

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA RESTAUROVÁNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

Dana MACOUNOVÁ

**UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA RESTAUROVÁNÍ**

**Restaurování vápencové sochy světice č. 1 s využitím nanosuspenzí  
na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / Zhodnocení možností využití nanosuspenzí na  
bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pro konsolidaci organodetrického vápence  
v porovnání s běžně používanými prostředky na bázi TEOS;  
*Rozšířená restaurátorská zpráva***

**BcA. Dana Macounová**

**Diplomová práce  
2013**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **BcA. Dana Macounová**  
Osobní číslo: **R11016**  
Studijní program: **N8206 Výtvarná umění**  
Studijní obor: **Restaurování a konzervace děl nástěnné malby, sochařských děl a povrchů architektury**  
Název tématu: **Restaurování vápencové sochy světice č. 1 s využitím nano-suspenzí na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / Zhodnocení možností využití nanosuspenzí na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pro konsolidaci organodetritického vápence v porovnání s běžně používanými prostředky na bázi TEOS: rozšířená restaurátorská zpráva**  
Zadávací katedra: **Ateliér restaurování kamene**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Komplexní restaurování vápencové sochy světice č. 1 z Českého muzea stříbra v Kutné Hoře (sbírkový předmět) se zaměřením na studium možností aplikace nano-suspenzí na bázi hydroxidu vápenatého pro konsolidaci vápenců z oblasti kutnohorska. Rozsah diplomové práce: Diplomová práce zahrnuje samostatné řešení restaurátorského úkolu v plném rozsahu od zpracování návrhu na restaurování, přes důkladný restaurátorský průzkum až po vlastní restaurování a zpracování restaurátorské dokumentace. Zvláštní pozornost bude věnována studiu možností aplikace nano-materiálů pro zpevnění karbonátových podkladů (v rámci projektu NanoForART Nano-materials for the conservation and preservation of movable and immovable artworks; project number 282816; FP7-ENV-NMP-2011). Budou stanovena kritéria pro vyhodnocení konsolidantu s nejlépe vyhovujícími vlastnostmi a prostředek vyhodnocený jako nejlépe vyhovující na základě laboratorních zkoušek bude použit pro konsolidaci degradované vápencové sochy. Práce budou průběžně konzultovány s technologi a budou probíhat s dohledem pedagogů restaurátorů. Používané postupy a technologie budou voleny na základě důkladných zkoušek. Rozsah teoretické (experimentální) části diplomní práce: - příprava série referenčních vzorků odpovídajících hornině použité na zhotovení sochy světice č. 1 (organodetritický vápenec z lokality Kutná Hora) a zjištění jejich základních vlastností - provedení zkoušek konsolidace a optimalizace aplikační metody u prostředků na bázi nanosuspenzí hydroxidu vápenatého - vyhodnocení konsolidační schopnosti jednotlivých konsolidantů, resp. možných negativních vlivů souvisejících s aplikací hodnocených konsolidantů - podle výsledků laboratorních zkoušek odzkoušení vybraného typu prostředku na referenční ploše reálného objektu - shrnutí a závěrečné vyhodnocení výsledků zkoušek

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

**závěrečné práce studentů Fakulty restaurování Univerzity Pardubice a Institutu restaurování a konzervačních technik o. p. s. Kotlík P.a kol., Stavební materiály historických objektů, Praha 1999 Zelinger, J., Chemie v práci konzervátora a restaurátora, Praha 1987**

**Odborná periodika:**

**Studies in conservation Restauro Journal of the American Institute for Conservation Zprávy památkové péče Kámen Publikace STOP**

**Internetové zdroje:**

**www.sciencedirect.com <http://aata.getty.edu/NPS/> [www.springerlink.com/](http://www.springerlink.com/)**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Zuzana Slížková, Ph.D.**

Ateliér restaurování kamene

Datum zadání diplomové práce:

**30. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce:

**6. září 2013**

L.S.

Ing. Karol Bayer  
děkan

doc. Jiří Novotný, akad. sochař  
vedoucí ateliéru

V Litomyšli dne 4. září 2013

*Hlavní konzultanti a odborní garanti dílčích částí diplomové práce:*

*Jelikož systémy pro zadávání akademických prací, jejichž výstupem je zadání práce uvedené na předchozích stranách, neumožňují jmenovat další odborníky, kteří se významnou měrou podíleli na vzniku této diplomové práce, považuji za nezbytné jejich uvedení mimo tento systému podléhající dokument. Dovoluji si proto uvést jména odborníků, jež mohou být dle standardních zvyklostí uvedeni jako hlavní konzultanti, nebo odborní garanti dílčích částí diplomové práce.*

*Mezi odborníky, kteří nejvýznamnější měrou přispěli ke vzniku této práce, patří především:*

**Ing. Karol Bayer**

- konzultant pro teoretickou tj. experimentální část diplomové práce a pro dílčí části praktické práce tj. především přírodovědný a chemicko-technologický průzkum stavu sochy světice č. 1

**doc. Jiří Novotný, akad. sochař.**

- konzultant a odborný garant praktické části diplomové práce tj. restaurování sochy světice č. 1 z Českého muzea stříbra v Kutné Hoře

**Ing. Zuzana Slížková, PhD.**

- vedoucí diplomové práce a konzultant pro teoretickou tj. experimentální část diplomové práce

## **Prohlašuji:**

Tuto práci jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Nesouhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice (Dislokované pracoviště – Fakulta restaurování, Litomyšl).

*Práce je podle § 5 odst. 2 autorského zákona dílem souborným a vztahují se na něj ustanovení vyplývající z tohoto odstavce.*

Dále prohlašuji, že při restaurování jsem použila pouze materiálů a postupů uvedených v této rozšířené restaurátorské zprávě a nejsem si vědoma nových zjištění a skutečností na restaurované památce, které by nebyly uvedeny v této zprávě.

Také prohlašuji, že restaurátorský zásah byl proveden v mezích určených zadáním.

Restaurátorská dokumentace je chráněna ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů s tím, že právo k užití ve smyslu zákona číslo 20/1987 sb. v plném znění (o památkové péči) má objednavatel a příslušný orgán památkové péče.

V Litomyšli dne 3. 9. 2013

.....  
BcA. Dana Macounová

**Počet vyhotovení restaurátorské zprávy: 2 ks**

**Místa uložení:**

Vlastník:

České muzeum stříbra,  
Barborská 28, 284 01 Kutná Hora

*- v tištěné a elektronické podobě*

Zhotovitel:

Univerzitní knihovna Univerzity Pardubice  
Studentská 519, 532 10 Pardubice

*- v tištěné a elektronické podobě*

## *Poděkování*

Ráda bych poděkovala vedoucí své práce Ing. Zuzaně Slížkové, PhD., za konzultace a cenné rady a další podněty k jejímu vypracování a především za podporu vytrvat a práci v její stávající podobě dokončit. Poděkování patří rovněž jejím kolegům z ÚTAM AV ČR, především prof. Ing. Miloši Drdáckému, DrSc., dr. h. c., Ing. Jaroslavu Valachovi, PhD., Ing. Haně Hasníkové a Ing. Pavlu Zímovi, za obohacující diskuze a především technickou podporu při prováděných vybraných měření.

Z řad akademických pracovníků Fakulty restaurování UPCE patří největší poděkování panu Ing. Karolu Bayerovi, který se velmi výraznou měrou podílel, svými praktickými radami a provedením některých analýz, rozborů a měření, na celé experimentální části práce a na dílčích částech praktické práce, především průzkumu restaurované sochy světice. Toto poděkování mu patří ale především za to, že ve mně v minulých letech probudil zájem o studovanou tematiku a odborný přístup k restaurování a průzkumu historických objektů vůbec. Tento zájem mi nedovoluje ustrnout na zaběhnutých metodách a upadnout tak do stereotypů, ale pudí mne k jejich vlastnímu prověřování a hledání způsobů k jejich případné optimalizaci. Děkuji mu především za obrovskou motivaci, kterou mi věnoval svým časem stráveným společnými diskusemi i praktickými úkony v nejrůznějších oblastech vědecké činnosti a výzkumu v oblasti restaurování.

Dále bych ráda poděkovala vedení ateliéru restaurování kamene FR UPCE za důvěru, kterou mi projevíli zadáním restaurování sochy světice a také za to, že mi umožnili věnovat značnou část času podrobnému studiu možností strukturální konsolidace na modelových vzorcích v rámci teoretické části práce. Konkrétně bych chtěla poděkovat doc. Jiřímu Novotnému, akad. sochaři za odborné vedení restaurátorského zásahu, Mgr. art. Jakubu Ďoubalovi za nalezení vhodného předmětu restaurování, na který mohly být aplikovány výsledky výzkumu z teoretické části práce, a také svému kolegovi BcA. Petru Rejmanovi za pomoc při dílčích úkonech v průběhu restaurování.

Nápomocen při hledání vhodného objektu k restaurování s využitím vápenných nanosuspenzí byl v jeho první fázi také PhDr. Zdeněk Vácha, kterému za to patří poděkování také.

Realizace dílčích částí práce by se rovněž neobešla bez podpory kolegů z projektu NANOforART, především Ing. Petry Lesniakové, PhD. a Ing. Renaty Tišlové, PhD. a rovněž



kolegů z FCHT UPCE, ve spolupráci s nimiž byla provedena vybraná měření, jmenovití to byli Ing. Luboš Prokůpek, PhD., Dagmar Pitthardová a Ing. Jiří Palarčík, PhD., kterým bych tímto také ráda poděkovala.

Za pomoc při zhotovování stovek uměle připravených zkušebních tělísek pro experimentální část práce děkuji Romanu Kolářovi.

Některé organizační a technické stránky mého celého šestiletého studia by se rovněž neobešli bez vstřícnosti a podpory pracovníků FR UPCE, především Bc. Pavly Novákové, Jitky Korábové, Petry Pokorné, Ing. Markéty Prokešové, Renaty Kladivové, Dany Večeřové a Jiřího Hubinky.

V neposlední řadě patří obrovské poděkování za podporu mé rodině a mým nejbližším přátelům, především BcA. Danielu Hvězdovi, BcA. Ivoně Kociánové, Ing. Blance Kolinkeové, Ing. Evě Dytrychové, BcA. Radce Nádvorníkové, MgA. Martinu Kulhánkovi, a BcA. Tomáši Titorovi.

Závěrem bych ráda vyslovila zvláštní, nezměrné poděkování mé nejbližší přítelkyni BcA. Michaele Navrátilové, která mi byla nesmírnou oporou po celou dobu práce, v jejímž průběhu mi věnovala mnoho času stráveného obohacujícími diskuzemi nad řešenou problematikou i nad tématy z běžného života, které mohly být zdrojem malého rozptýlení v průběhu psaní diplomové práce.

## ANOTACE:

Praktická část diplomové práce je zaměřena na průzkum a restaurování fragmentů barokní vápencové sochy světice č. 1 (sbírkový předmět Českého muzea stříbra v Kutné Hoře). Hlavní pozornost teoretické části práce je věnována možnostem využití vápenných nanosuspenzí pro konsolidaci silně degradovaného kutnohorského biodetritického vápence, ze kterého je socha zhotovena, z důvodu jejich materiálové kompatibility s původním typem pojiva.

Diplomová práce je strukturována jako restaurátorská zpráva, do níž je jako nedílná součást včleněna teoretická neboli experimentální část práce zaměřená na výběr vhodného konsolidantu pro restaurovaný objekt. Těžištěm experimentální části práce je odzkoušení dostupných konsolidantů na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a jejich srovnání s prostředky na bázi TEOS pro strukturální konsolidaci kutnohorského vápence.

## KLÍČOVÁ SLOVA

konzervace, konsolidace, hydroxid vápenatý, nanosuspenze, vápenec

## TITLE

Restoration of a limestone statue saint n. 1 using  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nanosols / Evaluation of the  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  based nanosols utilization possibilities for the consolidation of the organodetrinsic limestone in comparison with consolidants based on TEOS: Extended restoration report

## ABSTRAKT

Practical part of the thesis is focused on the investigation and restoration of fragments of limestone baroque statue of The Saint No. 1 (the object from the Czech Muzeum of Silver collections in Kutna Hora). Theoretical part deals with possibilities for use of lime nanosuspensions for consolidation of heavily degraded biodetrinsic Kutna Hora limestone, from which the statue was made. The aim was to conserve the statue with a consolidation agent providing a binder compatible with the original one.

The thesis is structured like a restoration report with incorporated theoretical and experimental work as an integral part of the whole thesis. Experimental part is focused on the selection of suitable consolidant for the conservation of the statue. The basis of the experiment is testing of different consolidants based on  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nanosuspensions and their comparison with strengthening agents based on TEOS for structural consolidation of Kutna Hora limestone.

## KEYWORDS

conservation, consolidation, calcium hydroxide, nanosuspension, limestone

## OBSAH

Úvod .....	15
1 Restaurátorská zpráva – první část: popis a průzkum objektu .....	17
1.1 Popis objektu.....	17
1.1.1 Lokalizace památky .....	17
1.1.2 Údaje o památce .....	17
1.1.3 Údaje o akci .....	17
1.1.4 Popis památky.....	18
1.2 Nálezová, průzkumová zpráva.....	19
1.2.1 Historie objektu .....	19
1.2.2 Popis stavu památky před započítím restaurátorských prací .....	24
1.2.2.1 Vstupní vizuální průzkum .....	24
1.2.2.2 Charakteristika jednotlivých typů povrchů a jejich poškození na základě vizuálního průzkumu .....	27
1.2.3 Průzkum stavu objektu přírodovědnými metodami.....	40
1.2.3.1 Průzkum povrchových vrstev sochy světice .....	40
1.2.3.2 Měření nasákavosti povrchů kamene .....	68
1.2.3.3 Stanovení vlhkosti a obsah vodorozpustných solí.....	78
1.2.3.4 Základní vlastnosti vápence .....	83
1.2.3.5 Zjištění stavu sochy metodou ultrazvukové transmise.....	89
1.2.4 Sumarizace výsledků průzkumu objektu.....	91
2 Formulace základní koncepce restaurování sochy světice č. 1.....	93
3 Testování konsolidantů pro potřeby konzervace sochy světice č. 1(experimentální část)95	
3.1 Úvod.....	95
3.2 Literární rešerše.....	96
3.2.1 Konsolidace porézních anorganických materiálů.....	96
3.2.2 Nanosuspenze hydroxidu vápenatého.....	97
3.2.3 Organokřemičité zpevňovací prostředky.....	98
3.2.4 Strukturální konsolidace nanosuspenzemi hydroxidu vápenatého .....	99
3.3 Charakteristika testovaných konsolidantů .....	102
3.4 Příprava zkušebních tělísek.....	105
3.4.1 Charakteristika směsi kameniva pro přípravu laboratorních tělísek, lokalizace jejího naleziště, úprava směsi pro přípravu zkušebních tělísek.....	105
3.4.2 Metodika přípravy laboratorních tělísek.....	106
3.5 Aplikace konsolidantů a její podmínky .....	109
3.5.1 Úprava zkušebních tělísek před aplikací konsolidantu.....	109
3.5.2 Rozdělení testovaných konsolidantů do tří základních skupin.....	110
3.5.2.1 Skupina konsolidantů na bázi nanosuspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o koncentraci cca 10 g/l	110
3.5.2.2 Skupina konsolidantů na bázi nanosuspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o koncentraci cca 25 g/l	111
3.5.2.3 Skupina konsolidantů o esterů kyseliny křemičité o koncentraci cca 300 g/l	111
3.5.3 Způsob aplikace a počty aplikačních cyklů.....	111
3.5.4 Doba a podmínky zrání.....	116

3.6	Metody měření vlastností nekonsolidovaných zkušebních tělísek .....	117
3.6.1	Stanovení objemové hmotnosti, nasákavosti a celkové otevřené pórovitosti vodě 118	
3.6.2	Stanovení kapilární nasákavosti vodou volným vzlínáním .....	118
3.6.3	Měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu .....	118
3.6.4	Stanovení pevnosti v tlaku .....	120
3.6.5	Studium mikrostruktury .....	121
3.7	Výsledky měření a charakteristika nekonsolidovaných zkušebních tělísek .....	122
3.7.1	Zjištěné fyzikální charakteristiky zkušebních tělísek .....	122
3.7.2	Výsledky měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu .....	122
3.7.3	Výsledky měření pevnosti v tlaku .....	125
3.7.4	Mikroskopická charakteristika uměle připravených dusaných tělísek ve srovnání s korodovaným vápencem ze sochy světice č. 1 .....	126
3.8	Metodika hodnocení vlivů konsolidace .....	130
3.8.1	Měření ultrazvukové transmise .....	131
3.8.2	Měření pevnosti v tlaku .....	133
3.8.3	Měření základních fyzikálních vlastností pro posouzení důsledků konsolidace .....	134
3.8.4	Posouzení změn barevnosti .....	136
3.8.5	Posouzení změn makro a mikrostruktury .....	136
3.9	Výsledky provedených měření a rozborů .....	137
3.9.1	Posouzení efektivity konsolidace metodou ultrazvukové transmise .....	137
3.9.2	Posouzení efektivity konsolidace měřením pevnosti v tlaku .....	148
3.9.3	Porovnání změn základních fyzikálních vlastností .....	154
3.9.4	Zhodnocení vizuálních změn v důsledku konsolidace .....	157
3.9.5	Výsledky studia makro a mikrostruktury .....	161
3.9.5.1	Makroskopické posouzení konsolidovaných vzorků .....	161
3.9.5.2	Mikroskopické hodnocení konsolidace .....	164
3.10	Shrnutí výsledků měření a rozborů pro posouzení efektivity konsolidace .....	167
4	Zkoušky na reálném objektu .....	169
4.1	Zkoušky aplikace testovaných suspenzí na reálném objektu – soše světice č. 1 .....	169
4.2	Zkoušky omezení negativních jevů při strukturální konsolidaci .....	179
4.3	Sumarizace výsledků testování konsolidantů vápenných nanosuspenzí pro potřeby restaurování sochy světice č. 1 .....	181
5	Restaurátorská zpráva – druhá část: průběh restaurování, zvolené metody a technologie a další doporučení .....	182
5.1	Koncepce restaurování .....	182
5.2	Průběh prací .....	183
5.2.1	Transfer .....	183
5.2.2	Základní očištění sochy a sanace biogenního růstu .....	184
5.2.3	Příprava povrchů sochy pro konsolidaci .....	184
5.2.4	Strukturální konsolidace a injektáž prostředky na bázi vápenných nanosuspenzí 187	
5.2.5	Posouzení účinku konsolidace a hloubky penetrace konsolidantu měřením UZ transmise a testem pomocí roztoku fenolftaleinu .....	191
5.2.6	Redukce bílého zákalu a dočištění vybraných ploch .....	196
5.2.7	Sesazení sochy .....	197
5.2.8	Zajišťovací tmelení .....	199
5.2.9	Barevná retuš .....	201
5.3	Materiály a technologie použité při restaurování sochy světice č. 1 .....	203

5.4	Doporučený režim památky .....	204
6	Závěr .....	205
7	Dokumentace restaurátorského zásahu – obrazová příloha.....	208
	Transfer, základní očištění a sanace biogenních růstů.....	209
	Stav sochy před restaurováním.....	214
	Zákresy poškození .....	220
	Stav sochy po předčištění před konsolidací.....	224
	Průběh jednotlivých kroků restaurování.....	228
	Stav sochy po konsolidaci a injektáži vápennou nanosuspenzí.....	236
	Dokumentace vybraného místa v průběhu restaurování.....	241
	Stav sochy po restaurování .....	244
	Znázornění kovových spojovacích prvků.....	248
8	Použitá literatura a prameny .....	249
9	Seznam obrázků.....	251
10	Seznam tabulek.....	255
11	Seznam grafů .....	257
12	Přílohy .....	259
	Příloha č. 1: Měření nasákavosti na soše světice č. 1 houbou Blitz Fix.....	260
	Příloha č. 2: Měření nasákavosti volným kapilárním vztlínáním na hornině z vrtného jádra sochy světice č. 1 .....	263
	Příloha č. 3: Zpráva z měření rychlosti průchodu UZ signálu na soše světice č. 1 před restaurováním .....	264
	Příloha č. 4: Doba a podmínky zrání suspenzí na bázi hydroxidu vápenatého .....	270
	Příloha č. 5: Fotodokumentace soch dvou světic z ČMS pořizené v srpnu roku 2004 .....	272

## Úvod

Stěžejním zadáním této diplomové práce bylo komplexní restaurování silně degradovaných fragmentů vápencové sochy světice č. 1 (sbírkový předmět) z Českého muzea stříbra v Kutné Hoře (dále jen ČMS), které zahrnovalo důkladný průzkum, vyhodnocení stavu, zpracování podrobné koncepce restaurování a následně realizaci jednotlivých restaurátorských kroků včetně standardní dokumentace stavu objektu před restaurováním, v jeho průběhu a po restaurování.

V počáteční fázi práce se ukázalo, že jedním z nejdůležitějších úkolů v rámci restaurování sochy světice č. 1 bude strukturální konsolidace s cílem stabilizace silně degradovaného kamene, ze kterého je zhotovena.

Vysoká míra degradace tohoto biodetritického, kutnohorského vápence exponovaného v exteriéru je jevem provázejícím většinu objektů zhotovených ze stejného typu kamene, vyskytujícího se nejenom v tomto regionu. V obvyklých případech se ke strukturální konsolidaci těchto typů karbonátových hornin (u nás zastoupeny v menší míře než výrazně rozšířenější pískovce) používají prostředky na bázi esterů kyseliny křemičité (dále také TEOS - tetraethylortosilikát). Pojivo vzniklé z tohoto typu konsolidantu je gel  $\text{SiO}_2$ , který je chemicky odlišný než původní pojivo vápence – uhličitan vápenatý ve formě kalcitu. Uvedená problematika se týká i dalších podobných typů hornin vyskytujících se na našem území (především v příhraniční oblasti s Rakouskem).

Teoretická část práce, motivována výše popsanými skutečnostmi, je zaměřena na odzkoušení a zhodnocení materiálově kompatibilních možností konsolidace těchto typů hornin a jejich porovnání s prostředky na bázi ethylesterů kyseliny křemičité. Testování bylo provedeno na zkušebních tělíscích imitujících silně degradovanou horninu sochy světice č. 1. a závěrečné fázi byly provedeny aplikační testy zkoušených konsolidantů také na referenční ploše samotné sochy.

Velká část konsolidantů poskytujících jako výsledné pojivo uhličitan vápenatý, který materiálově odpovídá ztracenému pojivu těchto hornin, tedy nanosuspenze na bázi  $\text{Ca(OH)}_2$ , byla testována v rámci mezinárodního projektu NANOforART (*Nano-materials for the conservation and preservation of movable and immovable artworks; project number 282816; FP7-ENV-NMP-2011*), v rámci něhož byla jednotlivými partnery vyvinuta. Mimo tyto byla skupina konsolidantů na bázi  $\text{Ca(OH)}_2$  rozšířena o prostředky z řady CaLoSil<sup>®</sup> již dříve

testované v projektu STONECORE (*Stone Conservation for the Refurbishment of Buildings; projekt v rámci 7.RP (NMP-SE-2008-213651)*). Pro srovnání účinků strukturální konsolidace nanosuspencemi hydroxidu vápenatého a jejich dalších aspektů (vliv na změnu fyzikálních vlastností, technická a ekonomická stránka jejich využití aj.) byly do testování zařazeny také dva konsolidanty na bázi ethylesterů kyseliny křemičité, z nichž jeden je jako jediný z těchto typů konsolidantů nabízených na trhu speciálně upraven a doporučován právě pro vápenné materiály.

Cílem teoretické části práce bylo vzájemné srovnání uvedených konsolidačních prostředků a jejich vlivů na zpevňovaný materiál. U konsolidantů na bázi  $\text{Ca(OH)}_2$  to pak také byla optimalizace podmínek jejich aplikace a následná minimalizace jejich vedlejších účinků.

Nejdůležitějším výstupem této části práce pak byl především výběr vhodného konsolidantu na bázi  $\text{Ca(OH)}_2$  pro strukturální konsolidaci fragmentů sochy světice.

Práce je strukturována jako restaurátorská zpráva, do které je jako její nedílná součást včleněna teoretická neboli experimentální část zabývající se odzkoušením a následným výběrem vhodného konsolidačního prostředku pro sochu světice č. 1. Tato teoretická část práce je vedena s ohledem na požadavky reálného případu sochy světice v praktické části. Obě části práce jsou velmi úzce provázané, vzájemně se doplňují a jejich hlavní snahou je dokumentovat a prezentovat restaurátorský zásah provedený na základě podrobného studia vlastností testovaných konsolidantů.



# 1 Restaurátorská zpráva – první část: popis a průzkum objektu

## 1.1 Popis objektu

### 1.1.1 Lokalizace památky

Kraj:	<i>Středočeský</i>
Okres:	<i>Kutná Hora</i>
Obec:	<i>Kutná Hora</i>
Adresa:	<i>Barborská 28</i>
Název památky:	<i>světiče č. 1</i>
Bližší určení:	<i>socha je sbírkovým předmětem Českého muzea stříbra v Kutné Hoře</i>
Rejstříkové číslo restaurované památky:	<i>není zapsána v Ústředním seznamu kulturních památek ČR NPÚ, jedná se o sbírkový předmět</i>
Přírůstkové číslo sbírek ČMS:	<i>2369/80</i>

### 1.1.2 Údaje o památce

Autor (okruh; dílna apod.):	<i>neznámý</i>
Sloh/datace:	<i>baroko; blíže neurčeno</i>
Materiál/technika:	<i>kutnohorský, biodetritický, mušlový vápenec; sekané</i>
Rozměry fragmentů (3 části) <sup>1</sup> :	
hlava:	<i>26 × 21 × 25,5 cm</i>
trup:	<i>120 × 78 × 50 cm</i>
nohy s plintem:	<i>47 × 63 × 56 cm</i>
Předchozí známé restaurátorské zásahy:	<i>nejsou známy žádné předchozí restaurátorské zásahy</i>

### 1.1.3 Údaje o akci

Vlastník:	<i>České muzeum stříbra v Kutné Hoře; Středočeský kraj<sup>2</sup></i>
Investor:	<i>České muzeum stříbra v Kutné Hoře; Středočeský kraj</i>
Závazné stanovisko:	<i>památka není zapsána v Ústředním seznamu kulturních památek ČR NPÚ</i>
Zadavatel:	<i>České muzeum stříbra v Kutné Hoře</i>
Požadavky na restaurování:	<i>restaurování objektu pro galerijní prezentaci v exteriéru krytém střechou</i>
Termín započetí prací:	<i>leden 2013</i>
Termín ukončení prací:	<i>srpen 2013</i>

<sup>1</sup> rozměry fragmentů jsou zapsány jako výška × šířka × hloubka v jejich původní orientaci, tedy jako fragmenty vertikálně stojící figury

<sup>2</sup> „Od 1. ledna 2003 je Sbirka ČMS majetkem Středočeského kraje.“ © 2013 ČESKÉ MUZEUM STRÍBRA, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE. Sbirka Českého muzea stříbra: Podsbírky - CES. In: [Http://www.cms-kh.cz/](http://www.cms-kh.cz/) [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-07-19]. Dostupné z: <http://www.cms-kh.cz/sbirka-ceskeho-muzea-stribra>

#### 1.1.4 Popis památky

Kamenná socha neznámé světice (označena číslem 1), kterou tvoří tři fragmenty, je sbírkovým předmětem Českého muzea stříbra v Kutné Hoře a není zapsána v Ústředním seznamu kulturních památek České republiky Národního památkového ústavu. (Ve sbírkách ČMS se nachází torzo další neznámé světice (označena číslem 2), která pochází velmi pravděpodobně ze souboru (dvou či vícečetného) jehož součástí byla také ženská figura, která je předmětem restaurování.)

Dvě ze tří částí sochy z kutnohorského, písčitého vápence byly před zahájením restaurátorských prací umístěny ve venkovních prostorách tzv. Hrádku u hlavní budovy ČMS v Barborské ulici čp. 28. Fragmenty byly volně uloženy v zahradě na zemitém terénu u paty ohradní zdi, která je paralelní s Barborskou ulicí, tzn., že je orientována svojí venkovní stranou na západ, přesněji mírně na severozápad. Jednalo se o trup a odlomenou spodní část sochy – nohy s plintem, hlava sochy byla uložena ve vnitřních prostorách muzea.

Hlava světice (26 × 21 × 25,5 cm) je od těla odlomena v místě nasazení krku na trup. Směrem od spánků k týlu je tvář lemována vlnitými prameny vlasů, rozdělenými na temeni, které jsou vzadu sepnuty v drdol. Výraz tváře ani další detaily není možné popsat, jelikož v důsledku ztráty několika milimetrů až centimetrů původního povrchu došlo k znečitelnění původní modelace.

Na temeni hlavy se nachází otvor, který byl velmi pravděpodobně místem pro uchycení svatozáře.

Největší fragment sochy světice, tvoří trup s nohama, které byly odlomeny pod úrovní kolen. Torzu ženské postavy (120 × 78 × 50 cm), oděné do šatů s bohatou draperií, chybí pravá ruka, která je odlomena v horní polovině paže. Levou rukou světice přidržuje atribut, pravděpodobně se jedná o lebku, v úrovni levého boku. Možnými pozůstatky po dalších attributech (možná kovových, nebo jiných) jsou v okolí odlomené pravé ruky dva otvory (z nich jeden je vyplněn olovem). Na levé ruce má žena bohatou draperii, která dále pokračuje mírně diagonálně z levého boku pod pravý a stáčí se směrem k zadní straně postavy. Zadní strana torza je pojednána velice zjednodušeně – schematicky a dá se proto přepokládat, že se nejedná o pohledovou část sochy. Ve spodní části středního dílu sochy splývá také směrem k pravé straně draperie šatů. Dle směru draperie je možné předvídat, že socha světice měla levou nohu mírně pokrčenou v kolenu, zatímco na pravé noze spočívala plnou vahou. Tato skutečnost se pravděpodobně objasní po sestavení jednotlivých fragmentů.

Spodním a posledním dílem sochy je dolní část nohou s plintem. Zdá se, že podstava sochy je téměř plně zachována a proto můžeme podle orientace lomové plochy vůči ní tvrdit, že nejspodnější část sochy je od trupu odlomena mírně diagonálně a to se sklonem k levé straně (pohledově – tj. směrem k pravému chodidlu sochy). Fragment je tvořen masivním plintem, který má půdorys větší poloviny osmiúhelníku (s rovnou stranou vzadu), jeho tvar je také možné popsat, jako obdélníkový se sraženými rohy vpředu (47 × 63 × 56 cm).

I pojednání půdorysu podstavy a zadní části tohoto dílu nasvědčuje předcházejícímu tvrzení, že zadní část sochy nebyla pohledová. Socha mohla být velmi pravděpodobně umístěna u stěny nějaké stavby, nebo na nějakém místě, ze kterého nebylo možné ji shlížet ze čtyř stran.

Na podstavci pevně spočívá pravá noha světice, zatímco levá, která původně jeho obrys přesahovala, je odlomena a do současnosti se nedochovala. Umístění chodidel na podstavci podporuje domněnku o kompozici postavy, která pravděpodobně stojí v mírném kontrastu tělesnou vahou na pravé noze a levou má pokrčenou v kolenu.

Předpokládáme, že socha i s plintem byla vysoká přibližně 190 cm, tedy byla provedena přibližně v životní velikosti a dle dochované modelace a jejího uspořádání je možné se domnívat, že socha byla určena pro mírný pohled.

## **1.2 Nálezová, průzkumová zpráva**

Tato kapitola je věnována základním poznatkům historickým, přírodovědným aj. zjištěným v průběhu podrobného průzkumu díla. Obsahuje jejich popis, shrnutí a vyhodnocení, na jehož základě byla následně stanovena koncepce celého restaurátorského zásahu.

### **1.2.1 Historie objektu**

K soše světice č. 1 nebyl nalezen dostatek informací, které by umožňovaly bližší popis historických okolností jejího vzniku a následné doby její existence. Doložitelné jsou pouze údaje o uložení sochy ve sbírkách Českého muzea stříbra v Kutné Hoře. Původní umístění sochy není známo a není ani jasné jakou figuru socha ženy představuje. Na základě míry jejího dochování a především míry dochování jejích atributů, jako ikonografických rozpoznávacích znaků, není možné jednoznačně určit, o jakou světici se jedná.

Fragmenty sochy, do doby před restaurováním uložené v prostorách ČMS v Kutné Hoře v areálu historického Hrádku, byly jako sbírkový předmět „*zaevidovány pouze v I. stupni*,”

čili v přírůstkové knize“<sup>3</sup> pod číslem 2369/80 s bližším označením „světiče č. 1“. Dle Bc. Josefa Kremly (historika a archiváře ČMS) ale není jisté či se záznam netýká druhé sochy „světiče č. 2“, která je v prostoru Hrádku také uložena (velmi pravděpodobně se ale jedná o párovou sochu, nebo sochu ze stejného souboru). V záznamu ČMS je k dané soše uveden pouze strohý popis *“torzo plastiky světiče silně poškozeno korozí / původ – Hrádek na zahradě”*<sup>4</sup>. Obě zmíněné sochy se dle tvrzení Bc. Josefa Kremly nacházely v prostorách ČMS dříve tzv. Hrádku již v roce 1980 (pravděpodobně rok provádění evidence), zaevidována tehdy byla pouze jedna, pravděpodobně lépe dochovaná socha světiče č. 1, která je předmětem restaurování.

Jednou z dalších indicií, která by mohla ozřejmit původ sochy, nebo délku doby, po kterou se vyskytuje v areálu Hrádku je skutečnost<sup>5</sup>, že ve *„Vepřkově soupise památek v Kutné Hoře, které chtěl v roce 1937-38 zařadit do památkové péče – zde o této / těchto sochách ale už nic není (jsou tedy buď mimo kutnohorské, anebo už v této době byly v muzeu)“*.

V dalším bádání byla pozornost věnována zmínkám o zániku nebo o přemístění dvou či více soch odpovídajících dvěma sochám světic z ČMS.

Aby bylo možné formulovat základní výchozí údaje, které by přispěly alespoň k přibližnému historickému a ikonografickému zařazení sochy, byly popsány charakteristické znaky sochy světiče č. 1, které jsou stále čitelné. Z provedeného průzkumu tj. především vizuálního ohledání sochy světiče vyplývají i poznatky, které by mohly napomoci k vytvoření představy o způsobu jejího pravděpodobného umístění. Tyto informace se dají shrnout v následujících bodech:

- socha světiče s plintem byla vysoká přibližně 190 cm
- světiče drží v levé ruce atribut, jímž je pravděpodobně lebka
- na temeni hlavy sochy se nachází otvor, ve kterém byla velmi pravděpodobně umístěna svatozář
- další dva otvory se nacházejí v oblasti odlomené pravé ruky – jeden z nich je na břiše a jeden na pravém rameni (chybějící ruky), jedná se pravděpodobně o místa pro ukotvení rovněž nějakého atributu (patrné zbytky olova, které se používalo k utemování vsazovaných částí)

<sup>3</sup> dle informací od Bc. Josefa Kremly (historik, archivář ČMS v Kutné Hoře)

<sup>4</sup> dle informací od Bc. Josefa Kremly (historik, archivář ČMS v Kutné Hoře)

<sup>5</sup> dle informací od Bc. Josefa Kremly (historik, archivář ČMS v Kutné Hoře)

- socha není ze zadní strany výrazně plasticky pojednána, jedná se o spíše rovnou, schematicky pojednanou plochu – proto předpokládáme, že mohla být přistavena zády k nějaké stěně, nebo byla osazena na nějaké ohradní zdi, případně atice aj.
- na základě vlastní zkušenosti a srovnání tvarosloví sochy s jinými, datovanými, kamenosochařskými díly ze stejného typu horniny předpokládáme, že by socha mohla být datována mezi léta 1700-1750
- dle otvoru v podstavě sochy můžeme říci, že byla osazena na čepu, který byl cca 30 cm dlouhý
- podle kompozice sochy se domníváme, že byla s velkou pravděpodobností určena pro mírný pohled
- dle dochovaného tvarosloví a rozměrů sochy, shodujícího se se sochou světice evidovanou ve stejné sbírce pod č. 2, můžeme předpokládat, že se jedná buď o párovou sochu, nebo případně sochy z většího souboru

V případě, že předpokládáme, že socha světice jímá ve své levé ruce skutečně lebku jako atribut, pak by mohla postava dle ikonografie znázorňovat buď sv. Rosalii, nebo Máří Magdalenu. Uvažujeme-li nad případným znázorněním Máří Magdaleny, pak postava se zcela sepnutými vlasy příliš nekoresponduje s běžným ztvárněním této světice, která bývá obvykle zobrazována s rozpuštěnými vlasy<sup>6, 7</sup>. V druhém případě, tedy u zobrazení sv. Rosalie by tato možnost souhlasila s popisem existence dvou soch v prostorách Hrádku, o které se ve svých publikacích, vydaných dohromady v reprintu Martinem Bartošem<sup>8</sup>, zmiňují František Beneš (str. 10) a později také Otakar Hejnic (str. 37). V jejich textech zachycujících historii Hrádku se uvádí, že v těchto prostorách bývaly sochy sv. Barbory a Rosalie s andělíčkem držícím kartuši s nápisem I. H. S. .

---

<sup>6</sup> RULÍŠEK, Hynek. *Postavy, atributy, symboly: slovník křesťanské ikonografie*. Vyd. 1. V Hluboké nad Vltavou: Alšova jihočeská galerie, 2005. ISBN 978-808-5857-481.

<sup>7</sup> HALL, James. *Slovník námětů a symbolů ve výtvarném umění*. 1. vyd. Praha: Mladá fronta, 1991, 517 s. ISBN 80-204-0205-5.

<sup>8</sup> BARTOŠ, Martin. *Kutnohorský sborník 10/08. Hrádek nad Páchem v Kutné Hoře*. Kutná Hora: Kuttna, 2008. ISBN 1212-6098. Dostupné z: [http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorskovlastivedny\\_sbornik\\_10-08.pdf](http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorskovlastivedny_sbornik_10-08.pdf)

V textu Františka Beneše *Hrádek nad Páchem v Kutné hoře* (původně publikovaného v „*Památky archeologické*, r. 5 (1863) s. 33-40“<sup>9</sup> je uvedeno následující:

„Když se zde r. 1777 tato normální hlavní škola zřizovala, mnoho se v stavení přejinačovalo, mnoho zanedbalo a ještě více pokazilo. Kaple sv. Václava, v níž Jesuité každodenně mši sv. sloužili, zůstala službám Božím věnována; vysoká brána, kterouž nyní jen v zahradě ředitelově viděti můžeme, a která podle jezuitského způsobu drahným počtem parukových kudrlinek přistrojena byla, jest tehduž zazděna, a zůstal jen půlnoční vchod do stavení otevřen, nad kterým bývaly sochy sv. Barbory a sv. Rosalie s andělíčkem, který držel štítek se jmenem Ježíšovým I. H. S. Všecky tyto sochařské práce zdají se býti dílem sochaře j. Bauguta, kterýž pro Kutnou Horu a celé okolí velmi mnoho pracoval. Jeho díla jsou ale prázdná vši umělecké ceny, a tyto věci zde, co byly nad vraty, dostanou nyní jiné přiměřenější místo.“

Později k této tématice, pravděpodobně značně inspirován textem Beneše, napsal Otakar Hejnic ve svém textu *Hrádek nad Vrchlicí čili nad Páchem* (1911) následující:

„Proto můžeme skoro bezpečně soudit, že Hrádek při proměně ze seminaria na hlavní školu jen velmi málo se pozměnil. Zůstal takým, jakým byl za dob jezuitských, t. j. od r. 1686-1773. Zadní vjezd vraty zahradními byl r. 1777 zazděn a jen vchod nynější ze strany severní ponechán. Nad tímto byly sochy sv. Barbory a sv. Rosalie s andělíčkem, kterýž držel štítek s emblémem jezuitským J. H. S. Sochy byly ale před r. 1860 již odstraněny, jelikož Beneš ve svém článku píše „bývaly“.“

---

<sup>9</sup> BARTOŠ, Martin. *Kutnohorský sborník 10/08. Hrádek nad Páchem v Kutné Hoře*. Kutná Hora: Kuttna, 2008. ISBN 1212-6098. Dostupné z: [http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorsko-vlastivedny\\_sbornik\\_10-08.pdf](http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorsko-vlastivedny_sbornik_10-08.pdf)



Hrádek od severu.

**Obr. 1: Fotografie Hrádku s již neexistující vstupní bránou na severní straně objektu; převzato z publikace Martina Bartoše<sup>10</sup>**

Závěrem lze konstatovat, že podrobný průzkum sochy světice č. 1, ani prozkoumání všech dostupných pramenů a konzultace se specialisty (odborní pracovníci z katedry humanitních věd FR UPCE, Státního okresního archivu Kutná Hora, Českého muzea stříbra v Kutné Hoře a Národního památkového ústavu územního odborného pracoviště středních Čech) neposkytly dostatek relevantních údajů umožňujících její bližší historické zařazení a ikonografickou charakteristiku. Při všech snahách potvrdit nebo vyvrátit souvislost dochovaných soch s popisovanými světicemi sv. Barbory a sv. Rosalie s andělíčkem narážíme na nedostatečné dochování zásadních rozpoznávacích ikonografických detailů (u fragmentu sochy světice č. 2, která je ještě více poškozena a tvarově méně čitelná než světice č. 1, se nedochovaly žádné).

Předpoklad, že se socha světice č. 1 představuje sv. Rosalii nebo sv. Barboru je pravděpodobný, ale bez dostatku upřesňujících informací je nutné jej považovat za pouhou domněnku.

<sup>10</sup> BARTOŠ, Martin. *Kutnohorský sborník 10/08. Hrádek nad Páchem v Kutné Hoře*. Kutná Hora: Kuttna, 2008. ISBN 1212-6098. Dostupné z: [http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorsko-vlastivedny\\_sbornik\\_10-08.pdf](http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorsko-vlastivedny_sbornik_10-08.pdf)

## 1.2.2 Popis stavu památky před započítím restaurátorských prací

### 1.2.2.1 Vstupní vizuální průzkum

Původní socha neznámé světice se dochovala v podobě tří fragmentů, jimiž jsou hlava, střední část figury od místa nasazení krku na trup až přibližně do poloviny lýtek a poslední částí jsou nohy světice na masivním podstavci. Fragmenty vápencové sochy světice č. 1 (z evidence ČMS) jsou ve velmi špatném, spíše havarijním stavu.

Za několik málo uplynulých let zvětrání povrchů obou světic značně postoupilo, jak je patrné ze srovnání dnešního stavu se stavem zachyceným na fotodokumentaci provedené zaměstnanci ČMS v srpnu roku 2004 viz příloha č. 5.

Hlava světice byla v posledních letech uložena v interiéru muzea a nebyla tedy vystavena povětrnostním vlivům<sup>11</sup>, tak jako zbylé dvě části sochy. I přesto se na ní nalézají velmi podobné typy poškození, která jsou popsána dále.

Fragmenty trupu a nohou byly před transferem do ateliéru Fakulty restaurování v Litomyšli uloženy ve venkovních prostorách ČMS v zahradě historického areálu Hrádku. Trup a nohy s plintem ležely na zemitém terénu pod ohradní zdí (orientována na západ), oddělující pozemek od Barborské ulice, poblíž historického těžebního stroje zvaného trejv. Nejspodnější část sochy světice – nohy stojící na podstavci – byly uloženy na původní podstavě sochy. Horizontálně orientovanou a tedy nejvíce exponovanou plochou byla lomová plocha fragmentu, tedy místo oddělení trupu. Střední část sochy světice – trup s částí nohou – byla na zemitém terénu položena přední částí tj. hrud' a draperie vedoucí přes boky. Tyto části tak byly vlastní vahou zabořeny do zeminy, která tvořila podloží. Tento díl sochy byl vůči povětrnosti nejvíce exponován na zadní straně (záda světice), která byla ve vodorovné pozici. V místě, kde byly tyto dva fragmenty uloženy, se vyskytovaly dva druhy popínavých rostlin, které svými úponky atakovaly kámen, ze kterého byly části zhotoveny.

Po transferu<sup>12</sup> do ateliéru Restaurování kamene a souvisejících materiálů Fakulty restaurování v Litomyšli byl zahájen podrobný vizuální, přírodovědný a chemicko-technologický průzkum.

---

<sup>11</sup> dle fotodokumentace poskytnuté ČMS, která byla provedena v období 1.-3. 8. 2004 (dle dat pořízení digitálních fotografií), je možné předpokládat, že do této doby byla hlava světice uložena v exteriéru společně s ostatními částmi (na fotografiích jsou na ní patrné biogenní kolonie) – fotografie dokumentující stav objektu v srpnu roku 2004, poskytnuté ČMS, jsou zařazeny do příloh (viz příloha č. 5)

<sup>12</sup> transfer byl proveden dne 14. 1. 2013



Všechny části sochy jsou lokálně, v důsledku svého předešlého uložení, pokryty zeminou aj. deposity v různé míře. Povrch všech částí sochy, které byly exponovány ve vodorovných pozicích srážkové vodě, jsou hojně kolonizovány zelenými řasami, na některých místech také mechy. Řasami jsou také osídleny tzv. dešťové stíny – místa skrytá před přímým dopadem dešťové vody, která se následně stala substrátem pro hojný růst mechů. Kámen je lokálně poškozen vrstvlými úponky popínavých rostlin. Mezi poškození, která vyplývají především z nevhodného umístění / uložení částí vápencové sochy světice, můžeme ještě započítat osídlení horniny malými plži – závornatkou černavou<sup>13</sup>, která vyhledává vápnitě substráty, ty využívá k torbě ulit.

Na všech částech sochy jsou zřejmé značné úbytky originálního povrchu, které dosahují i několika desítek milimetrů. Původní kamenosochařsky opracovaný povrch se nedochoval. S výjimkou hlavy, u které jsou ztráty modelace, rovnoměrné po celém povrchu, způsobeny pravděpodobně zejména degradací a erozí kamene a jeho mechanickým namáháním, byly na zbývajících dvou fragmentech také odlomeny a nedochovány některé partie. V případě trupu s nohama se jedná o chybějící pravou ruku, odlomenou v horní části paže a také o část draperie za levou rukou, kde došlo k masivním ztrátám především v důsledku hloubkové degradace horniny. U podstavce s nohama chybí část chodidla levé nohy, které přesahovalo plintu a na zadní levé straně podstavce je patrně odlomena část spodního rohu.

Hornina, ze které byla socha zhotovena – písčité, kutnohorský vápenec, se nachází v pokročilém stádiu degradace. Kámen na žádném místě nedosahuje svých původních mechanických vlastností, drolí se, pískovatí, je postižen hloubkovou desintegrací, vyskytují se zde trhliny, praskliny a dutiny. V místech tzv. dešťových stínů se vyskytují tmavé velmi kompaktní krusty, které se odtrhávají spolu s vrstvami původního materiálu. Pod těmito krustami, které deformují dochovaný povrch jednotlivých částí sochy, se nacházejí dutiny o síle až několik desítek milimetrů. Některé dutiny pod krustami jsou vyplněny rozdrobenými zrny horniny a zeminou, případně osídleny závornatkou černavou. Krusty a celistvě působící povlaky o různé síle, charakteru i barvě, pod nimiž je patrná struktura horniny, jsou přítomny přibližně na 60 % povrchu obou exponovaných fragmentů. Místa, která nejsou pokryta přímo masivní krustou nebo povlakem podobného charakteru, jsou naopak poškozena především působením kyselých dešťů a dalších původců zvětrávání. Díky snížené soudržnosti jednotlivých zrn horniny, došlo k vymývání měkčích složek sedimentární, vápencové horniny a k obnažení

---

<sup>13</sup> *Závornatka černavá* [online]. [cit. 2013-07-21]. Dostupné z: <http://www.radula.estranky.cz/clanky/zavornatka-cernava.html>

tvrdších a odolnějších zrn. Na takto poškozených místech působí hornina sochy velmi otevřeně s vysokou pórovitostí.

Nejrůznější vlivy a poškození materiálu sochy se rovněž významně promítají do uměleckého vnímání díla. Socha blíže neurčené světice, která je dnes díky svému neznámému osudu nazývána světící č. 1, se dochovala pouze ve fragmentární podobě. Fragmentům schází přiměřená adjustace, bez které jsou jednotlivé díly pouhými kusy opracovaného kamene. Po jejich případném sestavení by se nyní, díky jejich dosavadnímu uložení, významně uplatnily kontrasty způsobené nejrůznějšími poškozeními a změnami, které jsou různé u jednotlivých povrchů v závislosti na orientaci, ve které se několik let nacházely. Když bychom zhodnotili stav všech tří fragmentů z čelního pohledu, tak zjistíme, že hlava světice vykazuje ze všech stran podobnou míru poškození, trup sochy byl chráněn před přímým působením srážek a není tedy zřepředu téměř kolonizován biogenními povlaky ani se na něm nevyskytují tmavé krusty, zatímco nohy světice, které se jako jediná ze tří částí nacházely v originální poloze, jsou hojně kolonizovány řasami a mechy. Jednotlivé části, které je možné sestavit v celek a ten prezentovat v dochovaném torzálním stavu, jsou nyní svou mírou poškození i barevností povrchu naprosto nesourodé. Celková integrita díla byla významně narušena.

Technický ani vizuální či estetický stav jednotlivých částí sochy světice neumožňuje jejich sesazení bez předešlého konzervačního a restaurátorského zásahu, především hloubkové konsolidace a redukce barevných kontrastů jednotlivých částí sochy.

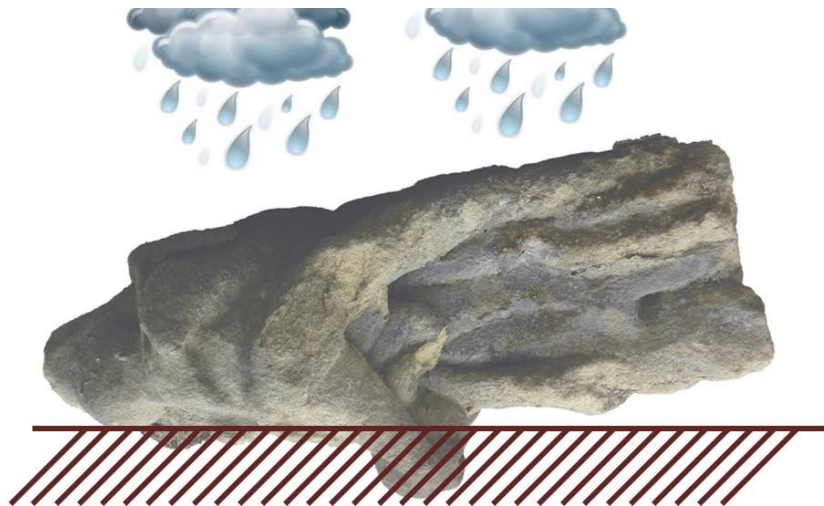
Na zadní straně trupu světice, tedy na zádech, byly na draperii pod levým ramenem nalezeny fragmenty barevné povrchové vrstvy. Zda je barevná vrstva, nalezená na exponované ploše, zbytkem nějaké koncepční povrchové úpravy sochy není možné na základě vizuálního průzkumu určit. Vzhledem k celkové míře dochování sochy, se může jednat o vrstvu, která nesouvisí s historickým vývojem památky. Mohlo by se jednat o barvu, která se na povrch sochy dostala sekundárně, ve smyslu neúmyslně, v tomto případě by se jednalo o druh nečistoty. Souvislostem nalezené barevné vrstvy se sochou světice bude věnována pozornost v další fázi průzkumu.

### 1.2.2.2 Charakteristika jednotlivých typů povrchů a jejich poškození na základě vizuálního průzkumu

Mapování jednotlivých typů povrchů kamene, jejich poškození a dalších uplatňujících se fenoménů bylo provedeno s cílem jejich poznání a charakterizace s ohledem na plánovaný a nezbytný konzervační zásah – tj. především strukturální konsolidaci.

Na největší části sochy světice, tedy trupu s částí nohou, jsou všechny tyto jevy, které se vyskytují i na zbývajících dvou fragmentech, zastoupeny v dostatečné míře. Mapování proto bylo provedeno na trupu světice a jeho výstupy jsou spolehlivě aplikovatelné i na zbývajících částí sochy.

Vznik a místa výskytu jednotlivých fenoménů, nebo poškození jsou podmíněny orientací podkladu, na kterém se vyskytují. Proto je na následujícím obrázku uvedena orientace trupu světice, ve které se několik posledních let nalézal exponován v exteriéru.



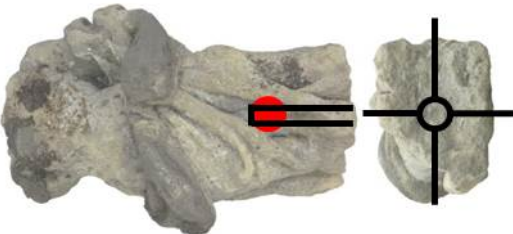
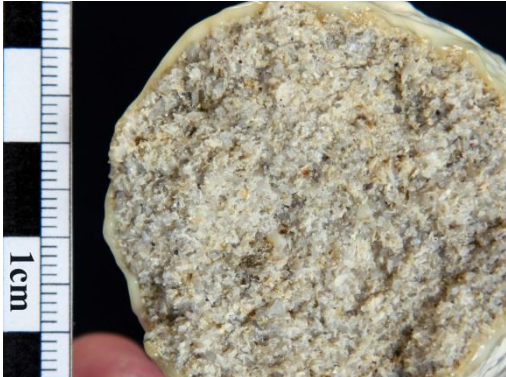
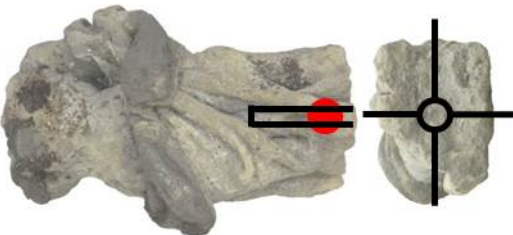

**Obr. 2:** Grafické znázornění orientace trupu světice, ve které byl tento fragment několik posledních let exponován v exteriéru. Spodní část sochy byla zabořena do zeminy.

V následující tabulce (Tab. 2) jsou uvedeny detailní fotografie s měřítkem zachycující jednotlivé typy povrchů s lokalizací jejich pořízení na soše světice. Fotografie jsou doplněny charakteristikou typu povrchu, jeho poškození a popisem místa jeho výskytu, případně jsou zde uvedeny okolnosti vzniku popsaných fenoménů.




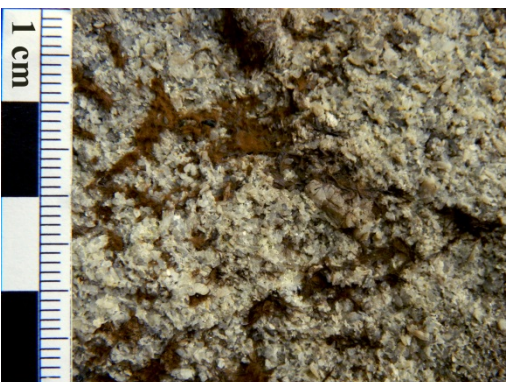
Pro porovnání jsou v tabulce Tab. 1 uvedeny jako standardy lomová plocha horniny ze středu trupu sochy světice a hornina opracovaná při odvrtávání jádrovým vrtákem. Oba referenční vzorky pocházejí z vrtného jádra z trupu světice, které bylo získáno v pozdější fázi restaurování při přípravě jednotlivých fragmentů k sesazení.

Tato podkapitola rozšiřuje poznatky popsané v kapitole 1.2.2.1 Vstupní vizuální průzkum a je zaměřena na zhodnocení kvality jednotlivých povrchů horniny sochy světice s ohledem na možnosti strukturální konsolidace.

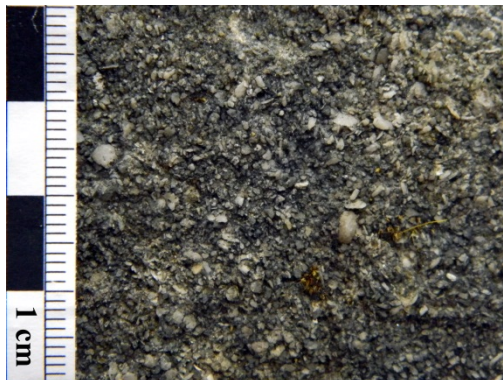
Tab. 1: Dokumentace a popis vzhledu referenční horniny ze středu bloku sochy světice č. 1

Lokalizace pořízení fotografie	Fotografie referenční horniny	Popis
	<p data-bbox="759 341 1397 432">Lomový povrch horniny z jádrového vrtu pro čep <i>Detail – jádrový vrt pro čep; trup světice, střed kamene z hloubky okolo 30 cm od lomové plochy fragmentu</i></p> 	<p data-bbox="1451 341 2060 719">Hornina z jádra vrtu a zároveň z vnitřní části bloku kamene má světlou okrovou barvu. Na lomové ploše jsou patrná jednotlivá zrna sedimentu, především vápenné částice a křemen. Ve hmotě kamene se nalézají červenohnědě zbarvené částice, což je velmi pravděpodobně slída, případně částice s obsahem železa. Kámen je hrubozrnný a porézni.</p>
	<p data-bbox="759 887 1397 1023">Řezaný/odvrtaný povrch horniny z jádrového vrtu pro čep <i>Detail – jádrový vrt pro čep; trup světice, střed kamene z hloubky okolo 10 cm od lomové plochy fragmentu</i></p> 	<p data-bbox="1451 900 2060 1182">Vrtáním opracovaná stejná část horniny z jádrového vrtu jako v předcházejícím případě. Na opracovaném povrchu je také patrná hrubozrnnost horniny i její porozita, díky kterým ji není možné opracovat zcela do hladka. Po opracování zůstává na povrchu reliéf.</p>

Tab. 2: Dokumentace a popis poškození jednotlivých typů povrchů sochy světice č. 1

Lokalizace pořízení fotografie	Fotografie poškození	Popis poškození
	<p data-bbox="763 341 1196 405">Biologická kolonizace – mechy <i>Detail – levý bok světice v oblasti nohou</i></p> 	<p data-bbox="1453 341 2065 756">Mechy se vyskytují na místech, kde docházelo k zadržování vlhkosti. Místa jejich výskytu jsou povětšinou zastíněná přímému dopadu dešťové vody, ale vyskytují se i na horizontálně orientovaných plochách. Kořenové vlásky mechů vrůstají do struktury kamene a lokálně tvoří pod samotnou rostlinou mikrozónu půdy. Pod mechy i v jejich blízkém okolí je hornina silně korodovaná, drolí se a pískovatí.</p>
	<p data-bbox="763 916 1368 1011">Biologická kolonizace – blíže neurčeno; patrné kořenové vlásky vrostlé do struktury kamene <i>Detail – trup světice, hrud'</i></p> 	<p data-bbox="1453 916 2065 1155">Tento přírodní exogenní materiál se vyskytuje na hrudi světice, v okolí oblasti, kterou byl kámen uložen v zemině. Jedná se o jemný vláknitý materiál, který je velmi pevně spjat s podkladní horninou a je vrostlý do struktury narušeného kamene.</p>

Biologická kolonizace – řasy  
*Detail – zadní strana trupu světice – záda*

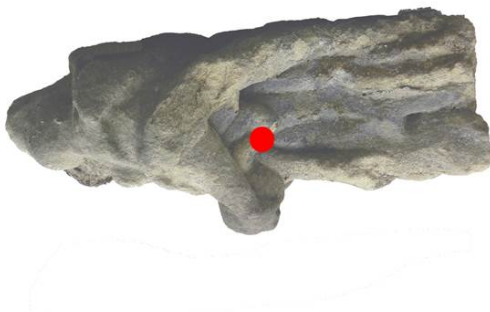


Řasami jsou kolonizovány především horizontálně orientované plochy přímo vystavené dopadu dešťové vody, kde tvoří celistvé biologické povlaky. Na takových místech má povrch velmi tmavou barvu, lokálně se uplatňuje zelená barva řas.

Jejich výskyt není, v podobě slabších filmů, ojedinělý ani v tzv. dešťových stínech nebo pod oddělujícími se krustami, v prasklinách či dutinách.

Důsledkem výskytu řas je tzv. biopatina.

Biologická kolonizace – popínavé rostliny,  
pravděpodobně skalník drobnolistý / Dammerův (?)  
*Detail – levý bok světice, pod levou rukou*



Popínavé rostliny, které se hojně vyskytovaly v místě uložení fragmentů sochy světice, atakovaly horninu svými úponky, případně i kořeny. Mimo znázorněný skalník, se v místě uložení vyskytoval také břečťan.

Rostliny jsou pro objekt zdrojem zavlhčení a vytvářejí tak spolu s jejich uhynulými částmi ideální substrát a podmínky pro další biologický růst (např. viz zelená řasa na fotografii).

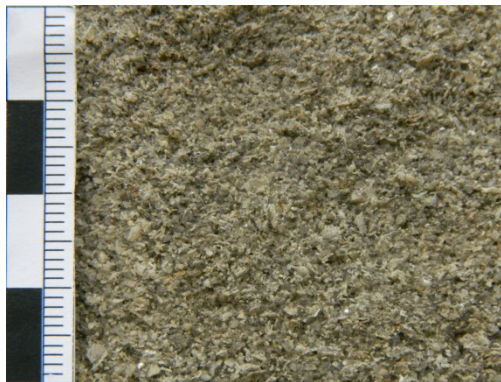
Kořeny nebo úponky vrůstají do struktury kamene a významně ji narušují – viz fotografie.

Biologická kolonizace – plž – závornatka černavá  
*Detail – levý bok světice, v úrovni kolen*



Na chráněných místech se vyskytovali malí plži – závornatky černavé (viz podlouhlá ulita v dutině). Tito měkkýši dosahující délky okolo 1-2 cm vyhledávají ke svému životu vápnité substráty, které jim slouží jako zdroj pro stavbu ulit.

Exogenní deposit – zemina  
*Detail – přední strana trupu světice, atribut – lebka*

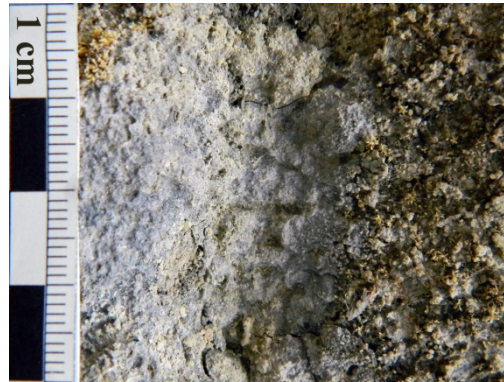
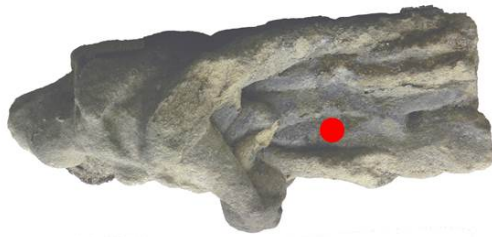


Na místech, která byla uložena v zemině, se vyskytuje celistvý povlak. Zemina ulpívá mezi jednotlivými obnaženými zrny horniny. Toto znečištění, které s velkou pravděpodobností obsahuje také jílové částice, blokuje jinak pravděpodobně nasákavý, degradovaný povrch kamene .



Krusta s exogenními uloženinami a biologickou kolonizací – soudržná s vysoce degradovaným podkladem

*Detail – levý bok světice v oblasti nohou*

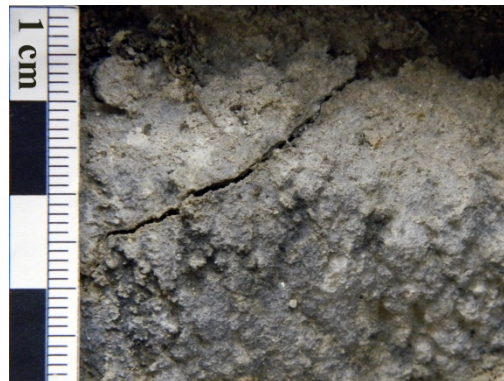


Tmavá krusta, která se vyskytuje na vysoce degradovaném podkladu, v jejímž okolí je hornina silně narušena. Rozpadlá hornina spolu s exogenními deposity či uloženinami vytváří v jejím okolí ideální substrát pro biologický růst.

