikroskopicky jednoznačně identifikovatelná na základě optického chování při zkoumání v procházejícím polarizovaném světle při zkřížených nikolech. Na druhou stranu nelze vyloučit, že vrstva je součástí opravných zásahů z přelomu 19. a 20. století.



Obr. 5 Vrstva bílého vápenného štuku na povrchu reliéfu s obsahem mramorové moučky, snímek z PLM, X nikoly. Foto: Thomas Köberle.

2 Výběr opravné malty – varianty řešení, modifikace vlastností

Na základě složení historické štukové malty bylo pro opravu navrženo několik systémů opravných malt s pojivem na bázi bílého vzdušného a hydraulického vápna, docílení hydraulických vlastností bylo dosaženo i kombinací vápna s hydraulickou přísadou (hydraulickým vápnem nebo cementem). V pojivu nebyl reflektován obsah dolomitického vápna, který byl v nízkém množství indikován v originální štukové maltě. Vápna s obsahem uhličitanu hořečnatého jsou navíc v agresivním prostředí atmosféry velice nestálá podléhající chemické přeměně s fatálními následky.

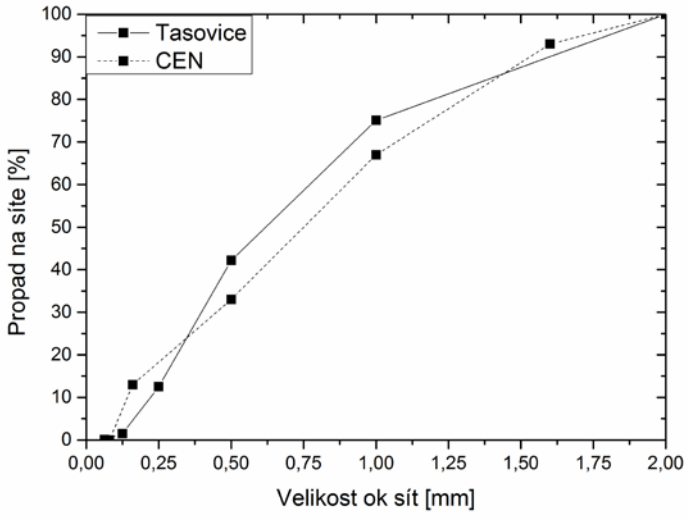
Pojiva opravných malt:

- **bílé vzdušné vápno** - vápenný hydrát CL90, vápenná kaše
- **přirozeně hydraulické vápno** - NHL2, NHL 3,5 (Calx Bohemia, s.r.o.)
- **vápenné modifikované pojivo** – CL90 a NHL2, pojivo kombinující vlastnosti vzdušného a hydraulického vápna. Vzdušné vápno zlepšuje zpracovatelské a aplikační vlastnosti, naopak přídavek hydraulické komponenty byl přidáván s cílem urychlit rychlost tuhnutí, umožnit rychlé nanášení malty ve vrstvách, připravit odolnější maltu oproti maltám s čistým vzdušným pojivem, aj.
- **směsi vápna s cementovým pojivem** – bílým (BC) a naturálním cementem (NC) – reprezentují materiál užívaný pro doplňování v současnosti; vyznačuje se dobrou trvanlivostí v současných podmínkách atmosféry.

Maltové směsi byly namíchány s různým typem kameniva v závislosti na typu aplikace. Normovaný písek byl použit jako typ křemičitého kameniva s distribucí a zrnitostí, která odpovídá ideálnímu složení kameniva vzhledem k vlastnostem malt. Tvarem částic originálu lépe odpovídá lokálně dostupný písek z nedaleké lokality Tasovice, který se vyznačoval mírně odlišnou distribucí od normovaného písku. Oba typy písků neobsahují významný podíl jemnozrnné až prachové frakce. Náhrada normovaného písku za lokální směřovalo k přiblížení vlastností i textuře malty původní štukové směsi. Granulometrie písku byla upravena sítováním dle původního kamenina - byl přesát na frakci d< 2 mm, zastoupení ostatních frakcí uvádí Graf 1. Pro modifikaci svrchní směsi byla též testována vápenná moučka (OMYA, d< 0,2 mm), ačkoliv v původní maltě nebyla objevena. Její použití však obecně zlepšuje plastické i zpracovatelské vlastnosti malt a mohla by být použita do svrchního modelačního štuku.

Použitá kameniva opravných malt:

- **normovaný křemičitý písek** (odpovídá standardům stanoveným EN 196-1), (frakce < 2 mm) (Graf 1).
- **kamenivo zrnitostí i původem lépe odpovídající originálu** (lokální říční písek, lokalita Tasovice, frakce < 2 mm) (Graf 1).
- **vápencová moučka OMYA CZ, s.r.o.** (frakce < 0,2 mm)



Graf 1 Srovnání křivek zrnitosti normovaného písku CEN a lokálnímu písku (Tasovice u Telče), který charakterem lépe odpovídá originálu.

Přesné složení štukových malt uvádí Tab. 2. Receptura R5c reprezentovala modifikovanou směs pro užití na finální modelační vrstvu, ostatní reprezentují složení základního modelačního tmelu. Množství vody bylo voleno tak, aby měly malty konzistenci odpovídající danému typu aplikace (odpovídá rozlivu ca 150 mm), vodní součinitel w/p (množství vody na pojivovou složku) byl 0,27-0,28.