Nachází se především v tzv. dešťových stínech. Krusta spolu s biologickými organismy tvoří sekundární „pojivo“ silně degradovanému materiálu.

Masivní krusta s exogenními uloženinami – oddělující se silnější vrstvou horniny, deformující dochovaný povrch

*Detail – levý bok světice v oblasti nohou*

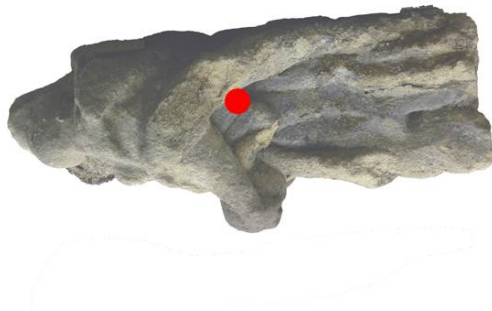


Masivní tmavá krusta, která se odděluje se silnou vrstvou horniny, způsobuje značné, nevratné ztráty originálního kamene a také deformuje dochovaný povrch. Silná vrstva tmavé, velmi tvrdé a nepropustné krusty na některých místech praská a dochází pod ní ke vzniku dutin.

Tento typ krusty se nachází na místech velmi dobře krytých před přímým dopadem dešťové vody.

Oddělující se masivní krusta s exogenními uloženinami, odhalování vysoce degradované horniny v její těsné blízkosti

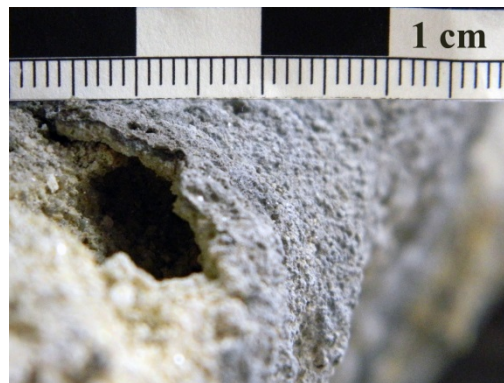
*Detail – levý bok světice pod levou rukou*



Oddělující se silná, tmavá krusta obnažuje silně narušenou horninu, která se drolí a pískovatí. Přímou expozicí takto narušeného kamene, který pravděpodobně postrádá značnou část původního pojiva, dochází k významným ztrátám hmoty a tvorbě reliéfu. Tento typ krusty se nachází především na místech, která jsou přístupná stékající vodě.

Dutina pod masivní krustou s exogenními uloženinami, krusta ve větší ploše soudržná s podkladem

*Detail – levý bok světice v oblasti nohou*

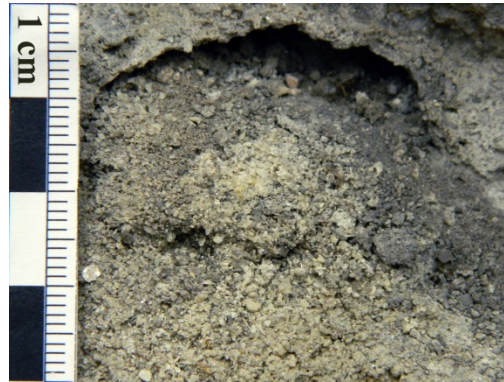


Masivní tmavá krusta, která se vlivem pnutí při deformaci oddělila od podkladu. Pod silnou krustou, která je tvořena také silnou vrstvou původní horniny se vytvářejí dutiny, které jsou někdy vyplněny zbytky zvětralého kamene. V případě, že jsou v takových krustách otvory, praskliny aj. stávají se rezervoárem pro zadržování vlhkosti nebo nečistot.

Tento typ krusty se nachází na místech velmi dobře krytých před přímým dopadem dešťové vody.

Dutina pod křehkou puchýřovatejší krustou  
vyplněná jednotlivými zrny korodované horniny  
a zeminou

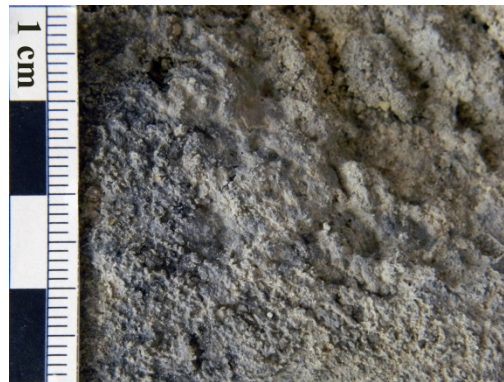
*Detail – levý bok světice v oblasti nohou*



Na místech, kde již s největší pravděpodobností došlo v minulosti k oddělení masivnější krusty, zbylý povrch pojený pravděpodobně sekundárně vzniklým sádrovcem se začal opětovně deformovat a oddělovat od podkladu. Kámen pod puchýři pískovatí a drolí se. V dutinách je mimo částice původní horniny přítomna také zemina. Podobně poškozená místa byla rovněž osídlena závornatkou černavou.

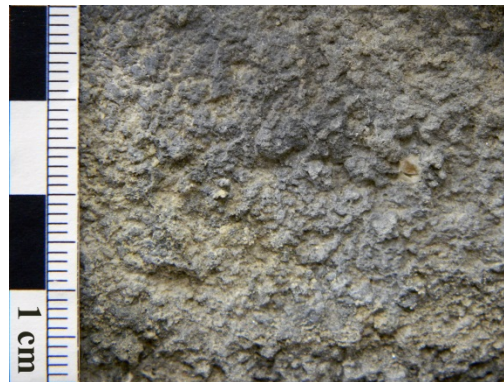
Krusta s exogenními uloženinami pevněji spojená  
s povrchem kamene, částečná deformace vlivem  
stékající vody tzv. krápníkový efekt

*Detail – pravý bok světice pod pravým ramenem*



Tmavá slabší krusta, která je pevněji spojená s podkladní horninou, se na některých místech, po kterých voda stéká, deformuje ve směru jejího stékání. Vytváří se tak tzv. krasový efekt – zvlnění krusty. Pod tímto typem krusty je patrná struktura horniny. Tyto krusty se vyskytují v místech stékání vody, spíše tedy na vertikálně orientovaných plochách.

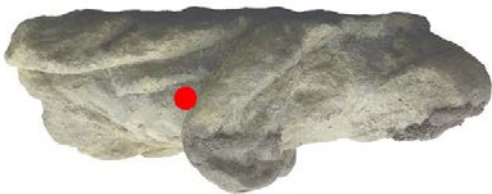
Krusta s exogenními usazeninami pevně spojená s povrchem kamene, patrná struktura horniny  
*Detail – levý bok světice v oblasti nohou*



Tmavá slabší krusta, která je pevně spojená s podkladní horninou. Pod tímto typem krusty je patrná struktura horniny.

Tyto krusty se vyskytují v místech stékání vody, spíše tedy na vertikálně orientovaných plochách.

Tenká krusta s exogenními usazeninami pevně spojená s podkladem kamene, patrná struktura kamene  
*Detail – pravý bok světice v oblasti nohou*



Tenká tmavá krusta, lokálně se jeví jako povlak. Pod krustou je patrná struktura kamene, se kterým je krusta pevně spojená.

Krusta tohoto typu se vyskytuje především na horizontálně orientovaných plochách, nebo na místech přechodu mezi vodorovně a svisle orientovanou plochou kamene.

Souvislá tenká krusta pevně spojená s povrchem kamene, částečně s exogenními usazeninami

*Detail – přední strana trupu světice, pod draperií vpravo*

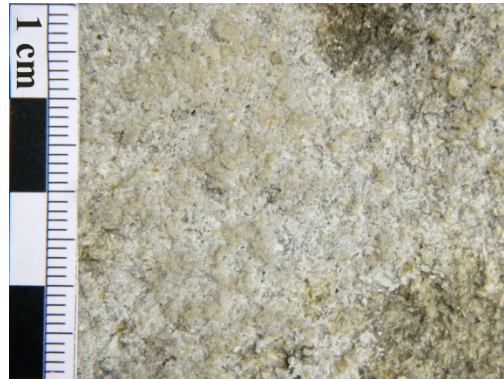


Světlejší souvislá tenká krusta je velmi pevně spojená s kamenem. Lokálně je krusta mírně zabarvena exogenními usazeninami.

Povrchy zasažené tímto typem poškození se vyskytují především na vodorovných plochách, které byly chráněny přímému dopadu dešťové vody, především tedy na přední straně trupu světice, který směřoval k zemi, ale nebyl s ní v těsném kontaktu.

Souvislý tenký bílý povlak krusty pevně spojený s povrchem kamene

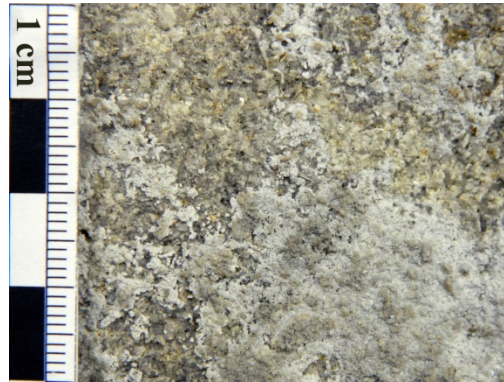
*Detail – přední strana trupu světice, v úrovni pasu vlevo*



Souvislý bílý povlak, který je pevně spojený s podkladní horninou.

Povrchy zasažené tímto typem poškození se vyskytují především na vodorovných plochách, které byly chráněny přímému dopadu dešťové vody, především tedy na přední straně trupu světice, který směřoval k zemi, ale nebyl s ní v těsném kontaktu.

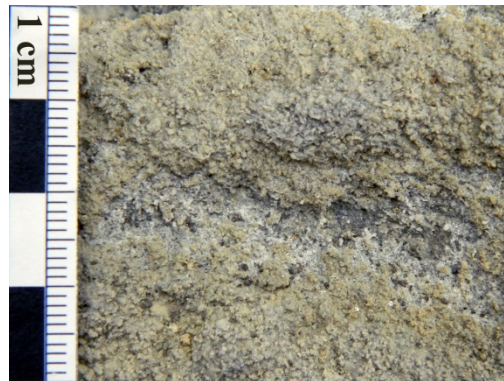
Lokálně se vyskytující tenká krusta světle šedé barvy pevně spojená s povrchem kamene  
*Detail – přední strana trupu světice, v úrovni pasu vpravo*



Lokálně se vyskytující tenká bílá krusta pevně spojená s podkladem se jeví jako výkvěty sádrovce. V těsné blízkosti těchto výkvětů se nacházejí také místa kamene, která vypadají zcela bez alterací.

Povrchy zasažené tímto typem poškození se vyskytují především na vodorovných plochách, které byly chráněny přímému dopadu dešťové vody, především tedy na přední straně trupu světice, který směřoval k zemi, ale nebyl s ní v těsném kontaktu.

Plošně se vyskytující vysoce degradovaný povrch kamene zaslepený, případně pojený sekundárním materiálem, pravděpodobně sádrovcem  
*Detail – přední strana trupu světice, draperie v oblasti nohou*



Degradovaný povrch horniny, vytvářející reliéf je na velkých plochách zaslepen bělavým povlakem. Povlak se opticky nejeví celistvě, spíše vyplňuje prostor mezi jednotlivými obnaženými zrny horniny. Hornina, která je vysoce degradovaná je ale díky tomuto jevu na povrchu pevná a nedrolí se.

Tento typ poškození se uplatňuje především na přední straně trupu světice, který byl orientován směrem k podloží.

Selektivní eroze – tvorba reliéfu – obnažení tvrdších zrn v důsledku vymývání měkčích složek horniny – hloubková degradace – ztráta originálního povrchu, případně silných vrstev kamene

*Detail – levý bok, draperie za levou rukou*



Selektivní eroze, nebo také vymývání měkčích složek materiálu horniny. V důsledku tohoto jevu, typickém pro kutnohorské, písčité vápence, dochází k obnažení tvrdších zrn horniny a k úbytku měkčích složek. V takto poškozených místech dochází k masivnímu úbytku hmoty kamene, hornina je postižena hloubkovou desintegrací. Vznik reliéfu umožňuje vodě pronikat do struktury kamene i na svislých plochách, na kterých se toto poškození především projevuje.

Eroze – povrchová degradace horniny, ztráta originálního povrchu

*Detail – přední strana trupu světice, levé rameno*



Rovnoměrné ztráty původního povrchu horniny v důsledku zvětrávání.

Tento typ povrchu se vyskytuje zejména na místech, která byla chráněna před přímým působením povětrnosti aj. nepříznivým vlivům.

### **1.2.3 Průzkum stavu objektu přírodovědnými metodami**

Průzkum s využitím několika různých přírodovědných metod navazoval na vizuální průzkum světice a jeho cílem bylo co nejširší doplnění poznatků o stavu sochy světice před restaurováním. Prozkoumání sochy s využitím přírodovědných metod zahrnovalo zejména charakteristiku použité horniny a zjištění její základních vlastností, detailní prozkoumání jednotlivých typů povrchů vápence vzniklých v důsledku jeho degradace, stanovení míry poškození jednotlivých částí sochy případně lokalizace dalších poškození nebo potenciálních zdrojů poškození v budoucnu. Získané poznatky sloužily nejen přesnému popisu stavu sochy světice, ale i jako důležitý podklad pro vypracování koncepce restaurování a specifikaci vhodných metod konzervačního zásahu.

#### **1.2.3.1 Průzkum povrchových vrstev sochy světice**

Vzhledem k nutnosti stabilizace silně korodované horniny a tedy k plánované strukturální konsolidaci bylo přistoupeno k podrobnějšímu, doplňujícímu průzkumu jejích povrchových vrstev. Na základě poznatků zjištěných vizuálním posouzením stavu povrchu sochy světice, byly vybrány ty, které jsou v dostatečné míře charakteristické pro jednotlivé situace nacházející se na povrchu horniny.

Jedním z hlavních cílů této části průzkumu bylo zjištění stavu a charakteristika jednotlivých částí povrchu, jejich poškození a identifikace exogenních nečistot a krust, které by mohly znesnadňovat nutnou a plánovanou strukturální konsolidaci. V případě krust byl kladen zvláštní důraz na jejich vlastnosti a to především jejich poréznost neboli propustnost a vztah k podkladu. Hodnocena byla jejich soudržnost s podkladem a také stav a struktura horniny pod nimi.

U velké části poškozeného povrchu bylo možné na základě viditelných projevů lokalizovat sulfatizovaná místa a sádrovcové krusty. Na povrchu sochy světice se ale také nacházely projevy – výkvěty či povlaky, u kterých nebylo zřejmé, zda se jedná o důsledky sulfatizace. V těchto případech byla, před odběrem vzorků na zhotovení nábrusů či výbrusů příčného řezu, k upřesnění definitivních míst odběru charakteristických vzorků pro instrumentální analýzy, provedena mikrochemická identifikace sádrovce. Pro tento účel byly odebrány vzorky velmi malých rozměrů seškrabáním povrchu skalpelem. Tímto postupem byl následně zajištěn vhodný výběr míst odběru vzorků pro mikroskopii a zároveň jeho minimalizace na nejcharakterističtější situace.



Mimo korodované povrchy byly také na zadní části trupu světice nalezeny fragmenty tmavé červené povrchové úpravy. Pro stanovení výstavby barevné vrstvy a její další identifikaci byl odebrán vzorek a zhotoven nábrus.

Součástí průzkumu byl i detailní popis a charakteristika poškození biologického původu.

Poznatky hlavní části tohoto průzkumu, zaměřené zejména na charakteristiku fenoménů degradace a vlastnosti kamene na jednotlivých površích sochy, byly využity nejen pro popis stavu sochy před restaurováním, ale následně posloužily jako důležitý podklad také pro volbu vhodných metod čištění i přípravu sochy pro strukturální konsolidaci.

### **Metodika měření:**

#### **Mikrochemické stanovení síranu vápenatého**

Vzorky pro mikrochemické stanovení síranu vápenatého neboli sádrovce byly získány seškrabáním velmi malého množství práškového vzorku z povrchu kamene. Práškové vzorky byly následně umístěny na podložní skličko a zakápnuty zředěnou HCl (v objemovém poměru 1:1 s H<sub>2</sub>O) a následně vysušeny zahřátím nad plynovým kahanem. Vysušený vzorek byl následně zkoumán pod stereolupou v dopadajícím světle.

#### **Mikroskopické zkoumání povrchových vrstev**

Vzorky odebrané pro potřeby mikroskopie byly prozkoumány přímo, jako úlomky aj. a následně byly z části vzorků připraveny nábrusy příčného řezu. Ty byly zhotoveny zalitím do polyesterové pryskyřice (Polylite 32032-00, fa Reichhol) a následně vybroušeny a vyleštěny.

Z jednoho rozměrnějšího vzorku, který se samovolně odloučil v důsledku poškození kamene, byl zhotoven výbrus<sup>14</sup>. Nábrusy i výbrus byly použity pro optickou i rastrovací elektronovou mikroskopii<sup>15</sup>.

---

<sup>14</sup> Vzorek výbrusu byl zhotoven firmou Geo-Präp, Andreas Wagner, Mozartstraße 23, 3730 Eggenburg

<sup>15</sup> Autorem všech fotografií z rastrovacích elektronových mikroskopů (fa Tescan, fa Fei) je Ing. Karol Bayer, pokud není uvedeno jinak

## **Metody měření:**

### **Optická mikroskopie:**

Optická mikroskopie v dopadajícím světle (optický mikroskop NIKON Eclipse 600, Stereomikroskop – NIKON SMZ 800, digitální foto zařízení NIKON COOLPIX 990). Průzkum byl proveden v laboratoři KCHT Fakulty Restaurování UPa v Litomyšli<sup>16</sup>

Optická polarizační mikroskopie v procházejícím světle (optický polarizační mikroskop – NIKON Eclipse 600). Průzkum byl proveden v laboratoři Institutu pro umění a technologie Univerzity pro užité umění ve Vídni<sup>17</sup>

### **Rastrovací elektronová mikroskopie s energo-disperzní analýzou:**

Rastrovací elektronový mikroskop FEI Quanta 200 F s energo-disperzním analyzátozem – EDAX, systém Genesis. Analýzy byly provedeny v laboratoři Institutu pro umění a technologie Univerzity pro užité umění ve Vídni<sup>18</sup>

Rastrovací elektronový mikroskop Tescan MIRA 3 s energo-disperzním analyzátozem Bruker, systém Quantax. Analýzy byly provedeny v laboratoři KCHT Fakulty Restaurování UPa v Litomyšli<sup>19</sup>

---

<sup>16</sup> Měření provedeno ve spolupráci s ing. Karolem Bayerem, KCHT Fakulta Restaurování UPCE v Litomyšli

<sup>17</sup> Měření provedl ing. Karol Bayer, pracoviště Institutu pro umění a technologie, Univerzita pro užité umění ve Vídni

<sup>18</sup> Měření provedl ing. Karol Bayer, pracoviště Institutu pro umění a technologie, Univerzita pro užité umění ve Vídni

<sup>19</sup> Měření provedeno ve spolupráci s ing. Karolem Bayerem, KCHT Fakulta Restaurování UPCE v Litomyšli

## Mikrochemická analýza výskytu síranu vápenatého:

Tab. 3: Lokalizace a dokumentace místa odběru vzorku na mikrochemickou analýzu přítomnosti síranu vápenatého na povrchu sochy světice č. 1, včetně jejího vyhodnocení

### Vzorek 1(SO<sub>4</sub><sup>-II</sup>)

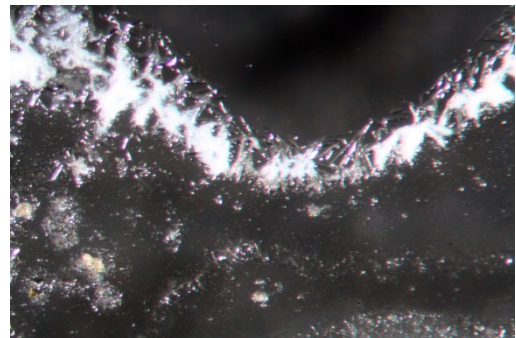
Lokálně se vyskytující tenká krusta světle šedé barvy pevně spojená s povrchem kamene  
*Detail – přední strana trupu světice, v úrovni pasu vpravo v oblasti břicha*



### Vyhodnocení:

Důkaz na **přítomnost sádrovce pozitivní**  
(opakován na stejném vzorku 3x)

Na fotografii vlevo jsou patrné jehličkovité krystaly síranu vápenatého indikující přítomnost sádrovce v zkoumaném vzorku.



*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 63×*

**Vzorek 2(SO<sub>4</sub><sup>-II</sup>)**

Krusta s exogenními usazeninami pevně spojená s povrchem kamene

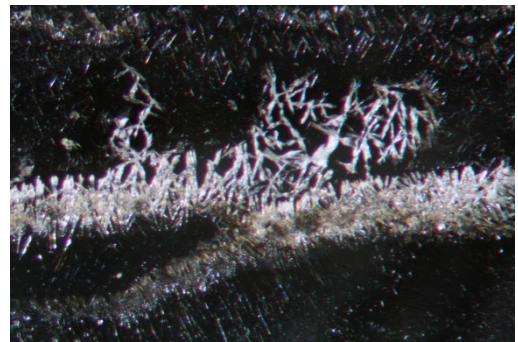
Detail – levý bok světice v oblasti nohou



**Vyhodnocení:**

Důkaz na **přítomnost sádrovce pozitivní**  
(opakován na stejném vzorku 3x)

Na fotografii vlevo jsou patrné jehličkovité krystaly síranu vápenatého indikující přítomnost sádrovce v zkoumaném vzorku.



*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 63×*

**Vzorek 3(SO<sub>4</sub><sup>-II</sup>)**

Souvislý tenký bílý povlak krusty pevně spojený s povrchem kamene

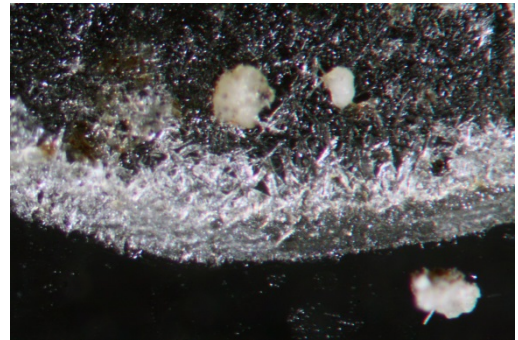
Detail – přední strana trupu světice, v úrovni pasu vlevo



**Vyhodnocení:**

Důkaz na **přítomnost sádrovce pozitivní**  
(opakován na stejném vzorku 3x)

Na fotografii vlevo jsou patrné jehličkovité krystaly síranu vápenatého indikující přítomnost sádrovce v zkoumaném vzorku.

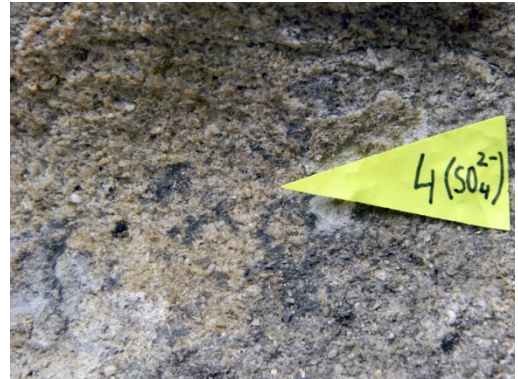
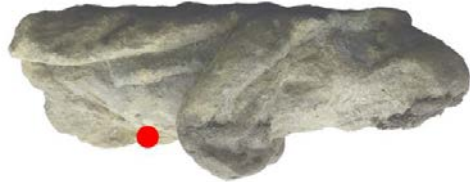


Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 63×

**Vzorek 4(SO<sub>4</sub><sup>-II</sup>)**

Tenká krusta s exogenními usazeninami pevně spojená s podkladem kamene

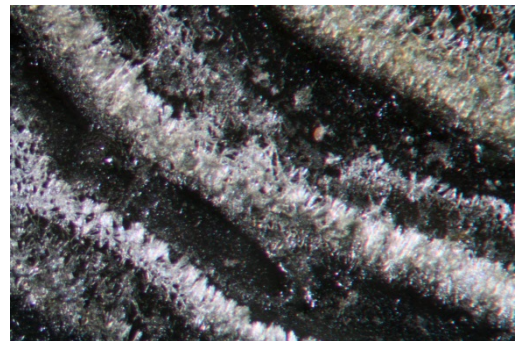
Detail – pravý bok světice v oblasti nohou



**Vyhodnocení:**

Důkaz na **přítomnost sádrovce pozitivní**  
(opakován na stejném vzorku 3x)

Na fotografii vlevo jsou patrné jehličkovité krystaly síranu vápenatého indikující přítomnost sádrovce v zkoumaném vzorku.



*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 63×*

**Shrnutí:**

U všech odebraných vzorků byla mikrochemickou důkazovou reakcí prokázána přítomnost síranu vápenatého. Je velmi pravděpodobné, že téměř všechny vizuálně se uplatňující alterace povrchu vápence v podobě zákalů, povlaků i krust jsou způsobeny především sulfatizací, neboli přeměnou uhličitanu vápenatého na síran vápenatý v důsledku chemické koroze (reakce s oxidy síry v ovzduší).

### **Studium povrchových vrstev horniny instrumentálními metodami:**

Za účelem bližšího poznání stavu na jednotlivých, vizuálně zcela odlišných površích sochy světice bylo po důkladném vizuálním průzkumu a doplňující mikrochemické analýze odebráno k podrobnějšímu prozkoumání 7 vzorků. Ze šesti vzorků byly zhotoveny nábrusy a jeden vzorek byl pro další analýzy připraven jako výbrus.

Místa odběru vzorků byla zvolena tak, aby získané výsledky utvářely celek, který postihuje všechny typické situace na povrchu sochy světice. Odebrané vzorky jsou tedy charakteristické pro celou současnou škálu typů povrchu sochy – od nejméně poškozených až po silně poškozené je můžeme uvést ve výčtu v následujícím pořadí:

- nejlépe dochovaná povrchová vrstva horniny bez známek výrazných alterací – pouze kolonizováno řasami (vzorek SR6)
- biologická kolonizace – řasy, silný biogenní povlak (vzorek SR7)
- zvětralý povrch pokrytý bílým povlakem / výkvětem (vzorek SR3)
- masivnější krusta, pevně spjatá s podkladní horninou (vzorek SR2)
- masivní, oddělující se krusta (vzorek SR1)
- masivní krusta odtržená s vrstvou horniny (vzorek SR4)
- silně korodovaná hornina, velké ztráty hmoty kamene (zejména v důsledku degradace) (vzorek SR5)

Při studiu jednotlivých nábrusů povrchových vrstev horniny byl kladen důraz především na stav bezprostřední povrchové vrstvy horniny a projevů případných změn v tomto místě. Dále byla studována struktura horniny, vzájemná vzdálenost a propojení jednotlivých zrn, porézni systém – velikost a tvar pórů.

Zvláštní pozornost byla věnována především přítomnosti identifikovaného síranu vápenatého na povrchu horniny i v její struktuře a především jeho distribuci. Sledována byla síla a homogenita krust a povlaků tzn. jejich propustnost. Hodnocena byla soudržnost povrchových vrstev s podkladní horninou. Jednotlivé charakteristické fenomény degradace kamene byly fotograficky dokumentovány.

U nábrusu vzorku barevné úpravy byla zkoumána výstavba jednotlivých vrstev, jejich propojení s podkladní horninou a výskyt případného rozhraní nebo nečistot mezi vrstvami.

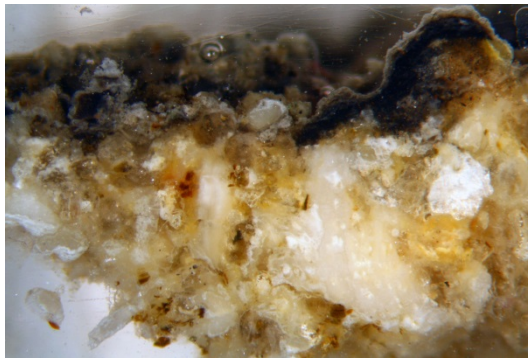
Elektronovou mikroskopií bylo stanoveno prvkové složení barevné úpravy. U barevné vrstvy byla také provedena mikrochemická identifikace pojivového systému.

Pozornost byla také u všech odebraných vzorků věnována přítomnosti případných reziduí povrchových úprav, které je v některých případech možné identifikovat např. pod krustami, které se na nich v průběhu času vytvořily.



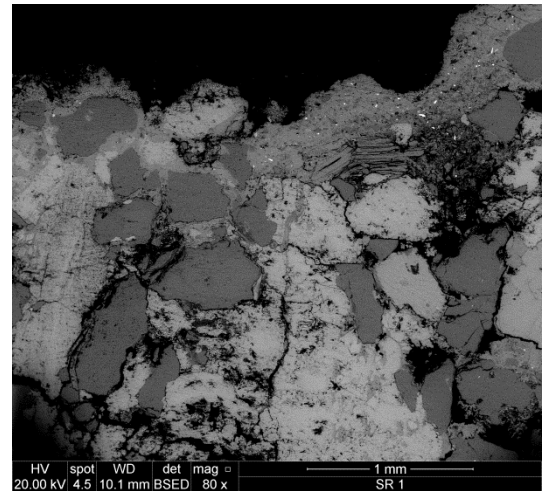
**Tab. 4: Vzorek SR1 – masivní, oddělující se krusta**

*Detail místa odběru vzorku SR1 – levý bok trupu světlce pod levou rukou*



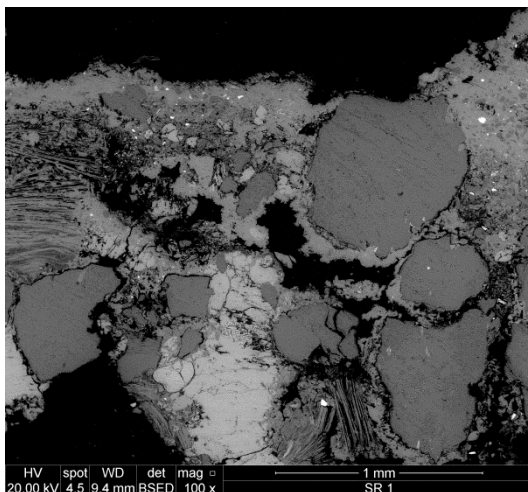
**Obr. 3: Nábrus vzorku SR1**

*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 17,5×*



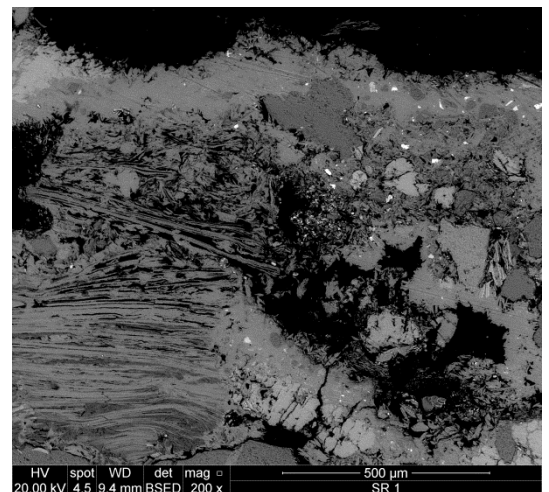
**Obr. 4: Nábrus vzorku SR1**

*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 80×*



**Obr. 5: Nábrus vzorku SR1**

*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*



**Obr. 6: Nábrus vzorku SR1**

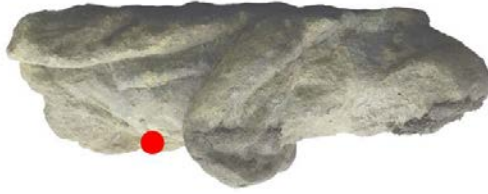
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 200×*

### **Vyhodnocení:**

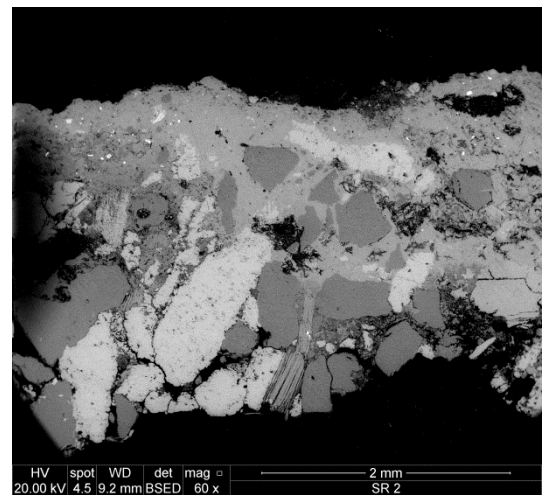
Na povrchu vápence je vytvořena silná tmavá, poměrně kompaktní vrstva korozních produktů a nečistot, kterou lze označit jako krustu. Podle výsledku analýz je zřejmé, že je tvořena hlavně síranem vápenatým (patrně ve formě sádrovce;  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$ ). Tmavou barvu (viz Obr. 3) způsobuje přítomnost jemných, tmavých prachových nečistot (hlavně nečistoty organického původu – saze), samotný krystalický síran vápenatý je bezbarvý, ale v mikroskopii je často viditelný jako bílý. Zdrojem síranu vápenatého je chemická koroze uhličitanu vápenatého obsaženého ve vápenci.

Sádrovcová krusta není pouze na povrchu vápence, ale sádrovec je kumulovaný i těsně pod povrchem v pórech a mezi zrnny horniny. Tento fenomén je viditelný na Obr. 4, Obr. 5 a Obr. 6 (šedá kompaktní hmota na povrchu a mezi zrnny vápence). Sádrovec proniká i do vrstevnaté struktury slídových částic přítomných ve vápenci (Obr. 6) a při větším zvětšení je lokálně patrna i destičkovitá struktura sádrovcových krystalů vyplňujících póry kamene. Síla krusty v místě odběru vzorku se pohybuje mezi 0,5 až 0,7 mm. Vzhledem ke kompaktní struktuře krusty je zřejmé, že povrch vápence má výrazně sníženou porozitu i tím i schopnost přijímat kapaliny. Pod krustou je porozita vápence výrazně vyšší, vzájemné propojení zrn horniny je zřetelně oslabené.

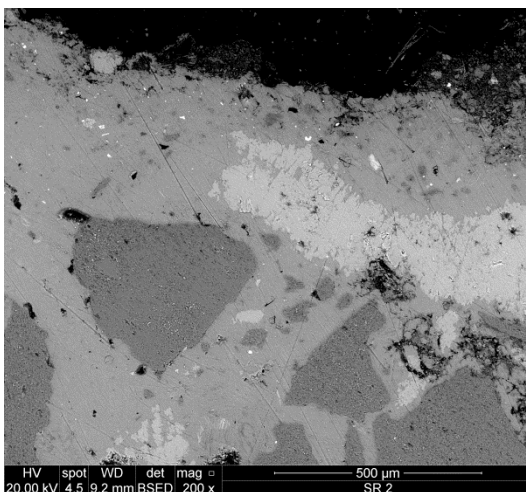
**Tab. 5: Vzorek SR2 – masivnější krusta, pevně spjatá s podkladní horninou**  
*Detail místa odběru vzorku SR2 – pravý bok trupu světice v úrovni nohou*



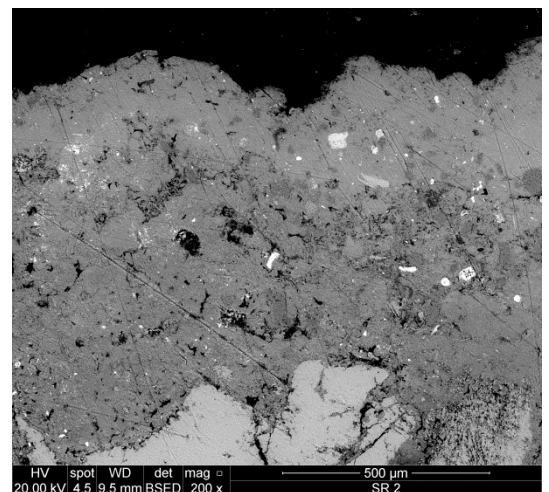
**Obr. 7: Nábrus vzorku SR2**  
*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 20×*



**Obr. 8: Nábrus vzorku SR2**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 60×*



**Obr. 9: Nábrus vzorku SR2**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 200×*

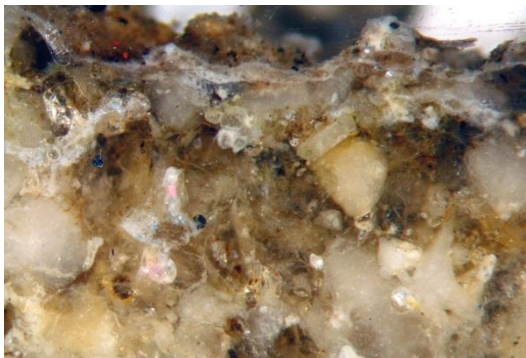


**Obr. 10: Nábrus vzorku SR2**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 200×*

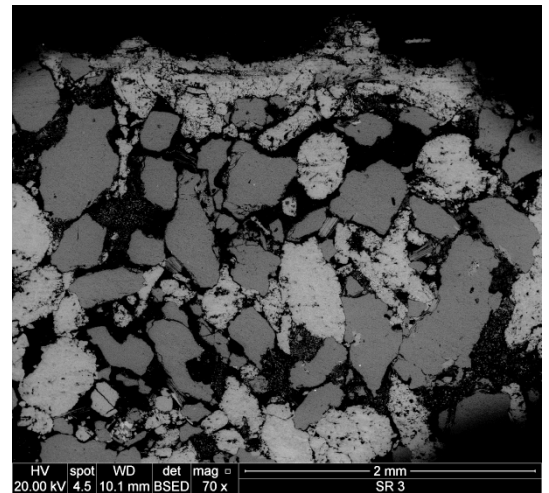
**Vyhodnocení:**

Struktura i složení povrchu vápence je v tomto místě poměrně podobná vzorku SR 1. Na povrchu vápence je kompaktní vrstva tvořená hlavně síranem vápenatým (sádrovec) a příměsí tmavých, prachových nečistot (Obr. 7). I v tomto případě je síran vápenatý kumulovaný nejen na povrchu, ale i v pórech vápence až do hloubky 1,5–2 mm. Na povrchu vápence patrně zcela nahrazuje původní pojivo uhličitan vápenatý. Vrstva je opět velmi kompaktní, to je dobře patrné na Obr. 8 až Obr. 10. Síran vápenatý vyplňuje póry kamene, což způsobuje výrazné snížení porozity a kapilární nasákavost vápence.

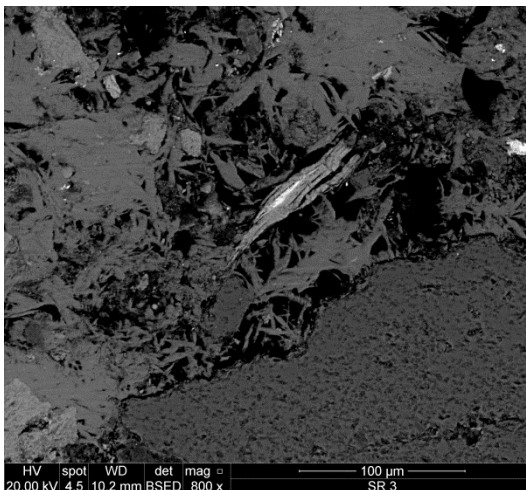
**Tab. 6: Vzorek SR3 – zvětralý povrch pokrytý bílým povlakem / výkvětem (?)**  
*Detail místa odběru vzorku SR3 – přední strana trupu svěčice v úrovni pasu vpravo*



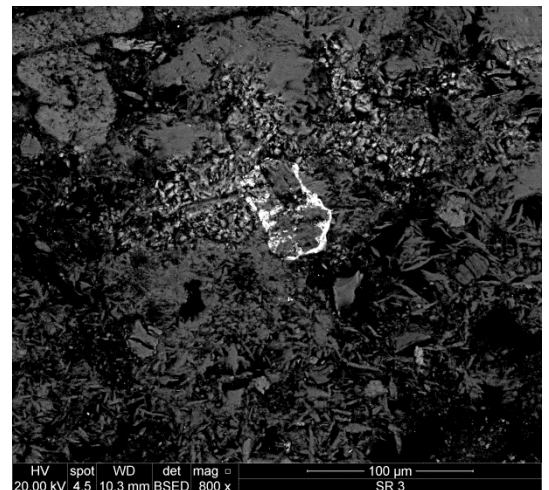
**Obr. 11: Nábrus vzorku SR3**  
*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 30×*



**Obr. 12: Nábrus vzorku SR3**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 70×*



**Obr. 13: Nábrus vzorku SR3**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 800×*



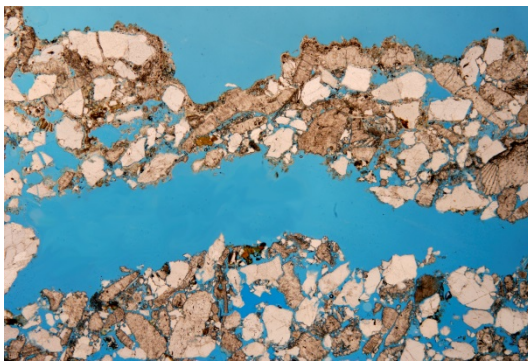
**Obr. 14: Nábrus vzorku SR3**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 800×*

### **Vyhodnocení:**

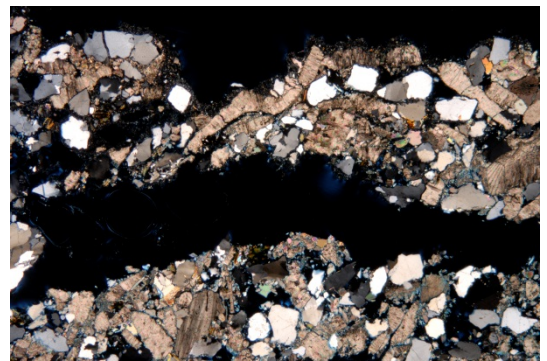
Bílý povlak na povrchu kamene je i v tomto vzorku tvořen hlavně síranem vápenatým (sádrovcem). Neobsahuje vyšší podíl tmavých prachových nečistot, což je důvodem, že barva povlaku je transparentní až bílá (Obr. 11). Povlak je poměrně tenký cca. 100–400  $\mu\text{m}$  a sádrovec proniká hlouběji do pórů vápence pouze velmi omezeně (Obr. 12). Při větším zvětšení je opět dobře viditelná destičkovitá struktura krystalů sádrovce (Obr. 13 a Obr. 14). Ve vrstvě síranu vápenatého byly nalezeny i částice obsahující olovo. Je možné, že se jedná o drobné fragmenty nebo zrna pigmentu pocházející z dřívějších povrchových úprav sochy (Obr. 14).

Struktura samotného vápence pod povlakem je vysoce porézní a otevřená. Lze předpokládat, že povlak síranu vápenatého na povrchu vápence bude částečně snižovat kapilární příjem kapalin, ale v menší míře než u míst odběru vzorku SR 1 a SR 2.

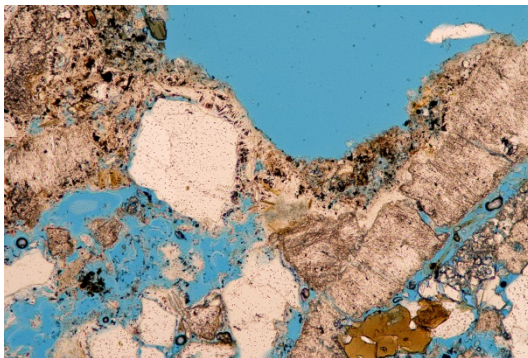
**Tab. 7: Vzorek SR4 – masivní krusta odtržená s vrstvou horniny**  
*Detail místa odběru vzorku SR4 – levý bok trupu svěťce pod levou rukou*



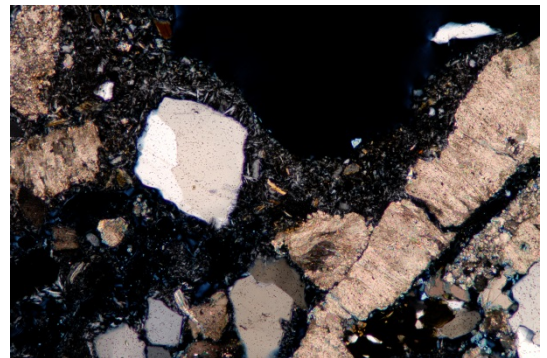
**Obr. 15: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při zvětšení 20×*



**Obr. 16: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 20×*



**Obr. 17: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při zvětšení 50×*



**Obr. 18: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 50×*

### **Vyhodnocení:**

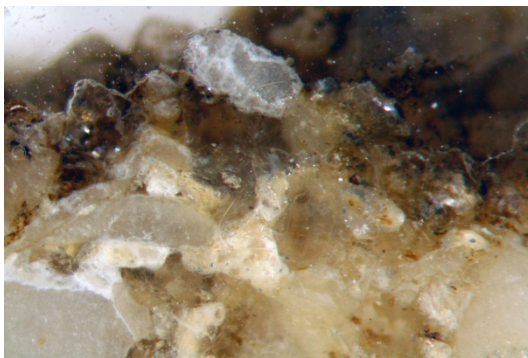
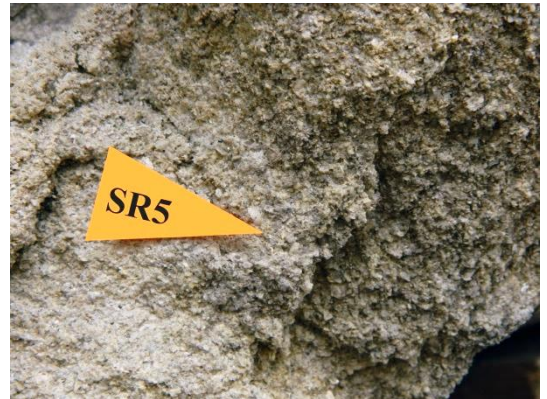
Dané místo je charakteristické pro silně degradovaný vápenec s výrazně sníženou pevností, tedy reprezentuje poškozenou horninu, kterou je nutné v rámci konzervačního zásahu důkladně hloubkově zpevnit. Místo odběru tohoto poměrně velkého vzorku bylo vybráno i z dalšího důvodu. Vrůstání kořenového systému popínavé rostliny skalníku do kamene v daném místě, způsobilo oddělení části vápence i s povrchovou krustou. Ze vzorku byl vyhotoven výbrus.

Korodovaný povrch vápence je i v tomto místě silně sulfatizovaný, uzavřený sádrovcovou krustou a podobá se povrchu vápence v místě odběru vzorku SR1. Poškození kamene pod krustou je však výraznější. Na prvních dvou snímcích tj. Obr. 15 a Obr. 16 je patrné úplné odtržení silné povrchové vrstvy horniny i s krustou (obě části jsou k sobě ještě spojeny zrnky v levé části fotografie). Na povrchu odtržené vrchní vrstvy kamene je souvislá vrstva sádrovce. Sádrovec částečně vyplňuje i póry vápence po hranici, kde došlo k odtržení od hmoty horniny (Obr. 17 a Obr. 18). Hornina pod odtrženou krustou má vysokou porozitu (póry mají v paralelních nikolech modrou barvu, protože jsou vyplněny modrou zalévací pryskyřicí), zrna vápence jsou propojena pouze velmi slabě.

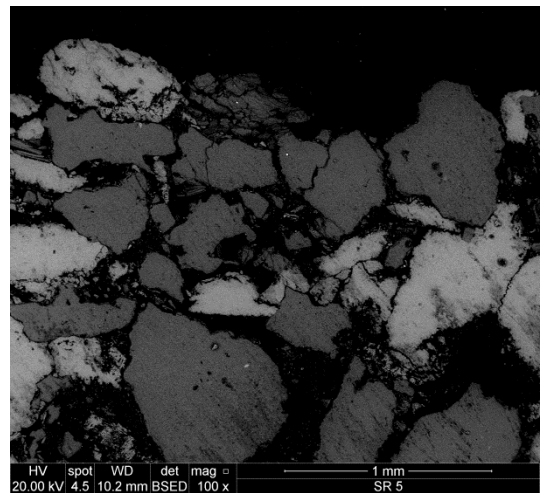


**Tab. 8: Vzorek SR5 – silně degradovaná hornina, velké ztráty hmoty kamene**  
(zejména v důsledku eroze)

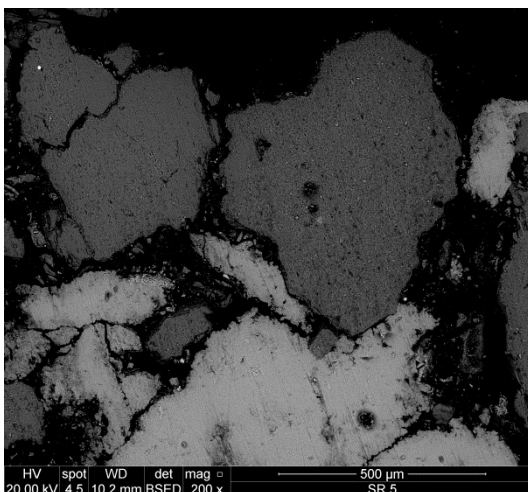
*Detail místa odběru vzorku SR5 – levý bok trupu světice za levou rukou*



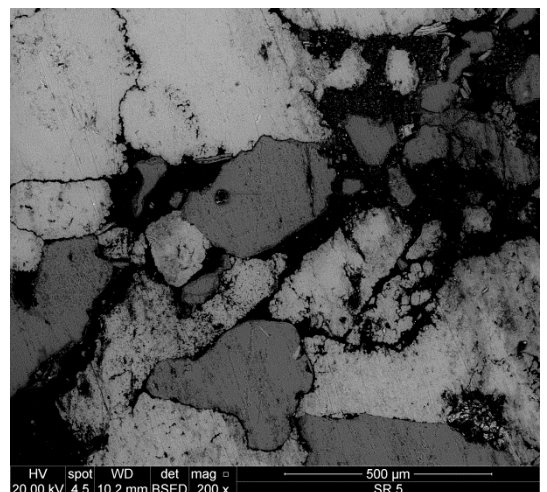
**Obr. 19: Nábrus vzorku SR5**  
*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 40×*



**Obr. 20: Nábrus vzorku SR5**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*



**Obr. 21: Nábrus vzorku SR5**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 200×*



**Obr. 22: Nábrus vzorku SR5**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 200×*

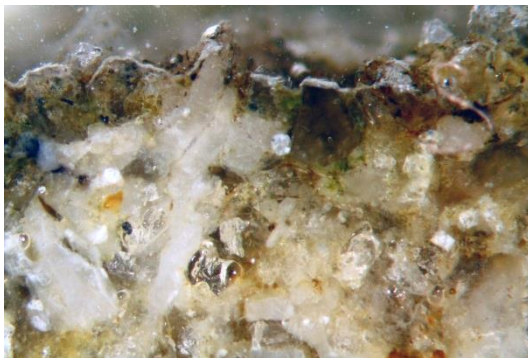
### **Vyhodnocení:**

Povrch i podpovrchové vrstvy vápence jsou poměrně porézní, otevřené. Vápenec není uzavřený sádrovcovou krustou, ani jiným typem nečistot. Jednotlivá zrna horniny jsou vzájemně pojena často pouze v několika bodech.

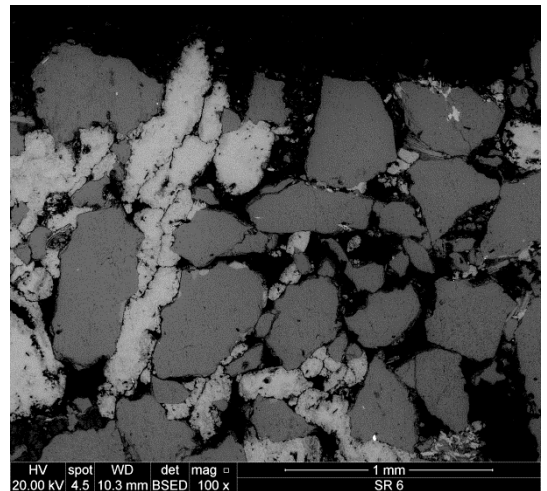
Na fotografii nábrusu v optickém mikroskopu jsou patrné nečistoty na povrchu korodované horniny. Je vidět, že se nečistoty nalézají mezi jednotlivými zrny i pod nimi. Tyto nečistoty, ale na rozdíl od vzorku SR 1, SR 2 a SR 4 nevytvářejí kompaktní vrstvu, povrch vápence je velmi porézní. Podle mikroskopické analýzy jsou částice těchto nečistot převážně organického původu, pravděpodobně zbytky zelených řas. Lze očekávat, že vápenec bude v daném místě vysoce nasákavý.

**Tab. 9: Vzorek SR6 – nejlépe dochovaná povrchová vrstva horniny bez známek výrazných alterací – pouze kolonizováno řasami**

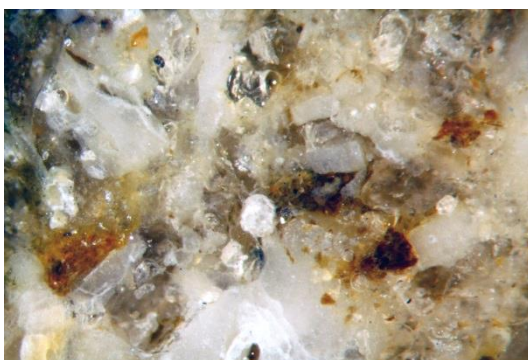
*Detail místa odběru vzorku SR6 – spodní lomová plocha trupu světice*



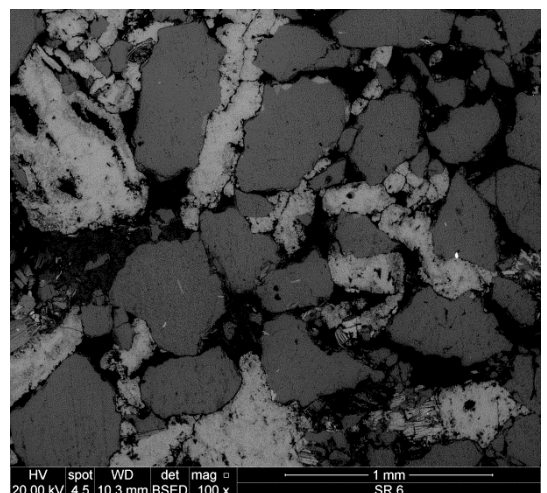
**Obr. 23: Nábrus vzorku SR6**  
*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 30×*



**Obr. 24: Nábrus vzorku SR6**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*



**Obr. 25: Nábrus vzorku SR6**  
*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 30×*



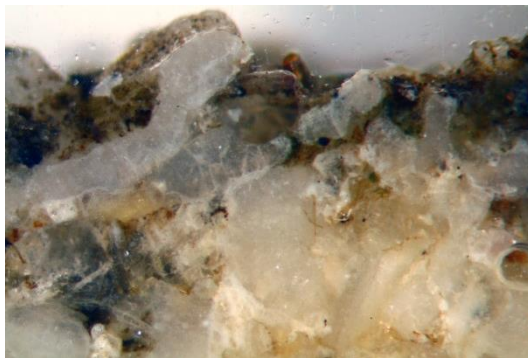
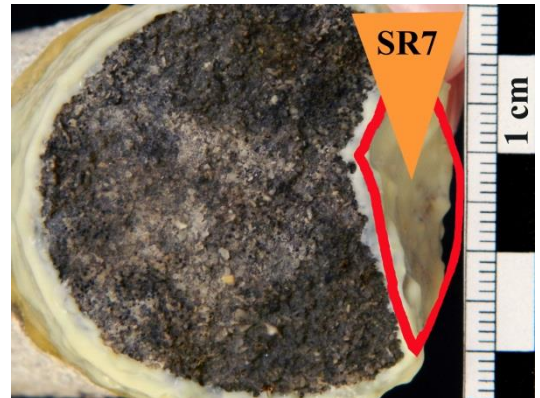
**Obr. 26: Nábrus vzorku SR6**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*

**Vyhodnocení:**

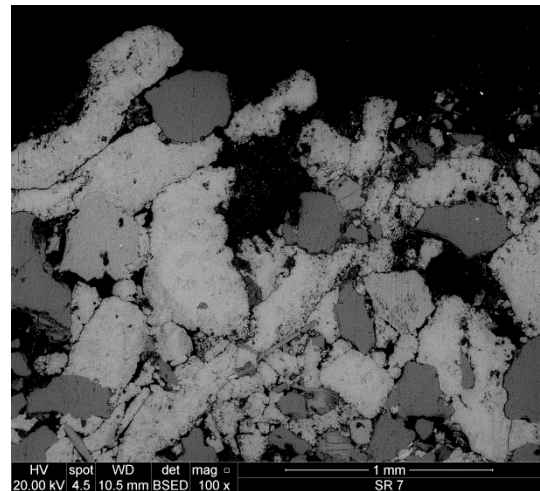
Vzorek by odebrán s cílem získat referenční materiál vizuálně nejlépe dochovaného povrchu sochy světice pro porovnávání s různě poškozenými místy. Na fotografii nábrusu v optickém mikroskopu (viz Obr. 23) je patrná kolonizace řasami. Řasy se nalézají nejen na povrchu, ale i těsně pod ním v pórech vápence. Analýza pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu neprokázala v povrchových vrstvách významnější podíl dalšího typu nečistot nebo sádrovce. Porozita vápence (na povrchu i těsně pod ním) je i v tomto místě vysoká.

**Tab. 10: Vzorek SR7 – biologická kolonizace – řasy, silný biogenní povlak**

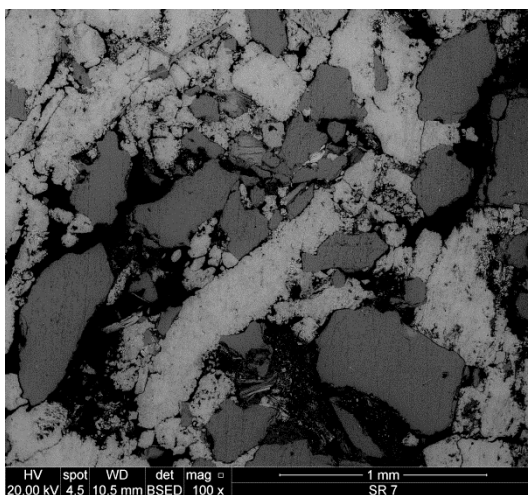
*Detail místa odběru vzorku SR7 – lomová plocha fragmentu nohou světice s podstavcem – odběr z jádrového vrtu*



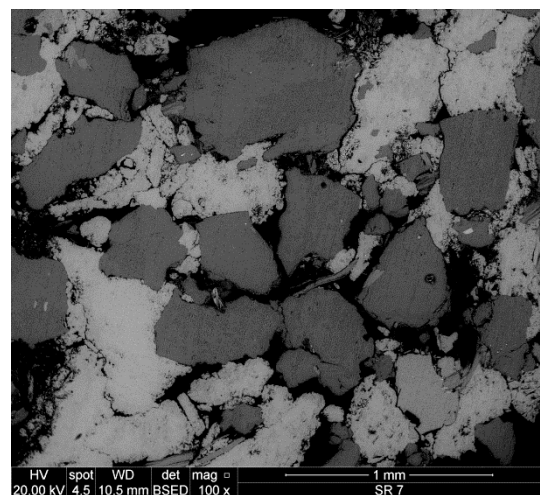
**Obr. 27: Nábrus vzorku SR7**  
*Stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 40×*



**Obr. 28: Nábrus vzorku SR7**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*



**Obr. 29: Nábrus vzorku SR7**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*



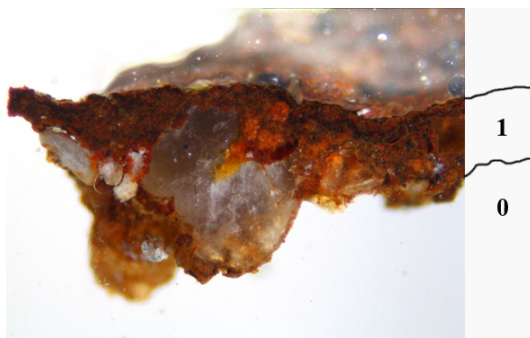
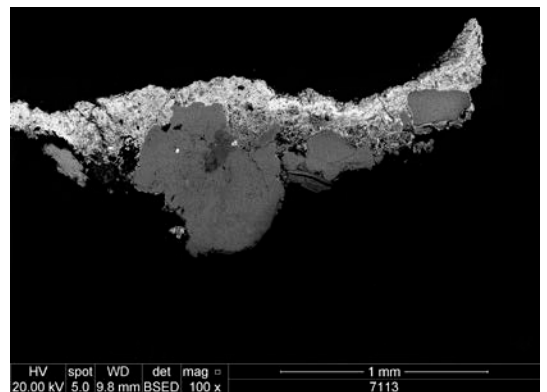
**Obr. 30: Nábrus vzorku SR7**  
*Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*

### **Vyhodnocení:**

Tento vzorek byl odebrán z vrtného jádra otvoru, který byl zhotoven pro čep, jehož úkolem bude spojit část nohou s podstavcem a trup světice. Jedná se o vzorek povrchu horniny z nohou světice z lomové plochy fragmentu, který byl exponován povětrnosti v horizontální orientaci. Povrch této části objektu byl silně kolonizován nižšími rostlinami, především řasami a mechy.

Na první fotografii nábrusu z optického stereomikroskopu viz Obr. 27 můžeme vidět biogenní povlak, který pokrývá téměř celý povrch. Tento film vyplňuje prostor mezi povrchovými zrny a nalézá se rovněž pod nimi. Naproti tomu na Obr. 28 z elektronového mikroskopu se jeví povrch kamene bez nečistot či jiných vrstev. Filmy nebo povlaky organického původu je v nábrusech pomocí rastrovací elektronové mikroskopie v režimu odrážených elektronu poměrně obtížné rozlišit, protože mají stejné nebo velmi podobné prvkové složení jako zalévací pryskyřice a „splývají“ s ní.

Není však vyloučeno, že schopnost daného místa přijímat kapaliny může být snížena přítomností tzv. mimobuněčného slizu zelených řas, jejichž povlak je dobře patrný na obrázku ze stereomikroskopu.

**Tab. 11: Vzorek C1 – barevná povrchová úprava, nalezená na draperii na zádech světice***Detail místa odběru vzorku C1 – zadní strana trupu světice – draperie za levým ramenem sochy světice***Obr. 31: Nábrus vzorku C1***Optický mikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 50×***Obr. 32: Nábrus vzorku C1***Elektronová mikroskopie v režimu odražených elektronů; fotografováno při zvětšení 100×*

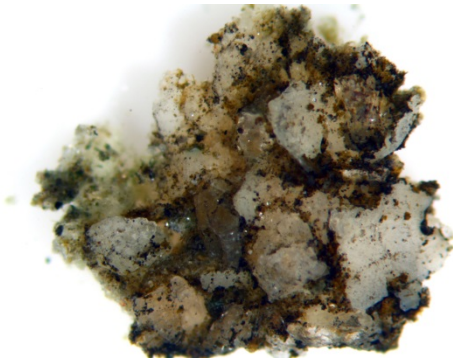
### Vyhodnocení:

Vzorek barevné vrstvy byl odebrán i s podkladní horninou. V optickém mikroskopu je patrna jedna vrstva tmavě červené, povrchové úpravy. Tato úprava je pevně spjatá s povrchem kamene, na kterém nejsou patrné žádné nečistoty ani rezidua jiných povrchových úprav, které by mezi nimi tvořily hranici. Barevná vrstva je nanesená přímo na vápenci (bez podkladu) a částečně penetrovala i do struktury kamene mezi jednotlivá povrchová zrna. (viz Obr. 31). Obsahuje červený pigment na bázi oxidu železa (případně červený okr s vysokým obsahem oxidu Fe). Ve vrstvě byla prokázána přítomnost fosforu, který může indikovat přítomnost mléčných bílkovin v pojivu vrstvy (kasein). Bílkoviny byly v barevné vrstvě prokázány mikrochemicky<sup>20</sup> (důkaz na pyrolové deriváty) a je velmi pravděpodobné, že pojivem barevné vrstvy je kasein (ve formě kaseinátu).

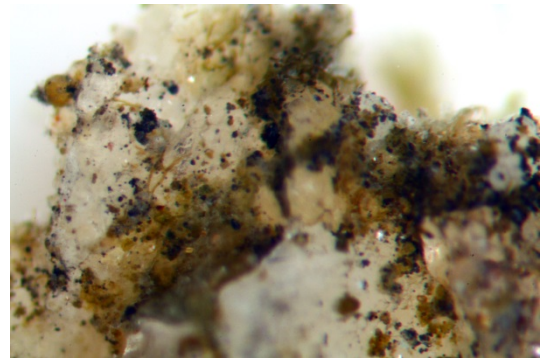
<sup>20</sup> Mikrochemickou identifikaci pojiva provedla Ing. Renata Tišlová, PhD., KCHT Fakulta restaurování UPCE v Litomyšli

## Studium biologické kolonizace optickou mikroskopií:

Tab. 12: Vzorek biologické kolonizace – řasy



**Obr. 33: Úlomek vzorku SR7**  
*Optický stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 20×*



**Obr. 34: Úlomek vzorku SR7**  
*Optický stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 63×*



**Obr. 35: Úlomek vzorku SR7 z rubové strany**  
*Optický stereomikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 63×*

### Vyhodnocení:

Snímky ze stereomikroskopu ukazují osídlení povrchu kamene řasami. Je patrné, že řasy osidlují spíše prostory mezi jednotlivými zrny. Biologický materiál se nalézá rovněž pod povrchem, což dokládá fotografie rubové neboli spodní strany vzorku silného přibližně 2 mm viz Obr. 35.

Na místech přímo exponovaných dopadu dešťové vody se řasami osídlený kámen zdá být pevný, je tedy pravděpodobně pouhým hostitelem, který může být dokonce chráněn tzv. mimobuněčným slizem proti průniku vody. V dešťových stínech se řasy nalézají v menší míře většinou na místech zasažených dalšími korozními vlivy – v oblastech osídlených mechy, nebo na silně korodovaných částech kamene, kde dochází k dlouhodobějšímu zadržování vlhkosti.

Důsledkem osídlení řasami je vznik tzv. biopatiny, která má tmavou šedavou, mírně zelenou barvu a je patrné, že se neuplatňuje pouze na povrchu kamene.



Tab. 13: Vzorek biologické kolonizace – mechorost



**Obr. 36: Mech pevně vrůstající do struktury kamene shora**  
*Optický mikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 12,5×*



**Obr. 38: Mech pevně vrůstající do struktury kamene v příčném řezu**  
*Optický mikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 12,5×*



**Obr. 37: Mech se silnou vrstvou mikrozoóny půdy snadno oddělitelný od struktury kamene, příčný řez**  
*Optický mikroskop; fotografováno v dopadajícím světle při zvětšení 10×*

**Vyhodnocení:**

Povrch horniny sochy světice byl hojně kolonizován mechem, pravděpodobně pouze jedním, přesně neurčeným, druhem z čeledi prutníkovité (Bryaceae). Mohlo by se jednat například o prutník převislý nebo jiný příbuzný druh. Uvádí se, že tyto typy mechů se vyskytují „na hlinité až písčité půdě ve štěrbinách bazických skal a balvanů nebo na obnaženém substrátu“<sup>21</sup>.

Na jednotlivých typech povrchů kamene byla adheze tohoto mechorostu k podkladu výrazně odlišná. Na některých místech, především přímo exponovaných povětrnosti, byly mechy pevně vrostlé kořenovými vlásky do struktury kamene, viz Obr. 38. Pod nimi se nalézal povrch horniny s dobrými mechanickými vlastnostmi. Mezi jednotlivými zrny kamene zůstávaly po odstranění zelené zóny mechu rezidua kořenových vlásků, hnědé až hnědočervené barvy. V oblasti kořínků byla pod stereomikroskopem patrná ojedinělá zrna kamene.

Naopak na místech krytých přímému dopadu dešťové vody se vyskytovaly rostliny velmi snadno oddělitelné od silně korodovaného podkladu horniny, viz Obr. 37. Pod zelenou zónou mechu se nacházela silná vrstva mikrozóny půdy s kořenovými vlásky. Tato porézní vrstva substrátu mechu byla tvořena převážně zrny zvětralého kamene, jak je patrné z obrázku. Když byl mech odstraněn, společně se silně korodovaným substrátem v oblasti jeho kořenového balu, zůstal pod ním kámen silně narušen, drolil se a pískovatěl.

Mechy měly po transferu sochy do ateliéru zelenou barvu, která signalizuje jejich aktivní fázi. Uvedené vzorky byly z povrchu sochy sejmuty až po vyschnutí kamene a tím i substrátu mechorostů, kdy u nich nazvala tzv. suchá neboli klidová fáze. Na fotografiích jsou tedy zachyceny mechorosty v suchém stavu.

---

<sup>21</sup> *Bryum algovicum* Sendtn. ex Müll. Hal. – prutník převislý [online]. [cit. 2013-08-03]. Dostupné z: <http://kopecek.pionyr.cz/nauc/rostliny/Mechy/Bryum%20algovicum.htm>

Tab. 14: Vzorek biologické kolonizace – závornatka černavá



**Ulita závornatky černavé**

*Optický stereomikroskop; fotografováno  
v dopadajícím světle při zvětšení 10×  
(obrázek je spojen ze dvou fotografií)*

**Popis situace na povrchu kamene v místech osídlení závornatku černavou:**

Malý plži, závornatky černavé osidlovali chráněná místa a záhyby sochy světice. Tito měkkýši se vyskytují na substrátech bohatých na uhličitán vápenatý, který je pro ně zdrojem pro stavbu ulit.

Hornina v oblasti osídlení závornatkou byla znečištěna akumulací exogenního materiálu, ze kterého plži budují svoje příbytky. Přítomnost tohoto organismu na povrchu horniny je také spjata s dotací vlhkosti do materiálu.

### 1.2.3.2 Měření nasákavosti povrchů kamene

Schopnost přijímat kapaliny nebo též nasákavost je pro horniny jednou z důležitých a zároveň také charakteristických fyzikálních vlastností. Tento parametr poskytuje, v závislosti na způsobu měření, údaje související s pórovitostí horniny resp. její kapilární aktivitou. Rozlišujeme dva způsoby měření nasákavosti a to tzv. celkovou nasákavost, která se zjišťuje ponořením horniny do kapaliny, nebo tzv. nasákavost vzlínáním, ta je dána kapilární aktivitou horniny. Měření kapilární nasákavosti lze provádět i nedestruktivními způsoby tj. bez nutnosti odebírat vzorky nebo jinak zasahovat do hmoty zkoumaného objektu. Umožňuje i vzájemné srovnání povrchů s různým stupněm degradace, znečištění ... atd. Tato metoda proto bývá preferována při měření *in situ* kde není možné ani žádoucí ponořit celé objekty a navíc poskytuje dílčí informaci o právě měřené oblasti.

Na základě vzájemných rozdílů jednotlivých měření nasákavosti vzlínáním nebo dle srovnání se standardem (s vlastní horninou např. na lomové nebo neexponované ploše, případně s obecně udávaným parametrem pro daný typ horniny) lze identifikovat změny ve struktuře horniny. Odchylky mohou detekovat různé stupně poškození materiálu, přítomnost krust nebo nečistot uzavírajících povrch, případně vliv předešlých konzervačních zásahů.

K měření nasákavosti kamene je možné použít různé kapaliny. Mezi nejběžnější média patří voda, případně také rozpouštědla, která jsou využívána jako nosná média konsolidačních a konzervačních prostředků. Na základě měření nasákavosti kamene je pak například možné stanovit předpokládanou spotřebu zpevňovacího materiálu či zvolit jeho nosné médium.

K měření nasákavosti vzlínáním se na kamenných objektech nejčastěji používá tzv. Karstenova trubice. Jedná se o otevřenou měřicí trubici (obvykle ze skla) se stupnicí objemu kapaliny v mililitrech, která umožňuje měřit vsakování kapaliny do materiálu přímo z vodního sloupce. Nevýhodou tohoto měření je nutnost upevnit měřicí trubici na kámen nějakým tvárným a těsnícím materiálem s dobrou adhezí k povrchu měřeného materiálu i vlastní trubici, což může být na některých typech povrchů poměrně obtížné.

#### Měření nasákavosti na soše světice č. 1

V případě sochy světice, jejíž povrch je z velké části vysoce korodovaný by upevnění Karstenovy trubice plastickým tmelem na bázi silikonového kaučuku znamenalo poškození jejího povrchu. Na silně korodovanou horninu proto nebylo možné měřicí zařízení tímto obvyklým způsobem upevnit a ani jej tedy použít.

K měření nasákavosti vzlínáním proto byla použita metoda šetrnější k povrchu kamene, která spočívá v těsném přikládání pevného, vodou plně nasyceného rezervoáru přímo

na měřený povrch. Pro tento účel byla použita speciální, vysoce absorpční houba, která se vyznačuje mimořádnou schopností nasáknout velké množství kapaliny.

Na referenčním vzorku horniny, který byl odebrán jádrovým vrtákem ze středu bloku trupu světice při zhotovování otvoru pro čep (pro pozdější sesazení jednotlivých fragmentů) byly naměřeny oba typy nasákavosti tj. kapilární nasákavost vzlínáním a celková nasákavost ponorem.

### **Cíle měření**

Cílem měření bylo získat informace o kapilární nasákavosti vybraných ploch. Výběr ploch vycházel z podrobného vizuálního průzkumu a byl zaměřen zejména na místa, která měla být následně konsolidována a na místa, kde bylo nutné rozhodnout o způsobu a míře čištění.

### **Metodika měření**

#### **Kapilární nasákavost vzlínáním – měřeno blokem speciální houby Blitz Fix**

Kapilární nasákavost kamene byla měřena pomocí definovaného bloku vysoce absorpční PVA houby Blitz Fix<sup>22</sup>, která tvořila rezervoár pro měřicí médium, v tomto případě vodu. Měřicí blok, plně nasycený vodou, byl přikládán k povrchu kamene tak, aby jejich vzájemný kontakt byl velmi těsný, ale zároveň, aby nedocházelo k vytlačení vody z měřicího bloku. Na stanovené místo měření byla vždy plně vodou nasycená houba přiložena 6 ×, vždy na dobu 10 s. Množství vsáknuté vody bylo po každém přiložení zjištěno úbytkem původní hmotnosti plně nasycené houby.

Výsledkem měření jsou údaje o množství přijaté kapaliny definovanou plochou [m/S] v závislosti na čase [t]. Pro upřesnění výpočtu byl součinitel nasákavosti vypočítán jako směrnice závislosti toho množství v čase, vyjádřeném jako jeho odmocnina [ $\sqrt{t}$ ].

Součinitel nasákavosti byl vypočítán ze vztahu:

$$W = m / S \times \sqrt{t}$$

W	součinitel nasákavosti	[kg × m <sup>-2</sup> × h <sup>-0,5</sup> ]
m	množství přijaté kapaliny	[kg]
S	plocha	[m <sup>-2</sup> ]
t	čas	[kg × m <sup>-2</sup> × h <sup>-0,5</sup> ]

<sup>22</sup> distributor Deffner a Johann

Vzhledem k tomu, že měření nebylo provedeno standardním způsobem, je nutné získané hodnoty považovat za relativní, vztahující se k danému způsobu měření a nelze je srovnávat se standardně uváděnými součiniteli nasákavosti pro tento typ materiálu. Výsledky měření jsou (ve srovnání s běžně získávaným součinitelem nasákavosti pomocí Karstenovy trubice, nebo volným vztlínáním tělísek položených do kapaliny) ovlivněny vlastnostmi materiálu měřící PVA houby. Dá se předpokládat, že podobně jak houba vodu přijímá má také schopnost ji zadržovat a transport vody do kamene tím může být omezen.

Naměřené hodnoty je možné porovnávat navzájem nebo se standardem vlastní horniny, který byl naměřen na vrtném jádru kamene. Jedná se tedy o část horniny ze středu bloku, která nebyla nikdy přímo exponována a je proto velmi pravděpodobné, že si ve velké míře zachovala svoje originální, původní vlastnosti.

### **Charakteristika materiálu měřícího bloku – houby**

Materiál měřícího bloku vysoce absorpční hydrofilní PVA (polyvinylalkohol) houby Blitz Fix je v suchém stavu tvrdý. Po jeho namočení (snazší v teplé vodě) hmota houby změkne a dojde k mírnému zvětšení jejího objemu. Houba má světle žlutou barvu, její materiál je hladký, homogenní a hutný. Udává se, že je odolná vůči chemikáliím (kyselinám, zásadám, organickým rozpouštědlům), vyšším teplotám (80 °C za mokra, 120 °C za sucha), proti mechanickému oděru, nepouští žádná vlákna a je vysoce odolná vůči stárnutí<sup>23</sup>.

V následující tabulce (Tab. 15) jsou uvedeny jak reálné rozměry měřícího bloku v suchém a mokřém stavu, tak i další zjištěné parametry, které jsou pro tento materiál charakteristické.

---

<sup>23</sup> The Unique Benefits of PVA Sponge: About PVA Sponge. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: <http://www.super-cool-products.com/infofaqs/aboutpvasponge.html>

Tab. 15: Vlastnosti měřicího bloku houby Blitz Fix

Vlastnosti měřicího bloku – houby	Suchý blok	Plně nasycený blok vodou
Výška [mm]	66,00	70,33
Šířka [mm]	26,65	28,82
Hloubka [mm]	27,40	29,03
Hmotnost m [g]	8,03	58,09
Objem bloku V [cm <sup>3</sup> ]	48,19	58,84
Plocha měřicí plochy bloku S [cm <sup>2</sup> ]	7,30	8,37
Změna objemu bloku V [%] *	–	22,1%
Změna měřicí plochy bloku S [%] *	–	14,6 %
Objemová hmotnost měřicího bloku [Kg/m <sup>3</sup> ]	167	1039
Hmotnostní nasákavost měřicího bloku [hm. %]	–	623%
Objemová nasákavost měřicího bloku [obj. %] *	–	85,1 %

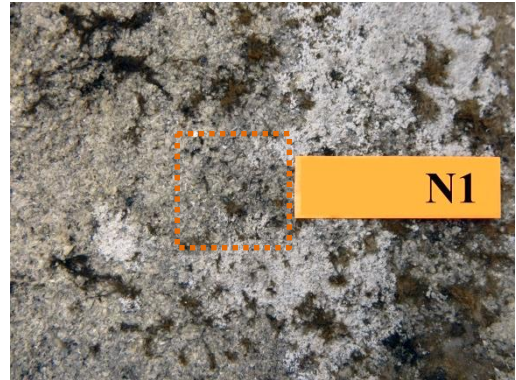
\*do výpočtu byla zakalkulována změna objemu měřicího bloku v důsledku nabobtnání při plném nasycení vodou

### Celková nasákavost ponorem

Na hornině získané z jádrového vrtu provedeného na trupu světice byla naměřena celková nasákavost ponorem dle postupů vycházejících z příslušné normy a směrnice – *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku (ČSN EN 13755; 2001)*.

Další charakteristické vlastnosti této části horniny sochy světice jako standardu jsou uvedeny v kapitole 1.2.3.4 Základní vlastnosti vápence.

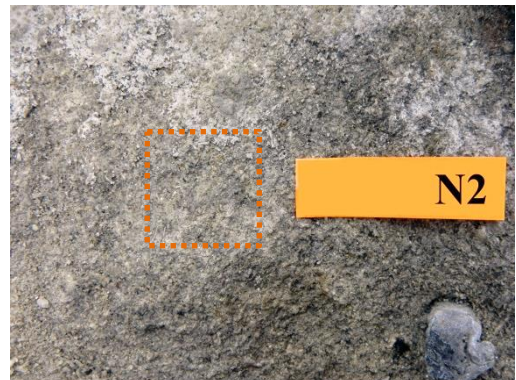
Tab. 16: Charakteristika a lokalizace míst měření nasákavosti



**Místo měření N1:**

Na pohled otevřený, degradovaný povrch v blízkosti lokálně se vyskytující tenké krusty světle šedé barvy, která je pevně spojená s povrchem kamene – měřeno mimo krustu

*Detail – přední strana trupu svěťice, na hrudi*



**Místo měření N2:**

Na pohled otevřený, degradovaný povrch v blízkosti lokálně se vyskytující tenké krusty světle šedé barvy, která je pevně spojená s povrchem kamene – měřeno mimo krustu v degradované oblasti; na pohled narušenější hornina než v oblasti měření N1

*Detail – přední strana trupu svěťice, na pravém boku*

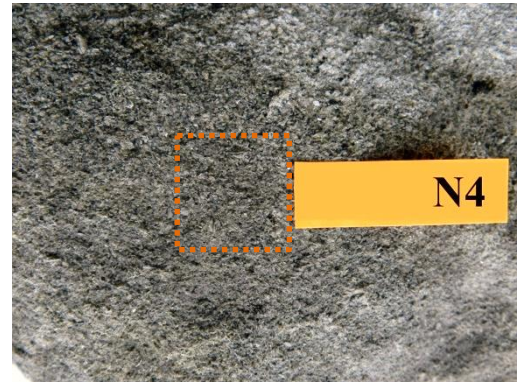


**Místo měření N3:**

Lokálně se vyskytující tenká krusta světle šedé barvy, která je pevně spojená s povrchem kamene – měřeno na místě kde krusta pokrývá celý povrch

*Detail – přední strana trupu svěťice, v úrovni pasu na levé straně*





**Místo měření N4:**

Na pohled otevřená struktura horniny pokrytá exogenním depositem – zeminou

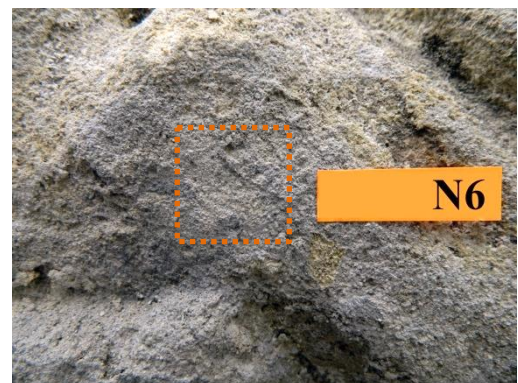
*Detail – přední strana trupu svěťice, atribut – lebka*



**Místo měření N5:**

Hornina pokrytá exogenním depositem – zeminou; na pohled homogennější povrch než v oblasti měření N4

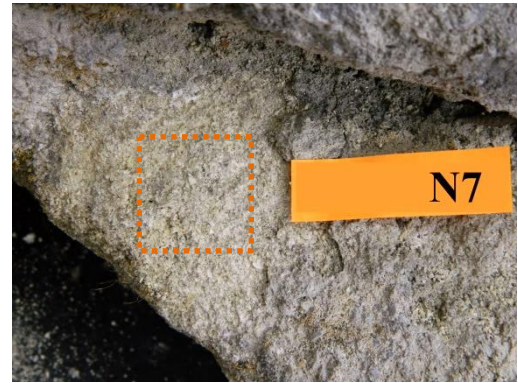
*Detail – přední strana trupu svěťice, atribut – lebka*



**Místo měření N6:**

Tenká krusta s exogenními usazeninami pevně spojená s podkladem kamene, patrná struktura kamene – měřeno v oblasti plně pokryté krustou

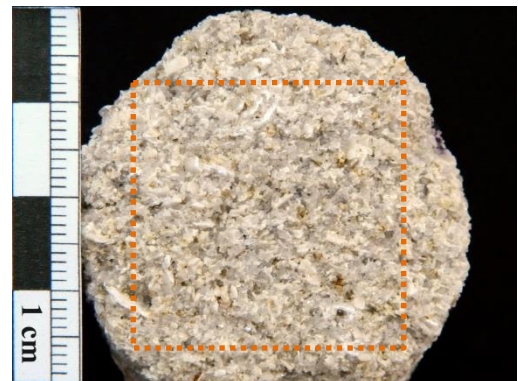
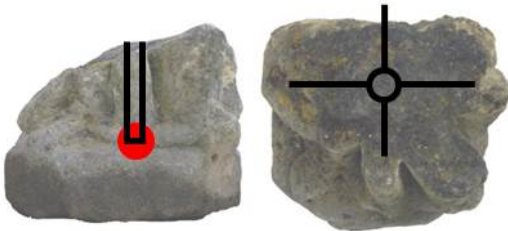
*Detail – pravý bok svěťice v oblasti nohou*



**Místo měření N7:**

Silně degradovaná hornina – selektivní eroze – tvorba reliéfu – obnažení tvrdších zrn v důsledku vymývání měkčích složek horniny, hloubková degradace – ztráta originálního povrchu, případně silných vrstev kamene

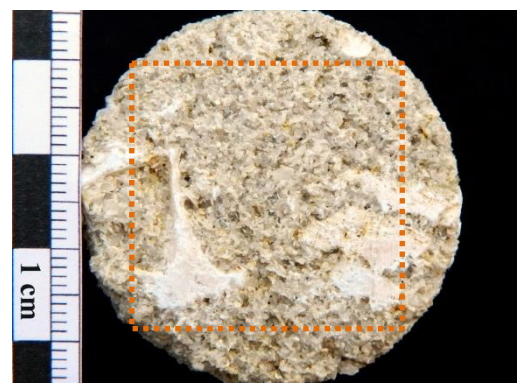
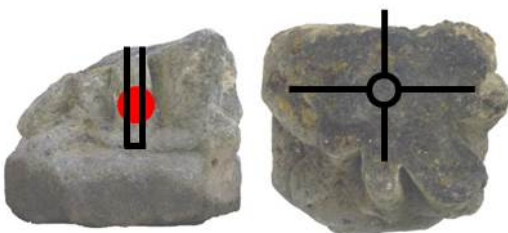
*Detail – levý bok, draperie za levou rukou v úrovni nohou*



**Místo měření N8:**

Zbroušený povrch horniny z jádrového vrtu pro čep – homogenní část bez přítomnosti organogenních klastů (úlomků schránek měkkýšů)

*Detail – jádrový vrt pro čep; nohy světice, střed kamene z hloubky okolo 20 cm od lomové plochy fragmentu*



**Místo měření N9:**

Zbroušený povrch horniny z jádrového vrtu pro čep – nehomogenní část obsahující organogenní klasty (úlomky schránek měkkýšů)

*Detail – jádrový vrt pro čep; nohy světice, střed kamene z hloubky okolo 12 cm od lomové plochy fragmentu*

## Výsledky měření:

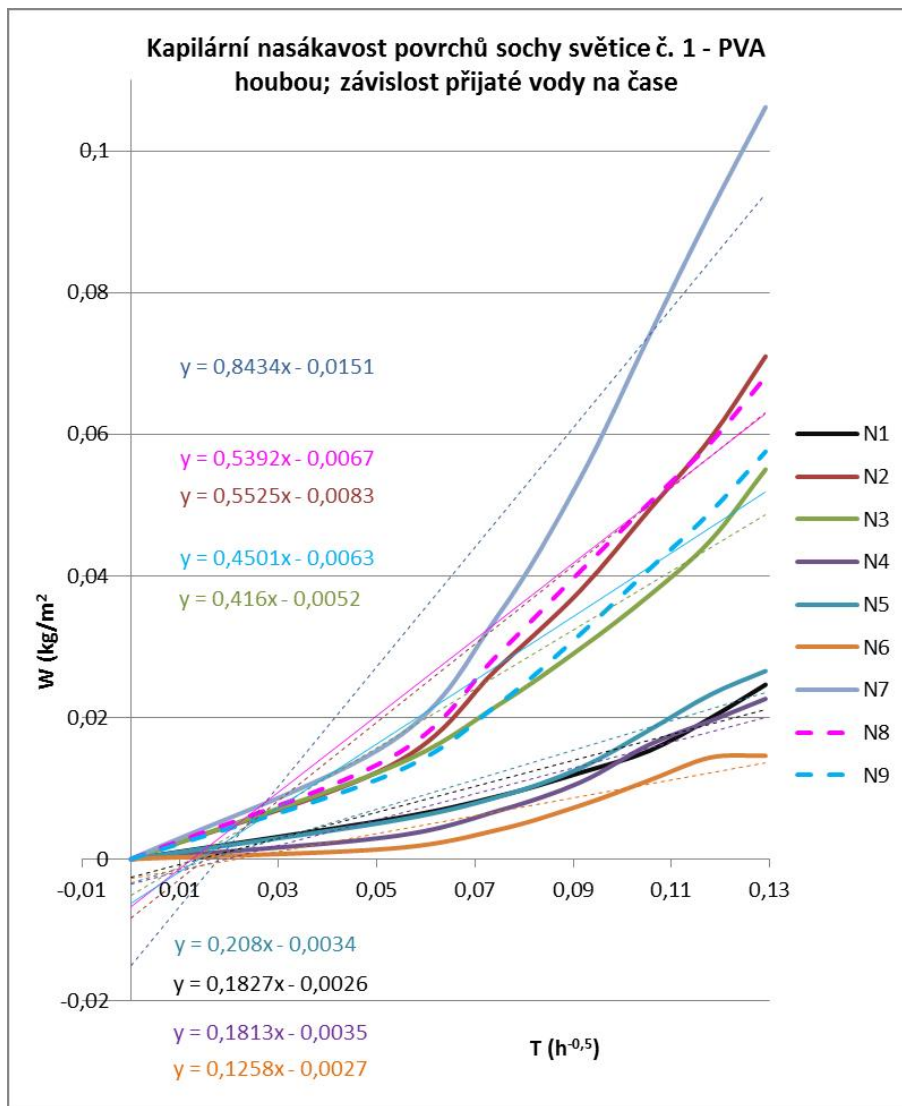
Tab. 17: Výsledky měření na daných plochách sochy světice č. 1 vyjádřené jako součinitel nasákavosti

Místo měření	Součinitel nasákavosti $W$ [ $\text{kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{h}^{-0,5}$ ]
N1	0,18
N2	0,55
N3	0,42
N4	0,18
N5	0,21
N6	0,13
N7	0,84
N8	0,54
N9	0,45

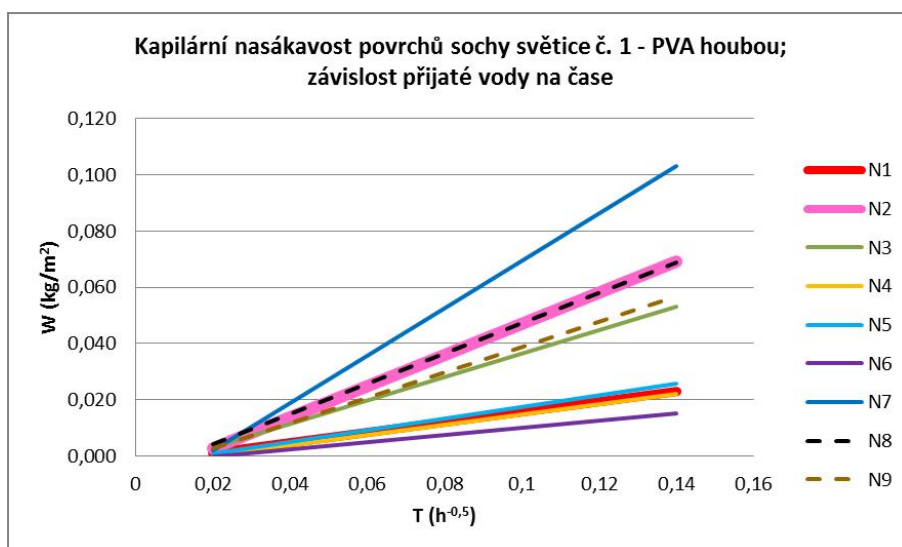
Hodnoty součinitelů nasákavosti uvedené v tabulce vycházejí z následujícího grafu (Graf 1), který obsahuje jednak reálné křivky znázorňující provedená měření, tak i jejich směrnice (slabé přerušované přímky) a rovnice.

Následující Graf 2 znázorňuje stejnou situaci jako předcházející, ale byl upraven pro přehlednost. Do grafu byly vyneseny modelové hodnoty podle směrnic v neupraveném grafu. Sklon lineárních částí křivek měření, který je pro stanovení součinitele nasákavosti rozhodující, je tedy stejný jako v Graf 1. Díky tomu, že počáteční fáze měření není lineární (lineární je část mezi např. 2.–6. měřením), dochází k mírnému posunu (přímky v Graf 2 nezačínají v bodě  $x=0, y=0$ ), který je ale zanedbatelný.

V obou grafech jsou standardy naměřené na vrtném jádru kamene znázorněny přerušovaně, aby je bylo snadné na první pohled rozlišit.



**Graf 1:** Výsledky měření na vybraných plochách sochy světice č. 1 – vynesené do grafu jako hmotnost vsáknuté vody na plochu za čas



**Graf 2:** Výsledky měření na vybraných plochách sochy světice č. 1 – vynesené do grafu jako hmotnost vsáknuté vody na plochu za čas – pro přehlednost uvedeno jako lineární závislost vycházející ze směrnic v Graf 1

V příloze jsou uvedeny tabulky s konkrétními výsledky měření nasákavosti jednotlivých míst. Do grafů byly vyneseny tyto hodnoty přepočítané na hmotnost vsáknuté vody ve vztahu k ploše ( $W$  [ $\text{kg} \times \text{m}^{-2}$ ]).

### **Vyhodnocení výsledků měření kapilární nasákavosti naměřené PVA houbou:**

- Standardy naměřené na hornině z vrtného jádra, z vnitřní části bloku kamene nohou světlé jsou v grafu uvedeny přerušovanou čarou. Nehomogenita povrchu kamene se projevila v případě plochy s vyšším podílem kompaktních klastů biologického původu (N9) mírným snížením nasákavosti. Tento jev velmi dobře koreluje s vizuálním posouzením obou měřených povrchů a vypovídá o nižší porozitě povrchu, kde jsou přítomny pevné úlomky schránek měkkýšů.
- Ve srovnání s oběma naměřenými standardy z lomové plochy vápence, vykazuje většina měřených povrchů sochy sníženou schopnost kapilárního příjmu vody. Pouze silně korodovaná hornina v místě měření N7 vykazuje výrazný nárůst nasákavosti, což odpovídá obecnému předpokladu, že při destrukci horniny a tím i jejích mechanických vlastností dochází ke zvýšení její pórovitosti.
- Měření N2 a N3 odpovídají dle svých vizuálních vlastností měření na obou typech standardů.
- Výrazně nižší nasákavost byla zaznamenána v místech měření N5, N1, N4, a nejnižší v místě N6. Je způsobena patrně snížením porozity vápence v důsledku sulfatizace povrchu (přeměna uhličitanu vápenatého na síran vápenatý).

### 1.2.3.3 Stanovení vlhkosti a obsah vodorozpustných solí

Z důvodu způsobu uložení dvou větších fragmentů sochy v ČMS v Kutné Hoře byla zvláštní pozornost v rámci průzkumu a celého jeho průběhu věnována vlhkosti kamene. Zjištěn byl také obsah anionů vodorozpustných solí, který má s vodním režimem památek zřejmou souvislost a představuje významný korozní činitel porézních materiálů.

Dvě části sochy světice č. 1 (trup a nohy) byly před transferem do ateliéru, který se uskutečnil v polovině měsíce ledna, dlouhodobě uloženy v exteriéru na zemitém podloží, do kterého byly zabořeny vlastní vahou. Již ze způsobu uložení fragmentů vyplývá důvodné podezření ke zvýšenému obsahu vlhkosti v kameni a s ní do jisté míry souvisejícím, možným obsahem vodorozpustných solí. Voda do kamene dlouhodobě pronikala jednak prostřednictvím srážek, ale také vztlínáním ze zemitého podloží.

Zvýšenému obsahu vlhkosti nasvědčovaly také klimatické podmínky, kterým byly části sochy vystaveny, v době před transferem. Toto období bylo bohaté na srážky a teploty vzduchu se pohybovaly okolo 0 °C, jak je patrné z dat ČHMÚ. Již před transferem do ateliéru byly exponované části mokré (hodnoceno vizuálně a hapticky), v jeho průběhu pak padal déšť se sněhem, který v nízké teplotě roztával a je velmi pravděpodobné, že docházelo k další dotaci vody do materiálu.

**Tab. 18: Údaje ČHMÚ o teplotě a úhrnu srážek v lednu roku 2013 pro Prahu a Středočeský kraj<sup>24,25</sup>**

Teplota vzduchu [°C]	-1,0
Dlouhodobý normál teploty vzduchu v období 1961-1990 [°C]	-2,0
Odchyłka od dlouhodobého normálu [°C]	1
Úhrn srážek [mm]	51
Dlouhodobý srážkový normál v období 1961-1990 [mm]	32
Odchyłka od dlouhodobého srážkového normálu [%]	159 % (tzn. nárůst o 59 %)

<sup>24</sup> Český hydrometeorologický ústav: Územní srážky. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4\\_Historicka\\_data/P4\\_1\\_Pocasi/P4\\_1\\_5\\_Uzemni\\_srazky&last=false](http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_5_Uzemni_srazky&last=false)

<sup>25</sup> Český hydrometeorologický ústav: Územní teploty. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: Český hydrometeorologický ústav: Územní srážky. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4\\_Historicka\\_data/P4\\_1\\_Pocasi/P4\\_1\\_5\\_Uzemni\\_srazky&last=false](http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_5_Uzemni_srazky&last=false)

## **Cíle měření:**

Vzhledem ke stavu především exponovaných fragmentů sochy světice č. 1 – trupu a nohu s plintem bylo již na počátku vizuálního průzkumu zřejmé, že bude nutné v první řadě přistoupit ke stabilizaci silně degradovaného kamene, aby se v průběhu dalších kroků restaurování minimalizovaly ztráty dochovaného povrchu. Přítomnost vysokého obsahu vody v kameni, v delším časovém horizontu, přispěla také ke snížení jeho mechanických vlastností (naměkčení pojiva), což limitovalo i manipulaci s jednotlivými fragmenty. V tomto případě, nezbytná, strukturální konsolidace je ale limitována obsahem vlhkosti v materiálu<sup>26</sup> (toto platí při použití téměř všech druhů dostupných zpevňovacích prostředků).

Z výše uvedených důvodů bylo nutné sledovat vysychání sochy světice v první fázi na povrchu kamene, nejlépe neinvazivní metodou. Vzhledem k potřebné strukturální tedy hloubkové konsolidaci, je následně také nutné ověřit přítomnost vlhkosti uvnitř kamene.

Zjištění přítomnosti anionů vodorozpustných solí, které by mohly být jedním z limitujících faktorů pro strukturální konsolidaci, bylo velmi důležité z hlediska stanovení koncepce restaurování s ohledem na případné odsolování.

Jedním ze základních cílů měření bylo tedy zjištění údajů souvisejících s přípravou vhodných podmínek pro strukturální konsolidaci.

## **Metodika měření:**

### **Sledování obsahu vlhkosti:**

Monitorování obsahu vlhkosti bylo zahájeno ihned po transferu částí sochy do ateliéru, kde se průměrná teplota a vlhkost vzduchu pohybovaly v zimních měsících v rozmezí 22–26 °C a 45–60 % RH. Vysychání kamene bylo v pravidelných intervalech sledováno po dobu 41 dní od transferu.

Použitý přístroj – dotekový vlhkoměr – umožňuje měření ve třech režimech, dle porozity daného materiálu – „*high, medium, low density*“ tedy vysoká, střední a nízká hustota. Hodnoty naměřené přístrojem udávají obsah vody v materiálu v % hm., hodnoty jsou pouze relativní a nemusí odpovídat skutečnému obsahu vlhkosti. Vlhkost byla zaznamenávána ve všech třech režimech (kvůli nulovým zkušenostem s citlivostí přístroje) a po vyhodnocení výsledků byly vybrány výsledky měření v nastavení „*medium density*“, který se pro daný typ materiálu jevil jako dostatečně citlivý.

---

<sup>26</sup> u některých konsolidantů např. esterů kyseliny křemičité je přítomnost malého množství vlhkosti nezbytný pro vytvrzovací proces v průběhu zrání, jedná se ale o malé množství vody (tzv. rovnovážná vlhkost) běžně přítomné ve struktuře kamene např. jeho pouhým uložením v podmínkách s RH kolem 50 – 80 %

Po poklesu a ustálení hodnot měřených na povrchu sochy byl proveden odběr vzorků z 11ti hloubek vrtu, aby byl zkontrolován obsah a distribuce vlhkosti uvnitř kamene. Právě odebrané vzorky byly zváženy a následně vysušeny v sušárně při teplotě 80 °C po dobu 24 h. Po zchladnutí vzorků v exsikátoru se silikagelem byly vzorky opět zváženy a z rozdílů jejich hmotností byl vypočítán obsah vlhkosti.

#### **Metody měření obsahu vlhkosti:**

- měření vlhkosti kapacitním vlhkoměrem (Physical & Electronic Laboratories Ltd.; Moisture Monitor M 49)
- gravimetrické stanovení vlhkosti

#### **Stanovení obsahu anionů vodorozpustných solí:**

Pro měření obsahu vodorozpustných solí v kameni byly použity stejné vzorky, na kterých byl stanoven obsah vlhkosti. Ze vzorků byl připraven vodní extrakt a následně byl stanoven obsah anionů spektrofotometricky.

Stanovení obsahu anionů vodorozpustných solí (sírany, dusičnany, chloridy) z vodních extraktů vzorků – VIS spektrofotometrie přístrojem Beckmann-Coulter DU©720.<sup>27</sup>

#### **Lokalizace a charakteristika míst měření:**

Na obou exponovaných fragmentech byla zvolena vždy dvě místa pro monitorování vlhkosti příložným vlhkoměrem. Místa byla zvolena tak, aby, vzhledem k orientaci uložení fragmentu po transferu, bylo jedno místo měření výš a druhé níž (kvůli možnosti migrace vlhkosti v materiálu). U trupu světice, která byla uložena na zádech, byl obsah vlhkosti měřen na břicho (VT1) a přibližně v polovině spodní lomové plochy fragmentu (VT2). U části nohou s plintem byl tento parametr zaznamenáván na zadní straně, při uložení fragmentu v originální orientaci. Jedno místo měření se nalézalo u horního okraje fragmentu (VN1) a druhé přibližně v polovině bloku fragmentu (VN2).

Vzorky na kontrolní stanovení vlhkostního profilu a následné měření obsahu anionů vodorozpustných solí byly odebrány z jednoho vrtu z fragmentu trupu světice (S1-11).

Místa měření a odběru vzorku jsou uvedena na následujících obrázcích (Obr. 39 a Obr. 40).

---

<sup>27</sup> Měření provedla BcA. Dana Macounová v laboratoři KCHT Fakulty restaurování UPCE





Obr. 39: Místa sledování obsahu vlhkosti v kameni; zleva: levý bok trupu sochy světice, spodní lomová plocha trupu světice, nohy světice – zdaní část



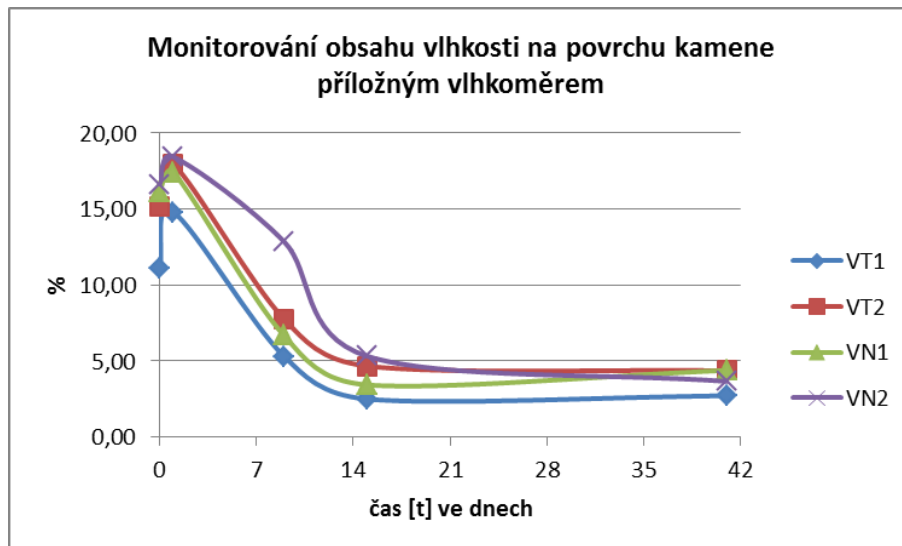
Obr. 40: Místo odběru série vzorků z hloubkového vrtu; pravý bok trupu sochy světice

### Výsledky měření:

Tab. 19: Hodnoty obsahu vlhkosti v kameni naměřené dotekovým vlhkoměrem ve sledovaném období v režimu „medium density“

Datum	čas (dny)	Naměřené hodnoty v jednotlivých místech měření [hm. %]			
		VT1	VT2	VN1	VN2
14. 1. 2013*	0	11,08	15,20	16,11	16,63
15. 1. 2013	1	14,81	17,95	17,43	18,43
23. 1. 2013	9	5,31	7,76	6,67	12,86
29. 1. 2013	15	2,50	4,68	3,44	5,33
24. 2. 2013	41	2,72	4,36	4,40	3,67

\* datum transferu sochy do ateliéru



Graf 3: Hodnoty obsahu vlhkosti v kameni naměřené dotekovým vlhkoměrem ve sledovaném období v režimu „medium density“ – vynesené do grafu

Jak je patrné z Tab. 19 a Graf 3, přibližně po 14 dnech dochází na povrchu k ustálení hodnot obsahu vlhkosti v kameni a hodnoty se ani po 41 dnech výrazně nemění. Skutečný obsah vlhkosti nejenom na povrchu kamene ale i v hlubších vrstvách byl po této době vysychání ověřen gravimetricky ze vzorků odebraných odvrtním z různých hloubek kamene. Výsledky gravimetrického stanovení obsahu vlhkosti jsou spolu s výsledky měření obsahu anionů vodorozpustných solí uvedeny v Tab. 20.

Tab. 20: Výsledky měření obsahu vlhkosti a anionů vodorozpustných solí z vrtu – trup sochy světice č. 1

Vzorek	hloubka odběru vz [cm]	vlhkost [hm %]	$c_{(SO_4)^{2-}}$ [hm%]	$c_{(SO_4)^{2-}}$ [mmol/kg]	$c_{Cl^-}$ [hm%]	$c_{Cl^-}$ [mmol/kg]	$c_{(NO_3)^-}$ [hm%]	$c_{(NO_3)^-}$ [mmol/kg]
S1	0-1 cm	0,11	0,91	95	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S2	1-2 cm	0,06	0,01	1	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S3	2-3 cm	0,07	0,10	11	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S4	3-4 cm	0,04	0,07	8	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S5	5-7 cm	0,03	<0,01	<1	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S6	7-9 cm	0,06	0,04	4	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S7	9-10 cm	0,05	<0,01	<1	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S8	10-12 cm	0,07	<0,01	<1	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S9	12-14 cm	0,07	0,07	8	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S10	14-16 cm	0,07	<0,01	<1	<0,01	<2,5	<0,01	<2
S11	16-18 cm	0,08	0,01	1	<0,01	<2,5	<0,01	<2

### **Vyhodnocení:**

Ve všech analyzovaných vzorcích nebyla zjištěna zvýšená koncentrace chloridů ani dusičnanů (koncentrace pod 0,01 %). Pouze v některých vzorcích je zvýšený obsah síranů, který zcela jistě souvisí přítomností síranu vápenatého (sádrovce), který vzniká hlavně chemickou korozí vápence tzv. sulfatizací (přeměna uhličitanu vápenatého na síran vápenatý v důsledku reakce s oxidy síry v ovzduší).

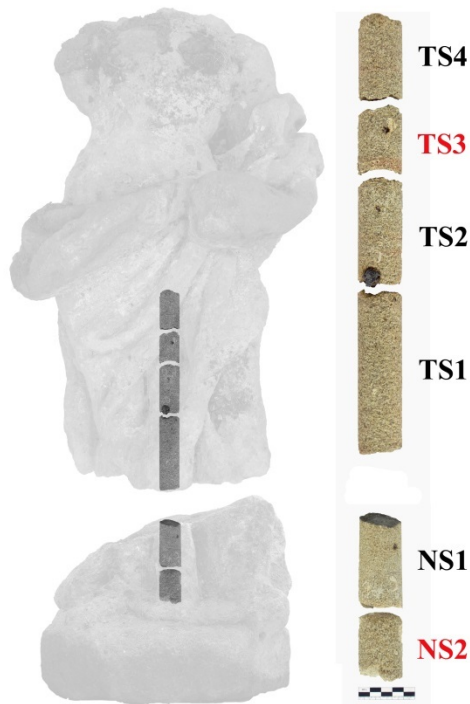
Z těchto důvodů není nutné ani žádoucí redukovat obsah vodorozpustných solí odsolováním, jelikož sádrovec na mnoha místech nevratně nahrazuje původní pojivo.

Obsah vlhkosti je rovněž u všech vzorků velmi nízký (tzn. i v hloubce okolo 10–18 cm) a zjištěný obsah vody v celé hmotě materiálu je pravděpodobně na úrovni rovnovážné vlhkosti vápence při daných klimatických podmínkách. Lze proto předpokládat, že vlhkost nepředstavuje omezující faktor z hlediska strukturální konsolidace.

#### **1.2.3.4 Základní vlastnosti vápence**

Cílem této části průzkumu bylo zjistit a definovat základní charakteristické vlastnosti vápence jako jsou objemová hmotnost, hmotnostní, objemová a kapilární nasákavost a zejména jeho pórovitost. Součástí je také obecnější petrografická charakteristika použitého typu kamene a důkladné studium jeho mikrostruktury, zejména velikosti a způsobu propojení pórů s ohledem na možnosti dalšího příjmu kapalin (konsolidantu).

Pro potřeby studia struktury horniny z povrchové vrstvy (s ohledem na konsolidaci především degradovaného povrchu sochy) byl použit výbrus (vzorek SR4 (7RKH1), jehož povrch byl již prozkoumán a popsán v kapitole 1.2.3.1 Průzkum povrchových vrstev sochy světice, kde je rovněž uvedeno místo odběru i charakteristika vzorku (viz Tab. 7). Struktura kamene hlouběji pod povrchem byla analyzována jak v optickém polarizačním mikroskopu, tak i na mikroskopu elektronovém.



**Obr. 41:** Grafické znázornění vrtného jádra sochy světice č. 1, jehož části byly použity pro stanovení základních fyzikálních vlastností horniny (červeně zvýrazněné)

Charakteristika základních fyzikálních vlastností horniny byla provedena na materiálu, považovaném za standard – vzorek reprezentující originální horninu, který byl odebrán ze středu bloku fragmentu jádrovým vrtákem při zhotovování otvoru pro čep. Pro stanovení vlastností kamene byly z důvodu vysoké nehomogenity sedimentu vybrány dva vzorky z odlišných částí kamene. Z vrtného jádra trupu světice byl použit vzorek homogenního vápence TS3, který se nalézá přibližně v hloubce 28-35 cm uvnitř bloku fragmentu a vzorek nehomogenní horniny obsahující organogenní úlomky lastur NS2 z vnitřní částí bloku nohou světice z hloubky asi 12-23 cm.

### **Metodika měření:**

#### **Stanovení základních fyzikálních vlastností:**

Objemová hmotnost, nasákavost a celková otevřená pórovitost vodě byly u definovaných vzorků stanoveny gravimetricky. Tyto jednotlivé charakteristické parametry byly měřeny standardními postupy vycházejícími z příslušných norem a směrnic (*Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku (ČSN EN 13755; EN 13755:2001) a Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti (ČSN EN 1936; EN 1936:2006)*).

#### **Měření kapilární nasákavosti vodou volným vztlínáním:**

Na vzorcích z jádrového vrtu NS2 a TS3 byla měřena nasákavost vodu volným vztlínáním. Aby mohla kapalina do kamene vztlínat pouze zvolenou plochou, byly stěny vzorků (válcového vrtného jádra) natřeny samovulkanizační, modifikovanou, latexovou emulzí Arte Mundit, která po zaschnutí vytvoří elastický film, který nepropouští vodu. Takto připravené vzorky byly měřicí plochou umístěny na mřížku do nádoby s vodou (výše hladiny přibližně 1

cm) a byla sledována jejich nasákavost volným kapilárním vztlínáním. Objem přijaté kapaliny v průběhu měření ve stanovených časových intervalech byl zaznamenáván gravimetricky. Ze získaných údajů (hmotnost přijaté kapaliny v čase) byl vypočítán součinitel nasákavosti, stejně tak, jak je uvedeno v kapitole 1.2.3.2 Měření nasákavosti povrchů kamene. Je však nezbytné upozornit, že výsledky tohoto měření jsou s výsledky uvedenými ve zmíněné kapitole neporovnatelné, kvůli odlišné metodice způsobu měření. I proto jsou detailní výsledky měření nasákavosti volným vztlínáním uvedeny v samostatné příloze č. 2.

### **Studium mikrostruktury:**

Vzorky odebrané pro potřeby mikroskopie byly prozkoumány nejdříve jako úlomky a následně byly z vybraných částí vzorků připraveny nábrusy. Ty byly zhotoveny zalitím do polyesterové pryskyřice (Polylite 32032-00, fa Reichhol) a následně vybroušeny a vyleštěny. Výbrusy byly zhotoveny vakuovým zalitím do epoxidové pryskyřice přibarvené modrým barvivem; ze zalitých vzorků byly broušením a vyleštěním připravené tenké řezy bez zakrytí krycím sklíčkem<sup>28</sup>. Nábrusy a výbrusy byly použity pro optickou i rastrovací elektronovou mikroskopii<sup>29</sup>.

### **Metody měření:**

#### **Optická mikroskopie:**

Rozbory byly provedeny v laboratoři Institutu pro umění a technologie Univerzity pro užité umění ve Vídni<sup>30</sup> viz popis v kapitole 1.2.3.1 Průzkum povrchových vrstev sochy světice.

#### **Rastrovací elektronová mikroskopie s energo-disperzní analýzou:**

Rozbory byly provedeny v laboratoři Institutu pro umění a technologie Univerzity pro užité umění ve Vídni<sup>31</sup> a v laboratoři KCHT Fakulty Restaurování UPa v Litomyšli<sup>32</sup> viz popis v kapitole 1.2.3.1 Průzkum povrchových vrstev sochy světice.

---

<sup>28</sup> Výbrus vzorku byl zhotoven firmou Geo-Präp, Andreas Wagner, Mozartstraße 23, 3730 Eggenburg

<sup>29</sup> Autorem fotografií z rastrovacího elektronového mikroskopu i optického polarizačního mikroskopu je Ing. Karol Bayer, pokud není uvedeno jinak

<sup>30</sup> Měření provedl ing. Karol Bayer, pracoviště Institutu pro umění a technologie, Univerzita pro užité umění ve Vídni

<sup>31</sup> Měření provedl ing. Karol Bayer, pracoviště Institutu pro umění a technologie, Univerzita pro užité umění ve Vídni

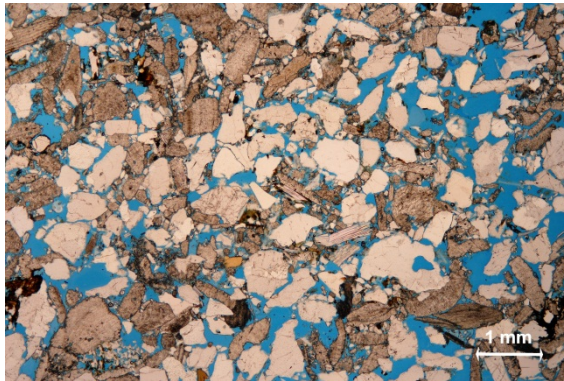
<sup>32</sup> Měření provedeno ve spolupráci s ing. Karolem Bayerem, KCHT Fakulta restaurování UPCE v Litomyšli

## Výsledky měření:

Tab. 21: Základní fyzikální vlastnosti originální horniny z hloubkových vrtů

Označení vzorku – typ části měřené horniny	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasákavost vodou [hm. %]	Celková otevřená pórovitost vodě [obj. %]	Součinitel nasákavosti volným vzlínáním W [kg × m <sup>-2</sup> × h <sup>-0,5</sup> ]
<b>Vzorek TS3</b> – homogenní část kamene s minimální přítomností velkých organogenních úlomků – schránek měkkýšů	1869	12,2	15,4	38,1
<b>Vzorek NS2</b> – nehomogenní část kamene s významným podílem velkých organogenních úlomků – schránek měkkýšů	1855	13,5	13,8	28,0
<b>průměrné hodnoty obou měřených typů horniny, vz. TS3 a NS2</b>	<b>1862</b>	<b>12,8</b>	<b>14,6</b>	<b>33,05</b>

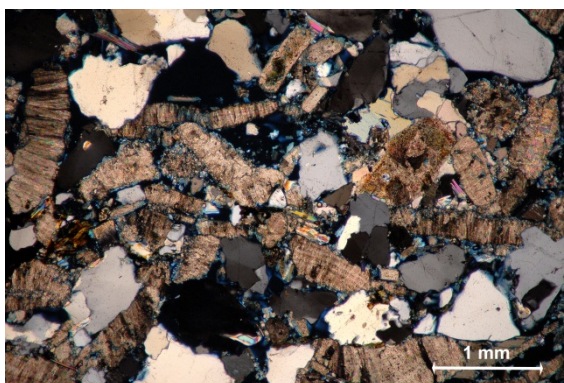
Z výsledků měření je zřejmé, že hornina má vysokou porozitu i nasákavost. Objemová hmotnost odpovídá porézním typům sedimentárních hornin. Vyšší kolísání součinitelů nasákavosti je zřejmě způsobeno heterogenitou horniny, zejména kolísáním velikosti a podílem organogenních úlomků v různých místech horniny.

**Mikroskopická charakteristika horniny:****Tab. 22: Mikroskopická charakteristika horniny z exponované povrchové vrstvy sochy světice**

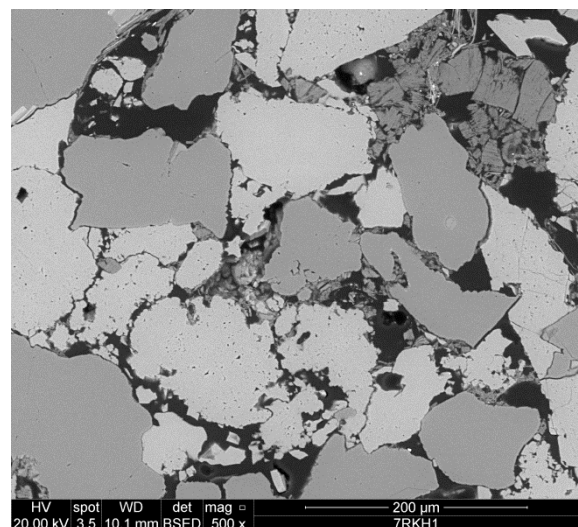
**Obr. 42: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při zvětšení 20×, modře zbarvené oblasti jsou póry vyplněné modře barvenou zalévací epoxidovou pryskyřicí*



**Obr. 43: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 20×*



**Obr. 44: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 50×*



**Obr. 45: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1)**  
*Rastrovací elektronový mikroskop, fotografováno v režimu odražených elektronů*

Z hlediska petrografického zařazení použité horniny potvrdilo mikroskopické studium vzorků<sup>33</sup> výsledky makroskopického (vizuálního) průzkumu sochy.

Jedná se o hrubozrnný, písčitý, příbojový vápenec, který byl historicky často používán v regionu Kutná Hora (tzv. kutnohorský vápenec) nejenom pro sochařská díla. Zmiňovaný

<sup>33</sup> Měření provedeno ve spolupráci s ing. Karolem Bayerem, KCHT Fakulta restaurování UPCE v Litomyšli

písčítý vápenec je druhohorní svrchnokřídová sedimentární hornina a pochází z vyšších stratigrafických poloh bělohorského souvrství české křídové pánve.

Z mikroskopického studia horniny je zřejmé, že použitý typ vápence má poměrně vysokou porozitu. Porézni systém (tvar a velikost pórů) je dobře čitelný na Obr. 42., kde pórům odpovídají modře vybarvené oblasti vyplněné modrou zalévací epoxidovou pryskyřicí. Celková porozita je vysoká, póry tvoří cca. 20–30 % plochy výbrusu (odpovídá přibližně celkové objemové porozitě), což poměrně dobře koreluje s výsledky měření základních vlastností vápence. Distribuce velikosti pórů je podle mikroskopického studia horniny poměrně široká, velikost většiny pórů v nekorodované hornině se pohybuje v rozmezí od 1–2  $\mu\text{m}$  až do 200–300  $\mu\text{m}$ .

Hornina je tvořena vápencovými úlomky biologického původu tzv. biodetritem, mezi kterými převažují fragmenty schránek měkkýšů. Dále obsahuje klastický materiál horniny významný podíl křemenných zrn, částice slídy a úlomky hornin (převážně metamorfovaných). Velikost zrn je poměrně rozmanitá. Hlavní podíl tvoří zrna velikosti 0,2 až 1 mm. Ojedinele lze ale ve vápenci nalézt i částice velké několik milimetrů případně až centimetrů. Tmel je dotykový, zrna (klasty) jsou vzájemně spojena sekundárním kalcitem. Diagenese je poměrně nízká, což je jednou z příčin vysoké porozity a nižší pevnosti daného typu vápence.

Hornina je poměrně nehomogenní, porozita, zrnitost i poměrné zastoupení klastů je proměnlivé, což se projevuje kolísáním fyzikálních vlastností vápence.

### **Shrnutí:**

Z analýz vzorků horniny prostřednictvím optické i elektronové mikroskopie i pozorování volným okem je zřejmé, že socha byla zhotovena ze sedimentární horniny, která je pro region Kutné Hory typická a v minulosti se těžila v jejím blízkém okolí. Horninu lze označit jako hrubozrnný až velmi hrubozrnný, písčítý, biodetritický vápenec. Klastické součásti horniny jsou tvořeny vápencovými, biogenními úlomky, zrný křemene, částicemi slídy a drobnými horninovými úlomky. Tmel horniny je dotykový, tvořený sekundárním kalcitem. Kámen je velmi porézni, kapilární i celková nasákavost je vysoká.

Hornina díky svému složení i struktuře snadno podléhá nepříznivému působení vnějších vlivů, které má za důsledek ztrátu, či přímo rozpuštění tohoto dotykového tmelu a tím snadný rozpad struktury kamene tzv. pískovatění. Tento jev se pochopitelně nejvíce projevuje ztrátou pevnosti v povrchových vrstvách. Mezi typické vnější korozní činitele tohoto materiálu můžeme zařadit kyselé atmosférické škodliviny, zejména oxidy síry. Reakce s vápencem způsobuje jeho rozpouštění i vznik sádrovce jako produktu koroze. Jeho kumulace na povrchu



má za následek vznik sádrovcových krust. Mezi nimi a neporušenou horninou kámen v důsledku koroze ztrácí pojivo, čili pískovatí a po jejich porušení nebo oddělení dojde k uvolnění a ztrátě této dezintegrované hmoty degradovaného kamene. S tímto procesem jsou spojeny rozsáhlé ztráty hmot a tím i dochovaného tvarosloví.

### **1.2.3.5 Zjištění stavu sochy metodou ultrazvukové transmise**

Metoda měření ultrazvukové transmise je jednou z možností nedestruktivního zjištění stavu kamene. Měření je založeno na sledování průchodu ultrazvukového signálu skrz daný materiál. Hlavním hodnotícím kritériem je rychlost UZ signálu (longitudálního vlnění), dále lze pro hodnocení využít i amplitudu nebo tvar signálu. Rychlost průchodu signálu je závislá na složení i kompaktnosti dané horniny (pevnosti, porozity), v kompaktnějších horninách je rychlost UZ vyšší, v méně stmelených materiálech naopak. Nepřímo tak lze získat informace související s pevností zkoumaného materiálu resp. místa, určit případný rozsah poškození, lokalizovat destrukce atd..

Cílem měření tedy bylo zjistit míru poškození materiálu a zaznamenat jeho rozsah. Měření bylo rovněž provedeno ve snaze prověřit stav tenkých vlasových prasklin patrných v oblasti levé ruky světice a případných jiných vizuálně neidentifikovatelných poškození (vnitřní dutiny, trhliny a praskliny).

Měřicí body byly zvoleny tak, aby mohla být vzájemně porovnána místa s různým typem i mírou poškození.

Výsledky měření jsou využitelné při posuzování stavu sochy, při stanovení koncepce konzervačního zásahu, i jako srovnávací údaje pro hodnocení účinnosti provedené strukturální konsolidace materiálu a injektáží problematických míst.

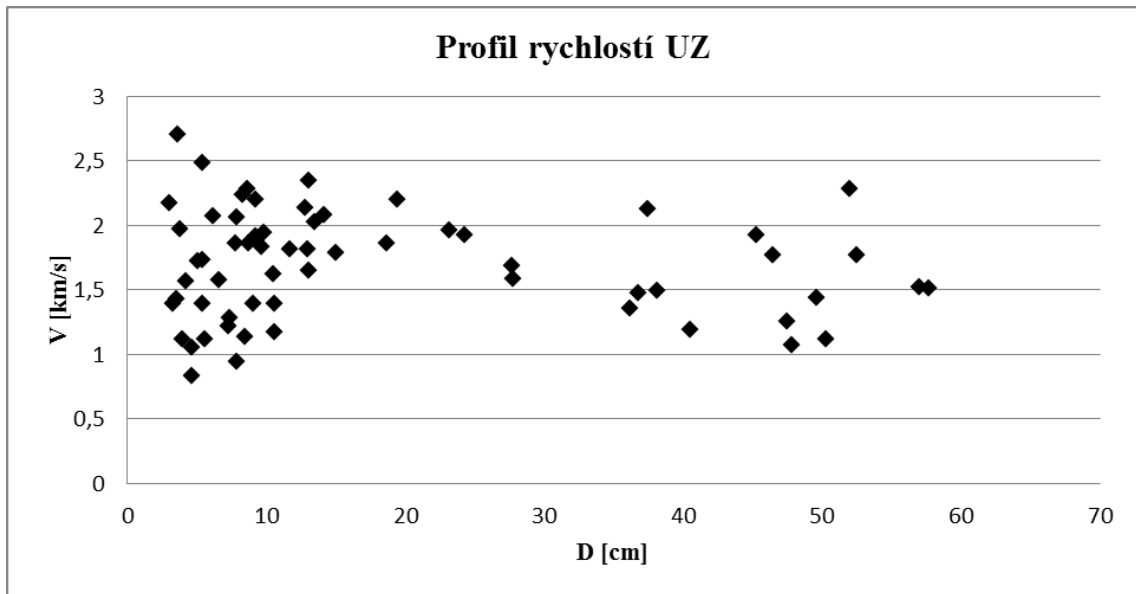
Měření bylo provedeno ve spolupráci s technologem Ing. Karolem Bayerem na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice v Litomyšli. Kompletní zpráva k provedenému měření, kde je podrobněji popsána také jeho metodika a je zde rovněž uvedeno vyobrazení měřených míst je uvedena v příloze č. 3.)

#### **Charakteristika míst měření:**

Na objektu bylo celkem provedeno 62 měření. Měření byla provedena na různých místech sochy tak, aby obsáhla a reprezentovala jednotlivá místa a různé typy poškození na objektu. Měřena byla také místa, kde byly na kameni krusty, aby byl prověřen stav materiálu pod nimi, nebo míra jejich adheze k hornině. Dále byla místa měření vybrána tak, aby zahrnovala širší rozsah vzdáleností měřících bodů, z důvodu hodnocení povrchu a hlubších vrstev vápence.

**Tab. 23: Průměr, horní a dolní hranice naměřených hodnot při UZ transmisi**

Průměrná hodnota naměřených rychlostí	1,69 km/s
Nejnižší hodnota naměřených rychlostí	0,83 km/s
Nejvyšší hodnota naměřených rychlostí	2,71 km/s

**Graf 4: Profil rychlostí UZ (závislost rychlosti na tloušťce měřeného místa)****Vyhodnocení:**

- Průměrná rychlost UZ je poměrně nízká (1,69 km/s), což odpovídá na jedné straně vlastnostem použité horniny, kterou je poměrně porézní, organodetrický vápenec. U poréznějších typů obdobných vápenců se rychlosti p-vlny UZ pohybují mezi 2,0 až 2,5 km/s, pro méně porézní, organodetrický vápenec se rychlosti UZ pohybují od 2,5 až do 3,5 km/s a pro lešitelné vápence a mramory až mezi 6,0–6,5 km/s<sup>34</sup>. Nízká naměřená průměrná rychlost je kromě základních vlastností vápence ovlivněna i rozsáhlou korozí kamene resp. vysokým počtem měření na poškozených místech sochy. Výrazná lokální poškození vápence jsou i důvodem značného rozdílu mezi maximální (2,71 km/s) a minimální (0,83 km/s) hodnotou naměřených rychlostí ultrazvuku (longitudální vlnění).