Označení receptur	Poměr (pojivo/kamenivo) obj. d.	Kamenivo	CL 90	NHL 2	NHL 3,5	Románský cement	Bílý cement	w/p
R 1 (CL 90)	2:1	1	2	-	-	-	-	0,28
R 2 (NHL 2)	2:1	1	-	2	-	-	-	0,28
R 3 (NHL 3,5)	2:1	1	-	-	2	-	-	0,28
R 4 (CL90:NHL2)	2:1	1	1	1	-	-	-	0,28
R 5 a (CL90:NHL2)	2:1	1	1,5	0,5	-	-	-	0,28
R 5 b (CL90:NHL2)	2:1	1 (Tasovice)	1,5	0,5	-	-	-	0,27
R 5 c (CL90:NHL2)	2:1	1 Tasovice+ moučka)	1,5	0,5	-	-	-	0,27
R 6 (CL 90+NC)	2:1	1	1	-	-	1	-	0,28
R 7 (CL 90+BC)	2:1	1	1	-	-	-	1	0,28

Tab. 2 Složení vybraných receptur v obj. d. komponovaných pro laboratorní testy.

Pro testování byla připravena zkušební tělesa s rozměry vycházející z požadavků platných standardů: kvádry 4x4x16 cm, krychle 4x4x4 cm.

Všechny směsi byly míchány v míchacím přístroji HOBART s nastavitelnou rychlostí otáček míchání. Nejprve se míchají suché složky na nízké otáčky (rychlostní stupeň 1) po dobu 60 s. Poté se přístroj zastaví a nalije se odměřené množství vody a přístroj se opět spustí na nízké otáčky po dobu 30 s. Poté se směs ručně míchá a následně se domíchá na střední otáčky (2) po dobu 30 s. Vydusané vzorky byly nechány zrát při podmínkách definovaných normou ČSN

EN 1015-11 a byly testovány po 6 měsících. Je nutné upozornit, že tato doba není pro dosažení finálních vlastností malt s vápenným pojivem zcela dostačující, avšak plán projektu a rekonstrukce neumožnil jejich delší zrání.

3 Posouzení opravných směsí na základě zpracovatelských a aplikačních vlastností. Modifikace složení malt.

O výběru štukové malty pro restaurování rozhoduje kromě posouzení materiálového složení také hodnocení zpracovatelských vlastností, které jsou zásadní při užití materiálů restaurátorem či štukatérem. V této metodice bylo provedeno ověření funkčních vlastností navržených štukových směsí, které provedli restaurátoři. Formou praktických zkoušek v ateliéru bylo provedeno ověření zpracovatelských vlastností při tvorbě modelových kopií, které výtvarně i technikou odpovídají reliéfu Poseidona (Obr. 6). Hlavním kritériem hodnocení bylo:

- posouzení plasticity, tj. schopnost modelace směsí v závislosti na reprodukovaném tvaru, původním zpracování a opracování tvarů různými technikami a nástroji, a možnost zpracování štukových malt v čase.

- aplikace - malty musí dále splňovat možnost nanášení štukových směsí postupným vrstvením do mírně zavadlého povrchu otevřeného jemným ´přeškrábnutím´ (na originálních štucích je zřetelné mírné rozhraní velmi podobné navrhovanému postupu). Následuje úprava – „vymačkávání“ tvaru kovovými nástroji, která musí následovat bezprostředně po nanesení štuku. Povrch je třeba upravovat (i po případném „oživení vodou“) poměrně dlouho (v závislosti na teplotě, vlhkosti vzduchu). Z tohoto požadavku vyplývá delší doba zpracovatelnosti tvárné směsi a její pomalejší tuhnutí.

Dle zpracovatelských vlastností vyhovovaly směsi s přírodním hydraulickým vápnem NHL (R2, R3) nebo ještě lépe směsi s obsahem vápna (CL90) a NHL2 (R4 a R5), které se jeví ze zpracovatelského hlediska jako nejvhodnější. Při jejich použití se lze přiblížit aplikacím pozorovaným in-situ. Vyšší obsah pojiva ve směsi dobře vyhovuje danému typu aplikace, zvláště při úpravě povrchu, otázka je, zda by nebylo možné obsah pojiva snížit pro základní modelační tmel. Negativním projevem zvýšeného podílu pojiva je vznik trhlin, které jsou sice charakteristickým znakem originální malty, avšak z průzkumu originálu je zřejmé, že negativně ovlivňují trvanlivost zásahu. Ostatní tvárné směsi lze také hodnotit pozitivně; vápenná malta (R1) se vyznačovala nejlepšími vlastnostmi z hlediska zpracování a aplikace. Dlouhá doba zpracovatelnosti v průběhu tuhnutí malty umožňovala široké možnosti zpracování povrchu, jeho začištění, kletování, aj. Nevýhodou je však dlouhá doba tuhnutí, která omezuje možnost rychlého vrstvení štukové malty v hlubších defektech. Směsi modifikované cementem jsou pro daný typ aplikace také vhodné, vyznačují se výbornými aplikačními vlastnostmi. Zásadní problém nastává při jejich zpracování, které lze provést jen v krátké době z důvodu rychlého tuhnutí směsi.