<sup>34</sup> Dle zkušeností Ing. Karola Bayera, ve spolupráci s nímž bylo provedeno měření i interpretace získaných výsledků

- V místech s výraznou korozi vápence jsou rychlosti UZ velmi nízké, často klesají pod hodnotu 1 km/s. Měření potvrzují výsledky vizuálního restaurátorského průzkumu a tato místa jsou nejvíce ohroženými částmi sochy. Lze sem zařadit zejména draperii na levé straně - pod levým předloktím, vedle levého boku a lýtka, částečně i na pravém boku a mezi stehny.
- Pod krustami je často hornina narušena, krusty nejsou pevně propojeny s podkladem
- Na profilu rychlostí UZ je viditelné, že v poškozených částech sochy dochází směrem k povrchu (tj. k menším měřicím vzdálenostem) k poklesu rychlostí, které indikuje snížení míry stmelení (pevnosti) vápence. Lze předpokládat, že poškození zasahují nejvíce zónu do hloubky cca. 46 cm.

#### **1.2.4 Sumarizace výsledků průzkumu objektu**

Na základě dílčích výsledků průzkumu detailně popsaných v jednotlivých předcházejících kapitolách lze stav sochy světice před restaurováním shrnout do několika hlavních bodů:

- Z umělecko-historického hlediska není přesně možné sochu časově zařadit a vzhledem k míře dochování ikonografických detailů není ani možné určit jakou světici zobrazuje. Rovněž se nepodařilo dohledat originální či další umístění sochy. Na základě vizuálního porovnání výtvarného zpracování s jinými sochami z oblasti Kutnohorska je možné se domnívat, že socha byla zhotovena přibližně mezi lety 1700–1750.
- Socha světice, dochovaná jako tři samostatné fragmenty, je velmi silně poškozena, na celém povrchu horniny chybí přibližně 0,5–2 cm původní hmoty kamene, čímž je výrazně znečitelněna modelace sochy. Integrita díla byla zásadně narušena jednak rozlomením sochy na tři části a také odlomením několika partií.
- Socha byla po transferu do ateliéru silně zavlhčená a po cca 1,5 měsíci vysychání v interiérových podmínkách došlo k jejímu prokazatelnému vysušení (což determinovalo možnost započítání strukturální konsolidace).
- Dalším významným typem poškození byla kolonizace poměrně rozsáhlých částí povrchu zelenými řasami a mechy, které na vybraných místech snižují propustnost povrchové vrstvy pro vodu (tzn. potažmo i pro konsolidant).

- Poškození sochy jsou velmi rozsáhlá a stav sochy lze bez nadsázky označit jako havarijní.
- Obsah vodorozpustných solí, kromě zvýšené koncentrace síranu vápenatého na povrchu sochy, je nízký. Koncentrace dusičnanů i chloridů je ve všech analyzovaných vzorcích pod 0,01 % hm. Sochu nebude nutné odsolovat.
- Socha světice je zhotovená z organodetrického vápence tzv. písčitého příbojového vápence, který byl v minulosti těžen a poměrně hojně využíván v Kutné Hoře a okolí. Jejím originálním pojivem je  $\text{CaCO}_3$  v podobě kalcitu.
- Použitá hornina je poměrně porézní, kapilárně aktivní – voda nebo i jiné kapaliny mohou v kontaktu s vápencem velmi rychle penetrovat do jeho porézního systému.
- Poškození sochy postihují zejména její povrch a lze předpokládat, že jsou především důsledkem působení kyselých atmosférických polutantů, hlavně oxidů síry. Poškození se projevují jednak postupnou ztrátou modelace sochy jako důsledek rozpouštění a postupného „odplavování“ vápence kyselými srážkami, dále zhoršování mechanických vlastností nejen bezprostředně na povrchu, ale i v hlubších vrstvách horniny a v neposlední řadě i tvorbou sádrovcových krust v důsledku kumulace síranu vápenatého (produktu chemické koroze vápence) na povrchu horniny. Sádrovcové krusty nejenže výrazně přispívají k degradaci vápence, ale uzavírají jeho povrch a brání tak transportu vlhkosti (vsakování i vysychání).
- Nejrůznější identifikované povlaky limitují průchodnost kapalin do materiálu, a proto bude muset být, především pro optimalizaci strukturální konsolidace, přistoupeno k jejich redukci.

## 2 Formulace základní koncepce restaurování sochy světice č. 1

Základní koncepci restaurování sochy světice č. 1 bylo možné odvodit ze dvou výchozích skutečností. Na jedné straně to byly požadavky formulované zadavatelem a současnými standardy památkové péče, na druhé straně byla tvorba koncepce restaurování sochy světice č. 1 determinována jejím havarijním stavem.

Tato skutečnost na samém začátku práce jasně definovala základní požadavek restaurátorského zásahu, kterým by měla být především stabilizace stavu hmoty díla, tzn. strukturální konsolidace vhodným zpevňovacím materiálem.

Tato kapitola je věnována shrnutí možných nabízejících se způsobů konzervace sochy a jeho výsledek tvoří hlavní podklad pro zaměření teoretické části práce. Jedna z hlavních částí koncepce restaurování sochy světice, tedy strukturální konsolidace bude stanovena na základě výsledků následujícího odzkoušení nabízejících se možností. Finální koncepce restaurování sochy světice zahrnující i řadu dalších restaurátorských kroků bude popsána až v kapitole 5.1 Koncepce restaurování.

Hlavním požadavkem strukturální konsolidace hornin je především materiálová kompatibilita vnášené zpevňující látky do jejich struktury. V ideálním případě by pak nově dodané pojivo mělo odpovídat chemickému složení původního pojiva zpevňovaných materiálů.

Socha světice č. 1 je zhotovena z písčitého mušlového vápence, jehož originálním pojivem je kalcit, tedy uhličitán vápenatý. Pro konsolidaci těchto typů kamene se v našich podmínkách běžně využívají rozšířené materiály na bázi ethylesterů kyseliny křemičité, jejichž výsledným produktem je  $\text{SiO}_2$  gel. Využívání těchto ne zcela přesně materiálově odpovídajících prostředků vychází ze zkušeností s jejich využitím na podobné materiály s uspokojivým výsledkem a také z omezených možností jejich nahrazení vhodnějšími, chemicky kompatibilními konsolidanty.

V posledních letech se jako vhodná alternativa splňující požadavek materiálové kompatibility začaly vyvíjet a testovat konsolidanty na bázi alkoholových suspenzí hydroxidu vápenatého, které ve srovnání s vápennou vodou (cca 1,6 g/l<sup>35</sup>), jenž rovněž poskytuje jako finální produkt konsolidace uhličitán vápenatý, mají podstatně vyšší obsah účinné látky –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Účinnost konsolidace za využití těchto nových prostředků dispergovaných

<sup>35</sup> DRDÁCKÝ, Miloš; SLÍŽKOVÁ, Zuzana. Calcium hydroxide based consolidation of lime mortars and stone. In J.M.MIMOSO, J.Delgado-Rodrigues, et al. *In Proceedings of the Int. Symp. „Stone consolidation in cultural heritage“*. Lisabon : LNEC, May 2008. s. 299-308. ISBN 978-972-49-2135-8.

v alkoholech je výrazně vyšší za současného snížení počtu aplikačních cyklů díky jejich několikanásobně vyšší koncentraci a především odpadá mnohonásobné zavlhčování objektu, které může mít velmi nepříznivý vliv na zpevňovaný materiál.

Od doby, kdy u nás byly vypracovány první studie<sup>36,37,38</sup> zabývající se využitím vápenných nanosuspenzí v oblasti restaurování porézních anorganických materiálů, se počet subjektů, které je vyvíjejí, značně rozšířil. Komerčně dostupné jsou v dnešní době stále pouze produkty řady CaLoSil<sup>®39</sup> testované v rámci mezinárodního projektu Stonecore<sup>40</sup>. V rámci dalšího velmi podobně zaměřeného projektu NANOforART<sup>41</sup>, který je v současné době realizován, bylo nově vyvinuto několik typů těchto materiálů různými výrobci.

Cílem teoretické části práce, směřující k výběru vhodného kompatibilního konsolidačního prostředku pro strukturální konsolidaci sochy světice č. 1, je odzkoušení všech těchto dostupných materiálů. Pro srovnání s technologiemi na bázi organokřemičitanů budou do testování zahrnuty také prostředky na této bázi S jejich využitím se ale, kvůli jejich chemickému složení, v případě konzervace sochy světice č. 1 nepočítá.

---

<sup>36</sup> DRDÁCKÝ, Miloš; SLÍŽKOVÁ, Zuzana. *Calcium hydroxide based consolidation of lime mortars and stone*. In J.M.MIMOSO, J.Delgado-Rodrigues, et al. *In Proceedings of the Int. Symp. „Stone consolidation in cultural heritage“*. Lisabon : LNEC, May 2008. s. 299-308. ISBN 978-972-49-2135-8.

<sup>37</sup> DUNAJSKÁ, Jana. *Zhodnocení současných možností konsolidace vápenných omítek konsolidanty na bázi hydroxidu vápenatého*. Litomyšl, 2009. 53 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování v Litomyšli.

<sup>38</sup> MACOUNOVÁ, Dana. *Restaurování vápencové sochy anděla z domu čp. 48 v Kutné Hoře s využitím nanosuspenzí na bázi hydroxidu vápenatého pro konsolidaci organodetritického vápence: Rozšířená restaurátorská zpráva*. Litomyšl, 2011. 218 s. Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/handle/10195/42082>. Bakalářská práce. Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Mgr. Art. Jakub Ďoubal.

<sup>39</sup> IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG; Frieberg (G)

<sup>40</sup> Stone Conservation for the Refurbishment of Buildings; projekt v rámci 7.RP (NMP-SE-2008-213651)

<sup>41</sup> Nano-materials for the conservation and preservation of movable and immovable artworks; project number 282816; FP7-ENV-NMP-2011

### **3 Testování konsolidantů pro potřeby konzervace sochy světice č. 1 (experimentální část)**

#### **3.1 Úvod**

Poměrně rozsáhlé testování možností konsolidace porézního kutnohorského vápence pomocí alkoholových nanosuspenzí hydroxidu vápenatého bylo nutné především z důvodu jejich zamýšleného využití pro strukturální konsolidaci sochy světice. Vzhledem ke stavu sochy světice č. 1 byla strukturální konsolidace jedním z nejdůležitějších kroků konzervačního zásahu v rámci jejího komplexního restaurování. Hlavními cíli odzkoušení vápenných nanosuspenzí bylo hodnocení a vzájemné srovnání jejich zpevňujícího účinku, optimalizace aplikace v praxi a zároveň i posouzení možných rizik a nevýhod spojených s jejich využitím jako konsolidantu. Testování bylo koncipováno tak, aby jeho výsledky měly i širší uplatnění a přinesly další poznatky o možnostech a limitech strukturálního zpevnění karbonátových materiálů pomocí nanosuspenzí hydroxidu vápenatého. Součástí zkoušek bylo i srovnání s podstatně rozšířenějším a déle používaným druhem konsolidantů – prostředků na bázi esterů kyseliny křemičité neboli organokřemičitanů. Tyto prostředky jsou hojně využívány pro zpevňování silikátových materiálů jako např. pískovců. V souvislosti s jejich využitím pro porézní vápence se v odborných diskusích často objevují pochybnosti o jejich účinnosti jako konsolidantu, zejména adhezi gelu  $\text{SiO}_2$  (konečného produktu po vytvrdnutí esterů kyseliny křemičité) k povrchům částic tvořeným uhličitanem vápenatým. Pravděpodobně i z tohoto důvodu byla jedním z výrobců těchto konsolidantů na bázi TEOS vyvinuta varianta tohoto materiálu speciálně upravená pro karbonátové materiály. V rámci testování bude tedy posouzen také rozdíl mezi tímto upraveným a standartním konsolidantem.

Převážná část zkoušek byla provedena na sérii zkušebních tělísek, která napodobovala silně degradovaný, kutnohorský vápenec – tedy karbonátový materiál s vysokou pórovitostí a velmi malou pevností.

### 3.2 Literární rešerše

Vzhledem k celkovému značnému rozsahu diplomové práce, jsou v této kapitole shrnuty pouze podstatné, publikované poznatky související bezprostředně s experimentální částí diplomové práce. Jsou to zejména znalosti, které byly v rámci práce využity jako teoretický podklad pro odzkoušení vápenných alkoholových nanosuspenzí pro strukturální konsolidaci i jejich srovnání s konsolidanty na bázi esterů kyseliny křemičité. Širší popis problematiky koroze vápenců a jejich konzervace, nebo kamene obecně je poměrně známý a popsán v řadě publikací nebo i závěrečných prací. I z tohoto důvodu se literární rešerše zaměřuje hlavně na aktuální poznatky související s nanosuspenzemi hydroxidu vápenatého.

#### 3.2.1 Konsolidace porézních anorganických materiálů

Pojem konsolidace neboli zpevnění porézních anorganických materiálů se v rámci restaurování a konzervace sochařských a umělecko-řemeslných děl z kamene používá pro označení tzv. strukturální konsolidace. Konsolidace může v jiném kontextu zahrnovat konsolidaci barevné vrstvy tzv. fixáž resp. fixaci povrchových úprav, ve stavařské terminologii zase statickou stabilizaci stavebních konstrukcí. Strukturální konsolidace označuje konzervátorský úkon, jehož cílem je zpevnění porézního materiálu impregnací vhodným zpevňovacím prostředkem. „Rozumíme tím zpravidla dodání nového či dodatečného pojiva, jež kompenzuje předchozí zhoršení mechanických vlastností vyvolané obvykle účinkem vnějších podmínek – zvětráváním, degradací apod.“<sup>42</sup>

Výsledkem konsolidace by mělo být zlepšení mechanických vlastností poškozeného materiálu např. degradované horniny a současně by nemělo dojít k výrazné změně jiných fyzikálních vlastností jako např. pórovitost, paropropustnost, modul pružnosti, tepelná a vlhkostní roztažnost nebo vzhled<sup>43</sup> Dále je velmi důležité, aby vnesený konsolidační prostředek nevytvářel riziko poškození zpevněného materiálu v budoucnu např. výše zmíněnou výraznou změnou fyzikálních vlastností, vznikem škodlivých korozních produktů ... atd. Proto je žádoucí použít zpevňovací prostředek poskytující nové pojivo stejného nebo velmi podobného složení jako zpevňovaný materiál. Tato podobnost je často označována jako chemická neboli materiálová kompatibilita.

Z tohoto předpokladu vyplývá, že pro materiály obsahující uhličitán vápenatý jako původní pojivo je vhodné použít zpevňovací prostředky, které se po vytvrnutí mění na uhličitán vápenatý, kam lze zařadit např. hydroxid vápenatý. Jednou z možností, jak docílit

<sup>42</sup> KOTLÍK, Petr. *Konsolidanty kamene – historie a současnost: Příspěvek na konferenci "Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví II"*. Litomyšl, 2013.

<sup>43</sup> BAYER, Karol. *Přednášky k výuce předmětu: Technologie restaurování a konzervace*. Univerzita Pardubice. Fakulta restaurování. Litomyšl, 2008-2012.



transportu částic hydroxidu vápenatého do porézních vápenatých materiálů, je využití nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , které se staly v posledních letech předmětem zájmu výzkumu z důvodu jejich možného využití pro výše zmiňované účely

### 3.2.2 Nanosuspenze hydroxidu vápenatého

Vápenné nanosuspenze vyvinuté pro konsolidaci porézních vápenatých materiálů jsou disperze s velmi jemnými částicemi hydroxidu vápenatého (velikost částic řádově v stovkách nm) rozptýlených v disperzní fázi, kterou je alkoholové organické rozpouštědlo, obvykle ethanol, isopropanol nebo n-propanol. Pro srovnání lze uvést střední velikost částic hydroxidu vápenatého ve vodných suspenzích připravených z hašeného vápna, která se pohybuje kolem 10  $\mu\text{m}$  čili částice jsou zhruba  $50 \times$  až  $100 \times$  větší.<sup>44</sup>

Počátky experimentování s vápennými nanosuspenzemi se vztahují ke druhé polovině 90tých let 20. století, kdy skupiny vědců z Francie a Itálie syntetizovaly koloidní disperze hydroxidu vápenatého. Následně započalo i zkoušení možností jejich využití v oblasti konzervace uměleckých děl, zejména pro konsolidaci (fixaci) barevných vrstev nástěnných maleb.<sup>45, 46, 47, 48</sup>

Nanosuspenze mají nízkou viskozitu, v závislosti na obsahu hydroxidu vápenatého se viskozita nanosuspenzí pohybuje mezi 150 do 350 mPas. Velmi malé částice hydroxidu vápenatého v nich obsažené mají schopnost relativně dobré penetrace do porézních systémů hornin, malt, omítek apod. Obsah hydroxidu vápenatého v nanosuspenzích určených pro strukturální konsolidaci se pohybuje obvykle mezi 5 až 50 g/l (existují i varianty s obsahem 250 g/l). Pro srovnání lze uvést množství hydroxidu vápenatého ve vápenné vodě (roztok hydroxidu vápenatého ve vodě), které je velmi nízké (1,7g/l při 20 °C)<sup>49, 50</sup>

<sup>44</sup> BAYER, K., D. MACOUNOVÁ a L. MACHAČKO. Nanosuspenze hydroxidu vápenatého jako konsolidanty porézních vápenců a vápenných omítek – od laboratorních testů k praktické aplikaci. In: *Acta Artis Academica 2012: Znalost a praxe ve výtvarném umění; Sborník 4. mezioborové konference ALMA*. Praha: Akademie výtvarných umění v Praze, 2012, s. 325-346. ISBN 978-80-87108-33-8.

<sup>45</sup> DELFORT, B., BORN, M., CUIVÉ, A., BARRÉ, L.: Colloidal Calcium Hydroxide in Organic Medium. *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 189. s. 151–157, 1997

<sup>46</sup> AMBROSI, M., DEI, L., GIORGI, R., NETO, Ch., BAGLIONI, P.: Colloidal Particles of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ : Properties and Applications to Restoration of Frescoes. *Langmuir*, 2001, s. 17

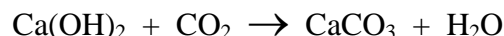
<sup>47</sup> AMBROSI, M., DEI, L., GIORGI, R., NETO, Ch., BAGLIONI, P.: Stable dispersions of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in aliphatic alcohols: properties and application in cultural heritage conservation. *Progress in Colloid and Polymer Science*, Volume 118, 2001, s. 68-72

<sup>48</sup> GIORGI, R., DEI, L., BAGLIONI, P.: A New Method For Consolidating Wall Paintings Based on Dispersion of Lime in Alcohol. *Studies in Conservation* 45, 2000, s. 154-161

<sup>49</sup> DRDÁČKÝ, Miloš; SLÍŽKOVÁ, Zuzana. Calcium hydroxide based consolidation of lime mortars and stone. In J.M.MIMOSO, J.Delgado-Rodrigues, et al. *In Proceedings of the Int. Symp. „Stone consolidation in cultural heritage“*. Lisabon : LNEC, May 2008. s. 299-308. ISBN 978-972-49-2135-8.

Po delší době může v nanosuspencích docházet k aglomeraci částic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , což má za následek zvyšování velikosti suspendovaných částic, čímž se zvyšuje tendence k jejich sedimentaci a zhoršuje se schopnost penetrace nanosuspence do porézních systémů.

Po odpaření disperzní fáze (alkoholu) se hydroxid vápenatý reakcí se vzdušným oxidem uhličitým mění poměrně rychle na uhličitan vápenatý. Tato reakce se nazývá karbonatace a až po vzniku uhličitanu vápenatého dochází k finálnímu zpevnění.



Počátkem 21. století se na trhu s materiály pro restaurování objevily i komerčně vyráběné nanosuspence hydroxidu vápenatého (IBZ Freiberg) pod názvem CaLoSil<sup>®</sup>. Jejich využitím pro účely konzervace památkových objektů se podrobně zabýval projekt STONECORE (*Stone Conservation for the Refurbishment of Buildings; projekt v rámci 7.RP (NMP-SE-2008-213651)*)<sup>51</sup>.

### 3.2.3 Organokřemičité zpevňovací prostředky

Organokřemičitany nebo tzv. estery kyseliny křemičité používané pro konsolidaci porézních materiálů v současnosti to jsou obvykle oligomery tetraethoxysilanu označovaného i jako tetraethylortosilikát (TEOS) – předkondenzované kapalně produkty (např. tetra, nebo pentamer komerčně nazvaný jako ethylsilikát 40). Jsou známé od dvacátých let 20. století, přičemž pro účely konsolidace se v restaurování začaly v větší míře používat od padesátých let minulého století.

Díky nízké viskozitě mají velmi dobrou schopnost penetrace do porézních systémů.

Po hydrolyze a kondenzační reakci v přítomnosti malého množství vody a katalyzátoru vytvářejí amorfní gel oxidu křemičitého  $\text{SiO}_2 \times \text{aq}$ , který plní funkci nového pojiva ve zpevněném materiálu. Gel oxidu křemičitého má velmi dobrou odolnost vůči stárnutí a jeho množství se v komerčně dostupných produktech na bázi oligomerů TEOS po vytvrnutí

<sup>50</sup> BAYER, K., D. MACOUNOVÁ a L. MACHAČKO. Nanosuspence hydroxidu vápenatého jako konsolidanty porézních vápenců a vápenných omítek – od laboratorních testů k praktické aplikaci. In: *Acta Artis Academica 2012: Znalost a praxe ve výtvarném umění; Sborník 4. mezioborové konference ALMA*. Praha: Akademie výtvarných umění v Praze, 2012, s. 325-346. ISBN 978-80-87108-33-8.

<sup>51</sup> tamtéž

obvykle pohybuje mezi 100 – 500 g/l. Používají se hlavně pro silikátové horniny např. pískovce.<sup>52, 53</sup>

### 3.2.4 Strukturální konsolidace nanosuspencemi hydroxidu vápenatého

Hodnocení možností strukturální konsolidace vápenných materiálů je předmětem několika publikací, součástí závěrečných prací a byly nebo jsou na ně zacíleny i mezinárodní vědecké projekty (STONECORE, NANOforART). Hlavní nespornou výhodou nanosuspencí hydroxidu vápenatého jako konsolidantu, která je uváděna prakticky ve všech publikacích je už výše zmiňovaná materiálová kompatibilita konečného produktu konsolidace – uhličitanu vápenatého se zpevňovaným materiálem. Dále jsou jmenovány další přednosti vápenných nanosuspencí jako dobrá schopnost penetrace do porézních anorganických materiálů, vysoká reaktivita a rychlá karbonatace v ošetřeném materiálu, vysoká čistota a definované složení a nízká škodlivost pro životní prostředí (neobsahují toxické látky)<sup>54</sup>.

Strukturální konsolidace, její účinnost, vliv na vlastnosti i případné vedlejší účinky byly podle publikovaných prací studovány na různých typech testovacích materiálů – na tělískách připravených dusáním simulujících degradovanou vápennou omítku<sup>55</sup>, omítku s dolomitickým vápnem, nebo poškozený vápenec, pak na chudých vápenných maltách<sup>56</sup>, na porézních vápencích (Maastricht stone<sup>57</sup>, Kutnohorský vápenec) a taky na reálných historických objektech<sup>58, 59</sup>.

Podle prezentovaných výsledků bylo možné dosáhnout nanosuspencemi hydroxidu vápenatého zřetelného zpevnění u různorodých typů karbonátových zkušebních materiálů. Míra

<sup>52</sup> RATHOUSKÝ, Jiří. Konzervační prostředky pro kámen, případně i jiné stavební materiály. *Příloha Zpráv památkové péče*. 1994, roč. 54, č. 6. ISBN 1210-5538

<sup>53</sup> SLÍŽKOVÁ, Zuzana. FRANKEOVÁ, Dita, Strukturální zpevnění vápenné omítky a vápence nanodisperzí CaLoSiL. *Zpravodaj STOP : časopis společnosti pro technologie ochrany památek*. Roč. 14, č. 3., s. 47-52., 2012, ISSN 1212-4168

<sup>54</sup> DAEHNE, A., HERM, Ch., Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials - results from EU-STONECORE, *Heritage Science* 2013, 1:11, pp. 2.

<sup>55</sup> DUNAJSKÁ, Jana. *Zhodnocení současných možností konsolidace vápenných omítek konsolidanty na bázi hydroxidu vápenatého*. Litomyšl, 2009. 53 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování v Litomyšli.

<sup>56</sup> SLÍŽKOVÁ, Zuzana. FRANKEOVÁ, Dita, Strukturální zpevnění vápenné omítky a vápence nanodisperzí CaLoSiL. *Zpravodaj STOP : časopis společnosti pro technologie ochrany památek*. Roč. 14, č. 3., s. 47-52., 2012, ISSN 1212-4168

<sup>57</sup> DRDÁČKÝ, Miloš; SLÍŽKOVÁ, Zuzana. Calcium hydroxide based consolidation of lime mortars and stone. In J.M.MIMOSO, J.Delgado-Rodrigues, et al. *In Proceedings of the Int. Symp. „Stone consolidation in cultural heritage“*. Lisabon : LNEC, May 2008. s. 299-308. ISBN 978-972-49-2135-8.

<sup>58</sup> DELIVERABLE D 7.2: Results of trial testing on objects in the Czech Republic (UPFR, ITAM); Collaborative Project STONECORE (Stone Conservation for the Refurbishment of Buildings); NMP-SE-2008-213651; FP-2007-SSP-5A

<sup>59</sup> DELIVERABLE D 6.1: Collaborative Project NANOFORART. Project no. ENV-NMP.2011.2.2-5; ENV-NMP.2011.3.2.1-1- 282816

zpevnění byla zjišťována většinou přímým měřením pevnosti např. pevnosti v tlaku, ohybové pevnosti, nebo i pevnosti v tahu. V některých případech byl konsolidační efekt na testovacích tělíscích nebo reálném objektu hodnocen ultrazvukovou transmisí.

Pro ilustraci lze uvést několik publikovaných výsledků nárůstu pevnosti tělísek z chudé vápenné malty po jejich konsolidaci vápennými nanosuspensemi. U neošetřené referenční malty byla naměřená pevnost v tlaku 0,3 MPa a pevnost v tahu 0,1 MPa. Po konsolidaci nanosuspensemi CaLoSil<sup>®</sup>E15 a CaLoSil IP<sup>®</sup>25 bylo dosaženo pevností v tlaku cca. 0,9 až 1,7 MPa a pevností v tahu cca. 0,3 až 0,8 MPa. Počet cyklů impregnace nanosuspensemi se pohyboval v rozpětí 7 až 40 cyklů. Tato práce se zabývá i možností konsolidace stejného typu chudé vápenné omítky organokřemičitými konsolidanty. Pro zpevňovací prostředek Dynasilan NT 40 byla po zpevnění naměřena pevnost v tlaku cca. 0,9 MPa a pevnost v tahu cca. 0,4 MPa. Pokles pórovitosti je po konsolidaci pouze minimální<sup>60</sup>.

Jako další příklad lze uvést strukturální zpevnění sochy anděla z kutnohorského vápence. Na sochu vysokou kolem 150 cm byla pro strukturální konsolidaci použita nanosuspense CaLoSiLu<sup>®</sup>E25 přičemž na nejvíce poškozených plochách dosahovala jeho spotřeba až 26 l/m<sup>2</sup> (aplikováno ve čtyřech cyklech). Zpevnění kamene bylo vyhodnoceno nejen vizuálně, ale také ultrazvukovou transmisí. Z původní průměrně rychlosti ultrazvuku u poškozené sochy před konsolidací 1,73 km/s došlo v důsledku konsolidace ke zvýšení na 2,2 km/s, což představuje nárůst o 27 %. Dosažená průměrná rychlost signálu po konsolidaci se přiblížila standardně uváděným hodnotám rychlosti ultrazvuku pro podobné typy vápence, která se obvykle pohybuje v rozmezí 2,5 – 3,5 km/s<sup>61</sup>.

Negativním doprovodným jevem konsolidace vápennými nanosuspensemi zmiňovaným v některých zveřejněných pracích je vznik bílého zákalu na povrchu zpevňovaného kamene nebo omítek.

Jedna z nejnovějších prací uvádí jako nejvhodnější způsob aplikace pro dosažení maximální hloubky penetrace i účinnosti konsolidace tzv. gradovanou, tedy opakovanou

---

<sup>60</sup> SLÍŽKOVÁ, Zuzana. FRANKEOVÁ, Dita. Strukturální zpevnění vápenné omítky a vápence nanodisperzí CaLoSiL. *Zpravodaj STOP : časopis společnosti pro technologie ochrany památek*. Roč. 14, č. 3., s. 47-52., 2012, ISSN 1212-4168

<sup>61</sup> MACOUNOVÁ, Dana. *Restaurování vápencové sochy anděla z domu čp. 48 v Kutné Hoře s využitím nanosuspensí na bázi hydroxidu vápenatého pro konsolidaci organodetrického vápence: Rozšířená restaurátorská zpráva*. Litomyšl, 2011. 218 s. Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/handle/10195/42082>. Bakalářská práce. Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Mgr. Art. Jakub Ďoubal.

impregnaci s postupně se zvyšující koncentrací nanosuspenze od 5 g/l až po 25 g/l. Přídavek nanosuspenze s hrubšími částicemi (CaLoSil-Micro) by měl snížit riziko zpětné migrace i tvorbu bílého zákalu<sup>62</sup>.

---

<sup>62</sup> DAEHNE, A., HERM, Ch., Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials - results from EU-STONECORE, *Heritage Science* 2013, 1:11, pp. 2.

### **3.3 Charakteristika testovaných konsolidantů**

Konsolidanty použité pro testování zahrnují několik typů vyvíjených i komerčně vyráběných alkoholových nanosuspenzí hydroxidu vápenatého a dva typy komerčně vyráběných organokřemičitých zpevňovacích prostředků, z nichž jeden je speciálně upraven pro zpevňování karbonátových materiálů. V tabulce Tab. 24 jsou uvedeny základní vlastnosti všech zkoušených konsolidantů.

**Tab. 24: Charakteristika testovaných konsolidantů**

označení suspenze	výrobce	typ účinné látky	obsah účinné látky originálního produktu udávaný výrobcem [g/l]	obsah účinné látky originálního produktu stanovený gravimetricky [g/l]	dispergační prostředí uváděné výrobcem	velikost částic udávaná výrobcem [nm]	velikost částic naměřená <sup>63</sup> [nm]	stáří konsolidantu v době jeho aplikace
CaLoSil®E25	IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG; Frieberg (G)	Ca(OH) <sub>2</sub>	25	25,03	ethanol	≈ 80–25	neměřeno	9 měsíců
CaLoSil®IP25	IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG; Frieberg (G)	Ca(OH) <sub>2</sub>	25	24,83	isopropanol	≈ 50–30	neměřeno	9 měsíců
MBN Nf070	MBN Nanomaterialia S.p.A.; Treviso (IT)	Ca(OH) <sub>2</sub>	10-20	22,19	isopropanol, (+ 5–10 % isobutanol)	≈ 80–100	≈ 200–1000 d = 432,6	5 měsíců
Nanorestore 1P35	CSGI (Consorzio Sistemi a Grande Interfase), Univerzita ve Florencii; Florencie (IT)	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	11,20	1–propanol	≈ 290–390	≈ 400–1200 d = 939,4	4 měsíce
Nanorestore E35	CSGI (Consorzio Sistemi a Grande Interfase), Univerzita ve Florencii; Florencie (IT)	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	11,06	ethanol	≈ 200	≈ 60–700 d = 191,0	4 měsíce
ZFB 703k	ZFB (Zentrum für Bucherhaltung GmbH); Lipsko (G)	Ca(OH) <sub>2</sub>	cca 75	76,07	isopropanol	d <sub>50</sub> = 100 d <sub>95</sub> = 166	≈ 200–900 d = 371,7	8 měsíců
KSE 300	Remmers Baustofftechnik GmbH; Löningen (G)	etylster kyseliny křemičité	300*	335**	bezrozpuště dlový systém	neudává se***	neměřeno	71 měsíců <sup>64</sup>
KSE 300 HV	Remmers Baustofftechnik GmbH; Löningen (G)	etylster kyseliny křemičité	300*	279**	bezrozpuště dlový systém	neudává se***	neměřeno	9 měsíců

\* množství gelu SiO<sub>2</sub> po jeho vyloučení tj. vyzrání

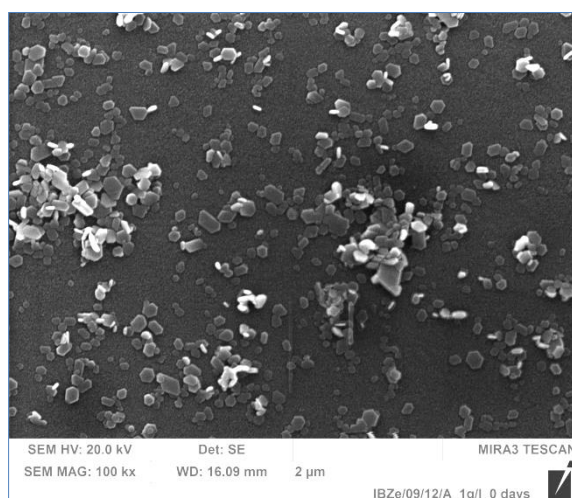
\*\* množství vyloučeného gelu naměřeného gravimetricky na Petriho miskách po uplynutí doby 30 dní zrání v přibližných podmínkách stanovených výrobcem za ideální

\*\*\* velikost částic tvořených oligomery TEOS (tetraethylortosilikát) se podle orientačního odhadu na základě délky vazeb v molekulách pohybuje kolem 1,5 až 3 n

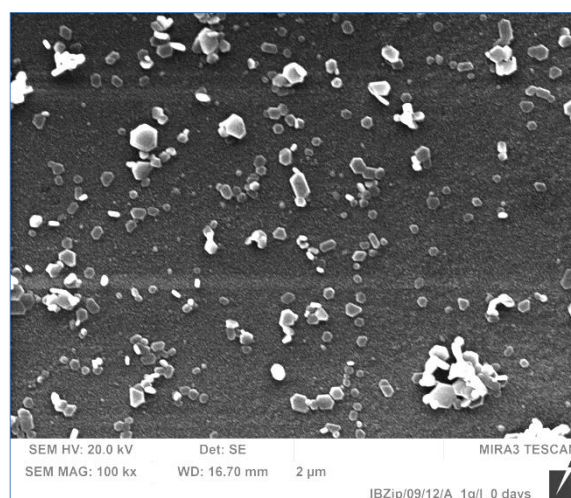
<sup>63</sup> Měření provedl Ing. Jiří Palarčík, PhD., Oddělení chemického inženýrství, Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice

<sup>64</sup> Tento prostředek byl před použitím nově otevřen, do té doby byl uzavřen v originálním obalu dodaný výrobcem, byl uložen na suchém místě a jeho stáří by tak nemělo mít negativní vliv na jeho vlastnosti – tato informace byla ověřena přímo u příslušného technického poradce fa Remmers; při aplikaci nebyly pozorovány žádné projevy, které by indikovaly změny vlastností konsolidantu v důsledku stárnutí (např. změny barvy, viskozity, nebo náznaky gelování prostředku)

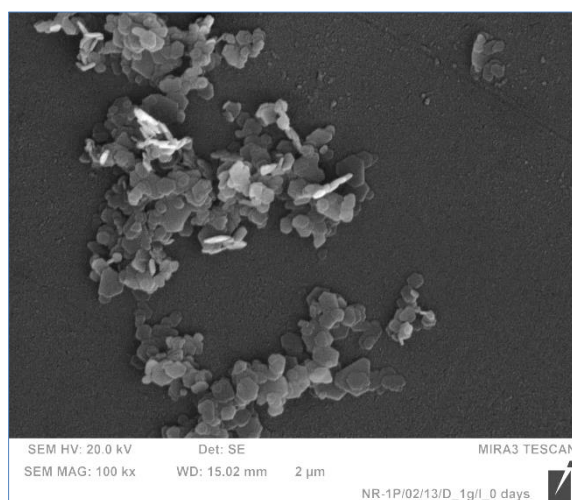
**Tab. 25: Fotografie REM-BSE (rastrovací elektronový mikroskop, režim odražených elektronů) pořízené vždy při stejném zvětšení tj.  $100\,000\times$  dokumentující tvar a velikost částic jednotlivých testovaných nanosuspenzí hydroxidu vápenatého<sup>65</sup>**



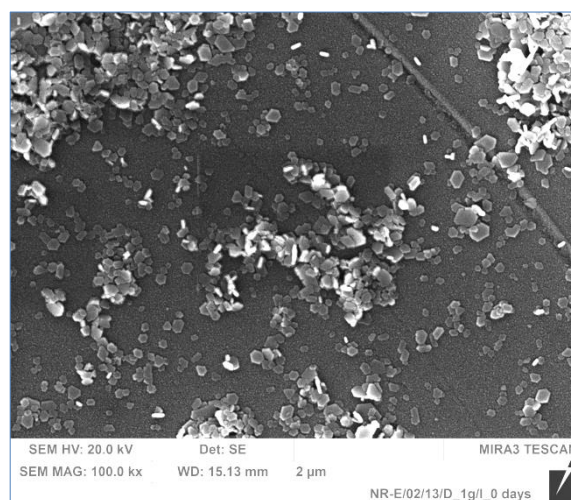
**Obr. 46: CaLoSil@E25**



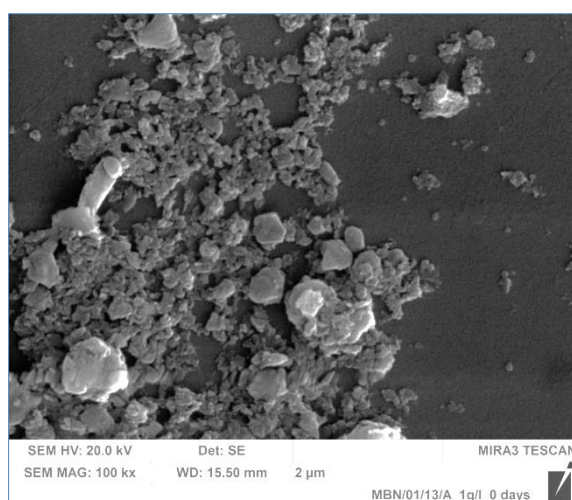
**Obr. 47: CaLoSil@IP25**



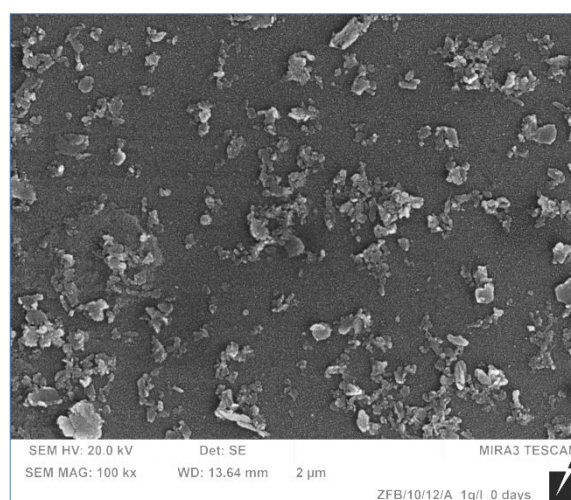
**Obr. 48: Nanorestore 1P35**



**Obr. 49: Nanorestore E35**



**Obr. 50: MBN Nf070**



**Obr. 51: ZFB 703k**

<sup>65</sup> Autorem fotografií z rastrovacího je BcA. Dana Macounová, KCHT Fakulty restaurování UPCE



### **3.4 Příprava zkušebních tělísek**

Pro potřeby posouzení účinků jednotlivých konsolidantů aplikovaných v rámci strukturální konsolidace porézního kutnohorského mušlového vápence použitého pro zhotovení sochy světice č. 1 byla z důvodu vysoké nehomogenity přírodní sedimentární horniny uměle zhotovena zkušební laboratorní tělíska imitující tuto vysoce korodovanou horninu. K přípravě těchto tělísek byla použita směs kameniva ze zvětralého kutnohorského vápence získaná z historického lomu v blízkosti Kutné Hory. Záměrně nehovoříme o drti, jelikož k získání sypké směsi nebylo nutné využít žádnou mechanickou sílu, hornina se rozdrobila samovolně v důsledku zvětrávání. Charakteristika této písčité směsi i postup přípravy jednotlivých tělísek jsou popsány v následujícím textu.

#### **3.4.1 Charakteristika směsi kameniva pro přípravu laboratorních tělísek, lokalizace jejího naleziště, úprava směsi pro přípravu zkušebních tělísek**

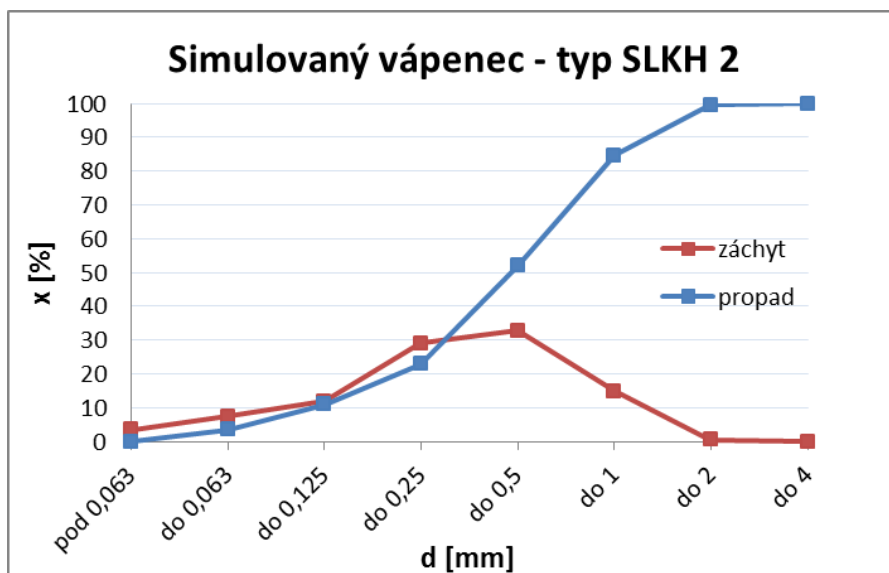
Směs kameniva zvětralého kutnohorského písčitého mušlového vápence byla nahrabána v historickém lomu poblíž Kutné Hory. Lom se nachází u silnice III. třídy 33353 mezi obcemi Bylany a Novou Lhotou. Místo nálezů směsi pro přípravu laboratorních tělísek je možné blíže geograficky lokalizovat těmito souřadnicemi N 49°55.48418', E 15°12.67893'.

Hornina těžební stěny popsaného lomu byla vizuálně velice podobná kameni, ze kterého byla zhotovena socha světice č. 1. Pod těžební stěnou se nacházela sypká směs kameniva zvětralé horniny. Tato směs byla nahrabána do nádob a převezena do laboratoře. Vzhledem k tomu, že tento materiál je produktem zvětrávání aj. vlivů v zalesněném prostředí, bylo nutné jej zbavit nežádoucích organických částí. Směs přivezeného kameniva byla nejprve přesáta přes síto o velikosti ok 2,5 mm, čímž byly odstraněny větší zrna horniny, jejichž podíl byl minimální, a také organické části: úlomky větví, jehličí aj. V místě získání směsi horniny se hojně vyskytovaly břízy a kamenivo tak i po přesátí obsahovalo jejich semínka. Z tohoto důvodu byla přesátá směs ještě proprána ve vodě tak, aby se odplavila semínka břízy a případně jiné organické zbytky, ale s cílem nevyplavit nejjemnější složku kameniva. Vždy menší množství kamenné směsi bylo umístěno do hlubokého kbelíku, do kterého byla přibližně do poloviny napuštěna voda a směs byla řádně proprána. Po tom, co se částice horniny usadily, byla pomalu do nádoby připouštěna voda až po její okraj, která následně odplavovala plavoucí organické nečistoty přes hranu kbelíku. Po odplavení nežádoucích částí byla v několika fázích voda z nádoby slita tak, aby opět nedošlo k odplavení nejjemnějších částic kameniva. Takto připravená směs byla rozprostřena na nerezové plechy a byla usušena v sušárně při teplotě 80 °C do konstantní hmotnosti.

Směs a její distribuce velikosti zrn byla charakterizována síťovou analýzou dle normy EN 933-1 zavedenou v ČSN EN 933-1 (72 1183) *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Síťový rozbor*. Výsledky procentuálního zastoupení jednotlivých velikostí zrn vyjádřené jako propad a záchyt jsou uvedeny v následující Tab. 26 a také v Graf 5.

**Tab. 26: Distribuce velikosti zrn stanovená síťovou analýzou jako záchyt a propad a vnesení hodnot do grafu**

velikost zrn nad [mm]	zastoupení záchyt x [%]	zastoupení propad x [%]
0	3,5	0
0,063	7,47	3,5
0,125	11,9	10,97
0,25	29,06	22,87
0,5	32,75	51,93
1	14,81	84,68
2	0,51	99,49
4	0	100



**Graf 5: Distribuce velikosti zrn směsi kameniva pro simulovaný vápenec**

### 3.4.2 Metodika přípravy laboratorních tělísek

Pro plánované zkoušky byla bez přídavku jakéhokoli pojiva z uvedené směsi smíšené v daném poměru s vodou zhotovena dusáním do forem zkušební tělíska o rozměrech  $4 \times 4 \times 4$  cm. Aby byla zajištěna homogenita a vysoká vzájemná podobnost tělísek, a také reprodukovatelnost jejich přípravy, byl po sérii zkoušek vyvinut následující postup.

Po zjištění vhodného poměru vody vůči suché směsi byla stanovena hmotnost mokré směsi vhodná pro přípravu jednoho zkušebního tělíska – tj. připravená mokrá směs byla bezzbytku nadasána do formy o rozměrech  $4 \times 4 \times 4$  cm, přičemž ji díky zvolenému množství nebylo možné snadno více stlačit tj. zmenšit její objem ve formě. Toto kritérium by mělo minimalizovat možné odlišnosti připravených vzorků v závislosti na jejich zhotoviteli. Zkušební tělíska z mokrého písčitého materiálu tedy nebyla připravována za konstantního přítlaku, ale přesně stanovená hmotnost mokré směsi byla nadasána vždy do stejného objemu dle následující receptury.

Tab. 27: Receptura přípravy zkušebních tělísek

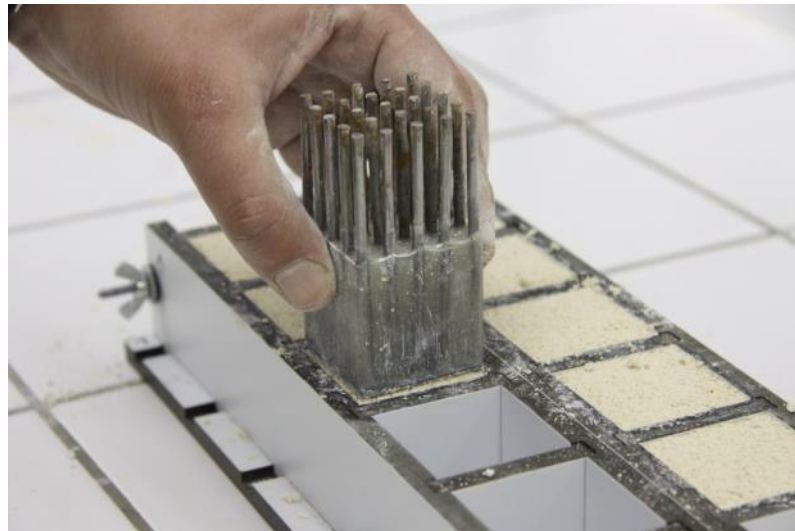
Receptura pro přípravu zkušebního tělíska o rozměrech 4 × 4 × 4 cm	
Složka	hmotnost [g]
suchá směs – drť SLKH 2	91,5
voda	17

K přípravě krychlových zkušebních tělísek o délce strany 4 cm byly zhotoveny rozebíratelné formy z nesavého, hladkého, umělého materiálu. Pro aplikaci a zhutnění mokré písčité směsi do forem byly zhotoveny tyto speciální nástroje: nerezový hřeben o šířce 3,8 cm (úprava povrchu mezi dusanými vrstvami), dusací oboustranný hranol s kovovými trny o délce čtvercové dusací plochy 3,9 cm (závěrečné zhutnění – stlačení směsi do úrovně horní hrany formy). K přípravě tělísek byly dále použity tři kovové špachtle, jedna s rukojetí, tou byla směs vkládána do formy a následně zhutňována s využitím výše uvedených pomůcek. Dvěma plochými špachtlemi (nazývají se též cidliny) byly hotové vzorky transportovány na misky, aby nedocházelo k jejich poškození nebo deformaci. Uvedené nástroje a pomůcky jsou znázorněny na následujícím obrázku.



Obr. 52: Nástroje a forma ke zhotovení laboratorních zkušebních tělísek

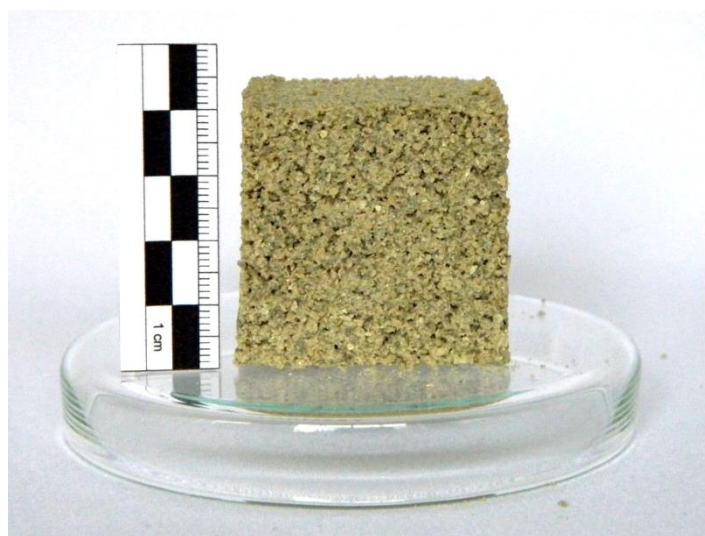
Definované množství mokré písčité směsi bylo do formy aplikováno ve dvou až třech krocích. Vždy před další aplikací směsi byl povrch předešlé vrstvy upraven tak, aby se vrstvy dobře vzájemně propojily a aby nedošlo k jejich separaci. Způsob přípravy zkušebních tělísek je znázorněn na následujícím obrázku.



**Obr. 53: Příprava zkušebních tělísek dusáním do formy – závěrečné zhutnění směsi kameniva speciálně připraveným nástrojem**

Každý vzorek byl po vydusání vyjmut z formy a uložen na plastovou mřížku do misky a volně sušen v laboratoři. Vzorky byly ukládány na samostatné misky z několika důvodů. V první řadě kvůli dobré manipulaci, protože tělíska byla velmi křehká, dále kvůli možnosti gravimetrického sledování, aby případné odrovené části tělíska zůstaly zachyceny na misce a nedocházelo tak k nechtěným hmotnostním úbytkům a v neposlední řadě kvůli testování konsolidantů, aby bylo možné snadno kontrolovat nasycení tělísek konsolidantem a případné přebytky mohly být zachyceny v misce.

Takto připravená zkušební tělíska byla před aplikací konsolidantů kondicionována v prostorách laboratoře s relativní vzdušnou vlhkostí okolo 30 %.



**Obr. 54: Zkušební tělíska  $4 \times 4 \times 4$  cm, zhotovené ze směsi kameniva ze zvětralého kutnohorského vápence (označení směsi kameniva SLKH2)**

### **3.5 Aplikace konsolidantů a její podmínky**

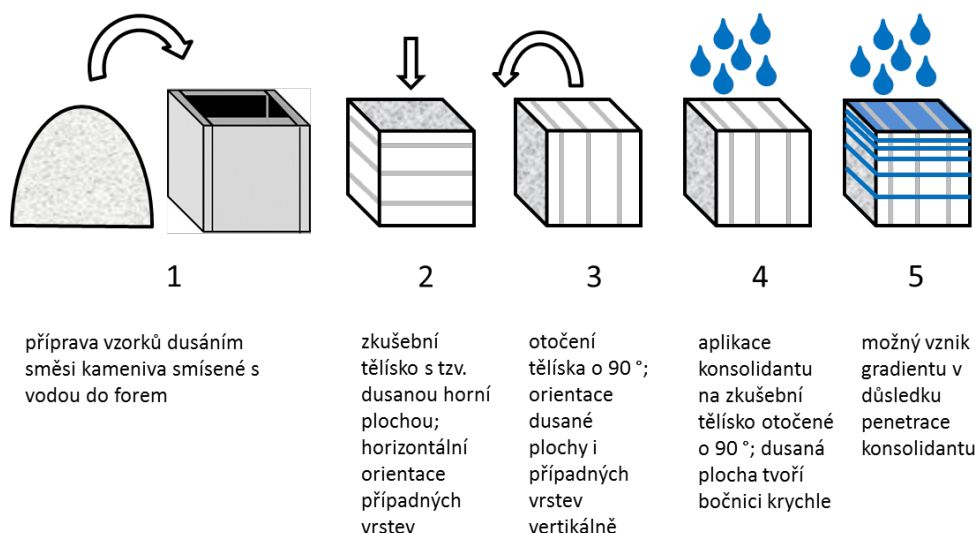
Základní podmínky aplikace konsolidantů, jako je množství konsolidantu, orientace zkušebních tělísek, doba a podmínky zrání konsolidovaných tělísek aj., byly stanoveny na základě předběžných zkoušek nebo dle doporučení výrobců. V průběhu zkoušek bylo dbáno především na to, aby metodika nanášení konsolidantu odpovídala způsobům použitelným v běžné restaurátorské praxi a aby zkušební tělíska byla prosycena konsolidanty v celém svém objemu tak, aby nedocházelo k úniku přebytečného materiálu ze substrátu.

#### **3.5.1 Úprava zkušebních tělísek před aplikací konsolidantu**

Vzorky zhotovené dle metodiky popsané v předcházející kapitole se v důsledku způsobu jejich přípravy vyznačují tím, že povrch jejich horní plochy tzv. „dusané plochy“ je více stmelený nebo zhutněný než povrchy zbylých 5ti stran tělísek. Tento jev je známý a charakteristický při zpracování materiálu s různou velikostí zrn, kdy při jejich mechanickém uhlazování či zhutňování dochází k vytlačení jemnějších částic blíže k povrchu. Přítomnost této povrchové vrstvy a její vliv na průchodnost testovaných konsolidantů byla prokázána v předběžných zkouškách, na jejichž základě byla zvolena metodika vhodná pro systematické testování. Byly odzkoušeny dva způsoby eliminace tohoto jevu, a to zbroušení této povrchové vrstvy a pootočení vzorku o 90 ° tak, aby tato „dusaná plocha“ tvořila boční stěnu krychlového tělíska. Z vyhodnocení těchto předběžných zkoušek na několika různých typech takto připravených tělísek jasně vyplynulo, že zbroušení povrchové vrstvy „dusané plochy“ nemá tak pozitivní vliv jako změna její orientace, tedy otočení tělíska o 90 °. Při broušení povrchu dochází velmi pravděpodobně k ucpávání pórů na povrchu jemnými částicemi.

Bylo dbáno na to, aby orientace „dusané plochy“ byla vždy známa. Pro testování strukturální konsolidace byla tělíska z výchozí polohy otočena o 90 °, tak aby tzv. dusaná plocha tvořila boční stěnu krychle. V dalším textu bude vždy upozorněno na orientaci této kompaktnější plochy, pokud to bude pro daný případ důležité.

Na následujícím obrázku je znázorněn způsob přípravy vzorku, změna jeho původní orientace před aplikací konsolidantu se znázorněním možných vrstev vzniklých přípravou tělíska a dále způsob pronikání konsolidantu do jeho hmoty se znázorněním možného jevu odlišné distribuce účinné látky konsolidantu v tělísku způsobená volným kapilárním vsakováním zpevňovacího prostředku skrze aplikační plochu. Existence těchto možných jevů byla v průběhu práce prověřována a vždy zohledněna při volbě správné metodiky jednotlivých měření.



Obr. 55: Popis přípravy dusaných zkušebních tělísek imitujících silně degradovanou horninu

### 3.5.2 Rozdělení testovaných konsolidantů do tří základních skupin

Koncentrace testovaných suspenzí daných výrobci, které pro nás byly dostupné od 10 do 75 g/l (někteří výrobci vyrábějí rovněž méně nebo i více koncentrované materiály až do cca 250 g/l), byly zvoleny jednak na základě nabídky originálních produktů a také na základě zkušeností s jejich aplikací na horniny stejného typu. Koncentrace suspenzí a následný počet cyklů, v nichž byly na zkušební vzorky aplikovány, byly voleny tak, abychom je mohli v ucelených skupinách vzájemně porovnávat a aby bylo možné alespoň orientační srovnání jednotlivých skupin mezi sebou. Testovány byly tedy 3 skupiny konsolidantů, které jsou uvedeny dále.

#### 3.5.2.1 Skupina konsolidantů na bázi nanosuspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o koncentraci cca 10 g/l

Tím, že od výrobce z Itálie (CSGI) byly dostupné pouze nanosuspenze o koncentraci 10 g/l, byla stanovena spodní hranice koncentrací jedné skupiny testovaných suspenzí. Ostatní suspenze testované v rámci projektu NANOforART (tj. výrobci ZFB a MBN) byly na tuto koncentraci upraveny ředěním příslušným rozpouštědlem dle pokynů jednotlivých výrobců. Jednu skupinu testovaných suspenzí o koncentracích cca 10 g/l tedy tvoří suspenze testované v rámci projektu NANOforART tzn. MBN Nf070, Nanorestore 1P35, Nanorestore E35, ZFB 703k.

### **3.5.2.2 Skupina konsolidantů na bázi nanosuspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o koncentraci cca 25 g/l**

V případě produktů výrobce IBZ (ten dodává originální produkty o koncentraci 25 g/l), které nebyly testovány v rámci projektu NANOforART, ale byly přiřčleněny k testování v rámci vlastní diplomové práce, nebyly suspenze na koncentraci 10 g/l upravovány. Toto rozhodnutí vyplynulo z kladných zkušeností s aplikací těchto produktů o dané koncentraci na materiály podobného typu bez nutnosti dalšího ředění tj. snižování jejich koncentrace. Vzhledem k tomu, že při vyšších koncentracích suspenzí než je 25 g/l (dodané pouze výrobcem ZFB) stoupá jejich viskozita a tím se snižuje schopnost penetrace do porézních materiálů, byla horní hranice koncentrace testovaných suspenzí definována produkty IBZ, tedy 25 g/l. Na tuto koncentraci byl pro porovnání upraven produkt ZFB 703k. U produktu výrobce MBN, který uvádí obsah účinné látky intervalem 10–20 g/l byl gravimetricky zjištěn skutečný obsah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  přibližně okolo 22,2 g/l, proto byl tento produkt přiřčleněn k této skupině konsolidantů o přibližné koncentraci 25 g/l. Tuto skupinu tedy tvoří suspenze CaLoSil<sup>®</sup>E25, CaLoSil<sup>®</sup>IP25, MBN Nf070, ZFB 703k.

### **3.5.2.3 Skupina konsolidantů o esterů kyseliny křemičité o koncentraci cca 300 g/l**

K testovaným konsolidantům byly také připojeny dva výrobky ze skupiny esterů kyseliny křemičité, také nazývané organokřemičity. Tyto prostředky jsou v restaurátorské praxi velmi rozšířené a běžně se používají i ke konsolidaci materiálů s menším či větším podílem vápenných složek jako jsou podobné typy vápenců nebo vápenné omítky. Firma Remmers má ve své nabídce jako jediný výrobce speciálně upravený ester kyseliny křemičité s přídavkem prostředků (tzv. primer tj. látka zprostředkující lepší adhezi jiné látky) pro lepší navázání výsledného křemičitého gelu na vápenné materiály. Tento produkt se nazývá KSE 300 HV (HV – haftvermittler tj. z němčiny volně přeloženo zprostředkovatel přídržnosti) a je upravenou obdobou produktu KSE 300, který je určen především pro materiály silikátové. Oba tyto produkty, z kterých by dle výrobce přibližně po 3 týdnech mělo být vyloučeno 300 g/l křemičitého gelu, tvoří poslední skupinu testovaných konsolidantů.

### **3.5.3 Způsob aplikace a počty aplikačních cyklů**

Konsolidanty byly aplikovány na vodorovnou plochu zkušebních tělísek injekční stříkačkou s jehlou o průměru 1,6 mm, vždy do doby, kdy byl konsolidant substrátem vsakován. V momentě, kdy konsolidant zůstával zadržován na povrchu zkušebního tělíska, bylo nutné v průběhu jednoho aplikačního cyklu udělat několika minutovou pauzu, aby konsolidant nestékal z aplikační plochy a dál plynule penetroval do materiálu aplikační plochou.

U všech vápenných nanosuspenzí bylo shodně stanoveno množství přípravku, které v jednom cyklu prostoupilo tělíska v celém jejich objemu a to 20 ml konsolidantu. Skupina nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o přibližné koncentraci 25 g/l byla na zkušební tělíska aplikována v 5ti cyklech ( $5 \times 20$  ml konsolidantu). Aby se méně koncentrované nanosuspenze o přibližné koncentraci 10 g/l přiblížily obsahem vpravené účinné látky do jednoho tělíska předcházející skupině, byly tyto konsolidanty aplikovány v 10ti cyklech ( $10 \times 20$  ml konsolidantu). Každý další aplikační cyklus následoval vždy po uplynutí doby 24 h od předcházejícího. Tělíska nebyla po aplikaci konsolidantu zakrývána, ani nijak jinak zvláště ošetřována.

U skupiny esterů kyseliny křemičité, které se vyrábějí tak, aby po jejich vyžrání vzniklo 300 g/l účinné látky, bylo obtížné se přiblížit k obsahům celkového vpraveného množství účinné látky jako u konsolidantů na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Vzhledem k tomu, že není výrobcem doporučeno tyto produkty ředit, muselo být množství vpravené účinné látky upraveno výrazným snížením objemu aplikovaného konsolidantu. Z předběžných zkoušek vyplynulo, že minimální množství pro prosycení celého zkušební tělíska je 11 ml. Výsledné množství vpravené účinné látky při aplikaci 11 ml 30% konsolidantu je o něco vyšší než v případě výše uvedených aplikací konsolidantů na bázi nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Díky tomu tedy přípravky na bázi esterů kyseliny křemičité tvoří samostatnou skupinu, která doplňuje testované materiály a poskytuje alespoň jejich přibližnou vzájemnou komparaci.

Snahou stanovení podobných celkových množství vpravených účinných látek na jednotlivá zkušební tělíska bylo, aby výše popsané skupiny mohly být vzájemně porovnávány. Vzhledem k různým odchylkám či limitujícím faktorům použitých konsolidantů ale nebylo zcela možné konečné obsahy účinných látek u všech třech skupin konsolidantů sjednotit. Když nebereme v potaz odchylky koncentrací jednotlivých prostředků a hrubě sumarizujeme množství vpravených účinných látek dle jejich rozdělení do třech skupin na základě přibližných koncentrací, získáme tyto údaje:

- skupina kons. 10 g/l      2,0 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / **2,7 g**  $\text{CaCO}_3$       vpravené účinné látky
- skupina kons. 25 g/l      2,5 g  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / **3,4 g**  $\text{CaCO}_3$       vpravené účinné látky
- skupina kons. 300 g/l      – / **3,3 g**      vpravené účinné látky

Aby byly výsledky testování korektní a byla tedy známa skutečná anebo alespoň přibližná koncentrace prostředků, bylo provedeno jejich gravimetrické stanovení ze sušin. Tyto výsledky jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 28, ve které jsou rovněž zavedeny zkratky



názvů konsolidačních prostředků, které budou pro usnadnění dále používány v následujícím textu.