3.1 Stanovení základních fyzikálně-mechanických vlastností originálu a opravných malt

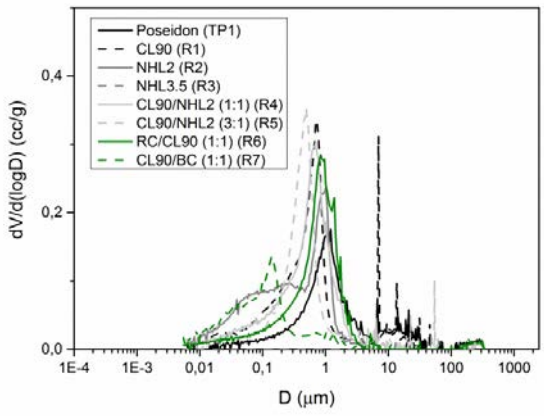
Při laboratorním testování byly u vzorků opravných malt stanoveny vlastnosti, které uvádí *Tab. 1* obecné části metodiky. Jejich komparací s vlastnostmi naměřenými na originální štukové bylo možné provést orientační porovnání jednotlivých opravných systémů a jejich přiblížení k originálu. Bohužel bylo srovnání možné pouze na základě vybraných parametrů, neboť množství odebraných vzorků originálu neumožňovalo jeho kompletní charakterizaci. Opravné malty byly naopak charakterizovány v kompletním spektru vlastností s výjimkou teplotní a vlhkostní roztažnosti, se kterým nemají autoři zkušenost a nedisponují ani zařízením pro jeho měření. Zajímavé je např. hodnocení modulu pružnosti, která je mírou elasticity materiálu. Autoři také vyzkoušeli možnost charakterizace štukových malt pomocí ultrazvukové transmise, neinvazivní diagnostické metody, která umožňuje blíže charakterizovat materiál bez fyzického zásahu do objektu.

Obr. 6 Zkoušky aplikace a modelace - testování tvárných směsí. Foto: Jana Waisserová.

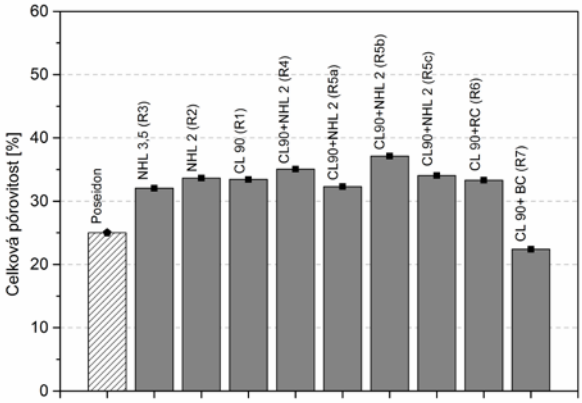
Celková pórovitost a distribuce pórů

Grafy 2 a 3 ukazují rozdíly v porozitě a distribuci referenční štukové malty a opravných laboratorních malt. Malta z Poseidona vykazuje tzv. bimodální distribuci pórů s ostrými maximy kolem 0,8 a 20 μm. Opravné malty lze charakterizovat velmi podobnou distribucí pórů s podobně lokalizovanými maximy v oblasti velikostí 0,5-0,8 μm i prakticky identickým zastoupením těchto pórů (širokost a výška distribučních křivek znamená stejný objem pórů). Rozdíl ve skupině opravných malt spočívá pouze v bimodální distribuci porézního systému u směsi R2 (NHL2) navíc charakterizované póry s velikostí ca 0,1 μm. Ve skupině opravných malt lze dále pozorovat rozdíl u malty R7 (CL90/bílý cement), který se vyznačoval odlišnou porozitou charakterizovanou póry o velikosti <0,1 μm související s hydraulickou reakcí cementové složky pojiva, v jehož důsledku dochází k ´zarůstání´ pórů hydratačními produkty. Přítomnost větších pórů v originálu (oblast s maximem ca 20 μm) jsou sekundární a souvisí se stavem štukové malty. Tyto tzv. makropóry vznikají v porézních stavebních materiálech v důsledku zvětrávání.

Se zastoupením a distribucí pórů souvisí porozita, kterou pro referenční a opravné malty porovnává Graf 3. Z výsledků porozity naměřené pomocí rtuťové porozimetrie je patrná mírně vyšší porozita prakticky všech navržených opravných směsí, které se s výjimkou směsi s bílým vápnem a bílého cementu, vzájemně prakticky shodují a dosahují hodnot ca 33-37%, oproti 25% naměřených na referenční maltě originálu. Porozita referenční malty se spíše překvapivě blíží hodnotě vápeno-cementové malty (ca 23%). Hodnocení porozity jako kritického parametru diskutuje obecná část metodiky; zde se uvádí, že na porositu i skladbu pórů má vliv řada okolností, které lze jen částečně reflektovat při návrhu opravného sytému malty; zejména se jedná vliv obsahu vody použité při přípravě malty nebo v případě naší studie bude hrát roli i doba zrání opravných malt a způsob jejich přípravy (bez substrátu, který ovlivňuje obsah vody). Pro hodnocení dosažené porozity opravných malt byla v metodice také diskutována možná odchylka od porozity originálu, která by vůči němu nebyla ohrožující. Z publikovaných studií i osobních zkušeností autorů vyplývá, že odchylky v porozitě mohou v rámci jednoho typu malt být značné a tento parametr proto nepovažují pro hodnocení za zcela určující. Zároveň upozorňují na váhu jiných hygrických parametrů jako nasákavost, kapilární nasákavost, rychlost vysýchání, které více korelují se skladbou porézního systému opravné malty. Jiným hlediskem posouzení opravy uvádí např. Benátská charta (Mezinárodní charta o konzervaci a restaurování památek a sídel), tj. že ideální opravná malta pro doplňování by měla být dostatečně trvanlivá, avšak měla by časem podléhat přirozenému stárnutí, a to rychleji než stárne originál. Z tohoto hlediska vyšší porozita opravných malt není při posuzování kompatibility problém, spíše naopak.