Na základě gravimetricky stanovených koncentrací daných konsolidantů a výše popsaných způsobů jejich aplikace (tj. počet aplikačních cyklů a objem konsolidantu aplikovaného v rámci jednoho cyklu), přehledně zaznamenaných v tabulce Tab. 29, byly vypočítány následující důležité údaje, uvedené rovněž v této tabulce:

- celkový objem aplikovaného konsolidantu na plochu definovaného zkušebního tělíka, z tohoto údaje byla vypočítána celková spotřeba konsolidantu v  $l/m^2$
- dále na základě získané hmotnosti sušin bylo vyjádřeno celkové množství účinné látky  $Ca(OH)_2$  aplikované příslušným počtem cyklů, z čehož byla na základě známé změny hmotnosti při karbonataci tj. přeměně  $Ca(OH)_2$  na  $CaCO_3$  vypočítán konečný obsah výsledné účinné látky po její 100 % konverzi
- oba předcházející údaje pak byly vyjádřeny také ve vztahu k hmotnosti zkušebního tělíka v % hm.

**Tab. 28: Přehled použitých konsolidantů, jejich zkratk dále používaných v textu; obsah výrobci udávaných účinných látek a jejich ověření navážkami sušin v laboratoři KCHT FR UPCE**

	Název konsolidantu (údaj o koncentraci)	Zkratka názvu konsolidantu používaná v dalším textu	obsah účinné látky originálního produktu udávaný výrobcem g/l	obsah účinné látky použitého originálního produktu stanovený gravimetricky (g/l)	obsah účinné látky použitého zředěného originálního produktu stanovený gravimetricky (g/l)
Ca(OH) <sub>2</sub> cca 25 g/l	CaLoSil <sup>®</sup> E25	<b>CaL E25</b>	25	25,03	–
	CaLoSil <sup>®</sup> IP25	<b>CaL IP25</b>	25	24,83	–
	ZFB 703k (25 g/)	<b>ZFB 25</b>	cca 75	–	25
	MBN Nf070 (22 g/l)	<b>MBN 22</b>	10-20	22,19	–
Ca(OH) <sub>2</sub> cca 10 g/l	Nanorestore E35 (10 g/l)	<b>NR E 10</b>	10	11,06	–
	Nanorestore 1P35 (10 g/l)	<b>NR 1P 10</b>	10	11,20	–
	ZFB 703k (10 g/l)	<b>ZFB 10</b>	cca 75	–	10
	MBN Nf070 (10 g/l)	<b>MBN 10</b>	10-20	–	10
KSE 300	KSE 300	<b>KSE 300</b>	300*	335**	–
	KSE 300 HV	<b>KSE HV</b>	300*	279**	–

\* množství gelu SiO<sub>2</sub> po jeho vyloučení tj. vyzrání

\*\* množství vyloučeného gelu naměřeno gravimetricky na Petriho miskách po uplynutí doby 30 dní zrání v přibližných podmínkách stanovených výrobcem za ideální

Tab. 29: Přehled použitých konsolidantů; počet aplikačních cyklů na jedno testovací tělísko; množství aplikovaného konsolidantu na m<sup>2</sup>; množství aplikované účinné látky na jedno tělísko – skutečné a vztažené k jeho hmotnosti v % hm.

	Název konsolidantu (údaj o koncentraci)	Zkratka názvu konsolidantu používaná v dalším textu	Počet aplikačních cyklů × objem konsolidantu v jednom aplikačním cyklu [ml] = celkový objem aplikovaného konsolidantu [ml]	Objem aplikovaného konsolidantu vztaženo na plochu [l/m <sup>2</sup> ]	Množství aplikované účinné látky vypočítané dle gravimetrie [g]	Množství aplikované účinné látky vypočítané dle gravimetrie po 100% vyzrání [g]	Množství aplikované účinné látky vztaženo na hm. neošetřeného tělíska [hm. %]	Množství aplikované účinné látky vztaženo na hm. neošetřeného tělíska po 100% vyzrání [hm. %]
Ca(OH) <sub>2</sub> cca 25 g/l	CaLoSil <sup>®</sup> E25	<b>CaL E25</b>	5 × 20 = 100	62,5	2,50	3,38	2,75	3,72
	CaLoSil <sup>®</sup> IP25	<b>CaL IP25</b>	5 × 20 = 100	62,5	2,48	3,35	2,73	3,69
	ZFB 703k (25 g/l)	<b>ZFB 25</b>	5 × 20 = 100	62,5	2,50	3,38	2,75	3,72
	MBN Nf070 (22 g/l)	<b>MBN 22</b>	5 × 20 = 100	62,5	2,22	3,00	2,45	3,30
Ca(OH) <sub>2</sub> cca 10 g/l	Nanorestore E35 (10 g/l)	<b>NR E 10</b>	10 × 20 = 200	125	2,21	2,99	2,43	3,29
	Nanorestore 1P35 (10 g/l)	<b>NR 1P 10</b>	10 × 20 = 200	125	2,24	3,03	2,47	3,34
	ZFB 703k (10 g/l)	<b>ZFB 10</b>	10 × 20 = 200	125	2,00	2,70	2,20	2,97
	MBN Nf070 (10 g/l)	<b>MBN 10</b>	10 × 20 = 200	125	2,00	2,70	2,20	2,97
KSE 300	KSE 300	<b>KSE 300</b>	1 × 11 = 11	6,875	3,69**	<3,69*	4,06	<4,06*
	KSE 300 HV	<b>KSE HV</b>	1 × 11 = 11	6,875	3,07**	<3,07*	3,38	<3,38*

\* u esterů kyseliny křemité není možné toto množství přesně stanovit nebo vypočítat, jelikož vylučování SiO<sub>2</sub> gelu je závislé na podmínkách zrání a jeho výsledná hmotnost tak může být v závislosti na nich proměnlivá; ze sledování konkrétních gelů na Petriho miskách však víme, že v době mezi 30 a 80 dnem zrání docházelo ještě k drobným poklesům hmotností SiO<sub>2</sub> gelů v rozmezí 3,3-4,5%, hm., proto jsou hodnoty uvedeny se znamínkem <

\*\* množství vyloučeného gelu naměřeno gravimetricky na Petriho miskách po uplynutí doby 30 dní zrání v přibližných podmínkách stanovených výrobcem za ideální; vzhledem k tomu, že u zkušebních tělísek probíhalo zrání o něco rychleji, jsou uvedené hodnoty orientační; skutečné hodnoty mohou být nižší přibližně o 2-5%

Je nutné upozornit, že mezi výrobci udávanými a skutečnými koncentracemi testovaných nanosuspenzí jsou drobné odchylky. Koncentrace zjištěné před testováním na základě gravimetrického stanovení sušiny může být také zatíženo drobnou chybou. Je velmi pravděpodobné, že se současně při sušení suspenzí na Petriho miskách v sušárně (při teplotě 80 °C) rozbíhá proces konverze  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  na  $\text{CaCO}_3$  doprovázený změnou hmotnosti. Velmi pravděpodobně se tyto dvě fáze prolínají. Naměřené hodnoty je proto nutné považovat za orientační.

Cílem tedy není porovnání účinků analyticky přesných množství účinných látek konsolidantů na vlastnosti zkušebních tělísek, ale zjištění základních trendů, rozdílů, výhod či nevýhod použití jednotlivých technologií a metodik jejich aplikace aj. vlivů s ohledem na jejich využití a efektivitu v běžné restaurátorské praxi.

Závěrem této kapitoly je nutné upozornit, že modelová tělíska při odpařování kapalného média konsolidantů zcela přesně nesimulují reálné podmínky – odpar u nich probíhá odlišně než u rozměrnějších reálných objektů. Tímto jevem tj. možností odparu rozpouštědla z dalších 4 bočních stran (u reálného objektu obvykle pouze jednou stranou), může být ovlivněna distribuce konsolidantu v tělískách po vytvrnutí a tím i jejich vlastnosti po zpevnění.

#### **3.5.4 Doba a podmínky zrání**

Doba a podmínky zrání konsolidantů na bázi nanosuspenzí hydroxidu vápenatého byla definována na základě předběžných systematických zkoušek. Při těchto zkouškách byly sledovány vlivy třech relativních vzdušných vlhkostí prostředí okolo 30%, 50% a 80% RH na rychlost karbonatace ošetřených tělísek i jejich výsledné pevnosti ve dvou časových horizontech 12 a 28 dní. Tyto zkoušky, jejichž základní výsledky jsou uvedeny v příloze č. 4, prokázaly závislost rychlosti konverze hydroxidu vápenatého na uhličitan vápenatý na vzdušné vlhkosti, avšak u dvou vyšších RH tj. 50 a 80 % byl rozdíl zanedbatelný (s výjimkou jednoho prostředku). Rozdíly stupně konverze v závislosti na čase byl u těchto dvou relativních vzdušných vlhkostí také zanedbatelný a po 12 dnech zrání v obou RH dosahovala míra konverze okolo 75–100% (v závislosti na daném konsolidantu) a už se téměř neměnila.

Na základě těchto zkoušek byla u těchto typů konsolidantů stanovena doba zrání 14 dní. Potvrdilo se také to, že klimatické podmínky v ateliéru (průměrná teplota 24 °C a průměrná relativní vzdušná vlhkost 58 %), kde měla být konsolidována socha světice a kde bylo zároveň

naplánováno i zrání zkušebních tělísek kvůli otestování konsolidantů přímo v daném prostředí, jsou pro proces karbonatace vyhovující. Po uplynutí stanovené doby zrání byla karbonatace pozastavena sušením vzorků v sušárně při teplotě 80 °C po dobu 24h a následně byly vzorky uloženy do vzduchotěsných nádob se silikagelem.

V případě zkušebních tělísek ošetřených konsolidanty na bázi esterů kyseliny křemičité je minimální doba zrání stanovena výrobcem, který uvádí následující: „*Za normálních podmínek (20 °C a 50% relativní vlhkosti vzduchu) je proces vylučování pojiva ukončen po cca 3 týdnech.*“<sup>66</sup>. Pro zrání tělísek ošetřených organokřemičitany tedy byla s přihlédnutím k doporučení výrobce zvolena doba 30 dní. Vzhledem k tomu, že u tohoto typu pojiva není možné proces zrání zastavit sušením, jelikož by mohlo dojít k přesušení vzniklého SiO<sub>2</sub> gelu a tak i k narušení jeho mechanických vlastností (zkřehnutí a popraskání) byla konečná doba zrání podmíněna především možností měření pevností v tlaku subdodavatelem. Pevnosti těchto tělísek byly proto měřeny po uplynutí doby 47 dní ode dne aplikace konsolidantů. Současně se zráním ošetřených zkušebních tělísek byly do stejného prostředí umístěny také Petriho misky s definovaným množstvím konsolidantů u nichž bylo gravimetricky sledováno vylučování SiO<sub>2</sub> gelu. Na Petriho miskách byl tento proces z pochopitelných důvodů o něco pomalejší než u ošetřených tělísek, ale poskytoval nám údaje o procesu zrání poté, co byly vzorky po 30 dnech odvezeny na měření pevností. I po uplynutí doby 30 dnů bylo stále možné zaznamenat drobný pokles hmotností vyloučených SiO<sub>2</sub> gelů na Petriho miskách. Nejedná se ale o zcela zásadní rozdíl, pro představu: na Petriho miskách, kde zrání gelu probíhalo pomaleji, než u zkušebních tělísek, bylo možné ještě mezi 30. a 80. dnem zrání zaznamenat pokles hmotnosti o cca 3,3% hm. (KSE 300) a 4,5% hm. (KSE 300 HV).

### **3.6 Metody měření vlastností nekonsolidovaných zkušebních tělísek**

U připravených tělísek byly stanoveny jejich základní charakteristické vlastnosti, jako jsou objemová hmotnost, hmotnostní, objemová a kapilární nasákavost a zejména jejich pórovitost. Dále bylo provedeno důkladné studium mikrostruktury laboratorních vzorků, zejména velikosti a způsobu propojení pórů s ohledem na plánovanou strukturální konsolidaci tj. možnost příjmu konsolidantu. Při studiu mikrostruktury byl kladen zvláštní důraz na studium povrchů tělísek, vzhledem k výše zmíněné odlišnosti struktury v oblasti tzv. „dusané plochy“. Posouzení homogenity zkušebních tělísek bylo provedeno metodou ultrazvukové transmise. Zvláštní pozornost byla věnována případnému možnému výskytu vrstevnatosti materiálu

<sup>66</sup> KSE 300 HV; Technický list; Číslo výrobku 0654; fa Remmers Baustofftechnik GmbH; Lönigen (G)

vzorků v důsledku přípravy. Vzájemná podobnost zkušebních tělísek a zároveň jejich mechanické vlastnosti byly také ověřeny měřeními pevnosti v tlaku.

Všechny porovnatelné vlastnosti byly komparovány s vlastnostmi horniny sochy světice č. 1

### **3.6.1 Stanovení objemové hmotnosti, nasákavosti a celkové otevřené pórovitosti vodě**

Objemová hmotnost, nasákavost a celková otevřená pórovitost vodě byly u definovaných vzorků stanoveny gravimetricky. Tyto jednotlivé charakteristické parametry byly měřeny standardními postupy vycházejícími z příslušných norem a směrnic uvedených v kapitole 1.2.3.4 Základní vlastnosti vápence. **Vzhledem k tomu, že se zkušební tělíska ve vodě rozplavovala, byla nasákavost měřena namísto vody 1-propanolem.** Hmotnosti přijatého rozpouštědla byly následně dle hustot přepočítány na hmotnost vody. Tímto postupem mohou být získané údaje zkreslené díky odlišné smáčivosti vody a tím i případné rozdílné kapilární aktivitě materiálu a je tedy nutné je považovat za orientační.

### **3.6.2 Stanovení kapilární nasákavosti vodou volným vztlínáním**

Vzorky byly aplikační plochou (tzn., rozuměj plochou, kterou byly následně aplikovány konsolidanty) umístěny na mřížku do nádoby s **1-propanolem** (výše hladiny přibližně 0,5 cm) a byla sledována jejich nasákavost volným kapilárním vztlínáním. Množství přijaté kapaliny, v tomto případě rozpouštědla, bylo zaznamenáváno gravimetricky. Protože vzorky byly v celém objemu velmi rychle prosyceny kapalinou a manipulace s nimi byla díky jejich nesoudržnosti po smočení velmi obtížná bez poškození tělíska, byl zaznamenán pouze jeden údaj přírůstku hmotnosti vsáknuté kapaliny po uplynutí doby 20-ti sekund.

Ze získaných údajů (hmotnost přijaté kapaliny v čase) byl vypočítán součinitel nasákavosti, stejně tak, jak je uvedeno v kapitole 1.2.3.2 Měření nasákavosti povrchů kamene. Je však nezbytné upozornit, že výsledky tohoto měření jsou s výsledky uvedenými ve zmíněné kapitole neporovnatelné, kvůli odlišné metodice způsobu měření.

### **3.6.3 Měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu**

Měření rychlosti průchodu UZ signálu bylo provedeno za účelem ověření vzájemné podobnosti dusaných zkušebních tělísek a pro stanovení charakteristiky rychlosti průchodu UZ signálu na neošetřených vzorcích. Rychlost byla měřena ve třech různých orientacích zkušebních těles k měřícím sondám na 7mi tělískách. Cílem systematického měření vždy ve 4 měřících bodech pro danou orientaci bylo prověřit homogenitu tělísek ve směru od dusané plochy k podstavě, kvůli možnému vzniku vrstev v důsledku přípravy. Další dva směry měření

měly ověřit homogenitu hmoty dusaných vzorků a případné vlivy měření prováděné kolmo na dusanou plochu. Krajiní měřicí body se nacházely vždy 0,5 cm od okraje zkušebního tělíska a jejich vzájemné rozestupy byly 1 cm. Způsoby a směry všech měření jsou graficky znázorněny na následujícím obrázku Obr. 56.

**Parametry měřicího zařízení<sup>67</sup>:**

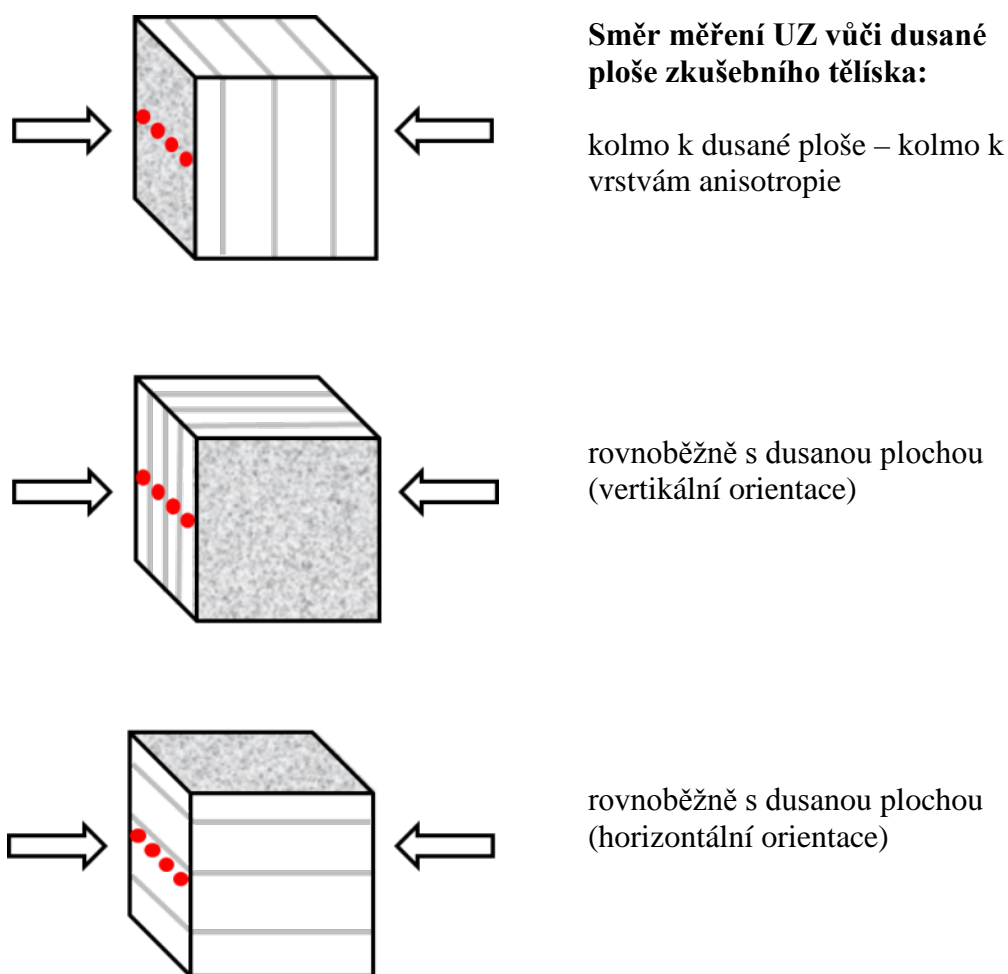
- Přístroj: *Koffermesssystem UKS 12*, výrobce: *GEOTRON-ELEKTRONIK R. Krompholz, BRD*
- Generátor ultrazvuku: *USG 40*
- Osciloskop (záznam a měření signálu) : *Digitální osciloskop Fluke 192B SCOPEMETER*
- Sondy: *UPG – D (vysilač, zdroj); UPE – E (přijímač)*

**Podmínky měření:**

- Měřicí frekvence: *20 KHz na generátoru*
- Rozsah amplitudy: *5mV*
- Rozsah času: *10 $\mu$ s*

---

<sup>67</sup> přístroj byl k měření zapůjčen kolegy z ÚTAM AV ČR



Obr. 56: Metodika měření rychlosti průchodu UZ signálu na neošetřených tělískách

### 3.6.4 Stanovení pevnosti v tlaku

Měření pevnosti v tlaku provedeno ve dvou orientacích neošetřených zkušebních tělísek, abychom případně zjistili výskyt anisotropie (vrstevnatosti) vzorků způsobený metodikou jejich přípravy dusáním. V jednom případě byla tělíska drcena v kolmém směru k dusané ploše a tedy i kolmo k možným vrstvám (8 kusů vzorků) a v druhém případě ve směru rovnoběžném s dusací plochou i možnými vrstvami (5 kusů vzorků).

Cílem měření bylo ověřit homogenitu neošetřených laboratorních vzorků, případný vliv jejich možné vrstevnatosti na výsledky měření a především na základě těchto výsledků zvolit metodiku vhodnou pro měření pevnosti u konsolidovaných vzorků.

Měření bylo provedeno ve spolupráci s kolegy z Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie ÚChTML na FCHT UPCE. Charakteristika měřicího zařízení a další podrobnosti jsou uvedeny v kapitole 3.8.2 Měření pevnosti v tlaku .



### **3.6.5 Studium mikrostruktury**

Z vybraného testovacího tělíska byl zhotoven výbrus tak, aby bylo možné studovat průřez celého vzorku.

Metodika měření včetně metod byla shodná s detaily uvedenými v kapitole 1.2.3.4 Základní vlastnosti vápence.

### 3.7 Výsledky měření a charakteristika nekonsolidovaných zkušebních tělísek

#### 3.7.1 Zjištěné fyzikální charakteristiky zkušebních tělísek

Zjištěné charakteristiky připravených zkušebních tělísek v porovnání s charakteristikami vápence, ze kterého byla zhotovena socha světice č. 1, jsou uvedeny v tabulce Tab. 30.

Tab. 30: Výsledky měření základních fyzikálních vlastností a jejich srovnání s hodnotami naměřenými na reálné hornině ze sochy světice č. 1

Označení vzorku	Průměrná hmotnost zkušebního tělíska 4 <sup>3</sup> cm [g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Nasákavost vodou [hm. %]	Otevřená pórovitost přístupná vodě [obj. %]	Součinitel nasákavosti volným vztlínáním W [kg × m <sup>-2</sup> × h <sup>-0,5</sup> ]
SLKH 2	90,79 (+/- 0,97)	1419 (+/- 15)	26,9 (+/- 1,65)	38,1 (+/- 2,54)	13,2 (+/- 0,92)
průměrné hodnoty obou měřených typů horniny ze sochy světice, vz. TS3 a NS2	–	1862	7,8	14,6	33,05

Z měření vyplývá, že připravený substrát je vysoce porézní a póry v materiálu tvoří přibližně 40 % jeho objemu. Tělíska tedy dobře simulují vysoce korodovaný materiál.

#### 3.7.2 Výsledky měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu

Výsledky měření rychlosti průchodu signálu ultrazvuku prokázaly, že zkušební tělíska vykazují vysokou vzájemnou podobnost. Měřením byla také identifikována výše popisovaná kompaktnější část zkušebních tělísek v blízkosti dusané plochy.

Naměřené hodnoty rychlostí průchodu ultrazvukového signálu materiálem byly zpracovány jednak jako průměr výsledků měření ve všech měřicích bodech ve třech různých orientacích vzorků a vzhledem k výskytu homogennější oblasti u dusané plochy také jako průměr všech měření provedených ve dvou středních měřicích bodech viz Tab. 31. Jak je patrné z tabulky, průměry naměřených hodnot zpracované oběma uvedenými způsoby jsou stejné, a to 0,82 km/s, přičemž jejich směrodatné odchylky jsou velmi malé, což poukazuje na vysokou homogenitu testovacích tělísek.

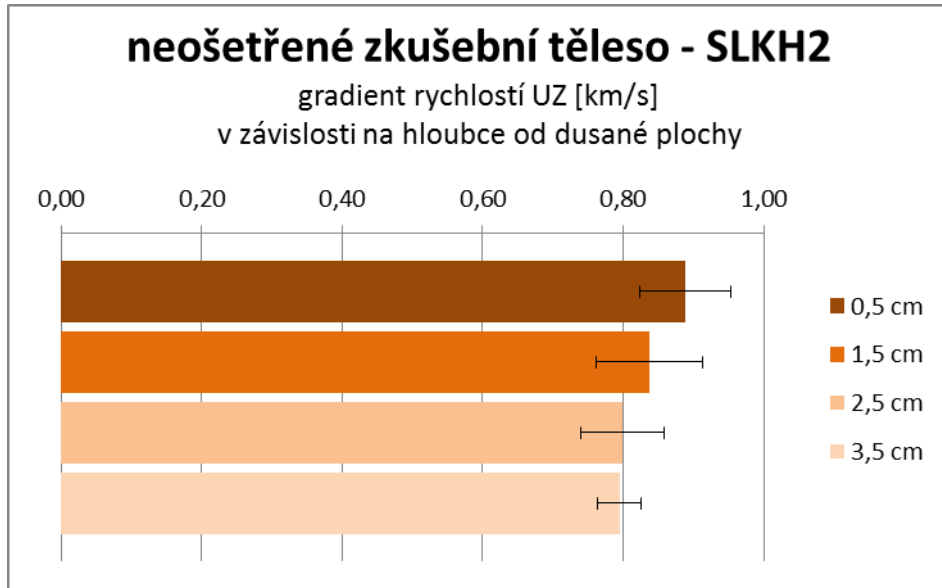
Samostatnou skupinou měření byla sledována přítomnost nehomogenit tělísek ve směru od dusané plochy do hloubky materiálu vzorku. Jak je patrné z Graf 6, v oblasti dusané plochy se vyskytuje část vzorku, která se projevuje mírným zvýšením rychlosti UZ signálu.

Proměření zkušebních tělísek ve směru od budoucí aplikační plochy do hloubky materiálu prokázalo, že u ošetřených tělísek by velmi pravděpodobně měl být dobře zaznamenaný případný vznik gradientu v důsledku penetrace konsolidantů do materiálu. Neošetřená tělíška jsou v celé této měřicí linii velmi homogenní, viz Graf 7, a případné rozdíly v šíření UZ signálu způsobené konsolidací materiálu, by tak mělo být možné velmi přesně zaznamenat. Oba výše popsané způsoby měření jsou v grafech vyjádřeny jako průměry měření stejných míst u sedmi neošetřených zkušebních tělísek.

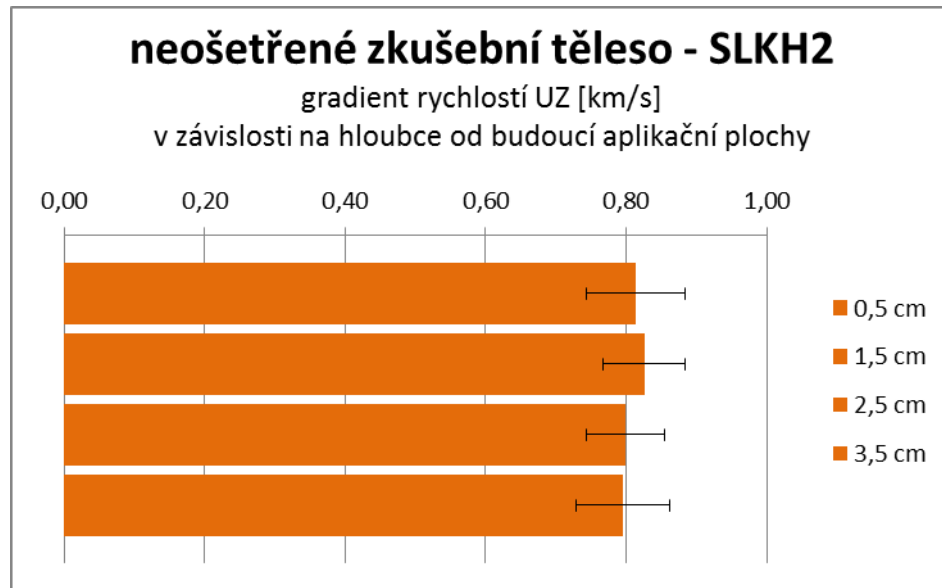
Výsledky těchto měření nejenom podpořily volbu vhodné orientace zkušebních tělísek k aplikaci konsolidantů, ale také napomohly ke stanovení vhodné metodiky měření stejného parametru u konsolidovaných tělísek.

**Tab. 31: Výsledky měření rychlostí průchodu ultrazvukového signálu materiálem neošetřených zkušebních těles**

<b>Zpracování dat a místa jejich měření</b>	<b>Výsledek měření</b>
Celkový průměr všech naměřených hodnot v různých orientacích vzorku	0,82 km/s (+/- 0,065)
Celkový průměr dvou středních hodnot naměřených v různých orientacích vzorku	0,82 km/s (+/- 0,057)



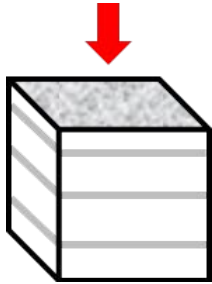
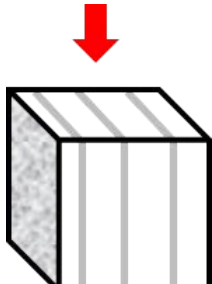
**Graf 6:** Gradient rychlostí průchodu ultrazvukového signálu ve směru od dusané plochy směrem do hloubky materiálu zkušebních těles



**Graf 7:** Hloubkový profil rychlostí průchodu ultrazvukového signálu ve směru od budoucí aplikační plochy zkušebních těles

### 3.7.3 Výsledky měření pevnosti v tlaku

Tab. 32: Průměrná mez pevnosti [MPa] u neošetřených tělísek – dva způsoby měření

<p><b>Vhodný způsob měření</b></p>	<p>0,0438 (+/- 0,0029) [MPa]</p>	 <p><b>Obr. 57:</b> Neošetřené zkušební tělísko a jeho orientace při měření pevnosti v tlaku – kolmo na dusanou plochu i případné vrstvy vzniklé dusáním</p>
<p>Nevhodný způsob měření</p>	<p>0,0540 (+/- 0,0250) [MPa]</p>	 <p><b>Obr. 58:</b> Neošetřené zkušební tělísko a jeho orientace při měření pevnosti v tlaku – rovnoběžně s dusanou plochu i s případnými vrstvami vzniklé dusáním</p>

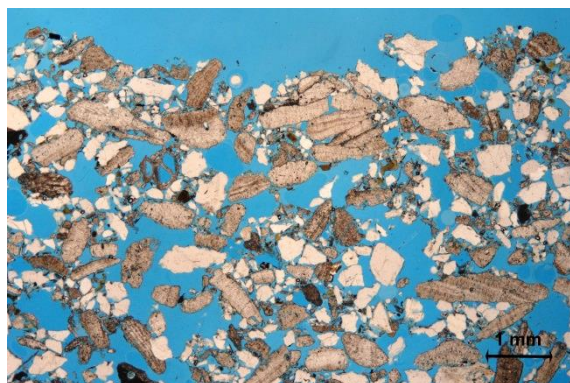
Výsledky obou způsobů měření byly vyjádřeny průměrnou hodnotou ze všech naměřených hodnot tj. u měření kolmého k dusané ploše na 8mi tělískách a u měření rovnoběžného s dusanou plochou u 5ti tělísek viz Tab. 32. Odchylka uvedená v závorce pod hodnotami pevností je podílem rozdílu mezi nejvyšší a nejnižší naměřenou hodnotou tzn. přibližný možný nárůst nebo pokles od průměrné hodnoty pevnosti.

Dle výsledků dochází v případě měření pevnosti rovnoběžně s dusanou plochou k velkým odchylkám mezi jednotlivými tělesy a jejich průměrná pevnost je o něco vyšší než u druhého způsobu měření. Oba tyto jevy jsou velmi pravděpodobně způsobeny orientací dusané plochy, která je k drtíciému příčnicku orientována kolmo, a tím může v závislosti na své, zřejmě u každého tělíska trochu odlišné, kompaktnosti ovlivňovat výsledek měření. Tato metoda měření se ukázala pro další využití jako nevhodná a pokud bychom velké odchylky, pohybující se v tomto případě měření okolo +/- 46%, mezi jednotlivými měření nepřičítali pouze dusané ploše, mohly by také indikovat očekávanou vrstevnatost vzorku, která ale např. metodou UZ nebyla zaznamenána.

Druhým způsobem měření, které bylo provedeno na 8ti tělískách, bylo dosaženo velmi podobných výsledných hodnot pevností jednotlivých tělísek. Odchylka vypočítaná z maximální a minimální naměřené hodnoty všech měření tvoří ve vztahu k průměrné hodnotě všech měření +/- 7%. Tato metoda bude zvolena i pro hodnocení pevnosti v tlaku u konsolidovaných tělísek.

#### **3.7.4 Mikroskopická charakteristika uměle připravených dusaných tělísek ve srovnání s korodovaným vápencem ze sochy světice č. 1**

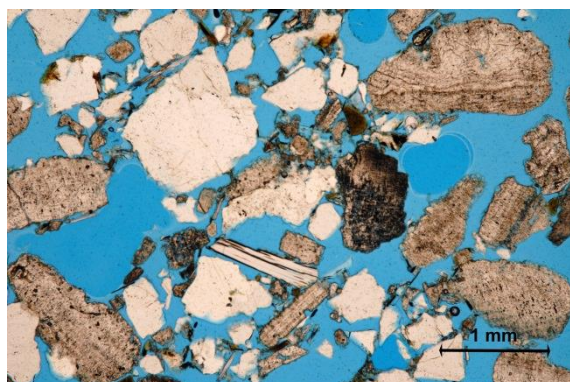
## Uměle připravená dusaná zkušební tělíska



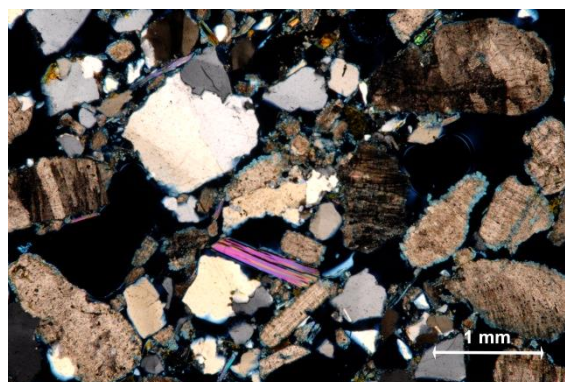
**Obr. 59:** Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub>\_KH2, povrch  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v  
procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při  
zvětšení 20×, modře zbarvené oblasti jsou póry  
vyplněné modře barvenou zalévací epoxidovou  
pryskyřicí



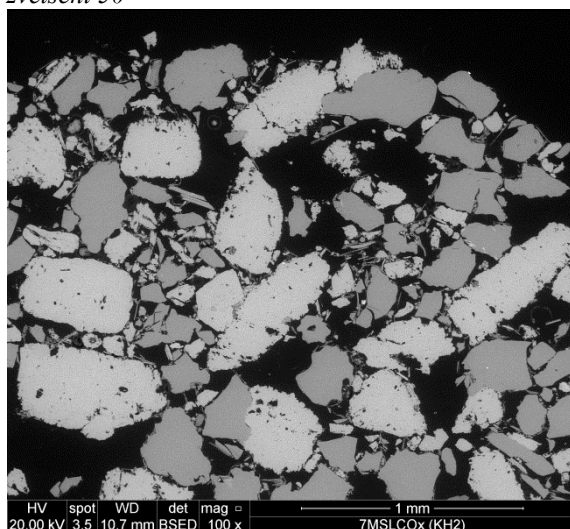
**Obr. 60:** Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub>\_KH2, povrch  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v  
procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při  
zvětšení 20×



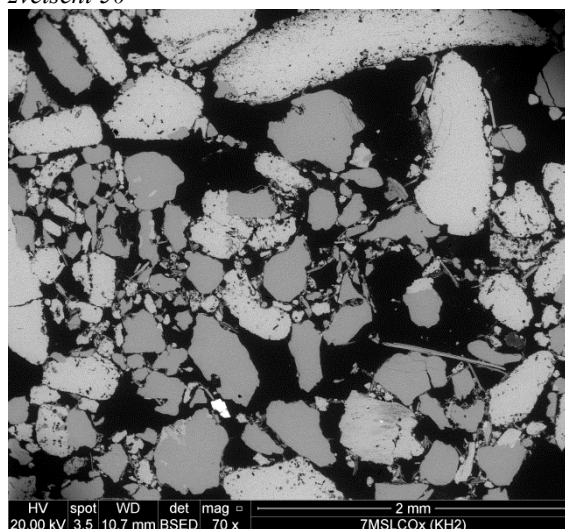
**Obr. 61:** Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub>\_KH2  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v  
procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při  
zvětšení 50×



**Obr. 62:** Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub>\_KH2  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v  
procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při  
zvětšení 50×

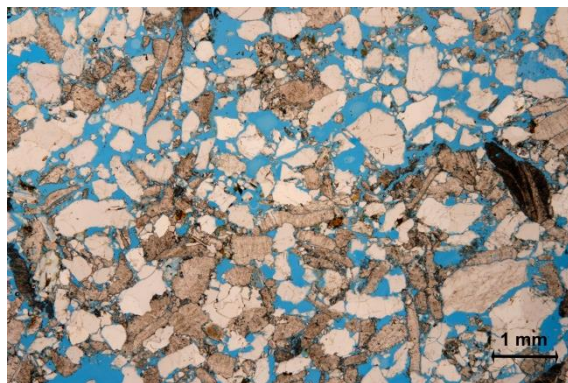


**Obr. 63:** Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub>\_KH2, povrch  
Rastrovací elektronový mikroskop, fotografováno  
v režimu odražených elektronů

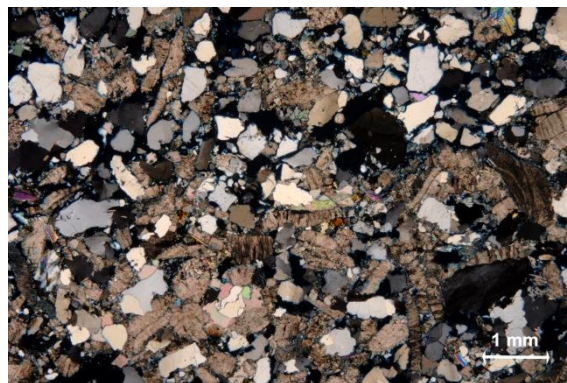


**Obr. 64:** Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub>\_KH2  
Rastrovací elektronový mikroskop, fotografováno  
v režimu odražených elektronů

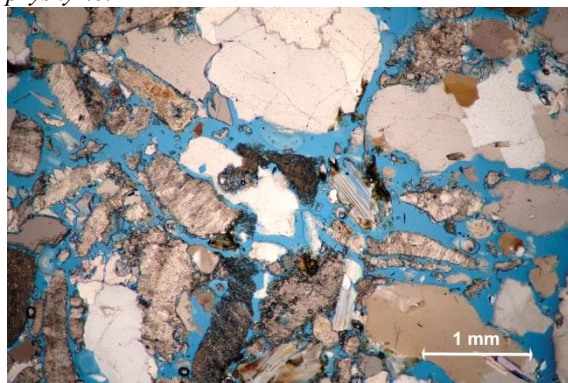
## Korodovaný vápenec ze světice č. 1



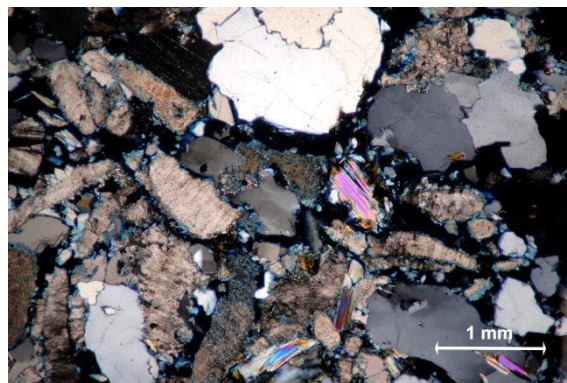
**Obr. X: Výbrus vzorku 7MSLCOx\_KH2, povrch**  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při zvětšení 20×, modře zbarvené oblasti jsou póry vyplněné modře barvenou zalévací epoxidovou pryskyřicí



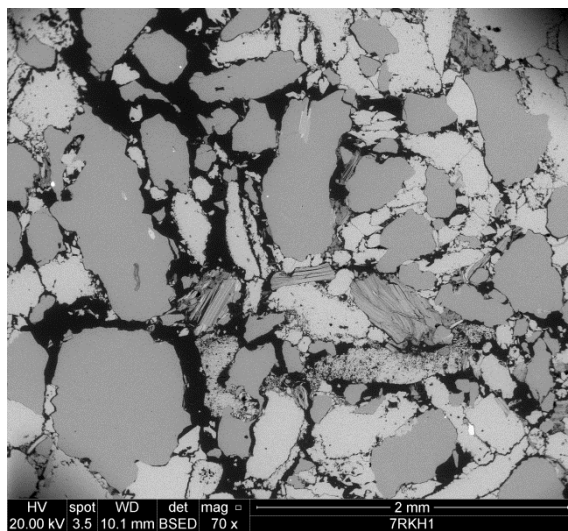
**Obr. X: Výbrus vzorku 7MSLCOx\_KH2, povrch**  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 20×



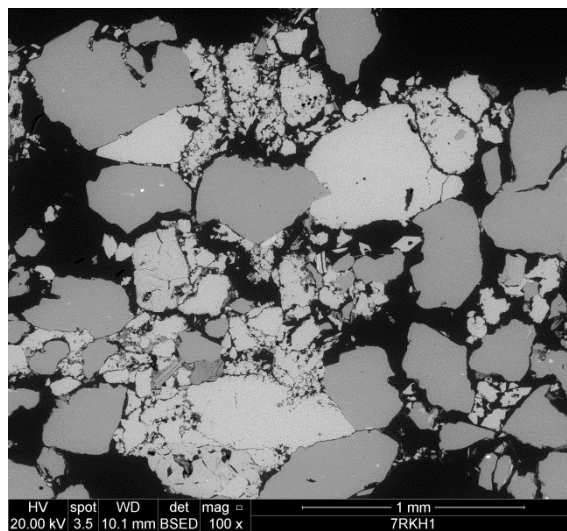
**Obr. X: Výbrus vzorku 7MSLCOx\_KH2**  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při zvětšení 50×



**Obr. X: Výbrus vzorku 7MSLCOx\_KH2**  
Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 50×



**Obr. X: Výbrus vzorku 7MSLCOx\_KH2, povrch**  
Rastrovací elektronový mikroskop, fotografováno v režimu odražených elektronů



**Obr. X: Výbrus vzorku 7MSLCOx\_KH2**  
Rastrovací elektronový mikroskop, fotografováno v režimu odražených elektronů



Mikroskopickým studiem silně korodovaného vápence (vzorek 7RKH1) ze sochy světice i vzorku zkušebního tělíska připraveného dusáním vápencového písku získaného z lomu v Kutné Hoře (7MSLCOx\_KH2) lze prokázat několik skutečností důležitých z hlediska konsolidace i vzájemného srovnání obou materiálů.

Je zcela zřejmé, že oba materiály mají vysokou porozitu, která kolísá u vápence mezi 20-30 % a u dusaného substrátu mezi 20-40%. Velikost pórů má u vápence i dusaného tělíska poměrně širokou distribuci a je srovnatelná u obou typů materiálů. Většinu pórů tvoří tzv. makropóry velikosti mezi 10 až 300  $\mu\text{m}$ .

Mineralogické složení i poměrné zastoupení jednotlivých složek je v obou případech prakticky totožné – hlavní podíl tvoří úlomky vápence (biodetrit), dále křemen a v menší míře částice slídy, živců a drobných horninových úlomků. Tvar a velikost zrn dusaného tělíska je rovněž podobný jako u kutnohorského vápence - částice vápencových úlomků jsou většinou podlouhlé, mají zaoblené hrany (oválné), částice křemene jsou méně zaoblené, s ostřejšími hranami.

Na základě mikroskopického srovnání lze tvrdit, že substrát použitý pro testování konsolidace má velmi podobnou porozitu, strukturu i složení jako silně korodovaný kutnohorský vápenec.

### 3.8 Metodika hodnocení vlivů konsolidace

Z důvodu posouzení účinnosti i možných negativních vlivů konsolidace byly systematicky studovány a srovnávány základní vlastnosti neošetřených a zpevněných tělísek. Při výběru metod hodnocení bylo vycházeno z požadavků pro strukturální konsolidaci poréznych materiálů stručně formulovaných v tabulce Tab. 33.

Tab. 33: Základní požadavky strukturální konsolidace<sup>68</sup>

Kvalitativní požadavek	Specifikace
Konsolidační schopnost	Maximální dosažitelná, optimálně pevnost na úrovni původní nedegradované horniny
Rovnoměrná distribuce nového pojiva v ošetřené části materiálu	Co nejnižší rozdíly v hloubkovém pevnostním profilu; při kontrole pomocí UZ transmise optimální tolerance rozptylu rychlosti UZ signálu do 10-15% při měřeních ve vzájemné vzdálenosti 1 cm
Penetrační schopnost	Maximální dosažitelná, umožňující zpevnění degradovaného materiálu v celém objemu a podle potřeby propojení s nepoškozeným podkladem
Odolnost vůči stárnutí	Maximální dosažitelná; zcela zásadní je minimalizace rizika vzniku vedlejších korozních produktů, které by mohly urychlit poškození originálu v budoucnu
Minimální změna fyzikálních vlastností souvisejících s transportem vody	Zachování nasákavosti, pórovitosti a propustnosti pro vodní páry na úrovni původního materiálu; optimálně odchylka do 20 %
Minimální změna vzhledu (barva a lesk)	Zachování původní barevnosti a lesku rozlišitelného vizuálně; výjimečně tolerance nepatrného bělavého zákalu nebo nepatrného prohloubení barevnosti

<sup>68</sup> požadavky byly definovány ve spolupráci s vedoucí práce Ing. Zuzanou Slížkovou, Ph.D.

### **3.8.1 Měření ultrazvukové transmise**

Metodika měření rychlosti průchodu UZ signálu u vzorků po konsolidaci byla stanovena na základě zkušeností a výsledků měření stejného parametru u neošetřených tělísek, tak aby mohly být tyto parametry srovnávány.

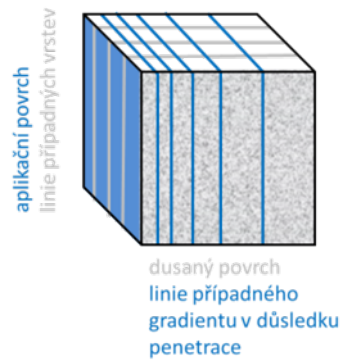
Měření zpevněných vzorků bylo vždy pro danou skupinu ošetřeno stejným typem konsolidantu provedeno na 5ti zkušebních tělískách vysušených v sušárně při teplotě 80 °C po dobu 24 h (s výjimkou tělísek ošetřených produkty KSE, ty byly kondicionovány při přibližně 50% RH). Účinky konsolidace byly posouzeny ve třech různých orientacích zkušebních těles k měřicím sondám, stejně jako v případě neošetřených tělísek. Eliminován byl pouze počet měření provedených v každé této jednotlivé orientaci vzorků. Systematické měření vždy ve 4 měřicích bodech (0,5 cm od okrajů zkušebních tělísek se vzájemnými rozestupy 1 cm) bylo provedeno pouze ve směru od aplikační plochy vzorku směrem do hloubky jeho hmoty s cílem zaznamenat případný gradient způsobený penetrací konsolidantů do materiálu volným kapilárním vsakováním z horizontálně orientované plochy (viz Obr. 65) U zbývajících dvou orientací byla tělíska proměřena pouze v jejich středu.

Měření kolmé k aplikační ploše mělo za cíl odhalit případnou odchylku vzniklou možným tzv. nasčítáním schopnosti UZ signálu procházet různě zpevněnými částmi materiálu napříč možným gradientem a zároveň nám poskytuje informaci o nárůstu rychlosti UZ signálu v celé hmotě tělíska ve směru od aplikační plochy bez ohledu na distribuci účinné látky konsolidantu – informace je tedy sumární.

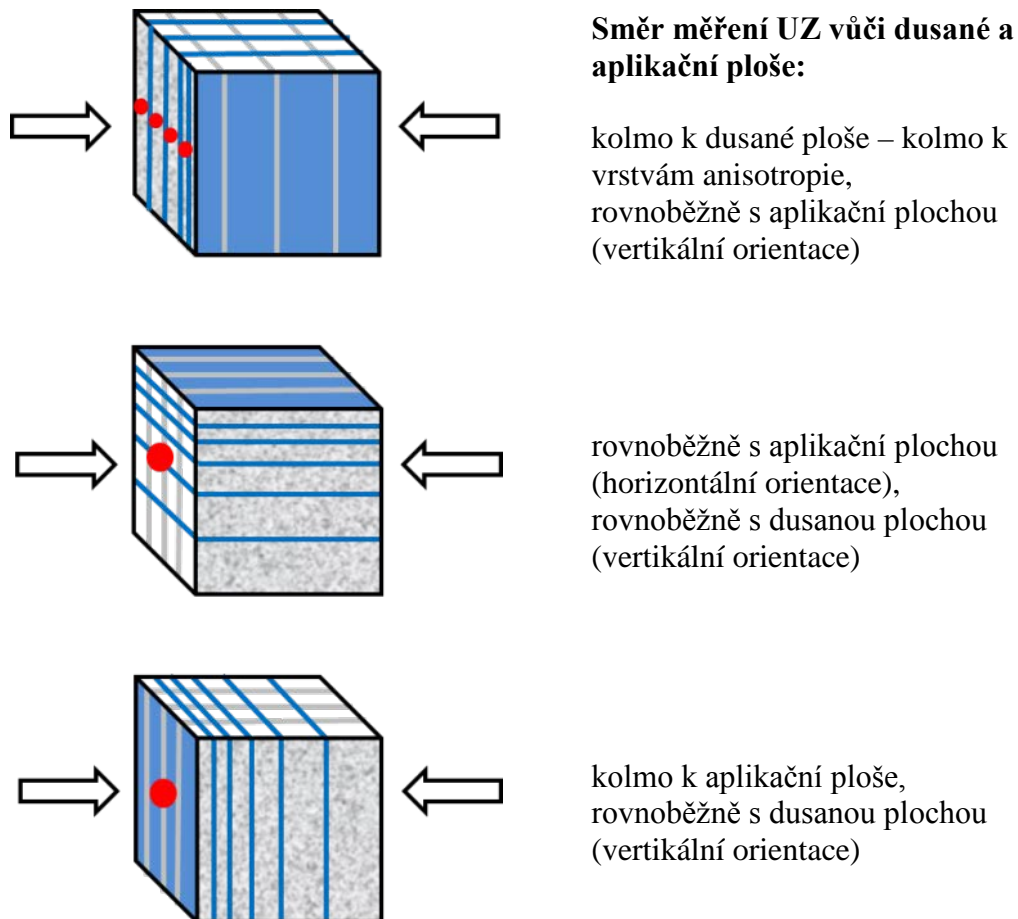
U měření ve středu tělíska provedeného rovnoběžně s aplikační plochou získáváme informaci o míře nárůstu rychlosti průchodu UZ v hloubce cca 2 cm pod povrchem tj. ve středu krychlového tělíska. Tyto hodnoty jsou vhodné ke vzájemné komparaci všech konsolidovaných tělísek.

Specifikace použitého přístroje (zapůjčeného kolegy z ÚTAM AV ČR) a parametry měření jsou shodné jako u měření UZ na neošetřených tělískách a tyto údaje jsou uvedeny v kapitole 3.6.3 Měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu.

Způsoby a směry všech měření jsou graficky znázorněny na následujícím obrázku Obr. 66.



**Obr. 65: Konsolidované zkušební tělísko se znázorněním případné vrstevnatosti vzorku a s možným gradientem koncentrace pojiva vzniklým v důsledku nerovnoměrného rozložení konsolidantu**

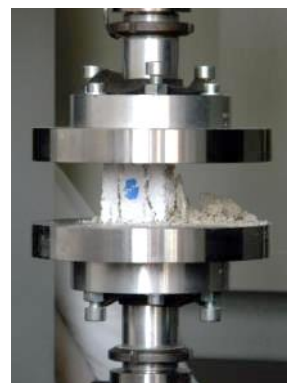


**Obr. 66: Metodika měření rychlosti průchodu UZ signálu na tělískách po konsolidaci**

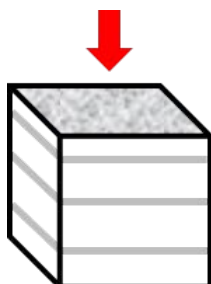
### 3.8.2 Měření pevnosti v tlaku

Měření pevností v tlaku bylo provedeno v laboratoři Fyzikálně-mechanické zkušebny plastů a kompozitních materiálů v Oddělení syntetických polymerů, vláken a textilní chemie Ústavu chemie a technologie makromolekulárních látek (ÚChTML) na Fakultě chemicko-technologické Univerzity Pardubice v Pardubicích. Měření bylo provedeno ve spolupráci s Ing. Lubošem Prokúpkem, PhD. a Dagmar Pitthardovou.

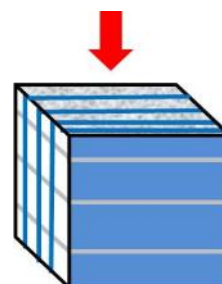
Měření pevnosti v tlaku bylo provedeno vždy na 4 kusech zkušebních tělísek ošetřených stejným typem konsolidantu v dané koncentraci za definovaných podmínek aplikace. Aby byl vyloučen vliv případné anisotropie (vrstevnatosti) zkušebních těles způsobené metodikou jejich přípravy dusáním, byla tělíska drcena v kolmém směru na dusanou plochu, tedy aplikační plocha vzorků tvořila bočníci krychle, jak znázorňují následující obrázky.



Obr. 67: Měření pevnosti v tlaku na zkušebních tělískách, orientace aplikační plochy vzorku vyznačená modrou značkou.



Obr. 68: Neošetřené zkušební tělísko a jeho orientace při měření pevnosti v tlaku – kolmo na dusanou plochu i případné vrstvy vzniklé dusáním



Obr. 69: Stejná situace jako na obrázku vlevo u ošetřených zkušebních tělísek, s modře vyznačenou aplikační plochou a směrem penetrace konsolidantů

#### Metoda měření:

Univerzální zkušební stroj MTS Adamel Lhomargy (zkušební trhačí přístroj) s měřicí hlavou 4/M-20kN o rychlosti posunu příčnicku 2 mm/min (tj. rychlost měření); čelisti na měření pevnosti v tlaku.

*„Měřicí přístroj - trhačka MTS – 4/M je jednoduchý, kompaktní a praktický přístroj pro testování všech materiálů, jejichž pevnost v tahu nepřekračuje 20kN. Ovládat přístroj je možno, jednak manuálně na digitálním displeji, tak také pomocí počítače se speciálním softwarem a s možností vytvoření různých programů pro jednotlivá měření a různé typy vzorků.“*

*Přístroj je jednofázový 220V, 50Hz, 5A. Přístroj má dva pracovní prostory o max. síle 20kN v tahu i tlaku.*

*Měření zátěže se provádí pomocí 5 vzájemně zaměnitelných čidel, přesnost měření zátěže je 0,5% z dané hodnoty nebo 0,1% z plné výchylky čidla. Trhačka splňuje požadavky norem NF.A. 03-501 třída O, DIN 51220 třída 0,5, BS 1610 A1 a ASTM E4. Rozsah rychlosti je 0,001 až 500 mm/min programovatelná klávesnicí v krocích 0,1 mm/min, s přesností 0,1%. Automatická rychlost zpět je 500 mm/min, s pomalým dojezdem do výchozí polohy. Čelisti jsou mechanické s namontovaným rychloupínacím trnem.“<sup>69</sup>*

### **3.8.3 Měření základních fyzikálních vlastností pro posouzení důsledků konsolidace**

Na zkušebních tělískách konsolidovaných prostředky na bázi nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  byly orientačně naměřeny základní vlastnosti vztahu materiálu k vodě jako je kapilární a objemová nasákavost a z ní vypočítaná objemová nasákavost, neboli celková vodě otevřená pórovitost. Na vzorcích ošetřených konsolidanty KSE tyto vlastnosti naměřeny v rámci diplomové práce nebyly, jelikož byly k testování přiřazeny pouze pro obecnější porovnání především docíleného konsolidačního efektu a praktických a ekonomických aspektů jejich využití v porovnání s vápennými nanosuspenzemi.

Měření nasákavosti u konsolidovaných vzorků bylo provedeno pouze orientačně, abychom ověřili zda konsolidanty nezpůsobují nechtěné nebo negativní změny chování substrátu ve vztahu k vodě. Díky předcházející zkušenosti, kdy jsme testovali nižší koncentrace těchto prostředků v méně cyklech (obsah vpravené účinné látky byl zhruba poloviční) na stejném typu substrátu, jsme zjistili, že měření prováděná vodu vždy na vybrané skupině zkušebních tělísek u nich vedla k znatelnému zhoršení mechanických vlastností než u tzv. nenamáčených tělísek (zaznamenáno shodně měřeními pevnosti v tlaku a UZ transmisí). Tento jev ale s vysokou pravděpodobností nijak nesouvisel s nestabilitou účinných látek konsolidantů, ale byl spjat s mechanickým narušením – rozplavením jednotlivých zrn substrátu v důsledku nízké míry konsolidace. Vzpomeňme, že na neošetřených tělíscích nebylo možné žádné parametry vodou naměřit, protože se okamžitě po kontaktu s vodou rozpadala.

Na základě zkušeností nejenom s riziky těchto měření, ale také s trendy změn měřených vlastností u ošetřených zkušebních tělísek byly tyto parametry ověřeny pouze u jednoho tělíska z dané série. Přesněji tedy k měření byla použita pouze jedna polovina tělíska,

<sup>69</sup> Autorem popisu měřicího přístroje je Dr. Ing. Luboš Prokůpek

jelikož druhá byla ponechána na studium mikrostruktury. Z celkového počtu pěti tělísek bylo nutné minimálně 4 kusy zachovat (za stejných podmínek) pro měření pevností, aby mohlo dojít ke statistickému vyhodnocení naměřených výsledků. Hodnoty získané měřením nasákavosti tedy nemohly být statisticky vyhodnoceny a výsledky mají pouze hrubě dokumentovat změnu substrátů po konsolidaci.

### **Metodika stanovení objemové nasákavosti a celkové otevřené pórovitosti vodě**

Metodika měření vychází z příslušných norem a směrnic uvedených v kapitole 1.2.3.4 Základní vlastnosti vápence.

### **Metodika měření kapilární nasákavosti vodou volným vztlínáním:**

Vybraná tělíška byla v polovině od aplikační plochy směrem k podstavě rozřezána pilou na polovinu a části vzorků určených na měření nasákavosti byly pro měření upraveny tak, aby mohla kapalina do zkušebních tělísek vzlínat pouze plochou, na kterou byly aplikovány konsolidanty. Stěny polovin vzorků byly natřeny samo vulkanizační, modifikovanou, latexovou emulzí Arte Mundit, která po zaschnutí vytvoří elastický film, který nepropouští vodu. Po zaschnutí resp. vulkanizaci této ochranné vrstvy byla na tělíškách naměřena kapilární nasákavost vodou.

Takto připravené vzorky byly umístěny aplikační plochou na mřížku do nádoby s vodou (výše hladiny přibližně 0,5 cm) a byla sledována jejich nasákavost volným kapilárním vztlínáním. Množství přijaté kapaliny bylo zaznamenáváno gravimetricky. Na jednotlivých tělíškách byla hmotnost přijaté kapaliny vždy po uplynutí 20 s zaznamenávána do doby, než se voda vyvzlínala na povrch, tedy k původní podstavě tělíška. U každého tělíška byl počet kroků měření do doby nasycení materiálu vzorku odlišný a jeho rozptyl se pohyboval od 1 do 10 měřících kroků, což už samo o sobě vypovídá o velkých vzájemných rozdílech měřených tělísek. U některých tělísek bylo po rozlomení volným okem patrné, že obsah účinné látky ve středu tělíška není stejný jako na jeho okraji, což způsobovalo, že kapilární vztlínání proto neprobíhalo u některých vzorků zcela rovnoměrně. Vzhledem k možnému zkreslení výsledků těmito vlivy a také kvůli porovnatelnosti naměřených hodnot s neošetřeným substrátem byly tedy součinitele nasákavosti vypočítány pouze z prvního údaje o množství vsáknuté vody, tedy po 20 s stejně jako u neošetřeného substrátu.

Součinitel nasákavosti byl vypočítán stejně tak, jak je uvedeno v kapitole 1.2.3.2 Měření nasákavosti povrchů kamene. Je však nezbytné upozornit, že výsledky tohoto měření

jsou s výsledky uvedenými ve zmiňené kapitole neporovnatelné, kvůli odlišné metodice způsobu měření.

### **3.8.4 Posouzení změn barevnosti**

Posouzení barevných změn v důsledku konsolidace bylo provedeno subjektivním vizuálním hodnocením na základě porovnání ošetřených tělísek s neošetřeným substrátem. Použití nějaké optické hodnotící metody např. kolorimetrie nebylo v tomto případě vhodné vzhledem k hrubé struktuře povrchu zkušebních tělísek a vizuální hodnocení volným okem bylo pro požadovanou míru komparace dostatečné.

Hodnoceny byly především barevné změny aplikačních povrchů. Vzhledem k tomu, že na rozdíl od aplikace na reálném objektu (např. soše, nebo omítce) v případě laboratorních tělísek docházelo k odparu rozpouštědel z konsolidantů na všech 5ti stranách (omezeně i na podstavě díky uložení tělíska na mřížku), byly u vzorků hodnoceny také boční stěny. Odpar rozpouštědel ze zkušebních tělísek se liší od aplikace na reálném objektu, kde dochází k odpařování prchavých složek konsolidantů (a případné zpětné migraci) obvykle pouze jednou stranou (směrem) a proto mohou být výsledky hodnocení změn barevnosti do jisté míry odlišné od reálných podmínek v restaurátorské praxi. V případě zpětné migrace tj. transportu účinné látky k povrchu při odpařování rozpouštědla můžeme předpokládat, že se tento jev v reálné situaci tzv. nasčítá a jeho projevy v podobě bílých zákalů tak mohou být výraznější, než u zkušebních tělísek, kde se tento jev rozloží na větší odpařovací plochu.

### **3.8.5 Posouzení změn makro a mikrostruktury**

Posouzení změn makrostruktury bylo provedeno podobným, vizuálním hodnocením především barevných změn ve hmotě zkušebních tělísek, dle které bylo možné pozorovat distribuci konsolidantu v substrátu.

Mikrostruktura substrátu po konsolidaci byla sledována pouze u jednoho typu konsolidačního prostředku, který vykazoval nejlepší výsledky v dílčích částech experimentu a který byl v konečné fázi zvolen jako prostředek vhodný ke konsolidaci sochy světice č. 1.

Z daného zkušebního tělíska byl zhotoven nábrus<sup>70</sup>, na kterém byl zachycen celý průřez zkušebního tělíska včetně všech jeho stran. Prostřednictvím optické polarizační mikroskopie a rastrovací elektronové mikroskopie byla sledována distribuce konsolidantu a způsob jeho ukládání v porézním systému tělíska.

---

<sup>70</sup> Vzorek výbrusu byl zhotoven firmou Geo-Präp, Andreas Wagner, Mozartstraße 23, 3730 Eggenburg



K analýzám<sup>71</sup> byly využity metody a přístroje uvedené v kapitole 1.2.3.1 Průzkum povrchových vrstev sochy světice<sup>72</sup>

### 3.9 Výsledky provedených měření a rozborů

#### 3.9.1 Posouzení efektivity konsolidace metodou ultrazvukové transmise

Po vyhodnocení dat měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu ve středních oblastech zkušebních tělísek (tj. dvě střední hodnoty měření ve směru od aplikační plochy (1,5 a 2,5 cm od aplikační plochy) a hodnoty měření ve středu tělísek u dvou zbývajících orientací vzorků k měřícím sondám) nebyly mezi těmito průměrnými hodnotami shledány u jednotlivých skupin vzorků zásadní rozdíly. To vypovídá o tom, že metodiky jednotlivých způsobů měření příliš neovlivňují výsledné naměřené hodnoty ve středu tělísek. Z tohoto důvodu byla pro usnadnění vyhodnocení použita data průměrů dvou středních hodnot naměřených ve směru od aplikační plochy vzorků. Z těchto průměrných hodnot byl pro každou skupinu vypočítán procentuální nárůst rychlosti průchodu UZ signálu ve vztahu k neošetřeným tělískům. Tento údaj byl také doplněn odchylkou tj. podílem rozdílů maximálního a minimálního procentuálního nárůstu rychlosti v dané skupině vzorků. Data byla vynesena do souhrnného grafu, který umožňuje komparaci všech testovaných konsolidantů. Dále byly zpracovány grafy pro jednotlivé skupiny konsolidantů, jejichž výtěžek výsledné účinné látky je přibližně podobný, aby je bylo možné lépe vzájemně porovnat.