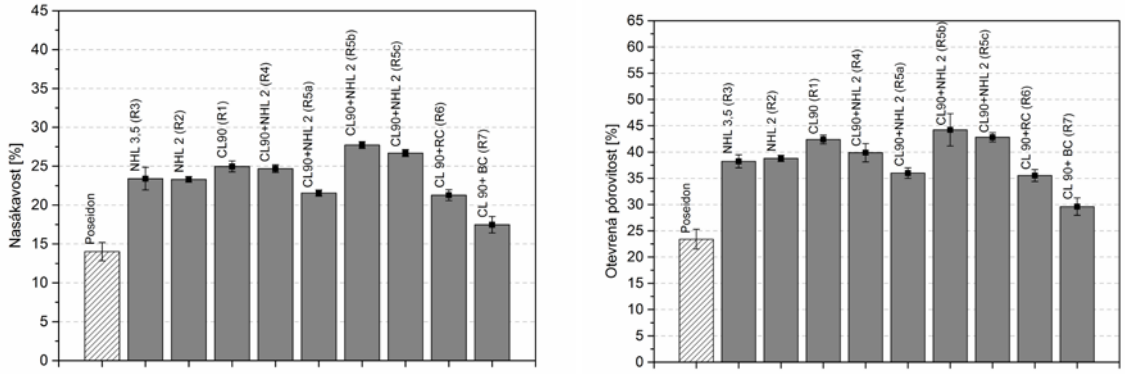
Graf 2 Distribuce velikosti pórů referenční štukové malty z reliéfu Poseidona a opravných laboratorních malt.



Graf 3 Celková pórovitost (stanovená rtuťovou porozimetrií) referenční štukové malty z reliéfu Poseidona a opravných laboratorních malt.

Nasákavost vodou a otevřená porozita

Podobný trend v rozdílu originálu a opravných malt je patrný i při porovnání otevřené pórovitosti a nasákavosti vodou, které byly naměřeny ponořením vzorků do vody za atmosférického tlaku. Většina opravných malt, i když se stejným materiálovým složením, má vyšší porozitu matrice než originální štuková malta. Jediná směs, která je prakticky identická v obou zjištěných parametrech je malta modifikovaná bílým cementem (R7). Vysvětlení tohoto rozdílu může spočívat v době stáří laboratorních malt; 6 měsíců je relativně krátká doba pro dosažení konečných vlastností, zvláště u směsí se vzdušným vápenným pojivem nebo jeho směsi s hydraulickým vápnem.



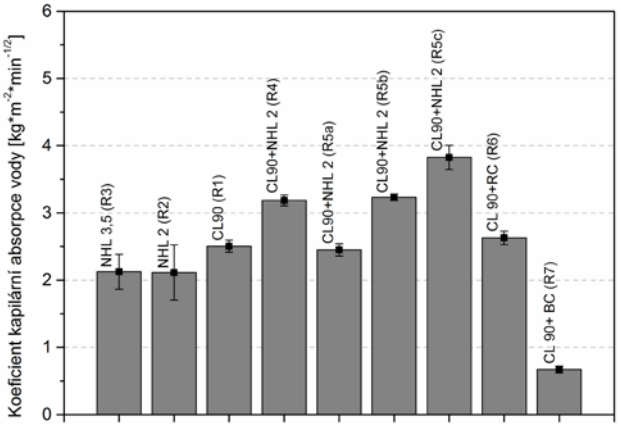
Graf 4, 5 Nasákavost vodou a otevřená pórovitost referenční štukové malty z reliéfu Poseidona a opravných laboratorních malt.

Druhý rozdíl, který lze pozorovat na hodnotách porozity a nasákavosti, jsou podstatně vyšší rozdíly mezi originálním štukem a opravnými maltami, než byl zjištěn měřením porozity rtuťovou porozimetrií. Tento rozpor nebyl jednoznačně vysvětlen, možným vysvětlením je schopnost vody pronikat do menších pórů, které jsou z hlediska principu měření rtuťové

porozimetrie pro rtuť nepřístupné. Vyšší porozita malt jednoznačně potvrdila vysoký obsah vody použité při koncipování záměsí opravných malt, která byla pravděpodobně podstatně vyšší než byla použita v originálu. Rozpor také nemusí souviset s množství samotné vody v záměsi, ale také např. s rozdílem aplikačních podmínek (vliv odsátí vody podkladem, doba zrání, aj.).