Zvláštní graf byl ještě zpracován pro produkty KSE, které byly v průběhu zrání touto metodou monitorovány dvakrát, jednou ve stejné době jako ostatní konsolidanty na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tj. po 13 dnech a podruhé po 41 dnech zrání, kvůli odlišnému způsobu a kinetice jejich vytvrzování.

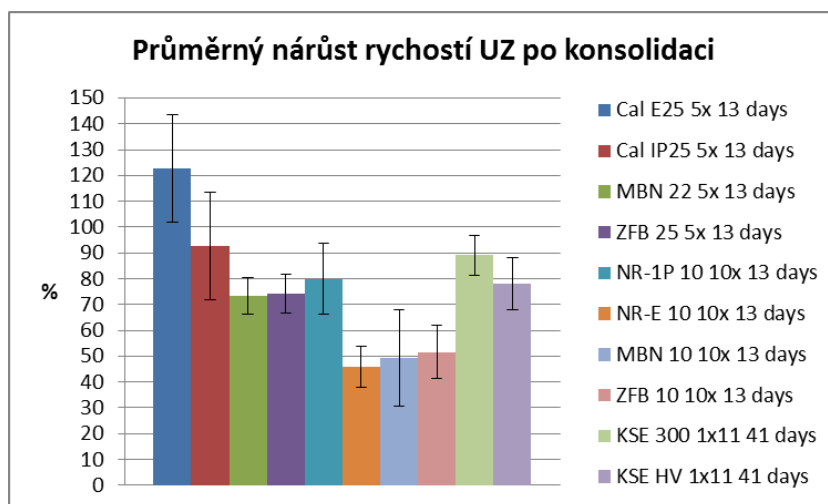
Pro srovnání účinků stejných typů konsolidantů na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  aplikovaných v různých koncentracích byl také zhotoven graf znázorňující nárůst rychlostí UZ po ošetření produkty MBN a ZFB, oba v cca 1% a cca 2,5% koncentraci.

Zpracována byla také data systematického měření tělísek ve 4 bodech tj. hloubkách ve směru od aplikační plochy. Potvrdilo se, že v důsledku aplikace konsolidantů volným kapilárním vsakováním z horizontálně orientované plochy vzorku dochází ke vzniku gradientu. Výsledky těchto měření byly pro dané skupiny vzorků vždy ve shodném místě tj. hloubce měření vyjádřeny jako průměry hodnot rychlostí UZ opět doplněné odchylkou vypočítanou

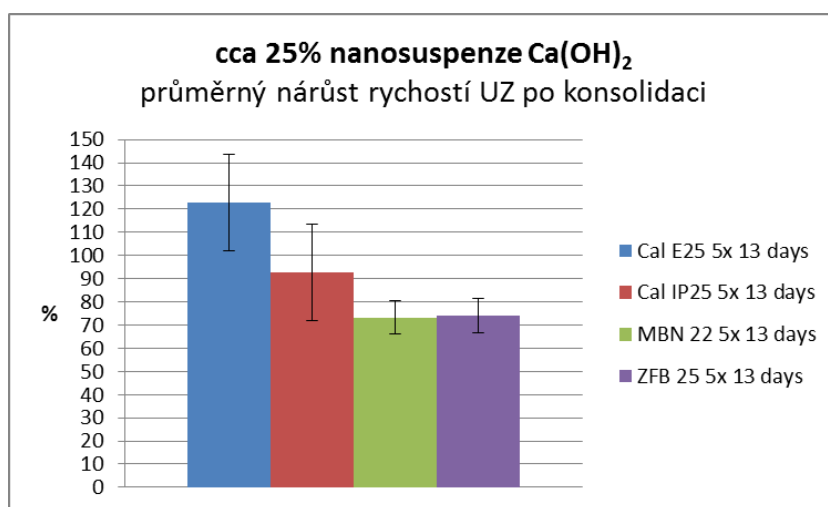
<sup>71</sup> Autorem všech fotografií z rastrovacích elektronových mikroskopů (fa Tescan, fa Fei) je Ing. Karol Bayer, pokud není uvedeno jinak

<sup>72</sup> Měření provedeno ve spolupráci s ing. Karolem Bayerem, KCHT Fakulta Restaurování UPCE v Litomyšli

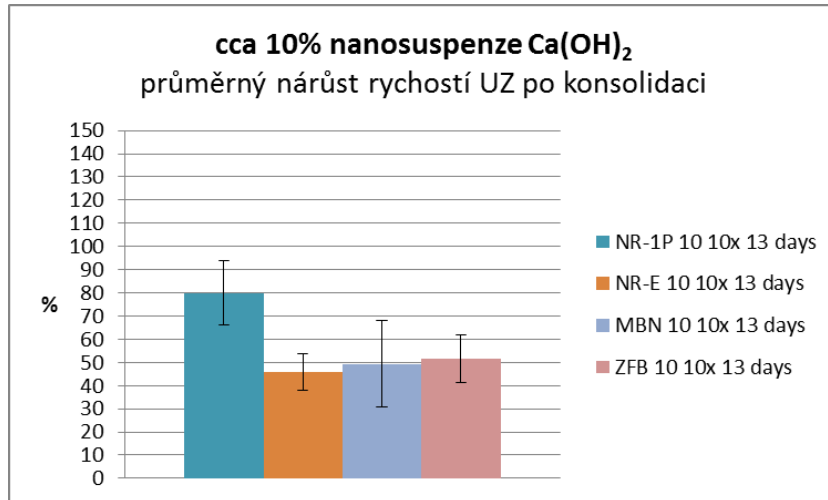
podílem rozdílů nejvyšší a nejnižší naměřené hodnoty. Tyto výsledky byly pro každý typ použitého konsolidantu vyneseny do samostatného pruhového grafu, který názorně ilustruje gradienty vzniklé v důsledku konsolidace daným prostředkem.



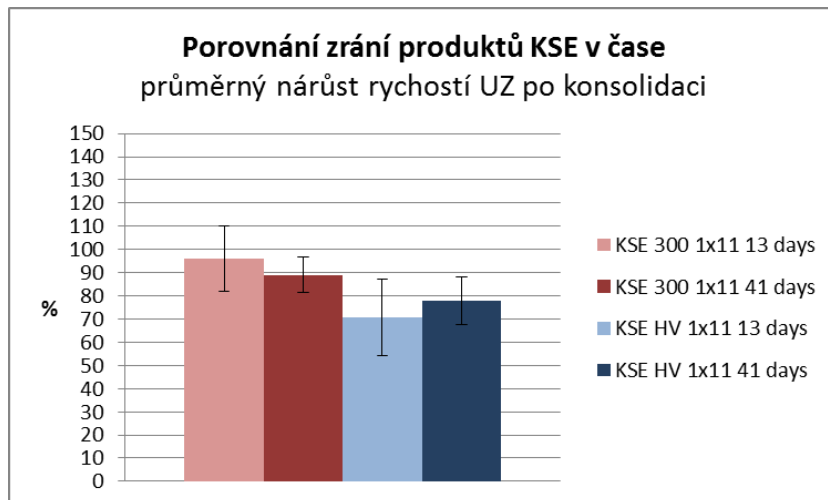
**Graf 8: Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zkušebními tělísky po konsolidaci – přehled všech konsolidantů**



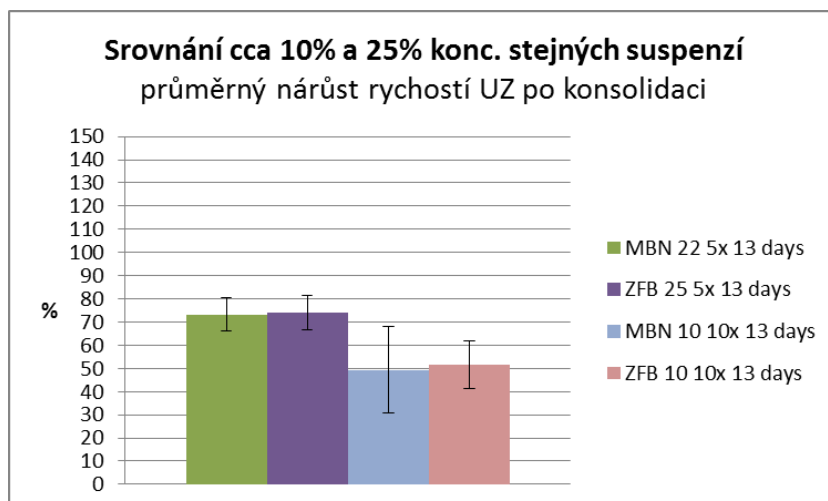
**Graf 9: Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělísky po konsolidaci – konsolidanty na bázi nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o přibližné koncentraci 25 g/l**



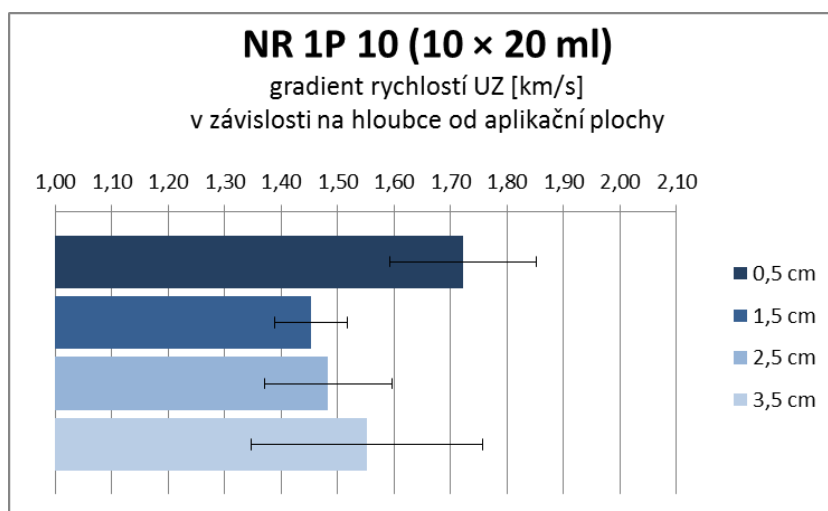
**Graf 10:** Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělísky po konsolidaci – konsolidanty na bázi nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o přibližné koncentraci 10 g/l



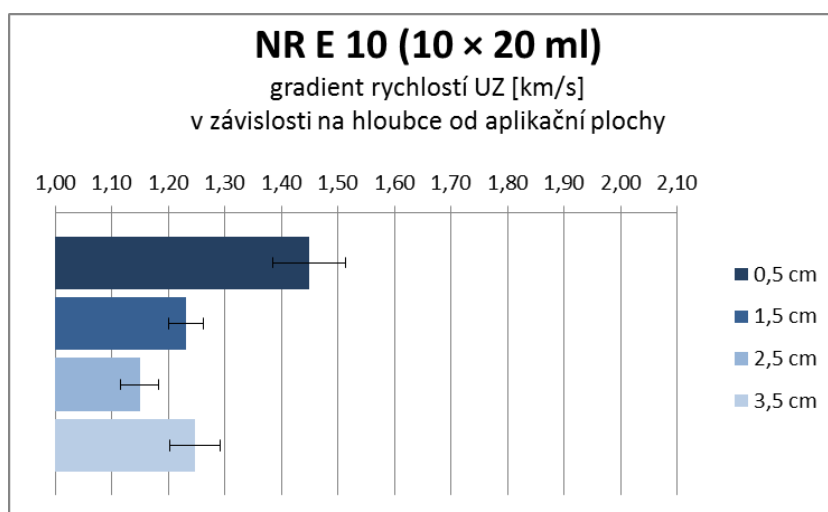
**Graf 11:** Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělísky po konsolidaci – produkty KSE o přibližné koncentraci 300 g/l  $\text{SiO}_2$  gelu – porovnání průběhu zrání po 13 a 41 dnech



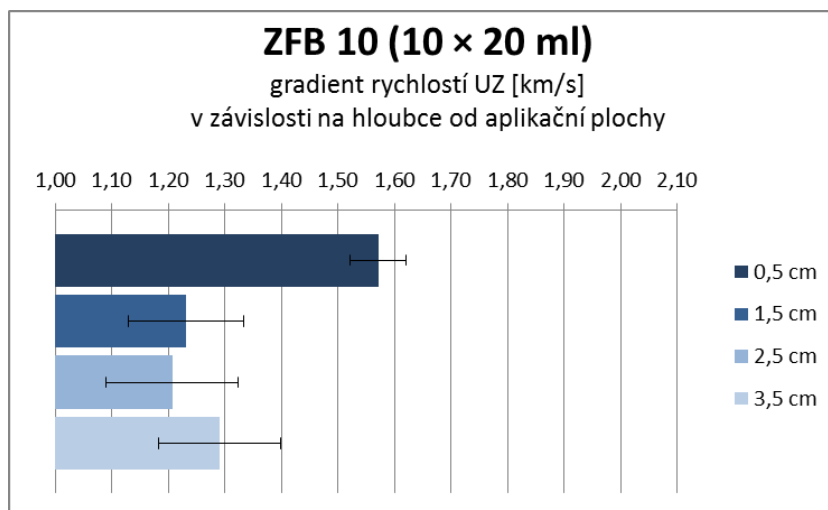
**Graf 12:** Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělisky po konsolidaci – konsolidanty výrobců MBN a ZFB na bázi nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o přibližných koncentracích vždy 10 a 25 g/l



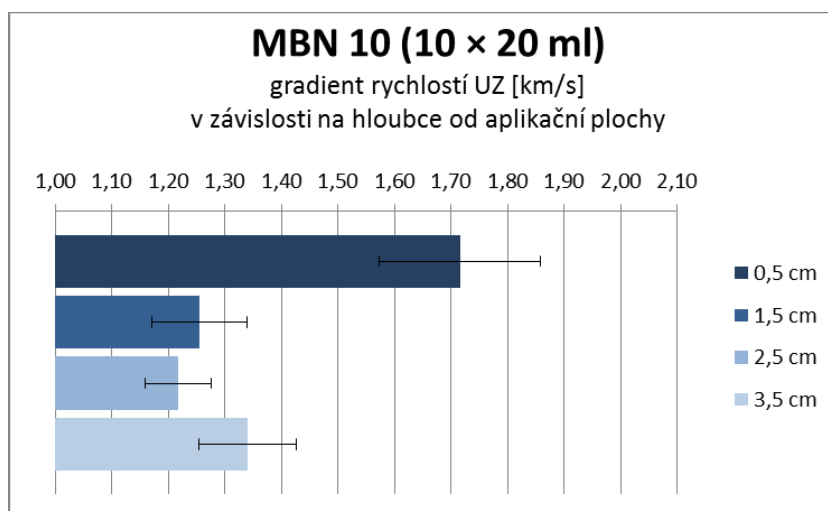
**Graf 13:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – těliska ošetřená nanosuspenzí NR 1P 10



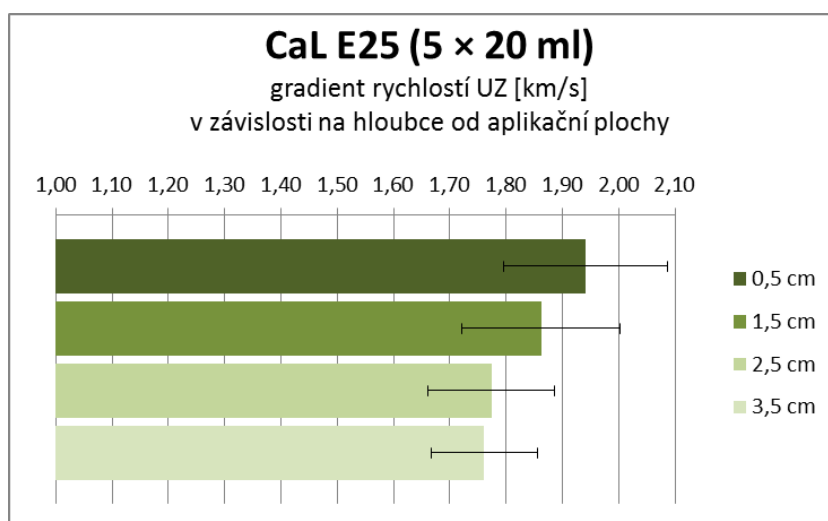
**Graf 14:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – těliska ošetřená nanosuspenzí NR E 10



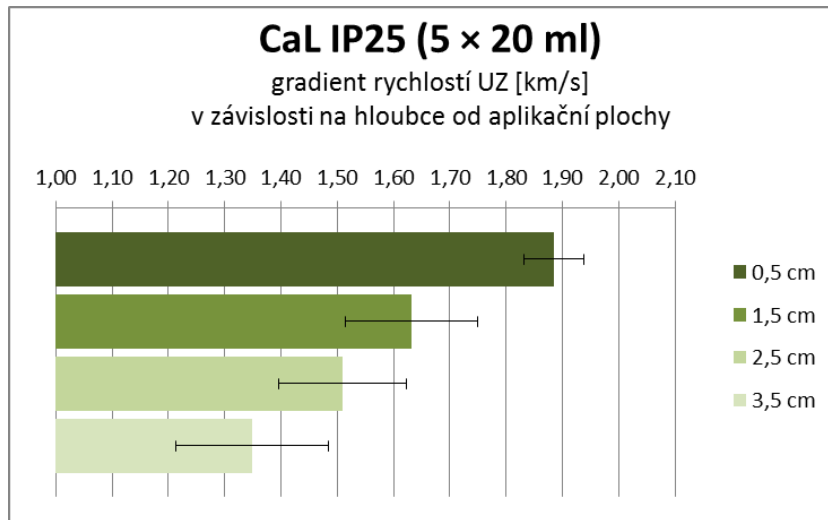
**Graf 15:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspencí ZFB 10



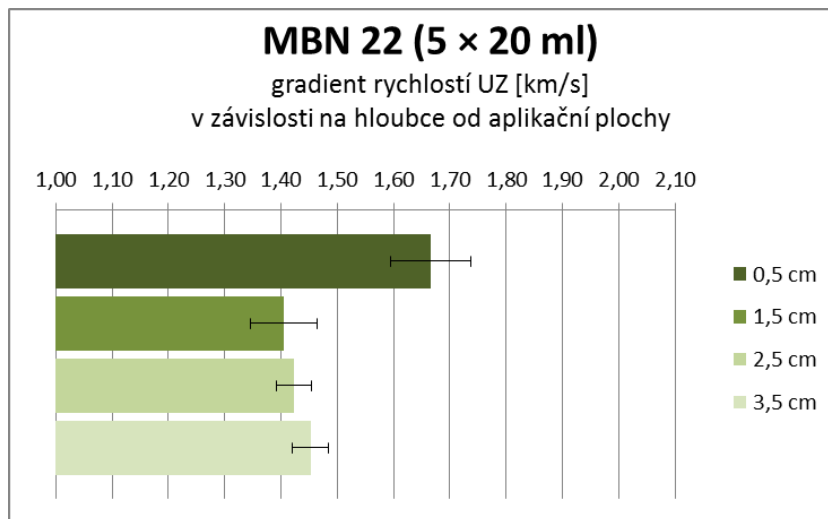
**Graf 16:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspencí MBN 10



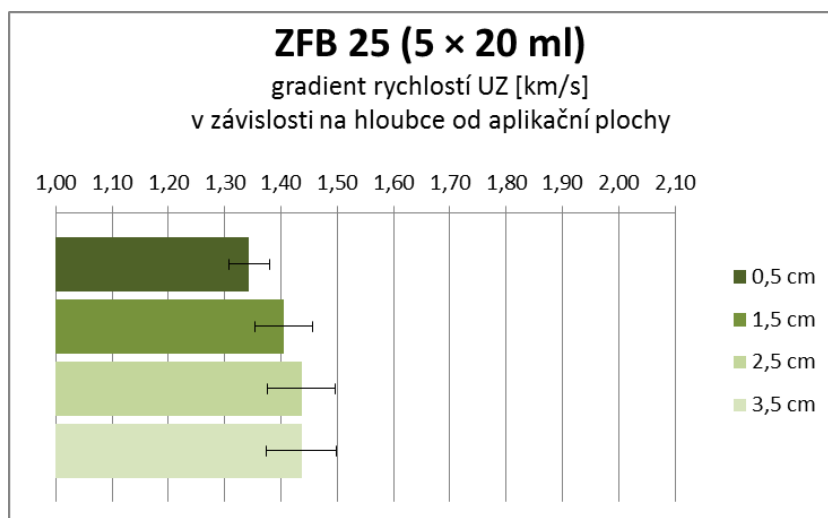
**Graf 17:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspencí CaL E25



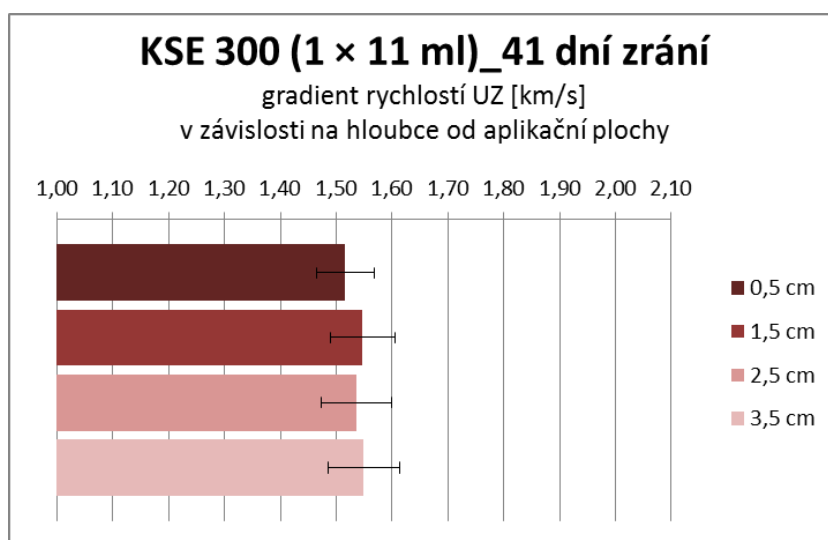
**Graf 18:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí CaL IP25



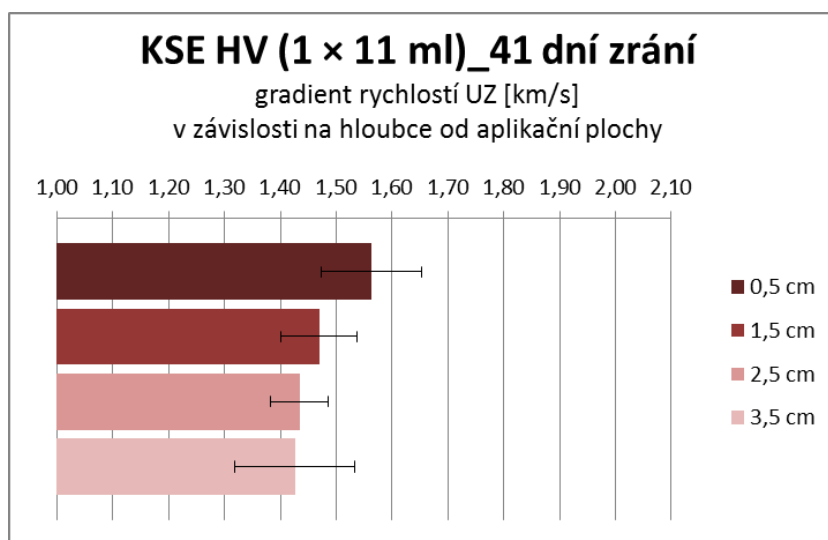
**Graf 19:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí MBN 22



**Graf 20:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí ZFB 25



**Graf 21:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená produktem KSE 300 po 41 dnech zrání



**Graf 22:** Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená produktem KSE HV po 41 dnech zrání

Nejvyšších nárůstů rychlostí průchodu UZ signálu, a to o 123% bylo docíleno pětinasobným ošetřením tělísek produktem CaLoSil®E25. Další dva nejvyšší nárůsty UZ signálu prokázaly přípravky CaLoSil®IP25 a KSE 300, okolo 90%. Naopak nejnižších nárůstů bylo docíleno desetinásobnými ošetřeními zkušebních tělísek prostředky na bázi nanosuspenzí Ca(OH)<sub>2</sub> o přibližné koncentraci 10 g/l, konkrétně produkty Nanorestore E35 (10 g/l), MBN Nf070 (10 g/l) a ZFB 703k (10 g/l), jejichž nárůsty se pohybují okolo 50%, což znamená zhruba méně než poloviční nárůst u nejlepších výsledků.

Zhodnotíme-li vzájemně jednotlivé skupiny testovaných konsolidantů zjistíme, že produkty na bázi vápenných nanosuspenzí o přibližné koncentraci 10 g/l vykazují nejnižší nárůsty rychlostí průchodu UZ signálu. Naopak tomu je u skupiny stejných produktů o

koncentraci přibližně 25 g/l, které se jako skupina s nárůsty v průměru o přibližně 90% řadí na první pozici. Konsolidanty na bázi esterů kyseliny křemičité, produkty řady KSE se s průměrným nárůstem o přibližně 84% řadí na druhou příčku, těsně za tyto vápenné systémy.

V rámci jednotlivých skupin se např. u konsolidantů s nejnižším nárůstem rychlosti průchodu UZ signálu tj. konsolidanty o koncentraci cca 10 g/l podařilo nejlepšího výsledku docílit suspenzí Nanorestore 1P35 (10 g/l), která by se tak mohla svou nejvyšší hodnotou nárůstu o 80% co do úspěšnosti zařadit ke skupině suspenzí o koncentraci cca 25 g/l. Ostatní suspenze z této skupiny tak dobrých výsledků nedosahují a nárůsty jejich rychlostí jsou přibližně o 30% nižší než u nejlepšího produktu z dané skupiny.

U skupiny suspenzí s přibližnou koncentrací cca 25 g/l, nejenom v níž dosahuje nejlepšího výsledku suspenze CaLoSil<sup>®</sup>E25, vykazuje vysoký nárůst rychlostí UZ produkt stejného výrobce CaLoSil<sup>®</sup>IP25. Produkty MBN Nf070 (22 g/l) a ZFB 703k (25 g/l) dosahují velmi podobného výsledku, který je ale ve srovnání s nejvyšším nárůstem u CaLoSilu<sup>®</sup>E25 o přibližně 50% nižší.

Konsolidanty řady Remmers tvoří nejvyrovnanější skupinu v celé škále hodnocených konsolidantů. Vzájemný rozdíl mezi dosaženým navýšením rychlosti průchodu UZ signálu je u těchto konsolidantů ve srovnání s ostatními pouze 11%. U produktu KSE 300 HV, který je výrobcem určen pro tento typ materiálu, byly naměřené nárůsty rychlostí o uvedený rozdíl nižší než u produktu KSE 300, jehož nárůst je přibližně 89%.

Dalším trendem sledovaným pomocí zařízení na měření rychlosti průchodu UZ signálu byl gradient způsobený různou distribucí účinné látky v testovacích tělíscích.

S výjimkou produktů ZFB 703k (25 g/l) a KSE 300, kde byl v malé míře zachycen spíše obrácený směr gradientu (od spodku směrem k aplikační ploše), se tento trend, tedy vyšší míra nárůstu rychlosti průchodu UZ v horní části vzorku v oblasti bližší aplikační ploše projevil u všech testovaných konsolidantů v různé míře.

Výskyt nejvýraznějších gradientů byl shodně zaznamenán u celé skupiny zkušebních tělísek desetinásobně ošetřených nižší koncentrací vápenných nanosuspenzí tedy 10ti g/l. U všech použitých prostředků se projevuje výrazná odlišnost rychlostí ve hmotě vzorků, indikující rozdílnou distribuci účinných látek konsolidantů. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny v oblasti 0,5 cm pod aplikačním povrchem. Rozdíl rychlostí naměřených v tomto místě představuje v porovnání s ostatními měřeními ve větších hloubkách ve velké většině případů až 50%. Ve všech čtyřech případech můžeme pozorovat nižší hodnoty naměřených rychlostí UZ – potažmo nižší obsah účinných látek ve střední oblasti tělísek. Vyšší rychlosti byly na rozdíl od



zmíněných dvou měření ve středu tělísek zaznamenány v dolní části vzorků tj. v hloubce 3,5 cm od aplikačního povrchu. Tento jev by mohl mimo vzniku gradientu v důsledku jakési filtrace účinné látky konsolidantu při jejím pronikání do hloubky materiálu (čemuž tento výsledek částečně protiřečí) indikovat také pravděpodobný další pohyb účinné látky v materiálu při odparu rozpouštědla. To, že jsou středy tělísek zřejmě méně zpevněné než povrch a dolní část vzorku může poukazovat na možnou migraci nanočástic materiálem při odpařování rozpouštědla směrem ze středu materiálu k jeho stěnám a také v důsledku gravitace do jeho spodní části. Tyto jevy jsou velmi pravděpodobně u jednotlivých prostředků výrazně ovlivněny rozpouštědly, ve kterých jsou nanočástice dispergovány, a jejich vlastnostmi, především rychlostí jejich odparu. Výraznou roli zde může představovat také velikost částic prostředků a tedy jejich schopnost se pohybovat porézním systémem. Tento jev je dozajista výrazně ovlivněn také podmínkami prostředí, ve kterém k odparu rozpouštědla dochází, tzn. z nejdůležitějších např. teplotou, vlhkostí a pohybem vzduchu, atmosférickým tlakem. Rozpoznání těchto fenoménů by ale vydalo na samostatnou práci podobného rozsahu, a proto je zde tato možnost pouze v hrubých obrysech nastíněna. Popsané jevy se dají v tuto chvíli shrnout následovně: s největší pravděpodobností jsou výsledky rychlostního profilu tělísek (který by měl korelovat s profilem distribuce účinné látky v jejich hmotě) ve směru od aplikační plochy k jejich podstavě způsobeny kombinací tzv. filtrace částic účinné látky v horní části tělísek a jejich další migrací v materiálu při odparu rozpouštědla a také vlivem gravitace, na což poukazuje vyšší obsah účinné látky ve spodní úrovni vzorku (kde je díky způsobu uložení vzorků část rozpouštědla zadržována) než v jeho střední části. Tento jev je u tělísek ošetřených desetkrát méně koncentrovaným konsolidačním prostředkem, na rozdíl od tělísek ošetřených pětkrát koncentrovanějšími prostředky, patrně způsoben díky dotaci dvojnásobného objemu rozpouštědla do hmoty tělísek a díky tomu zároveň kvůli delší době, kdy se částice mohou pohybovat materiálem.

Výše popsáný jev je u třech skupin tělísek ošetřených konsolidanty na bázi  $\text{Ca(OH)}_2$  s koncentrací okolo 25 g/l také možné částečně zaznamenat. Mimo produkt ZFB 703k (25 g/) (jeho specifický rychlostní profil bude popsán samostatně) můžeme u zbývajících konsolidantů zaznamenat také gradient ve směru od aplikační plochy směrem ke spodní straně vzorku. V tomto případě se ale u každého konsolidantu projevuje ve hmotě tělíska trochu odlišně.

Nejrovnoměrnější rozložení rychlostního profilu vykazují vzorky ošetřené produktem CaLoSil<sup>®</sup>E25 u kterého profil vypadá tak, jako by byla účinná látka konsolidantu skutečně filtrována ve směru do hloubky materiálu testovacího tělíska. Směrem do hloubky vzorku

rychlosti téměř lineárně klesají, rozdíly mezi nimi nejsou ve srovnání např. s CaLoSilem®IP25 tak výrazné. U tohoto konsolidantu, který v době jeho aplikace výrazně překračoval výrobcem uváděnou dobu použitelnosti, byla již v průběhu nanášení patrna zhoršená schopnost penetrace. Na vzorcích byl po aplikaci zřejmý také nejvýraznější bílý povlak, který indikuje zachycení velké části účinné látky na aplikačním povrchu (těmto vizuálním jevům ale bude věnována samostatná kapitola). Výsledek rychlostního profilu u tohoto konsolidantu velmi dobře koreluje se zkušeností při nanášení konsolidantu a také s výskytem bílého zákalu, který indikuje zmíněnou filtraci částic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Tento produkt byl i s ohledem na jeho stáří použit právě proto, aby mohly být zmapovány podobné důsledky jeho stárnutí a aby tato jednotlivá data mohla být komparována s výsledky pevností – na tomto příkladu se totiž ukazuje, že měření pevnosti v tlaku je pro hodnocení efektivity konsolidace podobných systémů provázených popsány jevy příliš sumární a vůbec neposkytuje informaci o distribuci účinné látky v materiálu. Může se například stát, že tělíška, u kterých by velká část účinné látky namigrovala k povrchu, by vykazovaly vyšší pevnosti než tělíška, v nichž je konsolidant rovnoměrně distribuován, což by ve většině případů mělo být cílem úspěšné strukturální konsolidace.

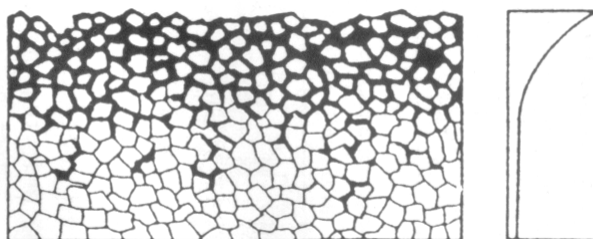
U vzorků ošetřených produktem MBN Nf070 (22 g/l) se rovněž v úrovni 0,5 cm pod aplikačním povrchem nachází oblast s výrazně vyšší rychlostí průchodu UZ. V dalších třech hloubkách jsou už ale hodnoty vyrovnanější ale dosahují pouze něco málo přes polovinu rychlosti UZ v horní části vzorku.

Ojedinelým případem je v této skupině distribuce prostředku ZFB 703k (25 g/l) – odvozená od rychlostního profilu – ve hmotě testovacích tělísek. Rychlostní profil u tohoto konsolidantu má zcela opačný trend než u ostatních prostředků, tedy směrem od povrchu do hloubky materiálu dochází k mírnému, můžeme říci také téměř lineárnímu, nárůstu rychlosti průchodu UZ. Tento jev by mohl být způsoben například větším podílem malých částic, které lépe pronikají hlouběji do struktury materiálu. Přesto, že je účinná látka tohoto konsolidantu nejrovnoměrněji rozložena ve hmotě tělísek, podobně jako tomu je u prostředku CaLoSil®E25, není u tělísek ošetřených tímto konsolidantem možné zaznamenat takový nárůst rychlosti jako právě u CaLoSilu®E25. Když si navíc představíme, typický příklad pevnostního profilu viz Obr. 70 u silně korodovaných materiálů, nezdá se býti způsob ukládání účinné látky CaLoSilu®E25 s vyšší distribucí na povrchu materiálu ke škodě, ale spíše naopak.

Poslední skupina konsolidantů na bázi esterů kyseliny křemičité zřejmě nezpůsobuje vznik výrazných gradientů ve hmotě tělísek. U prostředku KSE 300 je profil rychlosti průchodu UZ signálu velmi vyrovnaný, zdá se, že prostředek je rovnoměrně rozložen v celé hmotě

testovaných tělísek. Vlivem prostředku KSE 300 HV, který je určen pro karbonátové materiály, dochází k podobnému rozložení účinné látky konsolidantu jako u prostředku CaLoSil®E25, rychlosti jsou však v jednotlivých místech měření přibližně o 0,4 km/s nižší.

Z měření rychlosti průchodu ultrazvukového signálu materiály zkušebních tělísek i se zohledněním hodnocení vzniklých gradientů v důsledku konsolidace jasně vyplývá, že prostředkem CaLoSil®E25 bylo docíleno nejlepšího výsledku v obou těchto hodnocených parametrech. Rychlosti, které jsou u tohoto prostředku nejvyšší, dosahují přibližně od 1,75 do 1,95 km/s, což jsou hodnoty blížící se měření na podobných typech přírodních vápenců. Konkrétně kámen sochy světice, na který by měl být výsledek tohoto testování aplikován a je jeho požadavkům přizpůsoben, dosahuje v tzv. „zdravé“ části (měřeno na vrtném jádru) tj. průměrných rychlostí UZ 1,7 km/s s tím, že hodnoty měření se pohybují od 1,36 do 2,02 km/s což poukazuje na vysokou nehomogenitu této horniny.



Obr. 70: Pevnostní profil pískovatění povrchu – degradace povrchové vrstvy kamene<sup>73</sup>

<sup>73</sup> GRIMM, Wolf-Dieter. Naturwerksteine und Denkmalgesteine: Gewinnung, Verwendung und Verwitterung unter geogenen und anthropogenen Umwelteinflüssen. *Die Geowissenschaften*. 1992, roč. 1992, 9-10, s. 251-256.



**Obr. 71: Příklad pohybu rozpouštědla při jeho odparu – tělísko přibližně 15 h po ošetření prostředkem NR 1P 10**

### 3.9.2 Posouzení efektivity konsolidace měřením pevnosti v tlaku

Pevnosti v tlaku naměřené u konsolidovaných zkušebních tělísek byly vždy v dané skupině 4 měřených tělísek zprůměrovány a rozdíly mezi minimálními a maximálními naměřenými pevnostmi v těchto skupinách byly vyjádřeny střední hodnotou vzájemného rozdílu jako směrodatná odchylka.

Takto zpracované hodnoty měření pevností v tlaku, vyjádřené v MPa jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 34 spolu s údaji o množství skutečně aplikované účinné látky na jedno zkušební tělísko po jejím 100% vyžrání, vyjádřené též v hm. % vztažených na hmotnost tělíška. Naměřené pevnosti u jednotlivých skupin, byly také vyjádřeny jako procentuální nárůsty vůči průměrné pevnosti neošetřených zkušebních tělísek.

Tyto údaje byly vyneseny do grafů.

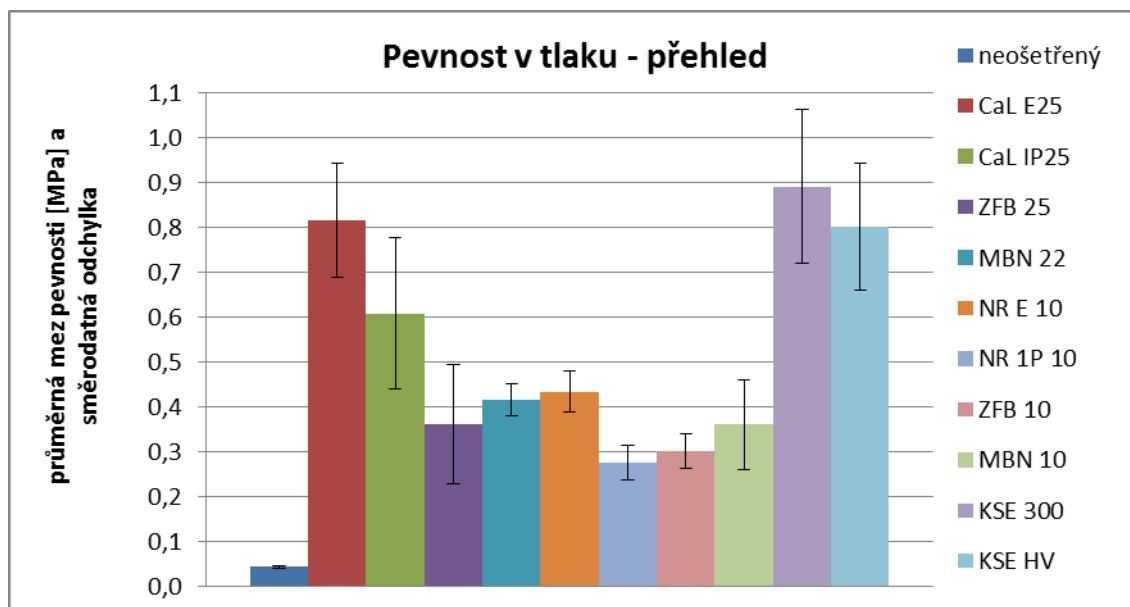
Graf 23 znázorňuje celkový přehled naměřených pevností v tlaku u všech testovaných suspenzí včetně srovnání s neošetřeným standardem. Výsledky naměřené ve skupinách, rozčleněných dle použitých koncentrací testovaných konsolidantů nebo jejich typu, jsou uvedeny vždy v samostatném grafu následovně: nanosuspenze  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o přibližné koncentraci 10 g/l v Graf 24, nanosuspenze  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o koncentraci cca 25 g/l v Graf 25 a estery kyseliny křemičité v Graf 27.

Graf 26 znázorňuje srovnání zpevňujících účinků konsolidantů dvou výrobců MBN a ZFB, které byly aplikovány v odlišných koncentracích a počtech cyklů s přibližně podobným výsledným obsahem účinné látky (u koncentrací 10 g/l je výsledný obsah o něco nižší viz Tab. 34)

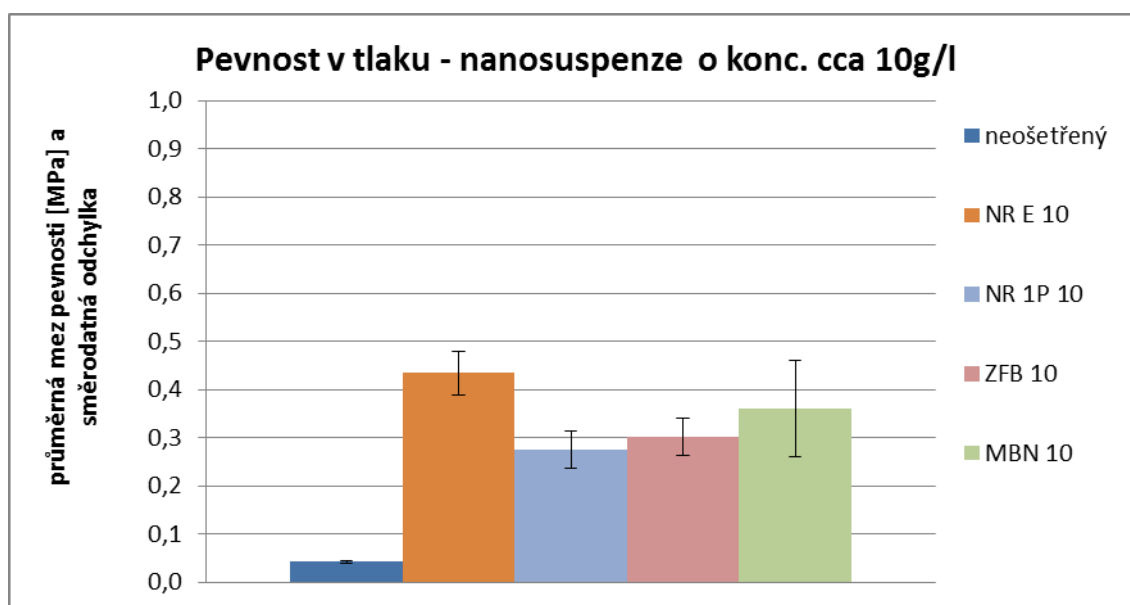
Tab. 34: Výsledky měření pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci

	Množství aplikované účinné látky vypočítané dle gravimetrie po 100% vyzrání [g]	Množství aplikované účinné látky vztaženo na hm. neošetřeného tělíška po 100% vyzrání [hm. %]	Průměrná mez pevnosti MPa ze 4 vz (u standardu z 8mi)	nárůst v % oproti standardu neošetřenému
<b>standard - neošetřený</b>	–	–	0,0438 (+/- 0,0029)	
<b>CaL E25</b>	3,38	3,72	0,815 (+/- 0,127)	1800
<b>CaL IP25</b>	3,35	3,69	0,608 (+/- 0,168)	1317
<b>ZFB 25</b>	3,38	3,72	0,362 (+/- 0,133)	744
<b>MBN 22</b>	3,00	3,30	0,415 (+/- 0,035)	868
<b>NR E 10</b>	2,99	3,29	0,434 (+/- 0,046)	911
<b>NR 1P 10</b>	3,03	3,34	0,275 (+/- 0,039)	541
<b>ZFB 10</b>	2,70	2,97	0,301 (+/- 0,039)	602
<b>MBN 10</b>	2,70	2,97	0,360 (+/- 0,100)	739
<b>KSE 300</b>	<3,69*	<4,06*	0,891 (+/- 0,171)	1978
<b>KSE HV</b>	<3,07*	<3,38*	0,801 (+/- 0,141)	1768

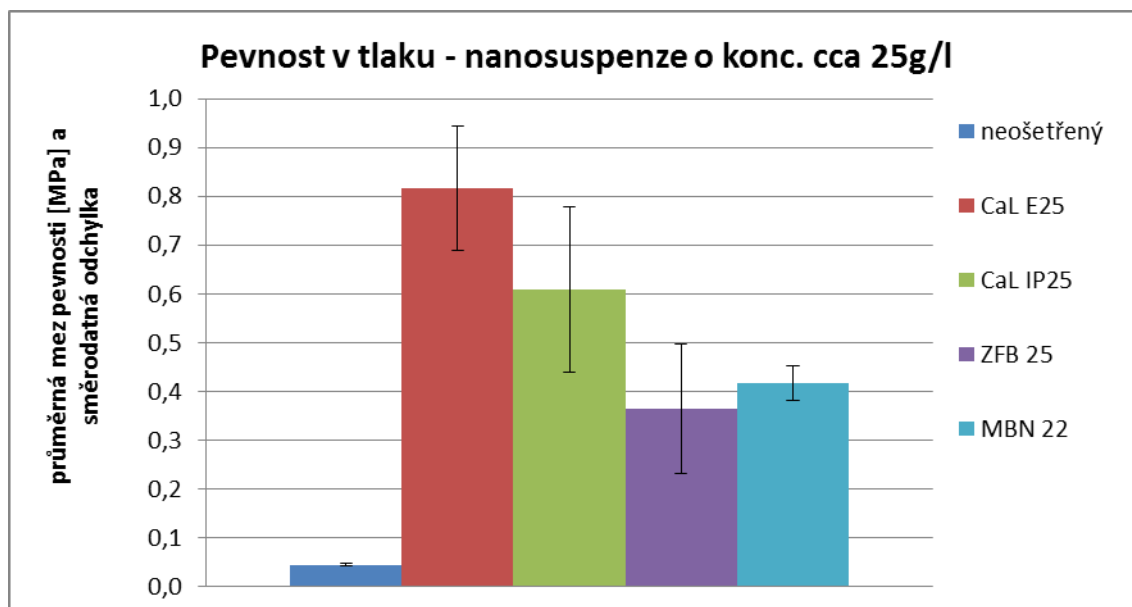
\* u esterů kyseliny křemité není možné toto množství přesně stanovit nebo vypočítat, jelikož vylučování SiO<sub>2</sub> gelu je závislé na podmínkách zrání a jeho výsledná hmotnost tak může být v závislosti na nich proměnlivá; ze sledování konkrétních gelů na Petriho miskách však víme, že v době mezi 30 a 80 dnem zrání docházelo ještě k drobným poklesům hmotností SiO<sub>2</sub> gelů v rozmezí 3,3-4,5%, hm., proto jsou hodnoty uvedeny se znaménkem <



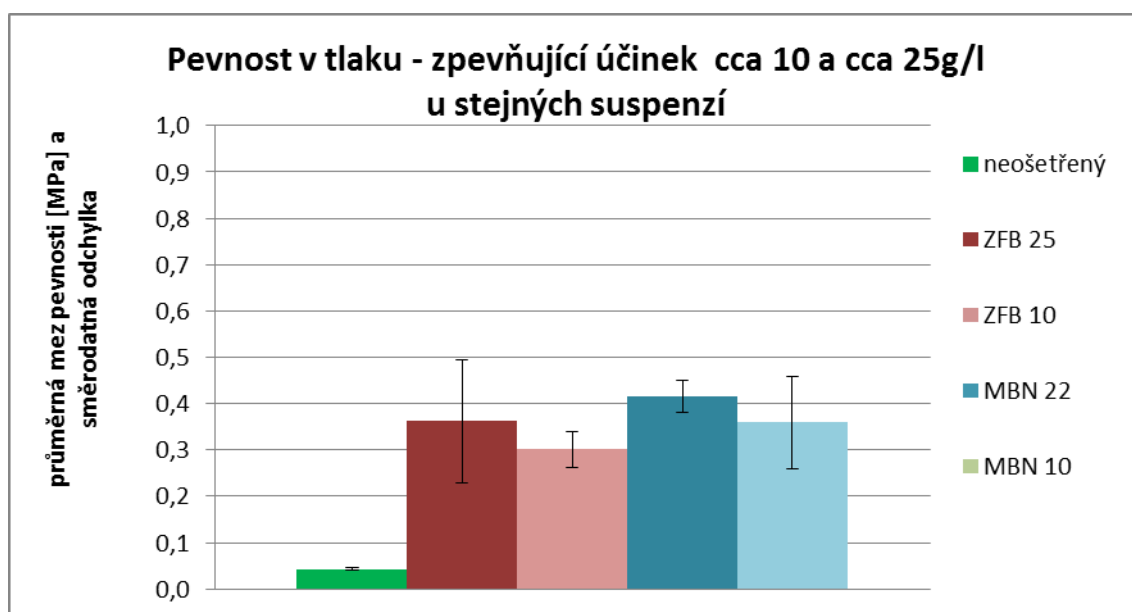
Graf 23: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků – přehled všech testovaných konsolidantů



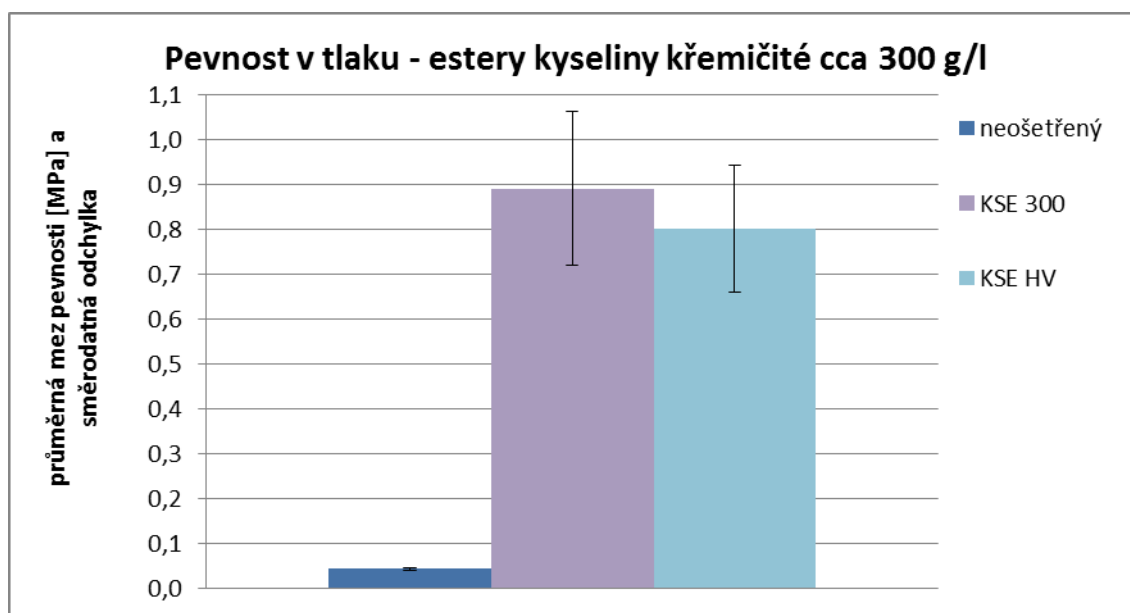
Graf 24: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci nanosuspencemi na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o přibližné koncentraci 10 g/l v deseti cyklech, se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků



Graf 25: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci nanosuspensemi na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o přibližné koncentraci 25 g/l v pěti cyklech, se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků



Graf 26: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci nanosuspensemi na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků – porovnání rozdílů v aplikacích podobného množství výsledné účinné látky u stejných suspenzí aplikovaných 10 × o přibližné koncentraci 10 g/l a 5 × o přibližné koncentraci 25 g/l



Graf 27: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci estery kyseliny křemičité o přibližné koncentraci 300 g/l v jednom cyklu, se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků

Z výsledků měření pevností v tlaku vyplývá, že největších zpevňujících efektů bylo docíleno ošetřením dusaných zkušebních tělísek konsolidanty na bázi esterů kyseliny křemičité, u kterých byl zaznamenán nárůst pevnosti o 1978% u KSE 300 a 1768% u KSE 300 HV oproti neošetřenému standardu. Další, významnou skupinou konsolidantů, kterou bylo docíleno také výrazně vyšších zpevnění, než u zbývajících materiálů, jsou produkty na bázi nanosuspenzí  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  řady IBZ řady CaLoSil<sup>®</sup>, u kterých byly naměřeny nárůsty o 1800% v případě CaLoSilu<sup>®</sup>E25, a 1317% u CaLoSilu<sup>®</sup>IP25. U ostatních produktů se naměřené pevnosti vzájemně lišily v menší míře a dosahovaly nárůstů od 541 do 911%.

Zhodnotíme-li samostatně zpevňující účinky jednotlivých konsolidantů rozdělených do skupin dle jejich koncentrací, největší rozdíly mezi nimi shledáme u skupiny vápenných nanosuspenzí o přibližné koncentraci 25 g/l. V této skupině bylo dosaženo nejlepšího efektu zpevnění prostředkem CaLoSil<sup>®</sup>E25, který jako jediný z obou skupin vápenných nanosuspenzí může s dosaženou pevností 0,815 MPa konkurovat účinkům produktů KSE 300 a KSE 300 HV. Druhý produkt z řady německého výrobce IBZ tj. CaLoSil<sup>®</sup>IP25 dosahuje mezi konsolidanty na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  druhého nejlepšího výsledku 0,608 MPa. Konsolidanty výrobců MBN a ZFB dosahují pouze přibližně polovičního zpevňujícího účinku prostředku CaLoSil<sup>®</sup>E25 a to 0,362 MPa u konsolidantu ZFB 25 a 0,415 MPa u originálního produktu MBN 22.

V rámci skupiny vápenných nanosuspenzí o přibližné koncentraci 10 g/l jsou rozdíly účinků jednotlivých přípravků výrazně menší, než v předcházejícím případě. Nejlepšího zpevnění desetinásobnou aplikací 1% konsolidantu bylo docíleno přípravkem Nanorestore E35,



který dosáhl nárůstu pevnosti o 911%. Tento produkt se také jako jediný z této skupiny vyrovnává docílenou pevností v tlaku přípravkům ZFB 25 a MBN 22, které byly aplikovány jako přibližně 2,5% v 5ti cyklech, přičemž výsledné množství aplikované účinné látky by u něj mělo být o něco málo nižší, než u prostředků ze skupiny 2,5% suspenzí.

Zbývající konsolidanty o koncentraci cca 10 g/l dosáhly v porovnání se všemi ostatními přípravky relativně nízkého zpevnění a to nárůstu pevností od 739 do 541%.

Dva konsolidanty výrobců MBN a ZFB byly odzkoušeny v obou skupinách vápenných nanosuspenzí tj. v koncentraci cca 10 g/l aplikované v 10ti cyklech a rovněž v koncentraci cca 25g/l aplikované v 5ti cyklech. Porovnáme-li tyto dvě metodiky vždy u stejného výrobku s různě upravenou koncentrací, shledáme, že produkty s vyšší koncentrací dosahují u obou výrobků vyšší míry zpevnění. Je ale nutné připomenout, že tento rozdíl může být způsoben tím, že množství aplikované účinné látky na jedno tělísko je u 1% suspenzí o něco nižší (u 1% je to 2,7 g a u 2,5% 3,4 g CaCO<sub>3</sub> výsledné účinné látky na jedno tělísko). Je možné, že když by množství výsledného CaCO<sub>3</sub> byla v obou případech stejná, zpevňující efekt by byl u obou aplikačních metodik srovnatelný.

Testované organokřemičitany od fa Remmers dosáhly ve srovnání s ostatními konsolidanty vysokých pevností v obou případech. Nejlepšího výsledku z celé testované škály konsolidantů dosáhl prostředek KSE 300, který je primárně určen na zpevňování silikátových materiálů. Druhý organokřemičitan, který je speciálně upraven a doporučován pro použití na zpevnění karbonátových materiálů KSE 300 HV byl v dosažené pevnosti 0,801 MPa těsně předstížen pouze jediným konsolidantem na bázi nanosuspenze Ca(OH)<sub>2</sub> a to CaLoSilem®E25 s pevností 0,815 MPa.

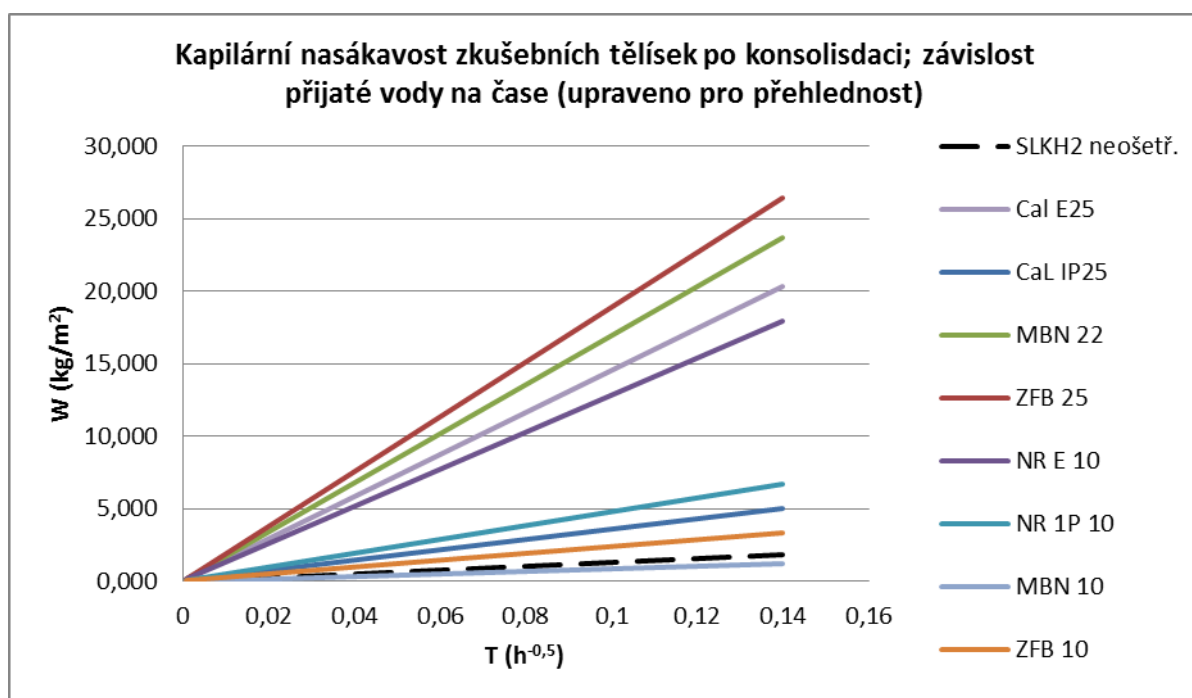
### 3.9.3 Porovnání změn základních fyzikálních vlastností

V následující tabulce jsou uvedeny údaje zachycující základní změny materiálu po konsolidaci. Pro srovnání jsou uvedeny také hodnoty naměřené na neošetřeném tělísku a na hornině z jádra sochy světice, považované za standard.

Součinitele nasákavosti pak také byly vyneseny do grafu pro jejich snazší komparaci.

**Tab. 35: Výsledky měření základních fyzikálních vlastností u konsolidovaných zkušebních tělísek a jejich porovnání se standardem a kamenem ze sochy světice č. 1**

Označení vzorku	Nasákavost vodou [hm. %]	Celková otevřená pórovitost vodě [obj. %]	Součinitel nasákavosti volným vztlínáním $W$ [ $\text{kg} \times \text{m}^{-2} \times \text{h}^{-0,5}$ ]
<b>Cal E25</b>	23,2	31,8	145,3
<b>CaL IP25</b>	22,1	31,9	36,0
<b>MBN 22</b>	25,7	39,3	169,2
<b>ZFB 25</b>	23,6	36,5	189,1
<b>NR E 10</b>	25,2	39,1	128,1
<b>NR 1P 10</b>	24,7	39,6	47,8
<b>MBN 10</b>	21,3	28,4	8,6
<b>ZFB 10</b>	22,9	33,6	23,6
<b>SLKH 2</b> – neošetřená zkušební tělíška; parametr měřen isopropanolem a následně byl přepočten na vodu	<b>26,9</b> (+/- 1,65)	<b>38,1</b> (+/- 2,54)	<b>13,2</b> (+/- 0,92)
<b>Vzorek TS3</b> <b>kámen z vrtu sochy světice</b> – homogenní část kamene s minimální přítomností velkých organogenních úlomků – schránek měkkýšů	12,2	15,4	54,0



**Graf 28:** Výsledky měření kapilární nasákavosti na konsolidovaných zkušebních tělíscích – vynesené do grafu jako hmotnost vsáknuté vody na plochu za čas – závislost vychází ze směrnic uvedených v tabulce

Všechna tělíscika vykazují po konsolidaci vysokou až velmi vysokou schopnost kapilárně přijímat kapalinu stejně tak jako tomu je u neošetřeného standardu a přírodního kamene ze sochy světice č. 1. Celkové nasákavosti vyjádřené hm. %, měřené ponorem tělíscik, u všech měřených vzorků, ve srovnání se standardem, po konsolidaci mírně poklesly. Tento jev i míra poklesu tohoto parametru přibližně odpovídá množství nově vpraveného pojiva. Podobně jsou na tom hodnoty celkové vodě otevřené pórovitosti, která byla z předcházejícího parametru vypočítána. Celková otevřená pórovitost vzorků po konsolidaci je ve srovnání s neošetřenými vzorky odchýlena u většiny vzorků poklesem, tam, kde jsou hodnoty o něco málo vyšší, můžeme tuto odchylku připsat možné chybě měření.

Zvláštní pozornost je zde věnována především kapilární nasákavosti plochy, na kterou byly prostředky aplikovány. Dá se říci, že dvě sady tělíscik, u nichž byly konsolidanty aplikovány různými metodikami (tj. aplikace  $5 \times 2,5\%$  a  $10 \times 1\%$  nanosuspencemi), vykazují, vždy na jednu výjimku v dané sadě, podobné trendy a v rámci kapilární nasákavosti tvoří dvě relativně ostře oddělené skupiny.

Vzorky ošetřené více koncentrovanými prostředky v pěti cyklech se jeví jako velmi vysoce nasákavé. Jedinou výjimku zde tvoří vzorek ošetřený CaLoSilem®IP25, jehož nasákavost je srovnatelná se skupinou vzorků ošetřenou 1% suspencemi, což je s největší pravděpodobností zapříčiněno výrazným bílým zákalem na jeho povrchu, který transport vody zpomaluje. K této nasákavější skupině je naopak připojen jeden vzorek ošetřený 1%

prostředkem NR E 10. Vzorky s výrazně vysokou kapilární aktivitou, které jsou viditelné v horní části grafu, byly ošetřeny těmito konsolidanty: z cca 2,5% jsou to CaLoSil®E25, MBN Nf070, ZFB 703k a z cca 1% je to Nanorestore E35. Součinitele nasákavosti jimi ošetřených tělísek se pohybují v rozmezí od 190 do 130. Tak vysoký nárůst kapilární aktivity testovacích tělísek z původního součinitele přibližně 14 může být vysvětlen tím, že vyplnění porézního systému novým konsolidantem vedlo ke zvýšení podílu kapilárně aktivních pórů.