Koeficient kapilární adsorpce vody

Tato charakteristika je mírou kapilární aktivity malt, tj. stanovuje množství vody, které je vzorek schopen absorbovat kapilárním systémem za daný časový interval. Dle klasifikace pórů IUPAC jsou tzv. kapilárně aktivními póry, póry s velikostí 0,1-5 μm. Při porovnání zastoupení pórů jsou tyto více zastoupené v opravných maltách a lze tedy předpokládat vyšší kapilární nasákavost těchto malt oproti referenční štukové maltě (ta nebyla z důvodu nepravidelného tvaru tělesa naměřena). Hodnoty koeficientu u všech opravných malt se pohybují v intervalu 2-4 $kg.m^{-1}.min^{-1/2}$, což odpovídá vyšším hodnotám kapilární nasákavosti charakteristickým pro nasákavé, vodopropustné materiály. Rozdíly v takto malém rozmezí absolutních hodnot odpovídají podobné skladbě porézního systému zjištěného rtuťovou porozimetrií všech opravných malt (Graf 2). U malty s bílým cementem je hodnota nejnižší, korelující s vyšším obsahem menších pórů, avšak i přesto jsou absolutní hodnoty v řádu hodnot ostatních opravných systémů (Graf 6).

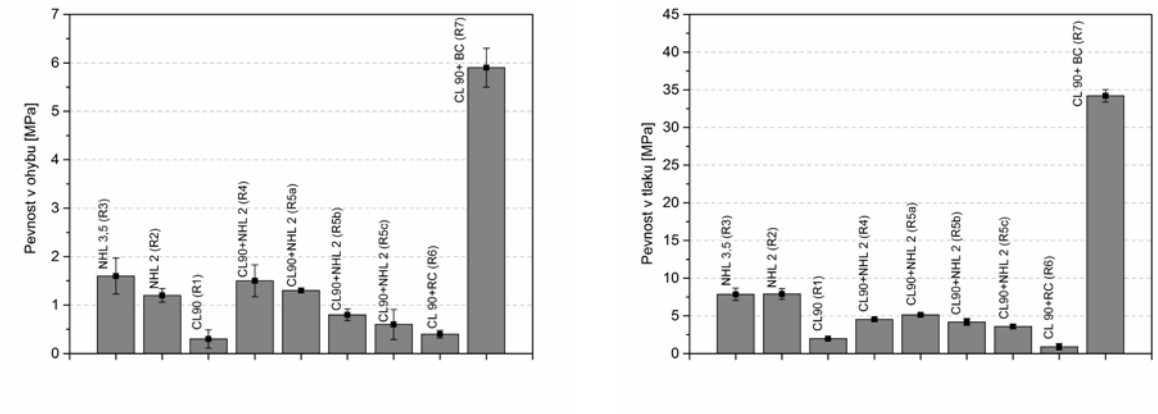


Graf 6 Koeficient kapilární adsorpce opravných malt. Hodnoty pro štukovou maltu Poseidona nebyly naměřeny.

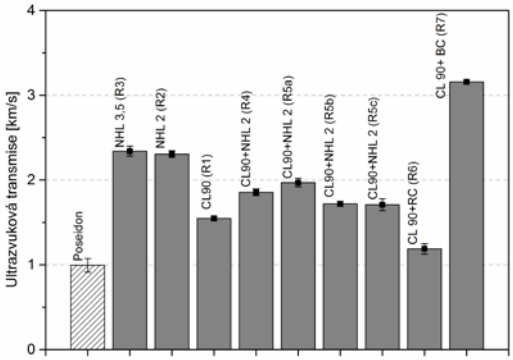
Mechanické vlastnosti a ultrazvuková transmise

Pevnost v tlaku a tahu za ohybu jsou běžně stanovované charakteristiky při posuzování kompatibility opravných malt. V případě této studie, a obecně ve většině případů opravy historických malt a omítek, však tento parametr nelze stanovit, z důvodu velkého množství vzorků pravidelného tvaru potřebného pro provedení měření. Proto se v praxi v současnosti

toto měření nahrazuje měřením rychlosti UZ transmise, akustickou neinvazivní metodou, která je založená na měření rychlosti průchodu UZ vlny (tzv. p-vlny). Z provedených měření byla prokázána souvislost rychlosti transmise s jinými parametry např. pevností, modulem pružnosti, porozitou (Graf 10, 11), z čehož vyplývá možnost určení ostatních materiálových charakteristik na základě jednoho typu měření ultrazvukovou transmisí. Tato metoda bude autory dále rozvíjena, aby mohla být implementována do běžné praxe při diagnostice porézních stavebních materiálů.



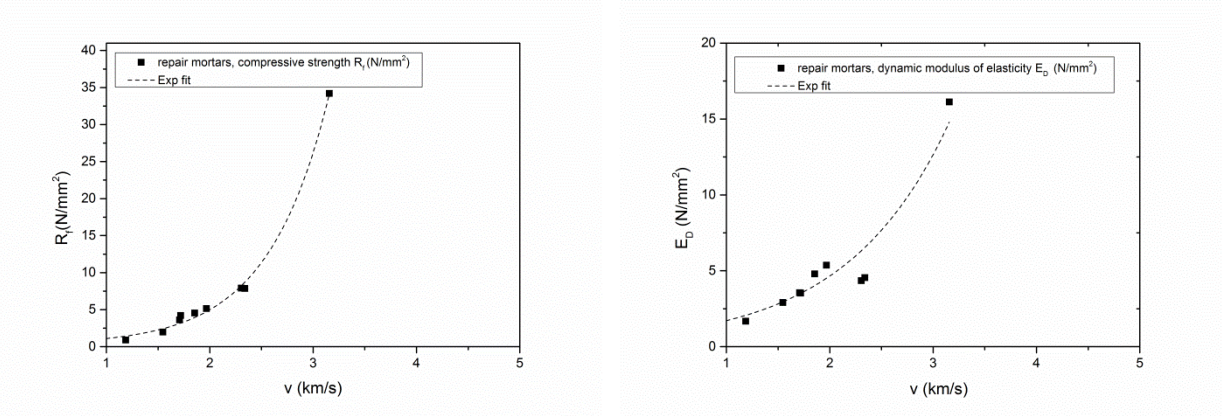
Graf 7, 8 Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu naměřených u opravných malt. Hodnoty pro štukovou maltu Poseidona nebyly naměřeny.



Graf 9 Hodnoty rychlosti ultrazvukové transmise referenční štukové malty z reliéfu Poseidona a opravných laboratorních malt.

Z porovnání rychlosti UZ transmise je patrná výrazně nízká hodnota rychlosti pro referenční štukovou maltu odebranou z Poseidona. Hodnoty kolem 1 km/s odpovídají silně degradovaným materiálům, které jsou na hranici soudržnosti. Výsledky korelují s výsledky získané rtuťovou porozimetrií, při kterém byla potvrzena přítomnost makropórů vzniklých v důsledku zvětrávání. Tyto výsledky potvrdily špatný stav originálního renesančního štuku a jeho silné zvětrání. Zároveň poukazují, že opravné malty nelze ve všech parametrech

důsledně porovnávat s degradovaným materiálem, i když by se mu opravné malty ve vlastnostech měly přibližovat, aby povrch původního štuku neuzavřel materiál s odlišnými vlastnostmi. Dalším závěrem je nutnost důkladného zpevnění štuku, čímž se alespoň částečně obnoví jeho původní vlastnosti.



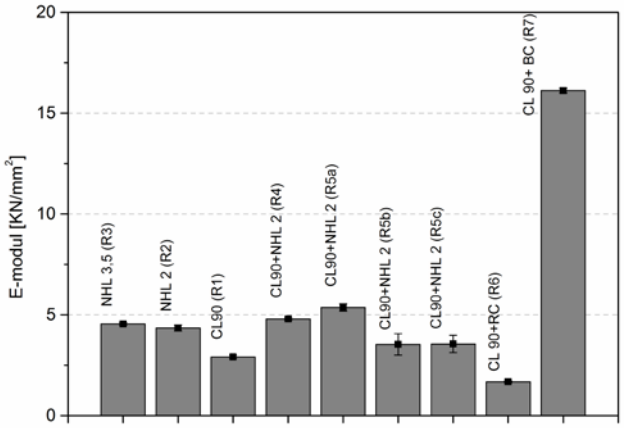
Graf 10, 11 Závislost pevnosti v tlaku a dynamického modulu pružnosti a rychlosti ultrazvukové transmise. Na základě měření lze přibližně určit hodnotu vybraných materiálových charakteristik např. pevnosti v tlaku, modulu pružnosti, aj.

Z porovnání pevností opravných malt vyplývá nejvyšší pevnost malty s bílým cementem (R7), 35 MPa v tlaku, 6 MPa v tahu za ohybu, jejíž hodnoty jsou však nadměrně vysoké, zcela nevyhovující historickému podkladu. Směsi z hydraulického vápna NHL2 a 3,5 (R2 a R3) dosahují shodné pevnosti v tlaku 7,5 MPa, rozdíl v pojivech se projevil pouze v pevnosti v tahu za ohybu; malta na bázi NHL3,5 dosáhla vyšší pevnosti v tahu 1,5 MPa a blíží se hodnotám směsí NHL2 a CL90 s vyšším obsahem NHL2 a směsí s normovaným pískem. Snížení pevnosti v ohybu u směsi R4, lze přisoudit použití vyššího množství NHL2 (obj. poměr CL90:NHL2 1:1). Zvýšení pevnosti v ohybu směsných malt (NHL2+CL90, R4 a R5) oproti směsím s NHL2 a 3,5 (R2 a R3) nelze jednoznačně vysvětlit, možností je vyšší pružnost malt s vápnem a jeho odezva na zatížení ohybem.

Modul pružnosti

Je parametr, který je mírou odezvy materiálu vůči změnám v okolí (vlhkosti, teploty, zatížení), jeho elasticity. V Grafu 12 jsou prezentovány hodnoty modulu pružnosti E_d naměřené na vzorcích studovaných opravných malt. Měření modulu pružnosti je vázáno na pravidelnou geometrii tělesa, u fragmentů odebraných z objektu ji proto nelze stanovit. Dynamický modul pružnosti lze charakterizovat jako odezvu materiálu na napětí působící deformaci materiálu, tzn. že čím je hodnota modulu pružnosti nižší, tím je materiál méně odolný vůči napětí a naopak. Z tohoto hlediska jsou malty s nejnižším dynamickým modulem pružnosti malty na bázi vzdušného vápna CL90 (R1) a vápenné malty modifikované naturálním cementem CL90+RC (R6). Obecně vyšší modul pružnosti mají překvapivě směsi

s hydraulickým vápnem a hydraulickým vápnem ve směsi s vzdušným vápnem, které se shodně blíží hodnotě 5 kN/mm^2 (R2, R4, R5a). Extrémně vysoký modul pružnosti u vápenné malty s bílým cementem (R7) vyplývá z jeho složení, zejména přítomnosti cementu. Tyto malty jsou vysoce pevné a zároveň i houževnaté a to díky přítomnosti cementové složky; z těchto důvodů směsi s cementem nelze pro obnovu historických omítek a štuků doporučit.