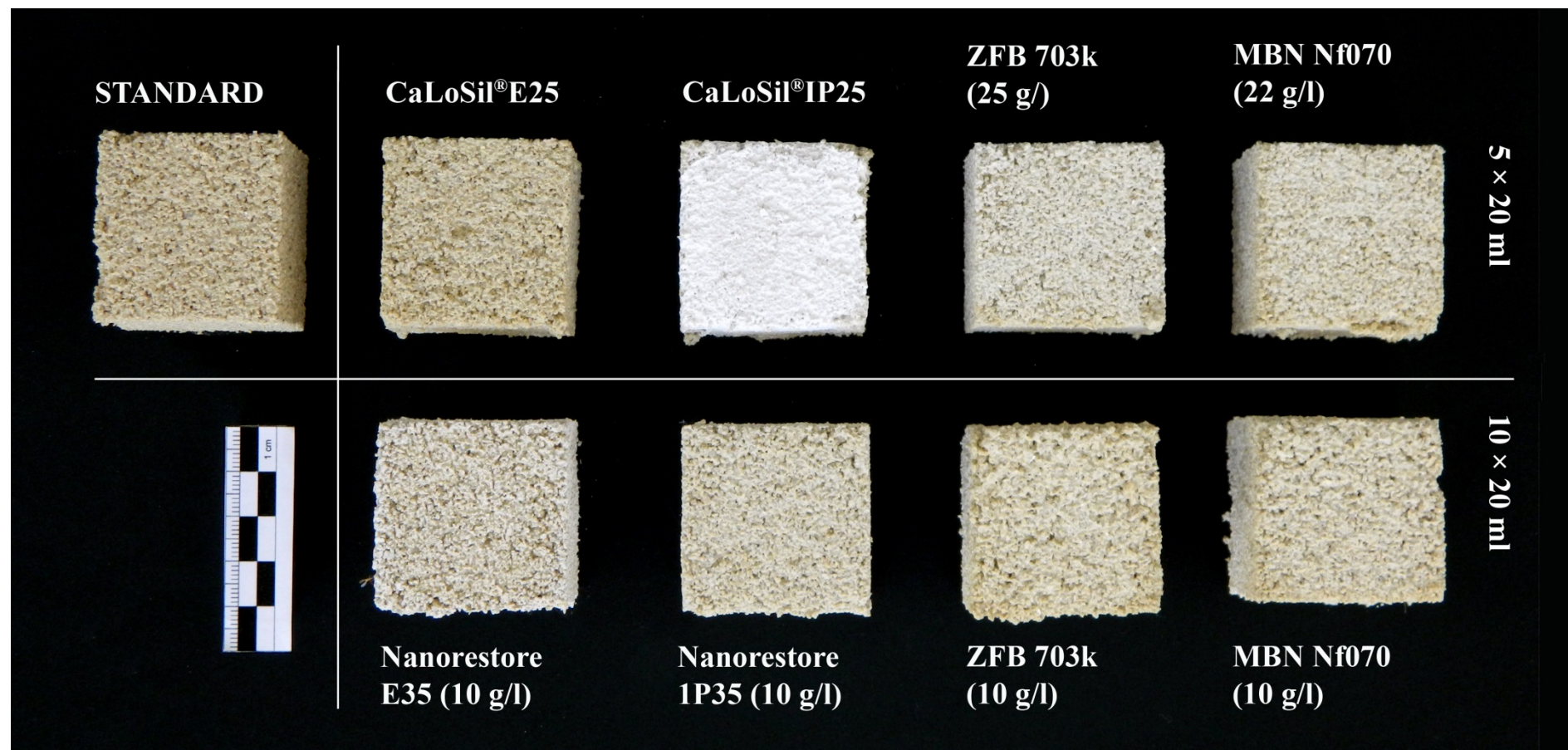
O něco nižší, ale i přesto velmi vysoké, součinitele nasákavosti byly vypočítány z množství kapaliny vsáknuté za daný čas vzorky ošetřeny cca 1% nanosuspencemi. K těmto vzorkům je připojeno již zmíněné tělísko ošetřené CaLoSilem®IP25. Součinitele této druhé o něco méně nasákavé skupiny se pohybují přibližně od 48 do 9. Mírný pokles kapilárního příjmu kapaliny od standardu se projevil pouze u vzorku ošetřeného prostředkem MBN 10, pokles ale není nikterak dramatický a i nejnižší naměřený součinitel nasákavosti se stále řadí mezi nasákavé materiály.

Konsolidace všech tělísek neměla negativní vliv na možnost transportu vody do materiálu a u většiny z nich se v důsledku ošetření naopak zlepšila. Z druhého pohledu to však zároveň znamená, že se materiály v důsledku zpevnění vápennými nanosuspencemi stávají vysoce kapilárně aktivními a tudíž nasákavými, což může zapříčinit velmi snadné pronikání vody do jejich struktury. Vzhledem k zachování velmi vysoké porozity by ale tento jev neměl znamenat pro konsolidovaný materiál žádná rizika.

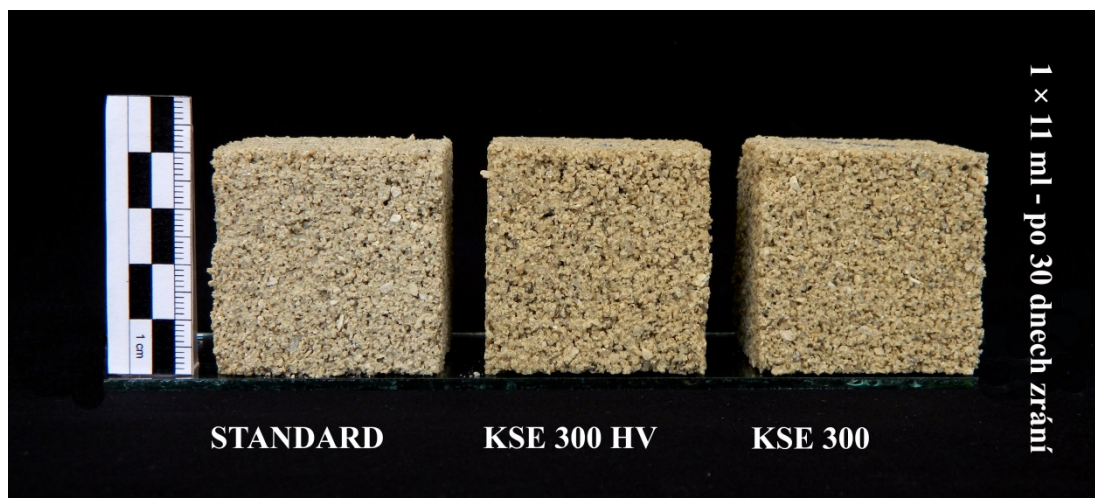
Porovnáním jednoho z hlavních trendů, tedy rozdělením 2,5% a 1% nanosuspencí (opomineme-li výjimku z každé této skupiny, kde pro CaLoSil®IP25 máme vysvětlení) na dvě odlišně nasákavé skupiny, s profily rychlostí průchodu ultrazvuku můžeme v tomto výsledku nacházet logické vysvětlení. Tam kde je velmi pravděpodobně konsolidant rovnoměrněji distribuován, jsou nasákavosti vyšší, než u vzorků kde bylo identifikováno velké množství konsolidantu především v blízkosti aplikační plochy.

Podobnou korelaci můžeme najít také s vizuálním studiem mikrostruktury na lomových plochách středů konsolidovaných vzorků, kde u tělísek ošetřených vícenásobně nižší koncentrací konsolidantů je patrné jejich nahromadění v blízkosti aplikačního povrchu.

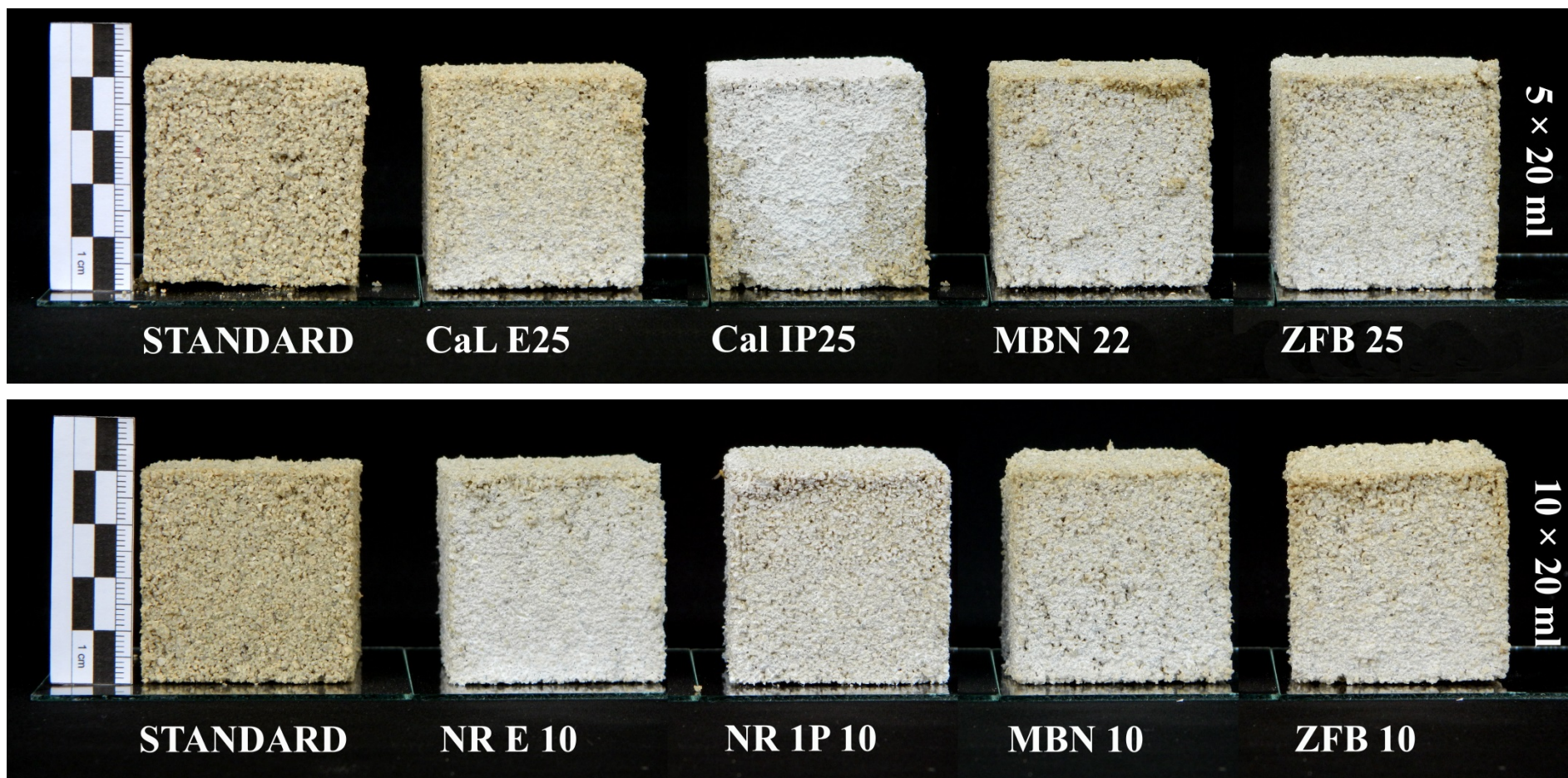
### 3.9.4 Zhodnocení vizuálních změn v důsledku konsolidace



Obr. 72: Posouzení barevných změn APLIKAČNÍ PLOCHY testovacích tělísek po konsolidaci prostředky na bázi nanosuspensí hydroxidu vápenatého



Obr. 73: Posouzení barevných změn APLIKAČNÍ PLOCHY testovacích tělísek po konsolidaci prostředky na bázi esterů kyseliny křemičité



Obr. 74: Posouzení barevných změn BOČNÍ PLOCHY (dusané plochy) testovacích tělísek po konsolidaci prostředky na bázi nanosuspence hydroxidu vápenatého

Dle vizuálního hodnocení barevné změny ošetřených zkušebních tělísek konsolidanty na bázi  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  s neošetřeným standardem vyplývá, že nejmenší změna barevnosti aplikačního povrchu byla způsobena pětinasobným ošetřením produktem CaLoSil®E25. Zkušební tělíska ošetřená tímto konsolidačním prostředkem se od standardu, tedy neošetřeného tělíska barevně téměř neliší. Naopak největší barevná změna aplikačního povrchu byla zaznamenána po ošetření prostředkem CaLoSil®IP25, který v době aplikace výrazně přesahoval dobu svojí použitelnosti a tím pádem, pravděpodobně, došlo ke koagulaci některých částic tohoto konsolidantu, které tak zůstaly zachyceny na aplikační ploše. Tento jev dobře ilustruje důsledky stárnutí podobných systémů a poukazuje na limity jejich použitelnosti.

Ostatní použité prostředky vykazují na aplikační ploše vzájemně srovnatelný barevný posun od standardu a u všech je shodně možné zaznamenat vznik bílého zákalu na povrchu v důsledku ošetření. Velké rozdíly není možné zaznamenat ani u odlišné metodiky aplikace podobného výsledného množství účinné látky u konsolidantů MBN a ZFB, které byly aplikovány jako cca 1% desetkrát a jako cca 2,5% pětkrát. Z tohoto výsledku vyplývá, že vícenásobné použití nižší koncentrace těchto prostředků z hlediska konečné vizuální kvality aplikačního povrchu není nijak výhodná.

Po ošetření zkušebních tělísek prostředky na bázi esterů kyseliny křemičité můžeme v obou případech, tedy jak u KSE 300 tak i u KSE 300 HV, zaznamenat mírné prohloubení barevného odstínu. Fotografie byly pořízeny po 30 dnech zrání konsolidovaných tělísek. Je nutné upozornit, že výrobce udává v technickém listě následnou nutnost omytí ošetřovaného povrchu bezvodým rozpouštědlem, což má právě redukovat účinky konsolidantu na prohloubení barevného odstínu kamene. U testovacích tělísek povrchy omyty bezvodými rozpouštědly nebyly z důvodu jejich vysoké nesoudržnosti. Je však nutné upozornit, že pokud by bylo třeba povrch například otupovat nějakým savým materiálem namočeným v rozpouštědle, tak tento způsob následné péče může být u velké části reálných objektů rizikový nebo dokonce nevhodný. Při tzv. bezdotykové formě této následné péče např. oplachem bychom zase mohli diskutovat otázku, zda v důsledku ní nedochází k dalšímu nechtěnému transportu konsolidantu ve zpevňovaném materiálu.

Zhodnotíme-li tělíska ošetřená konsolidanty na bázi hydroxidu vápenatého z boční strany, shledáme u šesti z nich zřetelně silněji viditelný bílý zákal v jejich spodní části. Tento jev bude s největší pravděpodobností spojen částečně s vlivem gravitace na pohyb rozpouštědla v porézním materiálu a především tím, že u plochy podstavy zkušebních tělísek nedochází tak snadno k odparu rozpouštědla a tyto partie tak zůstávají nejdéle zavlhčeny rozpouštědly a



některé částice ho mohou materiálem následovat. Tento jev nebyl objektivně zaznamenán pouze u prostředku NR 1P 10, kdy boční stěna ošetřená tímto konsolidantem vykazuje v celé ploše velmi podobnou vizuální kvalitu. U prostředku CaLoSil®IP25 je bílý povlak nehomogenní a velmi pravděpodobně je v horní části způsoben stékáním prostředku z aplikační plochy u tohoto případu není možné tento parametr objektivně vyhodnotit.

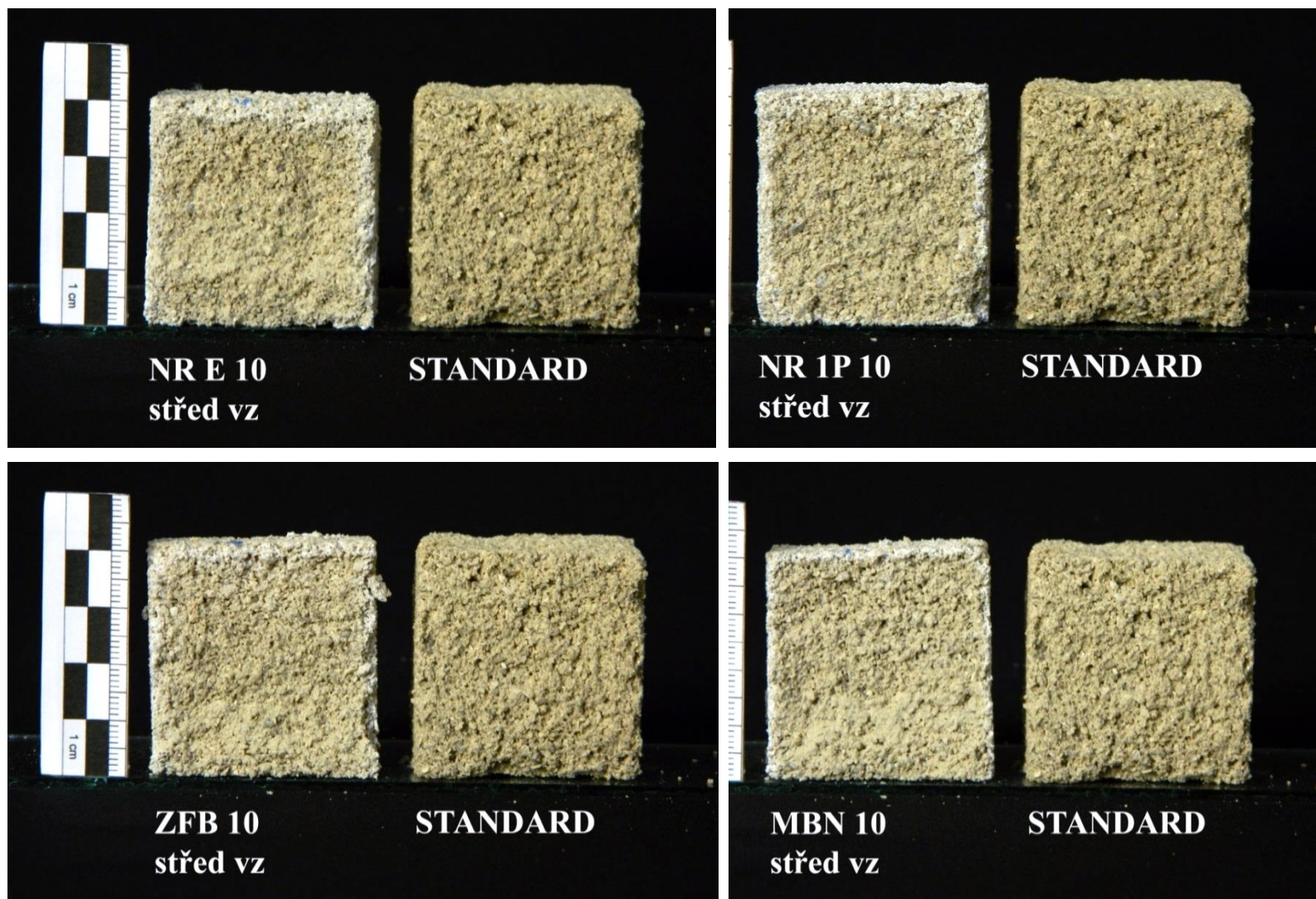
Z praktického hlediska, tedy využití těchto technologií v běžné restaurátorské praxi bez nutnosti dalších významných kroků vedoucích k redukci důsledků konsolidace – bílého zákalu, z této části hodnocení vychází jako nejvhodnější pro tento typ substrátu pětinasobné ošetření 2,5% prostředkem CaLoSil®E25.

### **3.9.5 Výsledky studia makro a mikrostruktury**

#### **3.9.5.1 Makroskopické posouzení konsolidovaných vzorků**



Obr. 75: Lomové plochy středů zkušebních tělísek konsolidovaných vápennými nanosuspensemi o přibližné koncentraci 25 g/l



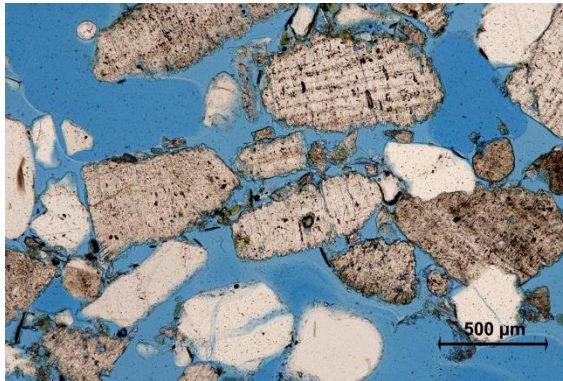
Obr. 76: Lomové plochy středů zkušebních tělísek konsolidovaných vápennými nanosuspensemi o přibližné koncentraci 10 g/l

Po rozřezání zkušebních tělísek na polovinu můžeme volným okem pozorovat nejnápadnější tendence způsobu ukládání účinných látek konsolidantů ve struktuře imitovaného kamene. U všech zkušebních tělísek můžeme zaznamenat kumulaci účinné látky u povrchu i bočních stěn vzorků. Výrazně méně je však tento jev zaznamatelný u tělísku ošetřeného CaLoSil<sup>®</sup>E25, které je v celé své hmotě barevně homogenní jen s mírným posunem od barevnosti lomové plochy neošetřeného standardu. Barevná homogenita a mírný posun od lomové plochy standardu poukazují na to, že účinná látka je velmi pravděpodobně rovnoměrně distribuována v celé hmotě testovacího tělísku. U ostatních tělísek je kumulace účinné látky velmi zřetelně patrná a vytváří bílé orámování tzv. odparových ploch vzorků. U některých konkrétních případů, můžeme také pozorovat, že středy tělísek se výrazně barevně neliší od barevnosti lomové plochy standardu, což může indikovat, že v jejich středu je uloženo pouze malé množství konsolidantu. Tento jev je velmi výrazný především u skupiny 1% konsolidantů aplikovaných v deseti cyklech.

Na základě vizuálního hodnocení je možné říci, že nejspokojivějšího výsledku, co se týče rozložení účinné látky konsolidantu v materiálu laboratorních vzorků a jeho případné kumulace na povrchu, bylo docíleno prostředkem CaLoSil<sup>®</sup>E25 naneseným v pěti aplikačních cyklech.

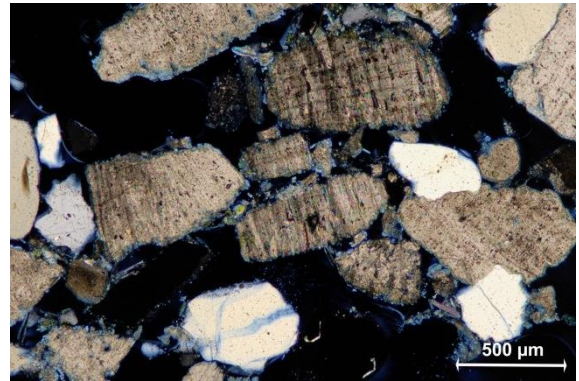
### **3.9.5.2 Mikroskopické hodnocení konsolidace**

Pro mikroskopické zkoumání byla vybrána tělísku zpevněná prostředkem CaLoSil<sup>®</sup>E25, který se podle výsledků zkoušek konsolidace ukázal jako nejvhodnější z testovaných vápenných nanosuspenzí. Cílem mikroskopického zkoumání bylo srovnání struktury zkušebního tělísku před a po konsolidaci, zjištění distribuce, mikrostruktury a způsob ukládání konsolidantu v porézním systému resp. mezi zrny zkušebního substrátu. Struktura byla studována na leštěných, nezakrytých výbrusech v procházejícím světle polarizačním mikroskopem a v režimu odražených elektronů pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.



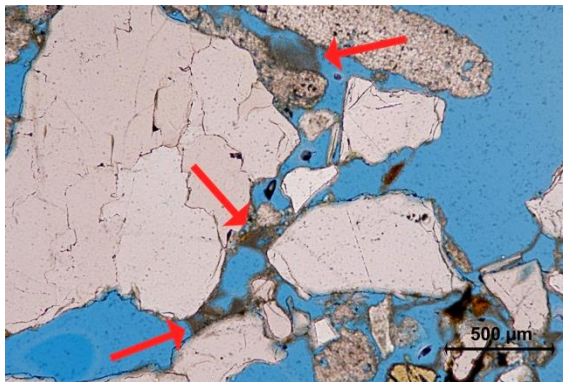
**Obr. 77: Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub> (KH<sub>2</sub>), před konsolidací**

*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při zvětšení 100×*



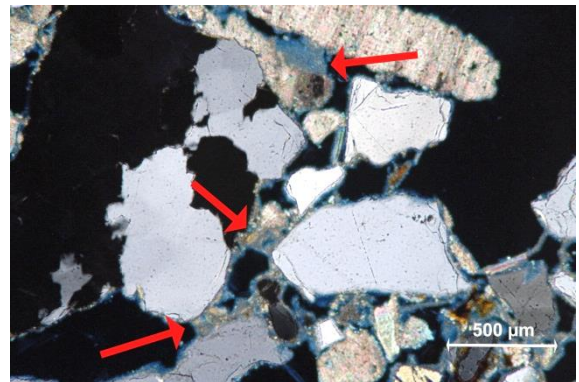
**Obr. 78: Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub> (KH<sub>2</sub>), před konsolidací**

*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 100×*



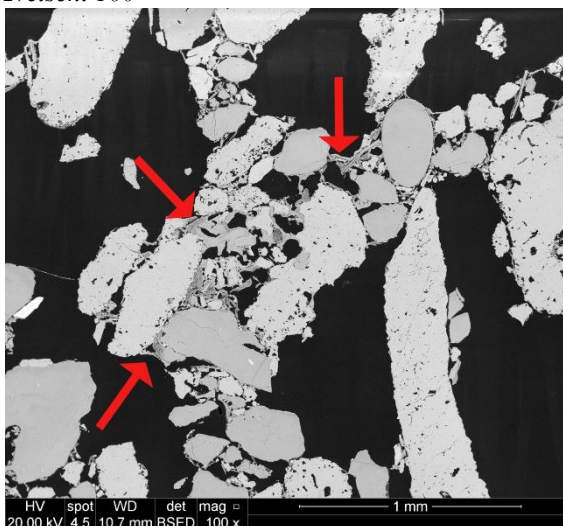
**Obr. 79: Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>204</sub> (KH<sub>2</sub>), po konsolidaci**

*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu paralelních nikolů při zvětšení 100×*



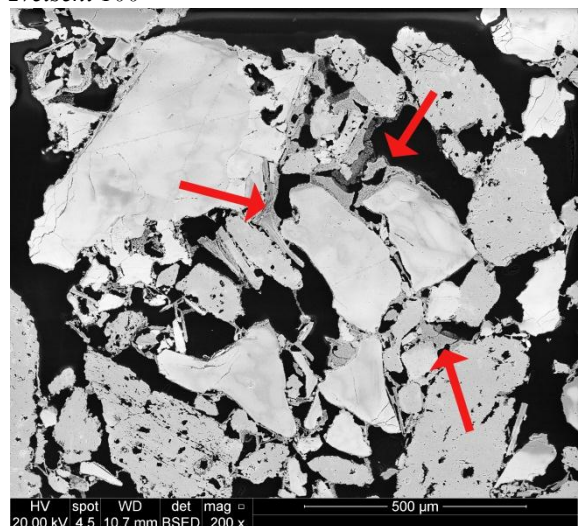
**Obr. 80: Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>204</sub> (KH<sub>2</sub>), po konsolidaci**

*Optický polarizační mikroskop; fotografováno v procházejícím světle v režimu zkřížených nikolů při zvětšení 100×*



**Obr. 81: Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>204</sub> (KH<sub>2</sub>), po konsolidaci**

*Rastrovací elektronový mikroskop, fotografováno v režimu odražených elektronů*



**Obr. 82: Výbrus vzorku 7MSLCO<sub>x</sub> (KH<sub>2</sub>), po konsolidaci**

*Rastrovací elektronový mikroskop, fotografováno v režimu odražených elektronů*

Mikroskopické studium mikrostruktury vzorku simulujícího korodovaný vápenec před a po konsolidaci vápennou nanosuspenzí CaLoSil®E25 (po jejím vytvrnutí a karbonataci hydroxidu vápenatého) ukázalo, že lze poměrně dobře rozpoznat nové pojivo mezi zrna zkušebního vzorku. Chemické složení značné části zrn simulovaného korodovaného vápence a nového pojiva je stejné, je tvořeno uhličitanem vápenatým. Mikrostruktura „nového“ pojiva je odlišná než struktura jemných částic uhličitanu vápenatého v neošetřeném tělísku. Tento rozdíl umožňuje prokazatelně identifikovat a lokalizovat nové pojivo ve zkušebních tělískách po konsolidaci optickou i elektronovou mikroskopií. Nově vzniklý uhličitan vápenatý má poměrně kompaktní, velmi jemnozrnnou strukturu, což je dobře viditelné při zvětšeních 100 × a výše. Na obrázcích (Obr. 79 – Obr. 82) jsou tato místa označena šipkami.

Při menších zvětšeních je zřetelné odlišení obtížnější a proto byly mezi obrázky dokumentující mikrostrukturu a rozložení konsolidantu zařazeny pouze fotografie nafocené při větším zvětšení.

Studiem bylo zjištěno, že konsolidant je po vytvrnutí tvořený velmi jemnozrnnými částicemi uhličitanu vápenatého (pravděpodobně kalcitu) s poměrně kompaktní strukturou. Pokrývá v tenké vrstvě stěny pórů, resp. obaluje v tenké vrstvě zrna simulovaného korodovaného vápence a vyplňuje místa doteku jednotlivých zrn. Právě vyplnění dotkových míst a vzájemné propojení zrn je z hlediska konsolidace nejdůležitější. Lokálně jsou ve vytvrnutém konsolidantu přítomny jemné praskliny vzniklé pravděpodobně při jeho kontrakci v průběhu odpařování rozpouštědla, v tomto případě ethanolu, po aplikaci nanosuspenze.

Dále lze konstatovat, že vysoká pórovitost zkušebních tělísek zůstává zachována i po konsolidaci. Koncentrace konsolidantu je vyšší v povrchových vrstvách tělíska, čili lze pozorovat koncentrační gradient směrem k povrchu.

### 3.10 Shrnutí výsledků měření a rozborů pro posouzení efektivity konsolidace

Vycházejíc z výsledků všech provedených pozorování, rozborů a měření popsanych v předcházejících kapitolách jsou zásadní poznatky a zjištění pro přehlednost popsány v několika bodech:

- **Připravená zkušební tělíska dobře napodobila vlastnosti a složení vysoce degradovaného kutnohorského vápence** a byla dostatečně homogenní, aby mohla být použita pro testování konsolidace s reprodukovatelnými výsledky.
- Zkoušky na tělískách prokázaly, že **pomocí alkoholových nanosuspenzí hydroxidu vápenatého lze poměrně účinně strukturálně zpevnit i vysoce degradovaný porézni organodetritický vápenec**. Mají velmi dobrou schopnost penetrace do porézního systému korodovaného vápence. Nárůsty pevností v tlaku, kterých lze po opakované aplikaci a karbonataci konsolidantů docílit, dosahují až téměř nevěrohodných hodnot do 1800 %. Je však nutné podotknout, že výchozí pevnost zkušebních tělísek je prakticky nulová, protože byly připraveny bez pojiva pouze dusáním vhodné směsi kameniva. Konkrétní hodnoty pevností v tlaku po konsolidaci dosahují u nanosuspenze s nejvyšší účinností (CaLoSil®E25) a konečném obsahu účinné látky cca. 3,7 % hm. průměrné hodnoty 0,8 MPa. Pouze pro srovnání lze uvést, že tato hodnota je přibližně na úrovni pevnosti v tlaku malt pojených bílým vzdušným vápnem po 90 dnech zrání<sup>74</sup>.
- **Po zpevnění nedochází k evidentnímu snížení pórovitosti, ani nasákavosti**. Z mikroskopického studia mikrostruktury vyplývá, že vysoká pórovitost zůstává zachována i po konsolidaci a lze očekávat, že propustnost pro vodní páry bude na podobné úrovni jako před konsolidací. Kapilární nasákavost vyjádřena součinitelem nasákavosti zůstává vysoká. U některých sérií zpevněných tělísek je dokonce po zpevnění vyšší – pro tento fenomén se v současné době nepodařilo najít uspokojivé vysvětlení a této tématice bude věnována pozornost v dalších fázích výzkumu.
- **Nejlepších výsledků zpevnění v rámci testovaných vápenných nanosuspenzí bylo dosaženo pomocí komerčně vyráběného prostředku CaLoSil®E25**. Poměrně dobrý konsolidační efekt byl zaznamenán i u prostředku CaLoSil®IP25, který má stejný obsah hydroxidu vápenatého – 25 g/l. Konsolidace nanosuspenzemi, které byly aplikovány s nižším obsahem hydroxidu vápenatého (10 g/l) se ukázala jako méně účinná, i když

<sup>74</sup> VELOSA, Ana Luísa a Maria do Rosário VEIGA. The use of pozzolans as additives in lime mortars for employment in building rehabilitation. *Historical Constructions 2001, Possibilities of numerical and experimental techniques: Proceedings of the 3rd International Seminar*. 2001, s. 373-380. Dostupné z: [http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Historical%20constructions/page%20373-380%20\\_88\\_.pdf](http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Historical%20constructions/page%20373-380%20_88_.pdf)

byl celkový konečný obsah konsolidační složky srovnatelný. Přírůstek hmotnosti po vyzrání konsolidantu, který reprezentuje účinné množství zpevňovací látky, byl u všech testovacích sérií podobný cca. 3-4 % hm.

- **Na většině jednotlivých sérií zkušebních tělísek byly pomocí UZ transmise prokázány pevnostní gradienty** související patrně s distribucí konsolidantu ve zpevňovaném materiálu, přičemž rychlost UZ obvykle stoupá směrem k povrchu. Tyto gradienty byly zřetelně výraznější u tělísek konsolidovaných nanosuspencemi s nižším obsahem  $\text{Ca(OH)}_2$  (10 g/l). Je možné, že tento rozdíl je způsoben vyšším počtem aplikačních cyklů a tím i výraznějším vlivem zpětné migrace konsolidantu. Vedle zpevňovacího účinku vyplývá i z tohoto poznatku, že pro strukturální konsolidaci je **výhodnější používání nanosupenzí s obsahem  $\text{Ca(OH)}_2$  kolem 25 g/l** než dosažení uspokojivé strukturální konsolidace nanosuspencemi s nižším obsahem účinné látky vyšším počtem aplikačních cyklů.
- **U všech tělísek** ošetřených vápennými nanosuspencemi byl po konsolidaci pozorován **vznik bílého zákalu nebo povlaku**. Nejméně výrazný byl tento jev v případě nanosuspence **CaLoSil®E25**.
- **Jako efektivní se ukázalo i zpevnění konsolidanty na bázi esterů kyseliny křemičité**, což znamená, že i tento druh zpevňovacích prostředků je schopný účinně zpevňovat porézní vápenaté horniny. Z důvodu objektivního srovnání s vápennými nanosuspencemi bylo množství aplikovaného konsolidantu voleno tak, aby byl konečný obsah zpevňující složky, kterou je v případě vápenných nanosupenzí uhličitán vápenatý a v případě esterů kyseliny křemičité gel  $\text{SiO}_2$ , u obou typů zpevňovacích prostředků na stejné úrovni. **Míra zpevnění je srovnatelná se zpevněním pomocí vápenné nanosupenze s nejvyšší účinností tj. CaLoSil®E25**. Pevnost v tlaku zkušebních tělísek po zpevnění prostředkem KSE 300 a obsahu účinné složky cca. 4,1 % hm dosahuje průměrnou hodnotu 0,89 MPa a po zpevnění prostředkem KSE 300 HV a obsahu účinné složky cca. 3,4 % hm. průměrnou hodnotu 0,80 MPa. To současně znamená, že se neprokázal lepší konsolidační účinek organokřemičitého prostředku KSE 300 HV určeného speciálně pro vápenaté materiály.



## **4 Zkoušky na reálném objektu**

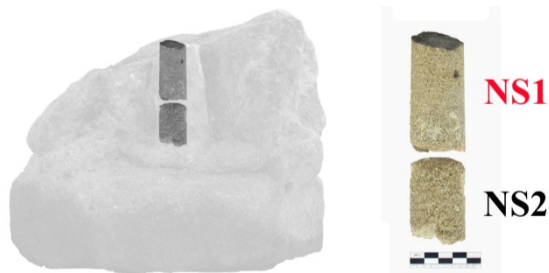
### **4.1 Zkoušky aplikace testovaných suspenzí na reálném objektu – soše světice č. 1**

Abychom ověřili, zda jsou výsledky laboratorního testování shodně aplikovatelné na reálný objekt, v našem případě sochu světice, pro jejíž konsolidaci bylo celé testování uzpůsobeno, provedli jsme zkoušky aplikace přímo na soše.

Jako zkušební plocha byla zvolena lomová plocha fragmentu spodní části nohou s plintem, tedy místo, kde došlo v minulosti k oddělení od těla sochy. Tato referenční plocha nebude po restaurování vizuálně prezentována ani jinak exponována, protože jednotlivé části sochy budou sesazeny do původní polohy.

Tato plocha byla před restaurováním silně kolonizována řasami a mechy (viz. obrazová příloha, stav sochy před restaurováním) a díky tomu byla struktura kamene na povrchu uzavřena vrstvou lepivého tzv. mimobuněčného slizu, ve kterém jsou buňky mikroorganismů uzavřeny. Bylo proto nutné povrch pro konsolidaci připravit alespoň částečným předčištěním.

Pro ověření účinku předčištění povrchu před konsolidací byla provedena následující zkouška měření nasákavosti tohoto povrchu. Na vrtném jádru části nohou s plintem (viz Obr. 83), které bylo z této části sochy odvrtno před jakýmkoli zásahy, byla pro kontrolu empirického posouzení uzavřenosti povrchu způsobenou biologickou kolonizací (viz Obr. 84) naměřena kapilární nasákavost tak, jako je uvedeno v kapitole 1.2.3.4 Základní vlastnosti vápence. Stejný parametr byl na tomto povrchu naměřen po jeho vysušení a následném mikropískování, které jsme plánovali jako jednu z nejefektivnějších metod čištění (viz zkoušky čištění v kapitole 5.2.3 Příprava povrchů sochy pro konsolidaci) pro přípravu testovací referenční plochy použit (mokrý metody byly vyloučeny z praktických důvodů). Výsledné naměřené hodnoty součinitelů nasákavostí byly komparovány vzájemně a také s hodnotami naměřenými na lomových plochách vrtných jader ze středu sochy světice, které jsou uvedeny v již odkazované kapitole a pro možnost okamžitého porovnání jsou také uvedeny v tabulce Tab. 36.



Obr. 83: Grafické znázornění vrtného jádra sochy světice č. 1, jehož část byla použita pro posouzení efektivity předčištění testovací plochy (červeně zvýrazněné)



Obr. 84: Detail povrchu vrtného jádra pokrytého biogenním povlakem před očištěním

Tab. 36: Vzájemné porovnání součinitelů nasákavosti na testovací referenční ploše před a po očištění a srovnání výsledných hodnot se zdravou horninou na lomové ploše

Označení vzorku – typ části měřené horniny	Součinitel nasákavosti volným vzlínáním $W [kg \times m^{-2} \times h^{-0,5}]$
<b>Vzorek NS1</b> – neočištěný povrch, pokrytý biogenními povlaky	12,6
<b>Vzorek NS1</b> – povrch po očištění mikropískováním	30,4
Vzorek TS3 – homogenní část kamene s minimální přítomností velkých organogenních úlomků – schránek měkkýšů	38,1
Vzorek NS2 – nehomogenní část kamene s významným podílem velkých organogenních úlomků – schránek měkkýšů	28,0

Jak je z uvedených výsledků patrné, povrch testovací referenční plochy sochy světice byl před očištěním skutečně částečně uzavřen biogenními aj. nečistotami, které zamezovaly kapilárnímu vsakování vody do kamene v takové míře, jaká je pro něj na lomové ploše charakteristická. Po očištění povrchu zvolenou mikro abrazivní metodou bylo docíleno obnovení této schopnosti ve vysoké míře.

Na základě toho výsledku byla tedy zkušební referenční plocha před testováním konsolidantů předčištěna touto otestovanou metodou – mikropískováním s využitím jemného a měkkého abraziva z dolomitického vápence.

Metodika testování byla nastavena tak, aby co nejvíce odpovídala zkouškám provedeným na laboratorních zkušebních tělískách a vzájemné porovnávání testovaných konsolidantů na přírodním kameni tak mohlo být co nejvíce objektivní.

Aby byla aplikační plocha, stejně jako v případě testovacích tělísek, ve vodorovné poloze, byl fragment nohou s plintem vypořádán dřevěnými klíny. I přesto však nebylo možné na lomové ploše přírodního kamene najít zcela rovné plochy.

Aby bylo možné vzájemně zcela objektivně hodnotit průběh aplikace testovaných konsolidantů (především schopnost penetrace) a změny povrchu v jejím důsledku (vliv na vizuální kvalitu povrchu – vznik bílého zákalu) ve vztahu k přírodní hornině bylo nutné zajistit pro jednotlivé testovací plochy stejné podmínky. Aby byly aplikační plochy vymezeny a nedocházelo k rozpíjení, nebo stékání konsolidantů mimo ně byla pro jejich přesné ohraničení využita samovulkanizační latexová emulze Arte Mundit. Na testovací plochu byly v dostatečných rozestupech rozmístěny papírové čtvercové šablony o rozměrech  $4 \times 4$  cm, což je rozměr shodný s testovacími tělísky, a štětcem byla okolní plocha důkladně natřena touto pastou. Ještě před zaschnutím pasty byly papírové šablony odstraněny a vzniklé čtverce byly ještě dodatečně po jejím zaschnutí ohraničeny plastickým tmelem, aby nedocházelo ke stékání konsolidantů mimo vymezené plochy tam, kde kámen nebyl zcela rovný. Na takto připravené testovací plochy byly aplikovány konsolidanty za pomoci injekční stříkačky a jehly, stejně jako tomu bylo při laboratorním testování. Celý tento popsany postup přípravy testovacích ploch i následná aplikace konsolidantů je zachycena na následujících obrázcích (Obr. 85 až Obr. 90).



**Obr. 85:** Referenční zkušební plocha po částečném očištění mikropískováním (vpravo neočištěná část)



**Obr. 86:** Referenční zkušební plocha po částečném očištění, připravena na testování konsolidantů



**Obr. 87:** Vymezení zkušebních ploch papírovými šablonami a natření jejich okolí samovulkanizační pastou



**Obr. 88:** Vymezené testovací aplikační plochy po odstranění papírových šablon před zaschnutím samovulkanizační pasty



**Obr. 89:** Samovulkanizační pasta po zaschnutí a dodatečné ohraničení zkušebních aplikačních ploch plastickým tmelem



**Obr. 90:** Aplikace konsolidantů pomocí injekční stříkačky a jehly o průměru 1,6 mm

Pro odzkoušení chování na reálném materiálu byly použity shodné prostředky, které byly použity v rámci laboratorního testování. Jedinou výjimku tvoří stárnutý prostředek CaLoSil®IP25, který byl vzhledem ke špatné penetraci už do laboratorního substrátu pro toto testování vyloučen a díky dostupnosti čerstvého materiálu jím byl nahrazen. Do testovací sady byl také zároveň přiřazen úplně čerstvý CaLoSil®E25, který už byl v této chvíli na základě výsledků laboratorních zkoušek objednan a doručen pro celkovou konsolidaci sochy světice č. 1. Pro přehlednost jsou tedy vyřazené a nově přiřazené konsolidanty spolu s těmi, s kterými by mohly být zaměněny, uvedeny v následující tabulce. U ostatních konsolidantů neproběhla žádná změna a tytéž, co byly použity v laboratorní části, byly použity i na této referenční ploše.

**Tab. 37: Vyřazené, nebo nově přiřazené konsolidanty k testování s uvedením těch se kterými by mohlo dojít k vzájemné záměně — viz poznámka**

Název konsolidantu (údaj o koncentraci)	Zkratka názvu konsolidantu používaná v dalším textu	Poznámka	Stáří konsolidantu v době jeho aplikace
CaLoSil®E25	<b>CaL E25</b>	použitý pro laboratorní testování	9 měsíců
CaLoSil®IP25	<b>CaL IP25</b>	vyřazený z testování	9 měsíců
CaLoSil®E25	<b>CaL E25 fresh</b>	nový, čerstvý konsolidant	méně než 1 měsíc
CaLoSil®IP25	<b>CaL IP25 fresh</b>	nový, čerstvý konsolidant	méně než 1 měsíc

Konsolidanty byly na zkušební plochu aplikovány při teplotě vzduchu okolo 18 °C a při přibližně 40 % vzdušné vlhkosti. Prostředky o koncentraci 25 g/l byly aplikovány v jednom aplikačním cyklu a méně koncentrované nanosuspenze o koncentraci 10 g/l byly aplikovány ve dvou aplikačních cyklech, aby opět bylo vpravené množství účinné látky alespoň srovnatelné s těmi více koncentrovanými. Každý cyklus, v rámci něhož bylo stejně jako u laboratorního testování na shodnou plochu aplikováno 20 ml konsolidantu, vyžadoval několik jednotlivých aplikačních fází, než byl celý stanovený objem konsolidantu do materiálu vpraven. Počty těchto jednotlivých fází aplikačního cyklu se prostředek od prostředku lišily v závislosti na tom, jak daný prostředek penetroval do kamene. Vzhledem k tomu, že se jedná o přírodní vysoce nehomogenní horninu, tak nemůžeme vyloučit, že rychlost penetrace nemohla být v daných místech částečně ovlivněna místními vlastnostmi kamene. Aplikační plochy však byly vybírány tak, aby byl tento možný vliv minimalizován.

K testování byly i v tomto případě připojeny dva prostředky na bázi estrů kyseliny křemičité (KSE 300, KSE 300 HV), které byly aplikovány ve shodném množství, jako u

zkušebních tělísek. V tomto případě již nebylo možné stanovené množství více minimalizovat, proto bylo zachováno množství 11 ml aplikované v jednom cyklu.

**Metodika vyhodnocení podmínek aplikace jednotlivých konsolidantů a změn barevnosti aplikačních povrchů v jejich důsledku:**

V průběhu aplikace konsolidantů na definované plochy byla zaznamenávána jednak doba, za kterou bylo možné stanovené množství konsolidantu do kamene vpravit a také v kolika jednotlivých krocích bylo možné daný počet cyklů dokončit. Aby byly tyto hodnoty, které se u jednotlivých konsolidantů liší v závislosti na schopnosti a rychlosti jejich penetrace do kamene, snadno porovnatelné, bylo z uvedených dvou údajů vypočítáno, kolik kroků by bylo možné uskutečnit za hodinu. Znamená to tedy, že čím je tato hodnota vyšší, tím lepší je penetrace daného materiálu do kamene a k vpravení požadovaného objemu tak bylo zapotřebí kratšího času. Pro představu reálné doby a počtu jednotlivých kroků, které byly nutné pro vpravení daného objemu do horniny, jsou v tabulce uvedeny i jejich skutečné hodnoty.

Tab. 38: Hodnocení rychlosti penetrace stanovených objemů testovaných konsolidantů do přírodního kamene

konsolidační prostředek	celková doba věnovaná aplikaci i s nutnými pauzami [min]	počet kroků celkem	tzn. počet kroků za hodinu	poznámka
Cal E25 fresh	65	21	19	
Cal E25	95	25	16	
Cal IP25 fresh*	120*	13*	7*	velmi špatná penetrace, tvorba silného bílého zákalu ukončeno po 120 min; aplikováno pouze 6 ml (-14 ml neaplikováno)
MBN 22	150	34	14	
ZFB 25*	105*	10*	6*	velmi špatná penetrace, tvorba silného bílého zákalu ukončeno po 105 min; aplikováno pouze 7 ml – (-13 ml neaplikováno)
NR E 10	300	69	14	
NR 1P 10	135	35	16	
MBN 10	280	64	14	
ZFB 10	280	59	13	
KSE 300	10	9	54	
KSE 300 HV	20	12	36	

\* u těchto prostředků nebyla dokončena aplikace stanoveného objemu konsolidantu z důvodu velmi špatné penetrace; uvedené hodnoty jsou proto s ostatními srovnatelné jen rámcově a jsou zde uvedeny především pro představu velkého rozdílu oproti ostatním konsolidantům; podrobnosti o skutečném aplikovaném množství prostředku jsou uvedeny v poznámce

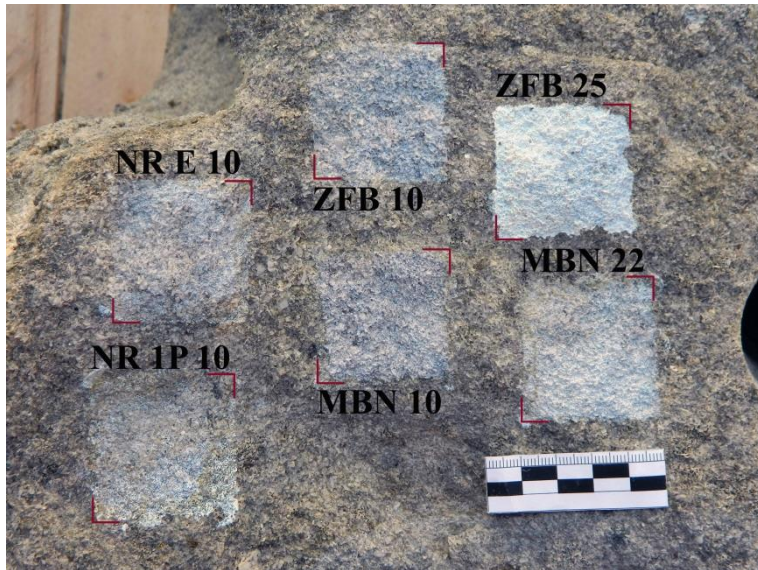
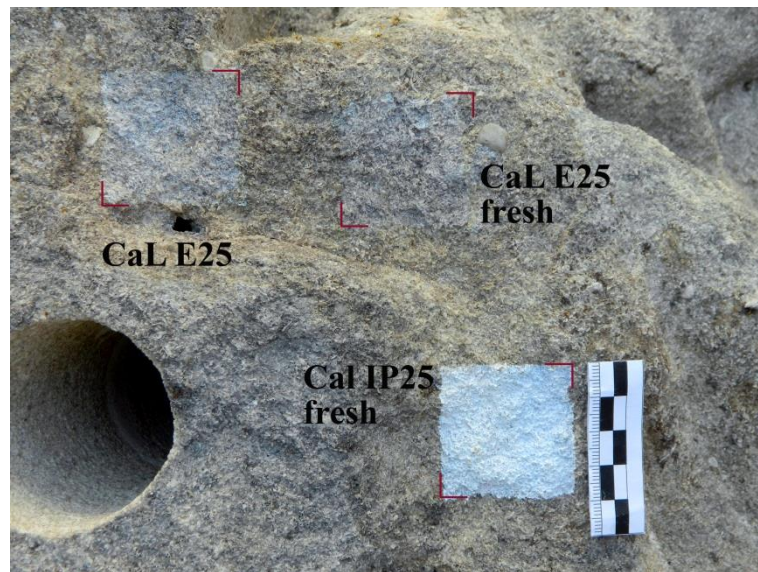
Z vyhodnocení rychlosti penetrace jednotlivých konsolidantů do přírodního kamene jasně vyplývá, že nejrychleji do kamene penetrují konsolidanty na bázi esterů kyseliny křemičité, především pak prostředek KSE 300. Konsolidant řady KSE určený na karbonátové materiály penetroval do vápence o něco pomaleji, ale i přesto ve srovnání se všemi vápennými suspenzemi přibližně jedenkrát rychleji. Opomine-li vápenné suspenze CaLoSil®IP25 a ZFB 703k (25 g/), u kterých nebyla aplikace stanoveného množství konsolidantu pro naprosto neuspokojivou penetraci dokončena, shledáme, že hodnoty počtů kroků za hodinu, nutné pro vpravení daného objemu do kamene se výrazně neliší. Výrazný rozdíl je pak v době, kterou jejich aplikaci musíte věnovat. Neliší-li se tedy příliš počty jednotlivých kroků za hodinu, pak to znamená, že 2,5% suspenze penetrují do materiálu srovnatelně jako suspenze 1%, avšak těch je nutné aplikovat do kamene dvojnásobný objem. Znamená to tedy, že aplikace méně koncentrovaných produktů není z hlediska rychlosti jejich penetrace do kamene nijak výhodná

a pro vpravení srovnatelného množství účinné látky je zapotřebí delšího, ve většině případů i dvojnásobného, času. Z 1% suspenzí tvoří výjimku pouze suspenze Nanorestore 1P35 (10 g/l), která se dobou nutné k aplikaci řadí k 2,5% suspenzím. Jedinou výjimku, kde se ukázalo ředění na nižší koncentraci prospěšné z hlediska schopnosti penetrace a především výrazně menší tvorbě bílého zákalu je suspenze ZFB, kde u 2,5% nebylo možné zvolené množství konsolidantu aplikovat.

Z časového hlediska tedy nejlépe do kutnohorského mušlového vápence penetruje z testovaných vápenných nanosuspenzí prostředek CaLoSil<sup>®</sup>E25.

Důležitým faktorem je také vliv konsolidantů na vizuální kvalitu aplikačního povrchu. Tento parametr byl hodnocen vizuálně, na základě porovnání s okolní horninou po sejmutí izolačního latexového filmu.





Obr. 91: Barevné změny aplikačních povrchů testovacích ploch na soše svíčky č. 1

Posoudíme-li barevné změny aplikačních povrchů jednotlivých konsolidantů, shledáme ve většině případů výsledky korelující s rychlostí penetrace jednotlivých prostředků do struktury kamene. Tam, kde k penetraci docházelo pomalu, jsou patrné silnější zákaly než u ostatních ploch ošetřených konsolidanty na bázi hydroxidu vápenatého. Dva 2,5% konsolidanty, u kterých nebyla aplikace stanoveného množství prostředku dokončena, vykazují velmi silný a homogenní bílý zákal, který byl patrný již v době aplikace. U těchto prostředků přitom došlo k aplikaci pouze zhruba  $\frac{1}{3}$  stanoveného objemu, než u ostatních 2,5% prostředků. Skupina ploch ošetřených 1% konsolidanty vykazuje ve všech případech srovnatelné bílé zákaly. Zajímavé je zde poté srovnání ploch ošetřených 1% a 2,5% konsolidanty výrobců MBN a ZFB. V případě ZFB se ukázalo, že 1% přípravek má mnohem lepší schopnost penetrace do kamene než 2,5%, jehož aplikace nebyla dokončena a bílý zákal je u něj nejintenzivnější ze všech testovaných prostředků. U různých koncentrací suspenze MBN je rozdíl malý, ale u 2,2% prostředku je o něco silnější bílý zákal, což může být způsobeno o něco málo vyšším množstvím vpravené účinné látky.

Prostředky na bázi esterů kyseliny křemičité mají velmi dobrou schopnost pronikat do struktury kamene a podle viditelného barevného posunu se také velmi dobře šíří porézním systémem do okolí aplikačních ploch (bohužel nemůžeme posoudit, jak tato penetrace funguje i do hloubky materiálu). I přes přesné vymezení aplikačních ploch pronikl povrchem kamene konsolidant do jejich velkého okolí a na celé této ploše došlo v důsledku aplikace k silnému prohloubení barevného tónu kamene (fotografie byla pořízena 24 h po aplikaci konsolidantů). Tento barevný posun by se měl v průběhu zrání zmírnit, ale i po něm je většinou na těchto typech kamene viditelný. Z důvodu dalších restaurátorských prací na soše světice jsme již neměli příležitost tento proces dále sledovat a dokumentovat.

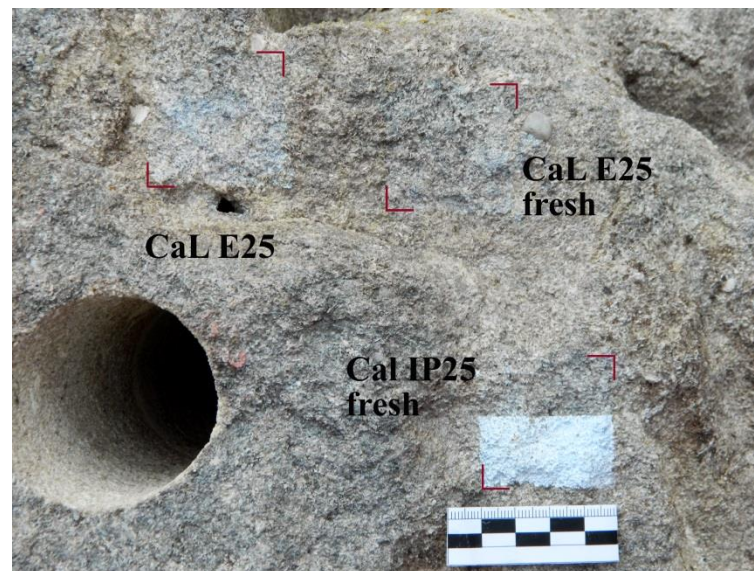
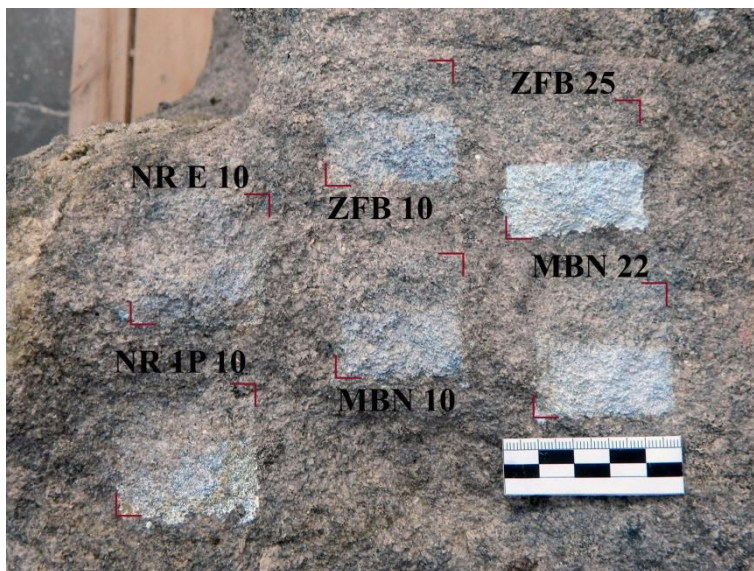
Z odzkoušených vápenných nanosuspenzí se jako prostředek s nejrychlejší schopností penetrace do materiálu v nejkratším možném čase s nejmenším barevným posunem aplikačního povrchu projevil německý výrobek CaLoSil®E25. Na základě srovnání barevných změn povrchů ošetřených tímto starším a zcela novým produktem můžeme také konstatovat, že je mezi nimi viditelný malý rozdíl v intenzitě bílého zákalu. Ze zkoušky je zároveň patrné, že u tohoto prostředku, ve vztahu k tomuto typu substrátu, nedochází vlivem stárnutí k výrazným změnám jeho penetračních vlastností, což je velmi důležitá praktická informace.

## **4.2 Zkoušky omezení negativních jevů při strukturální konsolidaci**

Při využití konsolidantů na bázi nanosuspenzí hydroxidu vápenatého na restaurování historických objektů je mimo jejich konsolidačních účinků také důležitý jejich vliv na vizuální kvalitu povrchu. Jak vyplývá z provedených zkoušek, aplikace všech z testovaných suspenzí způsobuje barevnou změnu v povrchu kamene. Před možným využitím této technologie na historickém objektu je tedy nutné odzkoušet možnosti redukce těchto jevů. Na základě předešlých zkušeností s touto problematikou byla pro odstranění vzniklých bílých zákalů použita metoda mikropískování s využitím velmi měkkého a jemného abraziva z dolomitického vápence.

Poloviny zkušebních aplikačních ploch na referenční ploše byly překryty lepicí páskou a následně byla provedena zkouška očištění vzniklých zákalů. Jak je patrné z Obr. 92, na všech nezakrytých polovinách zkušebních ploch bylo úspěšně možné bílé zákalů očistit. Tato technologie, tedy konsolidace vybraným prostředkem na bázi nanosuspenzí hydroxidu vápenatého, tak může být na soše světice použita bez rizika nevratné barevné změny aplikačního povrchu.

Při použití této technologie na tomto reálném objektu je na základě laboratorních zkoušek zřejmé, že bude nutné vybraný konsolidant aplikovat ve více cyklech (přibližně 3-5 dle stavu daného konsolidovaného místa). Z tohoto vyplývá, že zákalů vzniklé při uvedených zkouškách, kde byly provedeny 1-2 aplikační cykly, se v návaznosti na vyšší počet cyklů zintenzivní. Proto by i podle těchto zkoušek bylo v tomto případě ke konsolidaci sochy světice nejvhodnější využít CaLoSil®E25.



Obr. 92: Zkouška odstranění bílého zákalu mikroabrazivní metodou – mikropískováním s využitím měkkého jemného abraziva z dolomitického vápence

### **4.3 Sumarizace výsledků testování konsolidantů vápenných nanosuspenzí pro potřeby restaurování sochy světice č. 1**

Nejdůležitější poznatky byly získány provedeným laboratorním testováním na imitované korodované hornině, jejichž sumarizace je uvedena v kapitole 3.10 Shrnutí výsledků měření a rozborů pro posouzení efektivity konsolidace. Na základě výsledků laboratorního testování i praktické aplikace na referenční ploše sochy světice č. 1, kde byly poznatky získané v experimentální části práce ověřeny, byl jako nejvhodnější konsolidant zvolen CaLoSil®E25.

## **5 Restaurátorská zpráva – druhá část: průběh restaurování, zvolené metody a technologie a další doporučení**

### **5.1 Koncepce restaurování**

Stanovení koncepce restaurování bylo podřízeno několika základním cílům a požadavkům, které vyplývají z provedeného podrobného průzkumu stavu sochy před restaurováním, dále ze současných nároků na restaurování historických uměleckých děl a z představ zadavatele o výsledku zásahu.

Jak již bylo uvedeno v kapitole 2 Formulace základní koncepce restaurování sochy světice č. 1, jedním z hlavních úkolů restaurování bude strukturální konsolidace silně degradované sochy světice č. 1. (viz. Obr. 108–Obr. 118 v kapitole 7). Vycházejíc ze stanoveného požadavku materiálové kompatibility konsolidačního prostředku s původním pojivem kamene (kalcit –  $\text{CaCO}_3$ ) byl, na základě testování 6ti typů konsolidantů na bázi hydroxidu vápenatého, zvolen pro konsolidaci sochy prostředek CaLoSil<sup>®</sup>E25, který ve všech částech provedených pozorování, zkoušek, rozborů a měření vykazoval nejlepší výsledky ze všech testovaných konsolidantů tohoto typu.

Před prekonsolidací a základní stabilizací nejhroženějších míst bude nutné nechat sochu, transferovanou z exteriéru do ateliéru v období velmi bohatém na srážky, vyschnout. V počáteční fázi vysychání horniny budou vhodným biocidním prostředkem sanovány plochy postižené biologickou kolonizací hojně se vyskytujících řas a mechů. V průběhu vysychání kamene bude provedeno základní očištění povrchů fragmentů sochy světice od hrubých nečistot, jako je listí, hlína aj.. Po vysušení bude kámen lokálně předčištěn, aby došlo k otevření povrchů, pokrytých nejrůznějšími vrstvami nečistot (krusty, povlaky, biologický film, zemina), pro efektivní strukturální konsolidaci. Před stabilizací silně poškozené horniny, která se drolí a pískovatí bude minimalizována jakákoli manipulace s objektem, jelikož by při jeho stávajícím stavu mohla zapříčinit nevratné ztráty degradovaného povrchu.

Zvoleným konsolidantem CaLoSilem<sup>®</sup>E25 bude celý povrch sochy v několika cyklech ošetřen. Po napuštění sochy dostatečným množstvím konsolidantu bude následovat krátká technologická pauza pro jeho vyžrán (tj. 10-14 dní) a v průběhu této doby budou postupně snímány dosud ponechané krusty a zbytky biologické kolonizace, především polštářky sanovaných mechů. Po vyžrán konsolidantu, aplikovaného rovněž na lomové plochy všech fragmentů sochy, bude manipulace s jednotlivými částmi sochy světice méně riziková, a proto

bude přistoupeno k sesazení jednotlivých částí sochy, aby mohla být konsolidována také záda trupu. Po sesazení jednotlivých částí sochy bude následovat druhá fáze konsolidace, kdy bude především systematicky konsolidována plocha zad sochy světice a budou dozpevněna nedostatečně konsolidovaná místa. Posledním krokem konzervace sochy světice bude injektáž prostředkem z řady CaLoSil®Pasty o několikanásobně vyšší koncentraci účinné látky a také tlaková injektáž sesazovaných lomových ploch fragmentů sochy vhodnou restaurátorskou maltovinou.

Po dokončení konsolidace a injektáže ohrožených míst bude povrch sochy dočištěn od zbývajících nečistot a pravděpodobně v rámci tohoto kroku dojde také k redukci bílého zákalu vzniklého v důsledku konsolidace.