Graf 12 Modul pružnosti opravných malt. Hodnota pro štukovou maltu Poseidona nebyla stanovena.

Modifikací směsí jiným typem kameniva R5b (Tasovice) a R5c (Tasovice a vápencová moučka) dochází k poklesu modulu pružnosti k hodnotě ca 3 MPa. Vliv typu kameniva na modul pružnosti i mechanické charakteristiky mohou autoři potvrdit i na základě měření těchto charakteristik doplňků s jiným složením. Křemičitý CEN písek s ideální distribucí se ve směsích s minerálními pojivy vyznačuje vždy vysokým modulem pružnosti oproti jiným typům plniv (říční písky s nehomogenním složením, karbonátová plniva, drtě).

4 Porovnání opravných malt v dílčích fyzikálně-mechanických charakteristikách. Nakolik jsou v daném případě určující?

Z provedené studie vyplývá, že v daném případě lze srovnání provést pouze na základě několika vybraných hledisek a pokud jsou stanoveny, mohou mít zcela odlišnou váhu. V této studii byla při návrhu systému opravné malty zásadní materiálová charakteristika, zpracovatelnost a aplikační hledisko, značně omezené (z výše uvedených důvodů) je hledisko založené na komparaci materiálových vlastností originálu a opravných malt. Uvedená zjištění se autoři snažili zohlednit při celkovém ohodnocení kompatibility navržených opravných malt (Tab. 3). Hlediska kompatibility byla rozdělena do jednotlivých kategorií a ohodnocena vzhledem ke shodě s originálem. Inspirací pro tento systém hodnocení byly dvě základní studie, které se hodnocením oprav/doplňků podobným způsobem zabývají [22-23].

Charakteristika	Indikátor kompatibility	Hodnocení kompatibility (kritéria pro hodnocení)
Chemické a mineralogické složení	pojivo, kamenivo, receptura	**stejné → 0** odlišné → 10 nebo **stejné → 0** částečně odlišné → 5 zcela odlišné → 10 (přesné hodnocení lze upřesňovat na základě shody v obsahu jednotlivých složek, vyžaduje přesnou znalost složení originálu)
Porézní systém	distribuce	*S a R (substrát a oprava)* **odlišné o méně než 10%→ 0** 10-30% → 2 30-50% → 5 více než 50% → 10
Hydrofilní vlastnosti (hygrické vlastnosti)	koeficient kapilární absorpce vysýchání propustnost pro vodní páry	
Mechanické vlastnosti	pevnost v tlaku	

Tab. 3 Indikátory kompatibility a stupně hodnocení dle Silva et al. (2015) [23] a Delgado Rodrigues a Grossi [22].

Zvláště inspirativní je v tomto ohledu druhá práce autorů Silva et al. [23], která reviduje poznatky studie [22] a zcela novým způsobem zavádí hodnocení kompatibility. Každému dílčímu aspektu přidává hodnocení na stupnici 0-10, přičemž autory navržené stupně hodnocení jsou reprodukovány v Tab. 3. Z těchto dílčích indikátorů kompatibility byla vypočítána celková nekompatibilita jako stupeň nekompatibility (ID index) a to dle výpočtu, který udává [22]. Opravné malty s ID bližším 0 lze charakterizovat jako kompatibilní, s rostoucí hodnotou ID naopak klesá shoda doplňku s originálem. Hodnocení navržených opravných malt udává Tab. 4. Ze všech uvedených hledisek jsou pro daný typ substrátu a opravy nejkompatibilnější opravné malty R5 s kamenivem z lokality Tasovice (R5b a c), naopak nejméně kompatibilní je, na základě hodnocení uvedených hledisek, malta s obsahem bílého cementu (R7).

5 Finální optimalizace opravných směsí na základě hodnocení zpracovatelských vlastností při zkouškách in-situ, zohlednění poznatků z restaurování.

Na základě hodnocení restaurátorů při zkouškách in-situ bylo nutné složení opravných maltových směsí dodatečně ještě mírně upravit, neboť, jakkoliv složení malty vycházelo z originálu, neodpovídalo chování malty v reálných podmínkách požadavkům restaurátorů. Navržené a testované malty se vyznačovaly při zkouškách in-situ zejména vysokou mírou

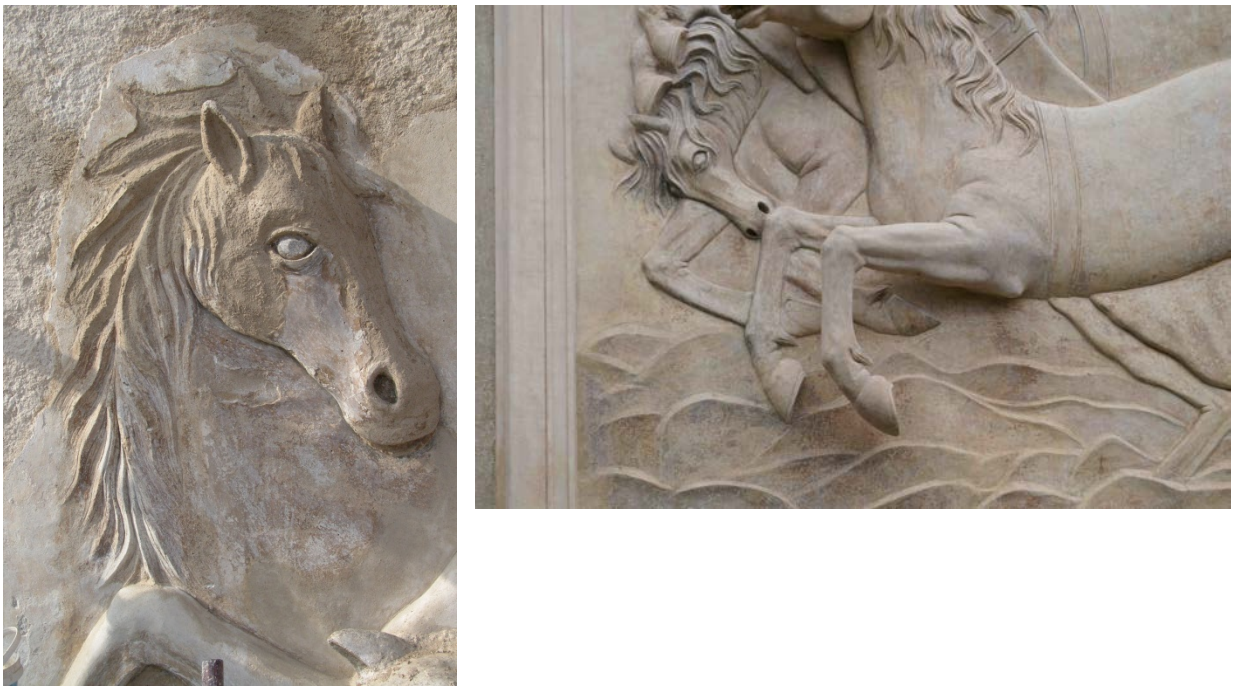
smrštění při nanášení. Navržená receptura také ne zcela vyhovovala všem typům aplikací. Zvláště obezřetně bylo nutné navrhnout jádrovou maltu, která by umožnovala nanášení velkých objemů hmoty a to v relativně krátké době po sobě, dále upravit složení receptury pro jemné modelace. Pro dosažení vhodných plastických vlastností odpovídající typu aplikace byl upraven poměr pojiva a kameniva, zrnitost užitého kameniva i snížen vodní součinitel.

Základní modelovací tmel byl připraven s vyšším obsahem hrubozrnného kameniva oproti původně navrhnutým opravným směsím (2 : 1, obj.). Cílem bylo redukovat smrštění malty při vysýchání, k čemuž mělo napomoci i snížení obsahu záměsové vody. Experimenty bylo zjištěno, že pro dosažení dostatečně tvárné konzistence vystačí vodní součinitel 0,22 oproti 0,27-0,28 použitém při přípravě laboratorních malt.

Štuková směs pro jemné modelace vycházela z navržené receptury poměrem složek. Jediný rozdíl oproti laboratorním maltám spočíval v koncipování kameniva, které bylo upraveno dle nároků daného typu aplikace s přesátým jemnozrnným kamenivem o velikosti D 0,05-0,15 mm (Obr. 7).

Složení štukových malt:

ZÁKLADNÍ MODELOVACÍ TMEL	JEMNÉ MODELACE
POJIVO : KAMENIVO 3 : 2 (obj.) - POJIVO : KAMENIVO 1 : 1 (obj.)	**POJIVO : KAMENIVO 2 : 1 (obj.)**
Pojivo: CL90 (hydrát, kaše)/NHL2 (1 : 2),	Pojivo: CL90 (hydrát, kaše)/NHL2 (1 : 3),
Kamenivo: maltový písek (D<2 mm), vápencová moučka (3 : 1, obj.)	kamenivo: maltový písek (D<1,5 mm), vápencová moučka (3 : 1, obj.)
vodní součinitel: 0,22	vodní součinitel: 0,22



Obr. 7 Aplikace opravných malt na objektu, příklad použití. Stav po restaurování (vpravo). Foto: Renata Tišlová.

Označení receptur	Pojivo	Kamenivo	Zpracovatelnost, aplikace	Skladba pórů	Porozita	Nasákavost vodou	Hodnocení kompatibility (ID index)[21]
R 1 (CL 90)	5	2	0	0	2	2	**2,5**
R 2 (NHL 2)	0	2	5	0	2	2	**2,5**
R 3 (NHL 3,5)	0	2	5	0	2	2	**2,5**
R 4 (CL90:NHL2)	0	2	0	2	5	5	**3,1**
R 5 a (CL90:NHL2)	0	2	0	0	2	2	**1,4**
R 5 b (CL90:NHL2)	0	0 (Tasovice)	0	0	2	2	**1,2**
R 5 c (CL90:NHL2)	0	0 (Tasovice+moučka)	0	0	2	2	**1,2**
R 6 (CL 90+RC)	5	2	5	0	2	2	**3,2**
R 7 (CL 90+BC)	5	2	5	10	0	0	**5,1**

Tab. 4 Hodnocení kompatibility opravných malt pro štukový reliéf Poseidona – objektivní parametry porovnání. Míra kompatibility je vyjádřena jako tzv. ID index, který se počítá dle [21] ze všech hodnocených parametrů, kterým byla přiřazena stejná váha 1.