Jednou z posledních fází restaurování bude zhotovení zajišťujícího tmelení ohrožených míst kamene. Obtmeleny budou vyčnívající části hmot, které by se mohly v budoucnu snadno odlomit, dále ostré hranice přechodů mezi oddělenými a dochovanými tvary sochy, hranice mezi sádrovcem zpevněnými plochami přecházejícími v silně korodovaný povrch apod. ohrožená místa. Scházející tvary a objemy nebudou vzhledem k míře dochování sochy a k její plánované galerijní prezentaci doplňovány ani rekonstruovány. Spoje jednotlivých částí sochy světice budou vyplněny tzv. pod líc, aby zůstaly patrné, ale zároveň aby nenarušovaly integritu torza sochy světice.

Po zajištění zmíněných částí sochy bude přistoupeno k barevnému zapojení nových tmelů a případně i k částečné barevné retuši povrchu sochy, jehož barevnost a tím i čitelnost a plasticita jednotlivých tvarů byla narušena v důsledku dlouhodobého nevhodného uložení. Barevné retuše budou vzhledem k plánovanému umístění sochy pod stříšku u ohradní zdi zahrady v prostorách Hrádku provedeny bez přídavku pojiva.

## **5.2 Průběh prací**

### **5.2.1 Transfer**

Před zahájením restaurátorských prací byla socha světice č. 1 převezena do ateliéru restaurování kamene Fakulty restaurování v Litomyšli.

Dva větší fragmenty sochy byly pomocí techniky, nákladního auta s hydraulickou rukou a různých druhů úvazových lan aj. vybavení, vyzvednuty z místa svého původního uložení. Části sochy musely být za pomoci této techniky přeneseny přes ohradní zeď, jelikož na

pozemek ČMS nevede žádná příjezdová cesta. Fragmenty byly uloženy na připravené podloží z měkkých matrací na vozík a byly řádně zajištěny, aby při jejich transportu nedošlo k jejich poškození (viz Obr. 101–Obr. 103 v kapitole 7). Hlava světice, do doby transferu uložená v interiéru muzea, byla transportována řádně uložena uvnitř vozu.

V ateliéru restaurování kamene byly jednotlivé fragmenty pomocí řetězového zvedáku, za využití ponechaných úvazů z doby jejich vyzdvižení, aby bylo minimalizováno namáhání degradovaného povrchu sochy, pečlivě uloženy na palety. Trup světice byl uložen na paletě na dva příčně položené trámky, pokryté měkkými podložkami, aby nedošlo k dalšímu poškození sochy a aby mohl blok kamene vysychat. Hlava byla uložena do vypořstované krabice a nohy světice byly uloženy podstavou na paletu.

### 5.2.2 Základní očištění sochy a sanace biogenního růstu

Ihned po transferu sochy do vnitřních prostor ateliéru restaurování kamene byly fragmenty ometeny od sněhu, který na ně po čas převozu napadal, aby nedocházelo k dalšímu zvyšování vlhkosti už tak vlhkého kamene. Spolu se sněhem byly také ometeny hrubší nečistoty na povrchu fragmentů, jako je listí, větve aj. (viz Obr. 104 a Obr. 105 v kapitole 7).

Následující den po transferu fragmentů do ateliéru byla na stále vlhký kámen provedena aplikace biocidního prostředku<sup>75</sup> (dle doporučení výrobce pro sanaci kontaminovaných ploch, ředěný v obj. poměru 1:5 s ethanolem), aby došlo k efektivní likvidaci biogenního růstu v jeho aktivní fázi (mechy a řasy byly zelené, což indikuje jejich aktivitu) (viz Obr. 106 a Obr. 107, kapitola 7). Po tomto zásahu, byla silně poškozená socha ponechána vyschnout ve vnitřní, vytápěné části ateliéru.

### 5.2.3 Příprava povrchů sochy pro konsolidaci

Před jakýmkoli restaurátorskými zásahy a další manipulací s fragmenty sochy světice č. 1 bylo nutné kámen v některých silně degradovaných partiích prekonsolidovat a tím stabilizovat ohrožené partie.

Jak vyplývá z průzkumu, bylo nutné většinu ploch kamene pokrytých různými nečistotami nebo krustami před konsolidací očistit a tím je připravit na konsolidaci. Aby byla nalezena vhodná metoda čištění, byly provedeny následující zkoušky čištění za sucha a za mokra.

<sup>75</sup> typ prostředku je uveden v kapitole Materiály a technologie použité při restaurování sochy světice č. 1



Tab. 39: Zkoušky čištění povrchu sochy před konsolidací

Zkouška čištění	Metoda čištění
CL1	<b>Suchá metoda</b> – čištění pomocí měkkého polypropylenového kartáče
CL2	<b>Mokrý metoda</b> – čištění pomocí měkkého polypropylenového kartáče za přítoku vody
CL3	<b>Suchá abrazivní metoda (mikropískování)</b> – korund hnědý (Mhos 9)
CL4	<b>Suchá abrazivní metoda (mikropískování)</b> – dolomit (3-4)
CL5	<b>Suchá abrazivní metoda (mikropískování)</b> – živec (Mhos 6)
CL6	<b>Suchá abrazivní metoda (mikropískování)</b> – korund bílý (Mhos 9)

CL1 – suché čištění

CL2 – mokré čištění



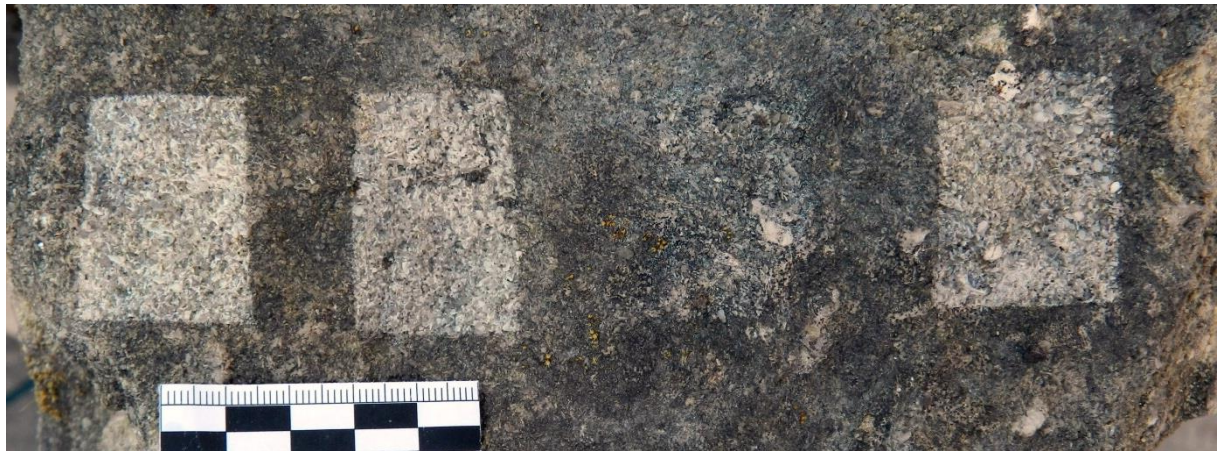
Obr. 93: Zkoušky čištění povrchu sochy světice č. 1 suchou a mokrou metodou

CL3 – hnědý korund

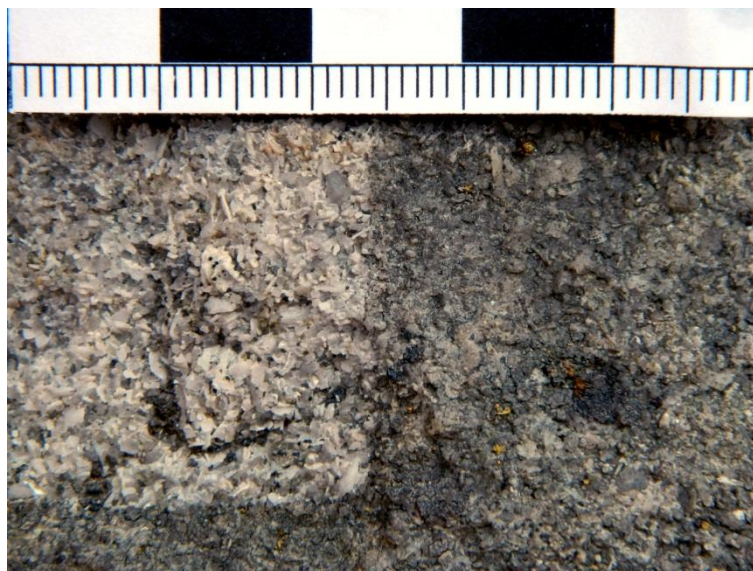
CL4 dolomit

CL5 živec

CL6 bílý korund



Obr. 94: Zkoušky čištění povrchu sochy světice č. 1 abrazivní metodou tzv. mikropískováním



Obr. 95: Detail efektu vybraného způsobu čištění na základě zkoušky CL4 – mikropískování moučkou z dolomitu

Jak je patrné z uvedených obrázků suché ani mokré mechanické čištění polypropylenovým kartáčem se neosvědčilo, navíc v případě mokrého způsobu byla do materiálu opětovně dodávána voda, která jednak způsobuje zhoršení mechanických vlastností kamene a také by její přítomnost v materiálu limitovala další plánované úkony, především plánovanou a nutnou konsolidaci. Mechanické namáhání silně zvětralého povrchu pak v tomto případě bylo neúměrné efektivitě čištění a v některých místech by bylo zcela nevhodné a nepoužitelné.

Z abrazivních metod se neosvědčilo mikropískování s nejménějším abrazivem tj. moučkou z přírodního živce, kterým bylo docíleno pouze malého efektu očištění povrchu kamene. Ostatní abrazivní metody se projeví jako velice účinné a proto se zdá dostačující k čištění povrchu sochy zvolit nejměkčí z odzkoušených abraziv, tedy moučku z dolomitického vápence. Oba typy ostrohranných korundů, jež jsou nejtvrdšími abrazivy vůbec, způsobovaly okem viditelné narušení struktury kamene.

Jako nejvhodnější způsob čištění byla vyhodnocena metoda mikropískování s použitím nejměkčího odzkoušeného abraziva (viz Obr. 94, druhá zkouška zleva), tedy moučkou z dolomitického vápence. Touto metodou pak byl následně povrch sochy předčištěn pro potřeby úspěšné konsolidace. Mikropískováním však nebylo docíleno očištění všech nečistot, povlaků, biogenního růstu a krust, ale povrch sochy byl pouze částečně očištěn tak, aby mohla být efektivně prekonsolidována i místa, na kterých ještě nečistoty a krusty zůstávají. Některé nečistoty a krusty byly v této fázi na povrchu sochy záměrně ponechány, aby mohly být redukovány až po zpevnění silně degradovaného podkladního kamene, na kterém se vyskytují, a aby tak byly redukovány další ztráty dochovaného povrchu sochy světice č. 1 (viz. Obr. 119–Obr. 124 v kapitole 7).

#### **5.2.4 Strukturální konsolidace a injektáž prostředky na bázi vápenných nanosuspenzí**

Na základě provedeného laboratorního testování, důkladně popsaného v teoretické části diplomové práce, a následných zkoušek na lomové ploše fragmentu nohou sochy světice č. 1 byl jako konsolidant vhodný pro zpevnění celé této sochy zvolen prostředek CaLoSil®E25 (nanosuspenze hydroxidu vápenatého v ethanolu, obsah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  25 g/l) od německého výrobce firmy IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG.

Konsolidant byl aplikován na suchý kámen za pomoci injekčních stříkaček s jehlami a stříček různých velikostí a podmínky aplikace a následného zrání konsolidantu se průměrně pohybovaly okolo 23,5 °C (min-max, 20,7–26,6 °C) a 58,3 % RH (min-max, 50,1–67,1 %). Zpevňovací prostředek byl vždy aplikován do nasycení daného místa tak, aby nestékal a nezůstával zadržován na povrchu sochy, v záhybech apod. Případný přebytečný, nevsáknutý kapalný konsolidant byl neprodleně odsáván buničinou, nebo jiným savým materiálem. (viz Obr. 129 a Obr. 130, kapitola 7)

V průběhu konsolidace byla sledována spotřeba konsolidantu na jednotlivých ošetřovaných plochách. Aby bylo možné spotřebu snadněji sledovat, byl povrch sochy rozdělen na několik napouštěných oblastí, u kterých byla následně změřena jejich plocha a spotřeba tak

mohla být vzhledem k této ploše přepočítána a vyjádřena v litrech na metr čtvereční, viz tabulka a Obr. 96.

Napouštění sochy světice bylo celkem věnováno 10 pracovních dnů a konsolidace byla rozdělena do dvou fází oddělených několika denní přestávkou pro vyzrání konsolidantu. V jednom dalším dni, navazujícím na druhou fázi konsolidace, byla provedena injektáž ohrožených míst (prasklin, dutin aj.) vysoce koncentrovaným prostředkem ze stejné řady CaLoSil®Pasty (vysoce koncentrovaná pastózní nanosuspenze hydroxidu vápenatého v ethanolu; obsah sušiny cca 25%). Injektáž byla provedena tzv. metodou mokré do mokrého a před ní tedy byla injektovaná místa předpenetrována CaLoSilem®E25. Z toho 6 po sobě jdoucích dnů bylo věnováno systematické konsolidaci všech částí sochy mimo zadní strany trupu, na které byl tento fragment uložen a tak plocha zad sochy byla tím pádem v danou dobu nepřístupná. Konsolidována nebyla také podstava sochy, tedy spodní plocha fragmentu části nohou s plintem ze stejného důvodu. Po tomto období, kdy byly jednotlivé části napuštěny ve 3-5ti cyklech, v závislosti na míře poškození daných míst a také v závislosti na schopnosti materiálu přijímat konsolidant, následovala technologická pauza pro zrání aplikovaného konsolidantu. Po přibližně 20ti dech od této první fáze konsolidace byl posouzen její efekt a byla lokalizována nedostatečně zpevněná místa, které bylo nutné opakovaně napustit.

Před zahájením druhé fáze konsolidace sochy světice č. 1 byl již kámen, ze kterého byl zhotoven trup sochy, stabilizovaný do té míry, že s ním bylo možné manipulovat bez rizika jeho dalšího poškození. Dostatečně zpevněné byly také lomové plochy fragmentů a tak nic nebránilo tomu, aby byly jednotlivé části sestaveny do původní kompozice a pro další fázi konsolidace tak byla socha přístupná ze všech stran (mimo její podstavy). Postup sesazení jednotlivých fragmentů sochy bude popsán v následující kapitole. Tato kapitola je věnována celému procesu konsolidace, i když tento proces nebyl kontinuální, aby jej bylo možné přehledně a uceleně popsat.

Po sestavení fragmentů sochy světice byla opakovaně napuštěna nedostatečně konsolidovaná místa ve 2–4 cyklech a po očištění zadní plochy trupu (především mikropískování, metodika i použité vybavení je shodné s čištěním předčištěním zbylého povrchu sochy) byla ve třech cyklech konsolidována i tato, ještě neošetřená část.

Na konsolidaci tří částí sochy světice č. 1, jejichž plocha dohromady tvoří přibližně 4 m<sup>2</sup>, bylo celkem spotřebováno přibližně 38 litrů konsolidantu na bázi nanosuspenze hydroxidu vápenatého o koncentraci 25 g/l. Celkem si napouštění sochy konsolidantem vyžádalo přibližně

okolo 90-100 pracovních hodin (údaj je zde uváděn záměrně pro představu časové náročnosti aplikace použitého typu konsolidantu) Aplikace konsolidantu na vybranou plochu v rámci jednoho dne napouštění je považována za jeden napouštěcí cyklus, i když se tento skládal z více dílčích napouštěcích kroků. V průběhu jednoho dne byly napouštěny různé vybrané plochy, které byly stále prosycovány CaLoSilem<sup>®</sup>E25 tak, aby nedošlo k úplnému odparu rozpouštědla a povrch tedy zůstával předvlhčen pro další aplikaci. Mezi jednotlivými dny napouštění byl vždy kámen překryt polyethylenovou folií, aby se zpomalil odpar rozpouštědla a následující aplikace tak mohla být provedena do „mokrého“. Když byla konsolidace všech míst dokončena a rozpouštědlo se z kamene odpařilo, bylo přistoupeno k redukci bílého zákalu, který vznikl na povrchu sochy v důsledku konsolidace. Tento proces byl součástí zákroku, který vedl k dočištění některých vybraných povrchů sochy.



Napouštěcí plocha	plocha [m2]	reálná spotřeba [l]	spotřeba [l/m2]	počet aplikačních cyklů
Hlava světiice	0,22	0,875	4,1	3
Trup světiice zepředu a z boků / horní polovina	1,07	6,5	6,1	7
Trup světiice zepředu a z boků / dolní polovina	0,67	9,25	13,8	9
Spodní lomová plocha sochy světiice	0,13	3,5	26,9	4
Horní lomová plocha fragmentu nohou s plintem	0,14	4	28,6	4
Nohy s plintem	0,92	6	6,5	7
Záda světiice	0,91	8	8,8	3
<b>CELKEM</b>	<b>4,06</b>	<b>38,125</b>	<b>9,4</b>	<b>10 (+1)</b>

Obr. 96: Vyznačení jednotlivých napouštěných ploch, u kterých byla následně stanovena spotřeba konsolidantu v litrech na m<sup>2</sup>

### 5.2.5 Posouzení účinku konsolidace a hloubky penetrace konsolidantu měřením UZ transmise a testem pomocí roztoku fenolftaleinu

Po uplynutí doby přibližně 14ti dnů od dokončení konsolidace byly nedestruktivním měřením rychlosti průchodu UZ signálu posouzeny její účinky. Toto měření po konsolidaci bylo provedeno ve stejných měřících bodech jako v případě měření před restaurováním, jehož výsledky jsou včetně metodiky tohoto měření uvedeny v kapitole 1.2.3.5 Zjištění stavu sochy metodou ultrazvukové transmise. Kompletní zpráva k provedenému měření je spolu se znázorněním míst měření umístěna v příloze č. 3.

**Tab. 40: Měření rychlostí průchodu UZ signálu kamenem sochy svěčice č. 1 před a po konsolidaci**

	č. m.	Místo měření	směr měření	d (cm)	V před kons. (km/s)	V po kons. (km/s)	Změna (%)
hlava svěčice	1	přes vlasy	lp	23,0	1,96	2,21	13
	2	brada – temeno	v	22,3	2,20	2,20	0
	3	tváře	lp	14,4	2,14	2,11	-1
	4	krk	lp	11,5	1,62	2,27	40
	5	vlasy nad pravým uchem	v	5,2	2,49	2,64	6
	6	vlasy pod levým uchem	v	6,7	2,07	3,02	46
	7	čelo – zátylek	pz	24,7	1,93	1,92	-1
trup svěčice	8	pravé rameno	pz	12,5	2,35	2,05	-13
	9	levé rameno	pz	13,8	2,03	2,62	29
	10	přes ramena	lp	50,3	2,28	2,29	0
	11	hrud' – záda	pz	26,5	1,69	1,95	15
	12	břicho – záda	pz	38,2	1,36	1,54	13
	13	levá paže	pz	13,0	2,08	2,05	-1
	14	draperie na levé paži	lp	8,4	2,28	2,55	12
	15	draperie na levé paži	v	7,9	2,24	2,85	27
	16	draperie na levém předloktí	lp	3,1	2,17	2,09	-4
	17	levé předloktí	v	9,3	1,86	2,01	8
	18	levé zápěstí	v	6,1	1,73	2,05	18
	19	levá ruka	v	7,8	1,86	2,37	27
	20	lebka	v	14,0	1,79	1,70	-5
	21	draperie na břicho vedle lebky	v	8,3	2,20	2,52	15
	22	přes bedra	lp	30,7	2,13	1,82	-15
	23	draperie na břicho	v	4,5	1,97	2,80	42
	24	draperie na břicho	v	8,8	2,06	2,46	19
	25	draperie na pravém boku	v	18,6	1,86	2,32	25
	26	draperie na pravém boku	lp-v	4,6	2,71	3,38	25
	27	draperie na pravém boku	v	9,4	1,39	2,51	81
	28	draperie na pravém boku	pz	8,1	1,58	2,74	73
	29	přes stehna	lp	46,0	1,26	1,84	46
	30	draperie mezi stehny – zadní část	pz	39,8	1,19	1,59	34
	31	přes lýtka	lp	49,0	1,44	1,91	33
	32	draperie mezi lýtky – zadní část	pz	35,7	1,48	1,8	22
	33	draperie pod levým předloktím	pz	9,1	1,14	2,09	83
	34	draperie pod levým předloktím	pz	6,7	1,12	2,17	94
	35	draperie pod levým předloktím	pz	7,8	1,22	2,66	118
	36	draperie pod levým předloktím	pz	5,4	1,57	2,58	64
	37	draperie pod levou rukou	pz	4,9	1,39	2,12	53
	38	draperie vlevo dole	pz	6,0	1,05	2,42	130

	39	draperie vlevo dole	lp	15,8	1,82	2,29	26
	40	draperie mezi lýtky	lp	6,0	1,72	2,31	34
	41	draperie mezi stehny	lp	11,1	1,17	2,49	113
	42	draperie na levém kolenu	lp-v	4,1	1,39	2,81	102
	43	draperie nad levým kolenem	lp	4,0	1,12	2,60	132
	44	draperie na pravé straně	pz	8,0	0,94	1,92	104
	45	draperie na pravé straně	pz	6,3	1,43	2,32	62
nohy světlé s plintem	46	zadní část	lp	49,0	1,12	1,86	66
	47	sokl vzadu	lp	57,0	1,52	1,51	-1
	48	střední část	lp	50,2	1,07	1,32	23
	49	sokl střed	lp	57,7	1,51	1,44	-5
	50	sokl přední část	lp	44,2	1,93	2,11	9
	51	levá noha – zadní část	pz	37,5	1,49	1,80	21
	52	sokl pod levou nohou	pz	52,4	1,77	1,98	12
	53	pravá noha draperie zadní část	pz	26,4	1,59	2,12	33
	54	sokl pod pravou nohou	pz	47,6	1,77	2,01	14
	55	draperie za levou nohou	pz	10,9	1,39	2,29	65
	56	draperie za levou nohou	pz	5,0	0,83	2,15	159
	57	levá noha nahoře	lp	13,6	1,65	2,43	47
	58	levá noha dole	lp	11,0	1,82	1,91	5
	59	draperie mezi nohama nahoře	lp	7,9	1,28	2,61	104
	60	draperie mezi nohama dole	lp	9,0	1,92	2,43	27
	61	pravá noha	lp	10,8	1,83	2,64	44
	62	pravá noha chodidlo	lp	10,8	1,94	2,43	25

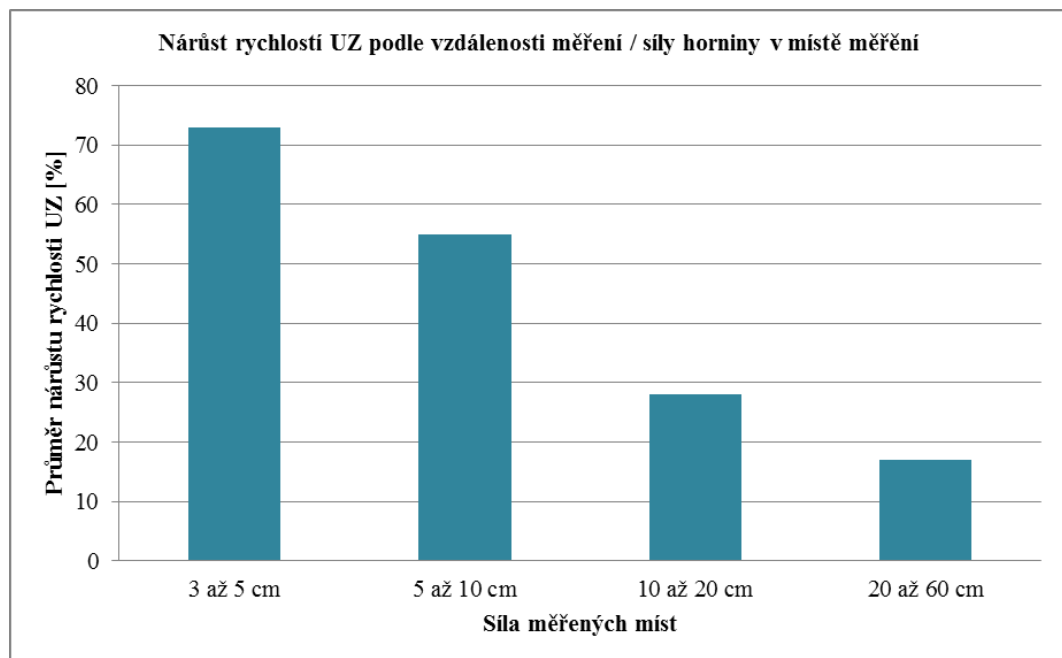
Z porovnání výsledků měření rychlostí průchodu UZ signálu před a po konsolidaci je patrné, že ve velké většině měřících bodů došlo ke zvýšení tohoto parametru. Z 62 měřících bodů došlo u 51 z nich k nárůstu rychlostí v důsledku konsolidace, což znamená, že u více než 80 % měření došlo k zaznamenanatelnému nárůstu pevnosti. Průměrný nárůst rychlostí měření, vypočítaný ze změny rychlosti UZ ve všech měřících bodech, činí oproti nekonsolidovanému materiálu 39 %. Průměrná hodnota rychlosti UZ před konsolidací byla 1,69 km/s a po konsolidaci a vyzrání zpevňovacího prostředku se zvýšila na 2,23 km/s.

Srovnání průměrných rychlostí UZ a průměrného nárůstu rychlostí UZ v jednotlivých bodech sice dokládá celkovou účinnost konsolidace, ale neposkytuje žádnou informaci o míře zpevnění v různých částech sochy a v různých hloubkách vápence. Proto byly výsledky měření rozděleny do několika kategorií podle vzdálenosti měření, tedy podle tloušťky vápence v místě měření. Tím bylo možné získat srovnávací údaje průměrných změn rychlosti UZ ve vztahu k síle horniny a tak nepřímo hodnotit i efektivitu konsolidace v různých hloubkách od povrchu.



Tab. 41: Posouzení efektu konsolidace u provedených měření v závislosti na síle měřeného místa

Síla měřených míst	Průměrná rychlost měření v dané skupině před ošetřením (min.-max. hodnoty rychlosti) [km/s]	Průměrná rychlost měření v dané skupině po konsolidaci (min.-max. hodnoty rychlosti) [km/s]	Průměr z jednotlivých nárůstů rychlostí měřených míst po konsolidaci [%]
<b>3 až 5 cm</b>	1,67 (0,83-2,71)	2,56 (2,09-3,38)	<b>73 %</b>
<b>5 až 10 cm</b>	1,69 (0,94-2,28)	2,44 (1,92-3,02)	<b>55 %</b>
<b>10 až 20 cm</b>	1,84 (1,17-2,35)	2,26 (1,7-2,64)	<b>28 %</b>
<b>20 až 60 cm</b>	1,60 (1,07-2,28)	1,86 (1,32-2,29)	<b>17 %</b>
<b>Celkově</b>	1,69 (0,83-2,71)	2,23 (1,32-3,38)	<b>39 %</b>



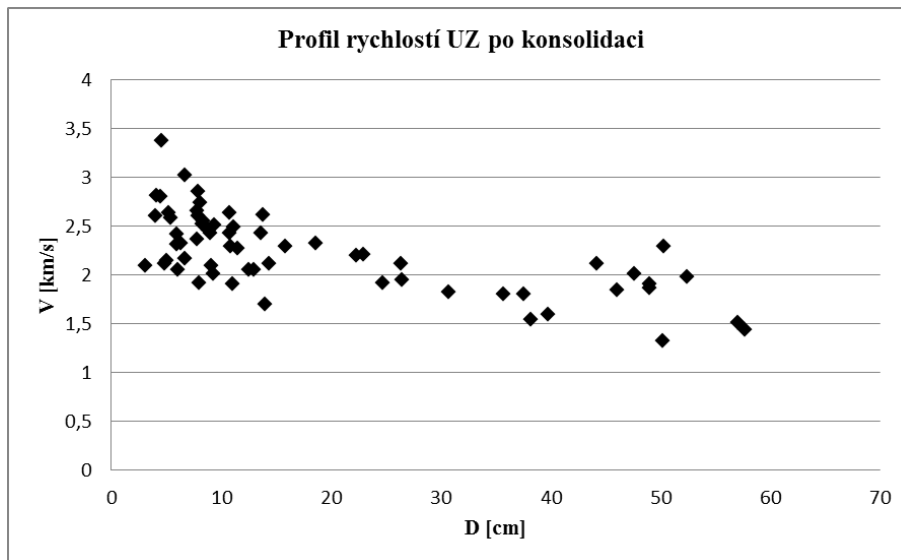
Graf 29: Průměry jednotlivých nárůstů rychlostí míst měřených po konsolidaci, rozdělených do skupin dle tloušťky měřeného místa

Tab. 41 a Graf 29 zřetelně ukazují míru nárůstu rychlosti UZ po konsolidaci v závislosti na měřicí vzdálenosti tedy na síle (tloušťce) vápence v místě měření. Je patrné, že nárůst rychlosti UZ klesá se vzrůstající vzdáleností měření tj. silou horniny v místě měření. Podobný trend lze očekávat i v případě pevností vápence po konsolidaci, protože rychlost UZ a pevnost materiálů spolu úzce souvisí. Nejvyšší míry zpevnění bylo podle měření UZ transmise zcela logicky dosaženo ve vrstvách vápence nejbližší k povrchu. Pro vzdálenosti měření 3–5 cm bylo nárůst rychlosti UZ nejvyšší a to až 73 %. Míra nárůstu směrem do hloubky kamene postupně a téměř rovnoměrně klesá až na 17 % pro měřicí vzdálenosti 20–60 cm. Při vyšších měřených vzdálenostech se ve větší míře na výsledku podílí i rychlost UZ v hlubších nezpevněných vrstvách nebo vrstvách méně zpevněných než vrstvy blíže k povrchu. Z hlediska hodnocení výsledku konsolidace, lze toto zjištění považovat nejen za logické, ale i za pozitivní, protože nejvyšší míry zpevnění bylo dosaženo v nejvíce poškozených místech (vrstvách) sochy světice č. 1. I když je míra nárůstu rychlostí na povrchu vápence výrazně vyšší než v hlubších vrstvách, je profil rychlostí poměrně vyrovnaný. Trend rychlostí směrem k povrchu UZ (k menším měřeným vzdálenostem) mírně stoupá. Po konsolidaci došlo ke snížení rozdílů mezi hodnotami rychlostí UZ v povrchových degradovaných vrstvách a rychlostmi UZ v hlubších nepoškozených částech sochy světice. Celkově lze na základě výsledků měření hodnotit strukturální konsolidaci světice č. 1. nanosuspencemi hydroxidu vápenatého za velmi účinnou.

Je nutné doplnit, že hloubka od povrchu kamene odpovídá polovině měřené vzdálenosti v daném místě (viz Obr. 97)



**Obr. 97:** Schematické znázornění vztahu měřené vzdálenosti a hloubky od povrchu sochy



Graf 30: Profil rychlostí UZ po konsolidaci – závislost rychlosti na měřené vzdálenosti

Po dokončení konsolidace byl na spodní lomové ploše trupu světlíce vyvrtán otvor a pomocí roztoku fenolftaleinu byla identifikována hloubka penetrace konsolidantu vybarvením prosycené části kamene (vybarvení dočasně alkalického  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  pomocí roztoku fenolftaleinu). Tímto důkazovým testem byla zjištěna penetrace konsolidantu do hloubky přibližně 8mi centimetrů, jak je patrné z Obr. 98. Je nezbytně nutné upozornit, že tato zkouška byla provedena na ploše, která byla konsolidována ve vertikální tedy svislé orientaci. Na této ploše byl tedy konsolidant vsakován horninou především kapilárními silami. V případě aplikace na horizontálně orientované plochy, by pravděpodobně penetrace mohla být i vyšší v důsledku působení gravitace.



Obr. 98: Měření hloubky penetrace konsolidantu pomocí testu roztoku fenolftaleinu ve vrtu zhotoveném po konsolidaci – bílé i černé dílky na měřící tyčce odpovídají 1 cm

### **5.2.6 Redukce bílého zákalu a dočištění vybraných ploch**

Po dokončení konsolidace bylo provedeno dočištění sochy světice, které také zahrnovalo redukci bílého zákalu na jejím povrchu vzniklou v důsledku konsolidace (viz Obr. 143 v kapitole 7). Dočištění bylo provedeno mikroabrazivní metodou mikropískováním s použitím měkkého abraziva z dolomitického vápence, které bylo na základě zkoušek vyhodnoceno jako nejšetrnější a současně dostatečně efektivní. (viz Obr. 146 a Obr. 147 v kapitole 7)

Po odstranění bílého zákalu a dočištění některých v první fázi (záměrně) ne zcela očištěných ploch následovala redukce tmavých krust a depositů, které vytvářely silné optické kontrasty a přispívaly tak ke snížené čitelnosti modelace sochy. Silnější části těchto krust bylo možné od už zpevněného povrchu odstranit mechanicky např. skalpelem, naopak ty nejtenčí byly redukovány rovněž mikropískováním.

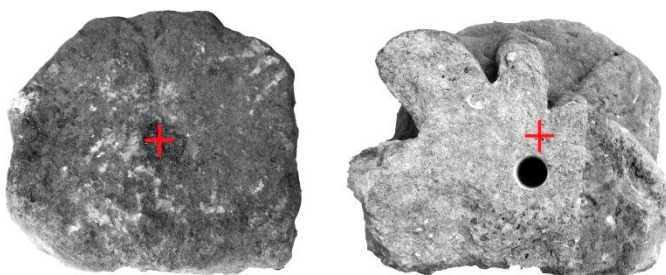
Krusty a tmavé povlaky, které nebylo možné těmito dvěma metodami odstranit, byly v první fázi mechanicky ztenčeny nebo odstraněny po jejich naměkčení pomocí dvou cyklů zábalů 15% hydrogenuhličitanu amonného v buničině. Plochy obložené těmito zábalů byly po sejmutí posledního z nich řádně odsoleny dalšími dvěma zábalů buničinou s demineralizovanou vodou.

Po sejmutí odsolovacích zábalů byly tyto ještě mokré plochy dočištěny pomocí laseru, který se díky vysokému kontrastu tmavých depositů podpořených navíc jejich provlhčením ukázal jako velice účinný. Tato metoda byla využita především k dočištění oblasti pod levou rukou světice, která byla tmavými krustami pokryta ve vysoké míře. Tato oblast byla díky vysokým kontrastům mezi kamenem a tmavými povlaky znečitelněna a modelace jednotlivých tvarů draperie tak zcela zanikala. Za pomoci laseru, který selektivně odstraňuje kontrastní vrstvy, byla tato oblast velmi šetrně dočištěna a díky tomu byla obnovena čitelnost modelace této oblasti.

V poslední fázi byly z povrchu odstraněny zbytky mechů, které někde byly velmi pevně vrostlé do struktury kamene. Na některých místech proto zůstaly projevy této kolonizace i po restaurování patrné, jelikož je díky jejich vrůstání mezi zrna kamene nebylo možné zcela odstranit.

### 5.2.7 Sesazení sochy

V průběhu konsolidace sochy světice byly jednotlivé fragmenty sochy sestaveny do jejich původní kompozice. K sesazení spodních dvou částí sochy byl kvůli nepoměru jejich velikostí použit masivní čep z nerezové oceli, aby byla zajištěna dostatečná stabilita sochy. Do spodní části sochy, tedy nohou světice s plintem byl jádrovým vrtákem o vnějším průměru 50 mm vyvrtán otvor pro tento čep. V podstavě tohoto fragmentu se již jeden, pravděpodobně původní, otvor pro čep nacházel, avšak jeho poloha byla vůči lomovým plochám dvou fragmentů nevhodná. Tento otvor byl situován ve středu podstavy fragmentu nohou světice. Když jsme si polohu tohoto čepu promítly na lomovou plochu fragmentu, zjistili jsme, že jeho poloha je příliš těsná s jedním ze záhybů draperie mezi nohami světice, jak je patrné z následujícího obrázku Obr. 99. Z tohoto důvodu bylo nutné zhotovit nový otvor pro čep ve středu hmoty kamene, která by jím měla být následně propojena.



**Obr. 99: Promítnutí polohy původního otvoru pro čep na lomovou plochu fragmentu a následné vyvrtání nového otvoru pro sesazení fragmentů sochy světice č. 1**

vyznačeny ze dvou směrů osy rovnoběžné se směrem vedení čepu. Na střed spodní lomové plochy fragmentu trupu sochy světice byl připevněn trvale plastický tmel, který byl následně překryt fólií, aby se zamezilo jeho přilepení ze spodní strany. Takto připravený trup sochy světice byl uvázan na vázací lana a pomocí řetězového zvedáku byl vyzdvižen do požadované výšky. Pod trup zavěšený v jeho originální tj. svislé orientaci byl pomocí paletového vozíku přistaven fragment části nohou s podstavcem, který byl uložen na paletě. Když byly oba fragmenty uvedeny do vzájemně vyhovující polohy, byl trup světice pomalu spouštěn tak, aby na sebe lomové plochy téměř dosedly a aby se novodurová trubka otiskla do plastického tmelu přilepeného na lomové ploše trupu světice č. 1.. Osy směru vedení čepu byly prokresleny rovněž na trup světice, aby dle nich mohl být ve správném směru vyvrtán otvor i do této části kamene.

Po vyvrtání nového otvoru pro čep, jehož směr byl kolmý k podstavě sochy světice, do něj byla vsunuta novodurová trubka (o stejném průměru jako budoucí nerezový čep), která byla upravena tak, aby přibližně 1 cm vyčnívala nad lomovou plochu tohoto fragmentu. Na povrchu sochy byly barevnou křídou

Trup světice byl opět uložen na záda a byl do něj jádrovým vrtákem stejné tloušťky vyvrtán otvor pro čep. Oba vyvrtané otvory pro čep byly před sesazováním fragmentů řádně zbaveny prachu za použití stlačeného vzduchu. Otvor ve spodní části sochy byl hluboký cca 23 cm a jemu protilehlý v části trupu světice měl hloubku přibližně 43 cm, aby došlo k překlenutí slabší hmoty kamen v oblasti mezi koleny. Pro spojení těchto dvou fragmentů byla použita 65 cm dlouhá silnostěnná nerezová trubka o průměru 40 mm × 3 mm, která byla rovněž opatřena na obou koncích ucpávkami z vytvrzené polyuretanové pěny. Trubka nebyla nijak povrchově upravována např. perforováním, zářezy aj., aby mohl být spoj v budoucnu v případě potřeby snadno rozebíratelný. Když bylo vše připraveno na finální sesazení dvou velkých částí sochy, taky byl trup světice opět zavěšen na lana. Do vrtu v trupu světice byl vsunut čep natřený gelovým epoxidovým lepidlem a pod tento díl byla opět přistavena spodní část sochy. Do spodního lůžka čepu byla nalita připravená malta (hydraulické vápno s pískem v obj. poměru 1:1) a trup světice byl spolu s již vsunutým čepem pomalu spouštěn, tak aby dosedl do požadované pozice na lomovou plochu spodního fragmentu. Ještě před sesazením sochy byl původní otvor pro osazení sochy světice ve své spodní části zaslepen ucpávkou z vyzrálé polyuretanové pěny a jeho prostor byl následně při sesazování sochy také zalit malým otvorem zhotoveným v horní části nového vrtu pro čep. K zalití této dutiny byl použit trychtýř, kterým do něj bylo vpraveno dostatečné množství stejné malty jako v případě zalití čepu.

Hlava byla osazena rovněž na čep z nerezové oceli, který tvořila kulatina o průměru 8 mm. Po přiložení hlavy k trupu světice byl nalezen vhodný směr vedení čepu a jeho osy byly zakresleny křídou na povrch obou částí sochy. Po zhotovení otvorů byl čep nejprve zalit do 10 mm širokého a 8 cm hlubokého otvoru v části hlavy středně viskózní epoxidovou pryskyřicí. Po vytvrzení tohoto spoje byla hlava světice se 7 cm dlouhým čepem osazena do protilehlého otvoru v trupu světice na gelové epoxidové lepidlo. (viz Obr. 131–Obr. 143 kapitola 7)

Po vytvrzení lepených spojů byly dutiny v některých místech nepřilíh doléhajících lomových ploch vyplněny pomocí tlakové injektáže komerčně vyráběnou restaurátorskou maltovinou. Do mezer ve spojích byly umístěny jehly o průměru 1,6 mm, kterými byla následně vpravena maltovina. Mezery po celém obvodu byly zaslepeny pomocí buničiny, pouze v nejvyšším bodě injektované dutiny byly ponechány otvory, aby mohla být kontrolována míra vyplnění injektovaného prostoru a také aby měl kudy unikat vzduch vytlačovaný injektážní maltovinou. Před injektáží těchto dutin zvolenou maltovinou byla provedena zkouška utěsnění injektovaného prostoru, pomocí tlakové injektáže vodou, která rovněž provlhlčila a připravila dutiny pro injektáž. Následně byla provedena tlaková injektáž dutin ve směru od nejnižších

k nejvyšším bodům vyplňovaného prostoru. Zaplnění všech částí dutiny bylo rozpoznáno a kontrolováno vytékáním maltoviny z vždy výše umístěné jehly. Tímto způsobem byly obě mezery mezi lomovými plochami fragmentů vyplněny a vzájemně propojeny. (viz Obr. 144 a Obr. 145 kapitola 7)

Aby u spoje ve spodní části sochy nedocházelo při její manipulaci k nežádoucím pohybům, byly do čtyř vybraných mezer po obvodu spoje utemovány olověné válečky zhotovené srolováním 2 mm silného olověného plátu. Toto opatření by mělo minimalizovat případné pružení masivního nerezového čepu, který je oproti dílu s podstavou v horní části zatížen velkou masou horniny.

### **5.2.8 Zajišťovací tmelení**

Po všech předcházejících zásazích bylo provedeno tzv. zajišťovací tmelení ohrožených částí sochy světice. Pro tmelení byl zvolen tmel vybraný na základě provedených zkoušek. Jeden z hlavních požadavků na vhodný tmel byla především jeho nižší pevnost, než které dosahuje konsolidovaný kámen (hodnoceno subjektivně vrypem). Jeho funkcí by mělo být vyplnění a tím zajištění různých rozhraní mezi méně a více degradovanými částmi kamene, které vyčnívají nebo tvoří ostré kontury v místech, kde došlo ke ztrátě nějaké hmoty. Jedním z dalších požadavků byla vhodná struktura a barevnost tmelu vůči okolní hornině. Na základě tohoto požadavku byla proto zvolena pro zkoušky tmelů různě barevná kameniva z podobných typů materiálu. Všechny materiály použité pro odzkoušení vhodného tmelu jsou uvedeny v tabulce Tab. 42 a konkrétní receptury pak v tabulce Tab. 43. Vzájemné poměry mísení jednotlivých komponent jsou uvedeny v jednotkách objemu. Pro dobrou zpracovatelnost tmelu byla použita záměsová voda s přídavkem akrylátové disperze Primal AC35 s konečným obsahem sušiny do 5%. Tmel byl mísen se záměsovou vodou tak, aby byl dobře zpracovatelný a plastický.

Tab. 42: Seznam použitých materiálů a jejich zkratky použité v následující tabulce s recepturami

Zkratka materiálu pro recepturu	Popis významu zkratky
cement	Bílý portlandský cement (slow) CEM I 52,5 N (podle EN197/1); Holcim (Rohožník – SR) a. s.
vápenný hydrát	Vápno CL 90 – vápenný hydrát, výrobek odpovídá EN 459-1; VÁPENKY VITOŠOV s. r. o. (ČR)
SLKH	směs kameniva zvětralého kutnohorského vápence o velikosti zrn 0-2 mm, použita také pro zhotovení zkušebních laboratorních tělísek – viz charakteristika této směsi v kapitole 3.4.1
SMw 0-1	drť z mušlového vápence Kalksandstein St. Margarethener z lomu Römersteinbruch o velikosti zrn 0-1 mm, typ white – světlá drť barvy slonové kosti
SMb 0-1; SMb 0-2	drť z mušlového vápence Kalksandstein St. Margarethener z lomu Römersteinbruch o velikosti zrn 0-1 mm a 0-2 mm, typ brown – tmavší, nahnědlá drť

Tab. 43: Receptury zkoušených tmelů

Číslo tmelu	Plnivo	Pojivo	Vzájemný poměr pojiva a plniva
1	SLKH	cement + vápenný hydrát (1:1)	1:4
2	SLKH	vápenný hydrát	
3	SLKH + SMb 0-2 (1:1)		
4	SLKH + SMB 0-2 + SMw 0-1 (2:1:1)		
5	SLKH + SMw 0-1 (3:1)		
6	SLKH + SMb 0-1 + SMw 0-1 (3:0,5:0,5)		





Obr. 100: Zkoušky tmelů; vybraný tmel je na obrázku označen červeně

Na základě provedených zkoušek bylo vyloučeno použití tmelu obsahujícího cement, kvůli jeho přílišné tvrdosti. Z dalších tmelů pojených vápenným hydrátem, které se vzájemně v pevnostech příliš neodlišovaly, byl jako barevností a strukturou nejvhodnější vybrán tmel číslo 6. Vyhovující barevnosti tohoto tmelu bylo docíleno nalezením vhodných vzájemných poměrů různě barevných vápencových drtí. Tmel tak díky tomu není třeba ve hmotě nijak dobarvovat anorganickými pigmenty.

Tmelení sochy světice bylo provedeno pouze v ohrožených partiích a na místech, kde bylo možné menší části tvarů modelace doplnit tak, aby tvary nepůsobily rozbitě. Rekonstrukce větších hmot nebyla vzhledem k míře dochovaného tvarosloví provedena. Způsob provedeného tmelení je možné označit rovněž za tzv. konzervační tj. takový, jehož cílem je pouze napomoci zachování hmotné podstaty díla v současně dochované formě. (viz Obr. 147, Obr. 151 a Obr. 155, kapitola 7)

### 5.2.9 Barevná retuš

Po vyzrání tmelů bylo provedeno jejich barevné zapojení do ostatní hmoty kamene. Tato místa byla retušována pomocí vlasových štětců různých velikostí za použití světlostálých anorganických pigmentů rozptýlených v ethanolu bez použití pojiva.

Když byly do celku barevně zapojeny tmely, bylo přistoupeno také k lokální barevné retuši dochovaného povrchu sochy, abychom napomohli obnovení její ztracené plasticity. Především vlivem uložení části trupu sochy světice č. 1 v nevhodné poloze přední

stranou k zemi, došlo ke ztrátě patiny v této partii. Naopak na exponovaných místech vznikla patina nová, která se sice vytvořila na charakteristických místech ale ve špatné orientaci této části sochy. Oba tyto jevy přispěly k znečitelnění dochovaného tvarosloví sochy. Po obnovení vzájemné kompozice a originální orientace jednotlivých částí sochy se ukázalo žádoucí alespoň v základních směrech jednotlivých hmot podpořit plastickou modelací sochy ztmavením některých partií. Místa, u kterých byla tato korekce provedena, byla vyhledána za pomoci bočního i horního nasvětlení sochy, aby odpovídala místům dešťových stínů, kde se přirozeně patina u exponovaných kamenných soch tvoří. K této intervenci bylo přistoupeno také proto, že socha by měla být umístěna sice do exteriéru, ale pod přístřešek, aby byla v budoucnu chráněna proti povětrnosti. Přirozený vznik patiny v následujících letech tak můžeme na základě plánovaného umístění vyloučit.

Oba typy barevných retuší jak tmelů, tak i dochovaného povrchu sochy světice č. 1 byly provedeny bez přídavku pojiva a je tedy možné je v budoucnu velmi snadno sejmout.

Stav sochy po restaurování je zachycen na Obr. 156–Obr. 159 v obrazové dokumentaci restaurátorského zásahu.

### **5.3 Materiály a technologie použité při restaurování sochy světice č. 1**

- konsolidant CaLoSil®E25 (IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG; Freiberg; G)
- injektážní prostředek CaLoSil®Pasty (IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG; Freiberg; G)
- epoxidová pryskyřice Epoxy 1200 (Kittfort Praha s. r. o.; Praha; ČR)
- gelová epoxidová pryskyřice AKEPOX 5010 – dvousložkové epoxidové želatinové transparentní lepidlo (AKEMI GmbH; Norimberk; G)
- injektážní maltovina LEDAN® TA1 (dříve D2) (TECNO EDILE TOSCANA; Latina; I)
- mikropískovač Sandmaster FG1-93 Restoration; abrazivum dolomitický vápenec o velikosti zrn 0-300 µm
- biocidní prostředek Porosan (AQUA obnova staveb s. r. o.; Praha; ČR)
- Vápno CL 90 – vápenný hydrát, výrobek odpovídá EN 459-1 (VÁPENKY VITOŠOV s. r. o.; ČR)
- drť z mušlového vápence Kalksandstein St. Margarethener z lomu Römersteinbruch o velikosti zrn 0-1 mm, typ white – světlá drť barvy slonové kosti (A)
- drť z mušlového vápence Kalksandstein St. Margarethener z lomu Römersteinbruch o velikosti zrn 0-1 mm a 0-2 mm, typ brown – tmavší, nahnědlá drť (A)
- směs kameniva zvětralého kutnohorského vápence o velikosti zrn 0-2 mm, použita také pro zhotovení zkušebních laboratorních tělísek – viz. charakteristika této směsi v kapitole 3.4.1
- Primal AC35 (dříve SF016), koncentrovaný na konečný obsah sušiny 5% použit do záměsové vody tmelů (Rohm and Haas)
- světlostálé barevné pigmenty Bayferrox (Lanxess)
- čep z nerezavějící oceli pro spojení dvou spodních fragmentů sochy světice č. 1 – 65 cm dlouhá silnostěnná trubka o průměru 40 mm × 3 mm
- čep z nerezavějící oceli pro osazení odlomené hlavy – 14 cm dlouhá tyčovina o průměru 8 mm
- 15% roztok hydrogenuhličitanu amonného aplikovaný formou buničtinových zábalů (Arbocel BC 200)

#### **5.4 Doporučený režim památky**

Restaurování sochy světice a jeho celá koncepce byla stanovena na základě budoucího umístění sochy světice č. 1 pod stříšku u ohradní zdi v exteriéru dvora ČMS v Kutné Hoře. Z dlouhodobého hlediska je pro uchování stávajícího stavu sochy nepřipustná její dlouhodobá expozice povětrnosti. Mělo by být tedy zajištěno, aby byl objekt chráněn především před srážkovou vodou a vzlínající vlhkostí. Zvláštní pozornost by měla být věnována zeleni v okolí objektu a jejím pravidelným úpravám tak, aby nedocházelo k vzájemnému kontaktu se sochou světice. Socha by neměla být zastiňována zelení, aby nedocházelo k jejímu zavlhčení, pomalému vysychání a následnému biologickému růstu, ze stejného důvodu by také neměla příliš těsně přiléhat k ohradní zdi, před kterou je plánované její umístění. Tato opatření jsou velmi důležitá především s ohledem na to, že z degradovaného kamene nebylo možné některé pozůstatky biologického růstu bezezbytku odstranit. V případě nedodržení doporučeného režimu tedy na povrchu sochy hrozí opětovný biologický růst, kterému budou uvedena rezidua vhodným substrátem. Z uvedených důvodů je také nutné v pravidelných intervalech provádět ohledání stavu objektu kompetentní osobou a případné objevené závady napravit.

Vzhledem ke kompozici sochy světice se domníváme, že pravděpodobně byla umístěna na soklu, nebo architektonickém prvku ve vyvýšené pozici. Vzhledem k plánovanému místu osazení této sochy ji proto doporučujeme umístit na nějaký tvarově i barevně vyhovující podstavec tak, aby úroveň očí diváka byla někde mezi rozkrokem a koleny světice.

## 6 Závěr

Hlavní součástí zadání této diplomové práce bylo komplexní restaurování sochy světice č. 1 z organodetrického vápence s důrazem na její konzervaci a stabilizaci. Stabilizace hmotné podstaty díla byla zaměřena především na strukturální konsolidaci vápence použitého pro zhotovení sochy. Vycházejíc ze současných trendů a požadavků památkové péče bylo snahou využít pro strukturální konsolidaci zpevňovací prostředek, který je po vytvrnutí materiálově kompatibilní s originálem tj. vápencem. Pro splnění tohoto požadavku se nabízelo použití inovativních konzervačních postupů využívajících nové nanotechnologie – alkoholové nanosuspenze hydroxidu vápenatého.

Fragmenty sochy světice č. 1 byly po převezení do ateliéru restaurování kamene FR UPCE podrobeny důkladnému vizuálnímu průzkumu, na který navázal průzkum využívající přírodovědné metody. Detailní průzkum umožnil s dostatečnou přesností charakterizovat nejen celkový stav jednotlivých částí sochy světice, ale podrobně popsat i hlavní typy poškození kamene. Mezi nejzávažnější poškození sochy lze zařadit rozlomení figury na tři části a ztrátu některých partií, nevratné změny modelace sochy způsobené úbytkem povrchových vrstev kamene, výrazné snížení jeho pevnosti a přítomnost sádrovcových krust na poměrně rozsáhlých plochách jeho povrchu, jenž byl také masivně biologicky osídlen. Celkově bylo možné bez nadsázky charakterizovat stav sochy před restaurováním za havarijní. Tento stav byl důsledkem koroze vápence, ke které v posledních letech přispělo také nevhodné uložení fragmentů sochy před restaurováním, jenž mělo za následek vysoké zatížení kamene vlhkostí.

Výše zmíněný obšírný průzkum posloužil jako nezbytný podklad pro formulaci koncepce restaurování i pro výběr technologií a materiálů použitých při restaurátorském zásahu.

Jak již bylo zmíněno výše, klíčovým konzervačním úkonem byla strukturální konsolidace sochy. Samotnému zpevnění předcházelo systematické odzkoušení konsolidačních prostředků na bázi alkoholových nanosuspenzí hydroxidu vápenatého tak, aby bylo možné posoudit nejen jejich účinnost, ale i možná rizika a případné negativní důsledky konsolidace. Zároveň bylo cílem optimalizovat způsob jejich aplikace a posoudit vliv podmínek zrání po nanesení zpevňovacího prostředku. Samotné zkoušky nebyly samozřejmě prováděny na originálu, ale na zkušebním materiálu odpovídajících vlastností. V rámci zkoušek se podařilo připravit sérii uměle zhotovených zkušebních tělísek poměrně věrně napodobujících vysoce degradovaný, kutnohorský vápenec. Tento krok byl pro další experiment velmi důležitý, aby bylo posuzování vhodnosti testovaných konsolidantů nejen reprodukovatelné, ale aby zkušební tělíska co nejlépe vystihovala realitu, tedy poškozený vápenec. Připravená tělíska měla stejné chemické i mineralogické složení, stejný tvar i velikost zrn jako vápenec použitý ke zhotovení

sochy. Současně měla tělíska velmi nízkou pevnost a vysokou pórovitost jako tomu bývá u vysoce poškozených hornin toho typu.

Rozsáhlý experiment byl zaměřen na odzkoušení účinnosti konsolidace několika typů alkoholových nanosuspenzí hydroxidu vápenatého a současně také na vliv konsolidace na další vlastnosti zpevněného materiálu. Výsledky konsolidace byly hodnoceny vizuálně a pomocí celé řady přírodovědných metod. Ukázalo se, že pomocí 1% (tj. 10 g/l účinné látky) a 2,5% (tj. 25 g/l účinné látky) vápenných nanosuspenzí, lze účinně zpevnit silně degradovaný organodetritický vápenec nejméně do hloubky 4 cm (rozměr zkušebního tělíska). Pevnosti dosažené u tělísek s původně prakticky nulovou pevností dosahují do 0,8 MPa, což odpovídá přibližně pevnosti malt pojených bílým vzdušným vápnem po 90 dnech zrání. Je však nezbytné dodat, že zmíněné míry konsolidace bylo docíleno po vícečetném opakování aplikace (u 1% suspenzí  $10 \times$  a u 2,5%  $5 \times$ ) poměrně velkého objemu suspenzí při spotřebách přibližně 60 l m<sup>2</sup> v případě 2,5% prostředků a 125 l/m<sup>2</sup> v případě 1% prostředků. Nejlepších výsledků konsolidace ve většině hodnocených kritérií poskytovala komerčně vyráběná nanosuspenze hydroxidu vápenatého CaLoSil<sup>®</sup>E25 (25 g/l).

Pro srovnání vápenných nanosuspenzí s běžně užívanými organokřemičitými prostředky ke konsolidaci studovaného typu horniny, byli zvoleni dva zástupci této skupiny konsolidantů. Jeden z nich byl standardní prostředek na bázi esterů kyseliny křemičité a druhým byl podobný, výrobcem speciálně upravený prostředek, modifikovaný pro lepší adhezi na vápenné materiály. Oběma těmito konsolidanty bylo docíleno obdobné míry zpevnění jako u tělísek zpevněných vápennými nanosuspenzemi. Množství aplikovaného konsolidantu bylo zvoleno tak, aby konečný obsah účinné látky byl podobný jako u vápenných nanosuspenzí. Znamená to, že při koncentraci těchto prostředků poskytujících cca. 30 % hm. gelu SiO<sub>2</sub> bylo zapotřebí přibližně desetkrát<sup>76</sup> až dvacetkrát<sup>77</sup> menšího objemu konsolidantu než v případě vápenných nanosuspenzí, aby bylo výsledné množství účinné, zpevňující látky na stejné úrovni tj. kolem 3–4 % hm. ve vztahu k hmotnosti konsolidovaného materiálu. Množství organokřemičitého konsolidantu dosahuje v přepočtu na spotřebu v l/m<sup>2</sup> hodnoty kolem necelých 7 l/m<sup>2</sup>.

Na základě vyhodnocení laboratorních zkoušek byla pro strukturální konsolidaci sochy světice č. 1 vybrána nanosuspenze CaLoSil<sup>®</sup>E25, kromě této byla pro injektáž vlasových prasklin použita ještě více koncentrovaná nanosuspenze hydroxidu vápenatého CaLoSil<sup>®</sup>Pasty, určená pro tyto účely.

---

<sup>76</sup> pro srovnání s 2,5% vápennými nanosuspenzemi

<sup>77</sup> pro srovnání s 1% vápennými nanosuspenzemi

Napouštění sochy vápennou nanosuspenzí bylo rozloženo do 10ti napouštěcích dní a celkem si vyžádala asi 90–100 hodin. Na konsolidaci, která byla rozdělena do dvou časových období s přibližně 20 denní pauzou, kvůli kontrole míry zpevňujícího účinku, bylo celkově spotřebováno 38 litrů 2,5% CaLoSilu®E25 s průměrnou spotřebou přibližně 9,5 l/m<sup>2</sup>. Spotřeba konsolidantu se na různých plochách lišila a v závislosti na míře jejich degradace se pohybovala v rozmezí zhruba od 4 do 29 l/m<sup>2</sup>.

Míra zpevnění a efektivita konsolidace byla po vyzrání konsolidantu hodnocena subjektivně pohmatem a také byla prověřena pomocí nedestruktivního měření ultrazvukové transmise. Z těchto hodnocení konsolidace vyplývá, že bylo docíleno účinného strukturálního zpevnění kamene a to až do hloubky několika centimetrů. Jednoduchým testem fenolftaleinu<sup>78</sup> byla ve vrtu zhotoveném po konsolidaci zjištěna hloubka penetrace do 8 cm. Plocha, na které byla tato hloubka penetrace změřena, byla napouštěna jako svislá, penetrace konsolidantu tak probíhala převážně na základě kapilární aktivity kamene.

Hlavní výhodou konsolidace vápenců pomocí nanosuspenzí hydroxidu vápenatého je především to, že jejich výsledným produktem je uhličitan vápenatý, tedy chemicky identická sloučenina s hlavní složkou zpevňovaného vápence. Lze proto očekávat, že i v dlouhodobém horizontu by nemělo docházet k nežádoucím interakcím „nového“ pojiva s originální horninou a tento způsob konsolidace je možné zařadit mezi opakovatelné způsoby konzervace bez negativního vlivu na originální horninu.

Je nutné také zcela otevřeně uvést, že značnou nevýhodou využití těchto technologií je časová náročnost aplikace a poměrně vysoká cena konsolidantu<sup>79</sup> srovnatelná s cenou 30% organokřemičitých prostředků, které ovšem poskytují 10ti násobné množství účinné látky tj. jsou až 10 × účinnější.

Závěrem je nutné připomenout, že navzdory provedenému systematickému odzkoušení konsolidantů na bázi Ca(OH)<sup>2</sup> i jejich následnému, úspěšnému využití na reálném objektu zůstává v této oblasti stále mnoho nezodpovězených otázek, které by bylo vhodné a žádoucí řešit podobným způsobem v budoucnu.

---

<sup>78</sup> důkazový test pomocí roztoku fenolftaleinu, detekující alkalitu vpraveného konsolidantu tj. přítomnost Ca(OH)<sup>2</sup> zbarvením do fialova

<sup>79</sup> cena vápenné nanosuspenze CaLoSil®E25 se pohybuje okolo 450 Kč/l (cena klesá při objednávce většího objemu cca nad 10 l), cena 30% produktů KSE se pohybuje okolo 610 Kč (produkt určený pro vápence je o něco dražší)

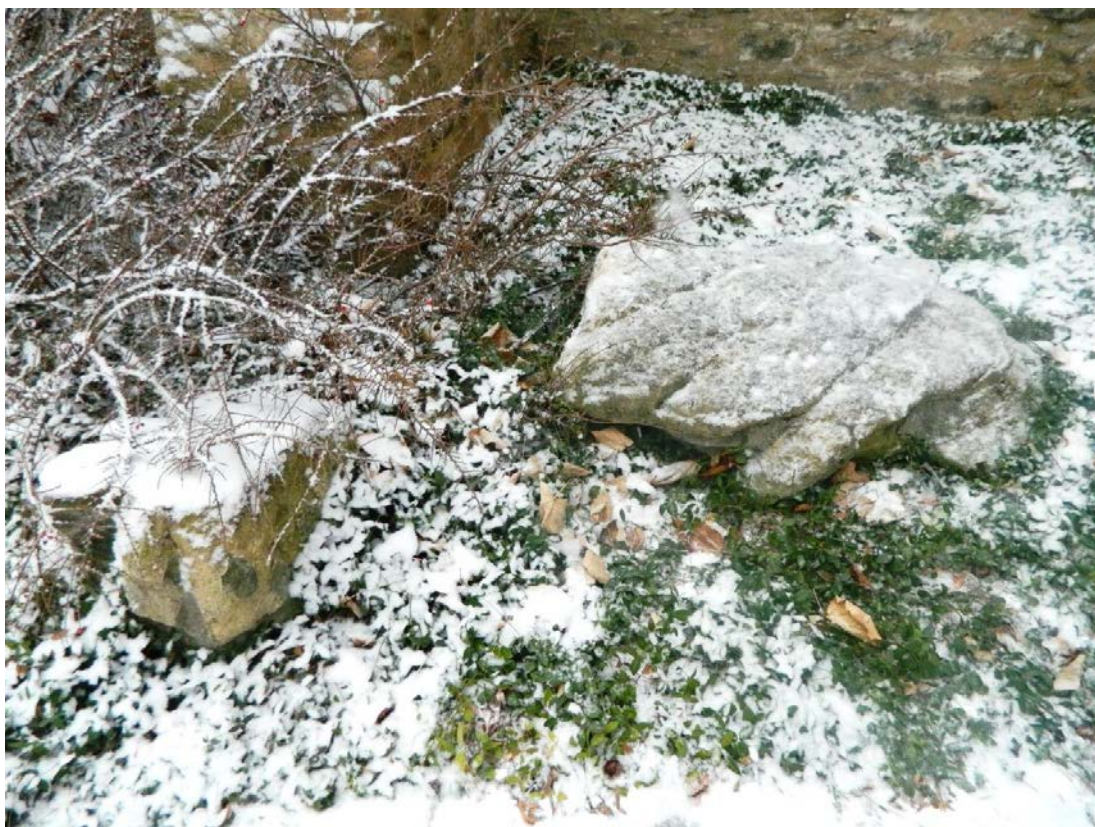
## **7 Dokumentace restaurátorského zásahu – obrazová příloha**



## ***Transfer, základní očištění a sanace biogenních růstů***



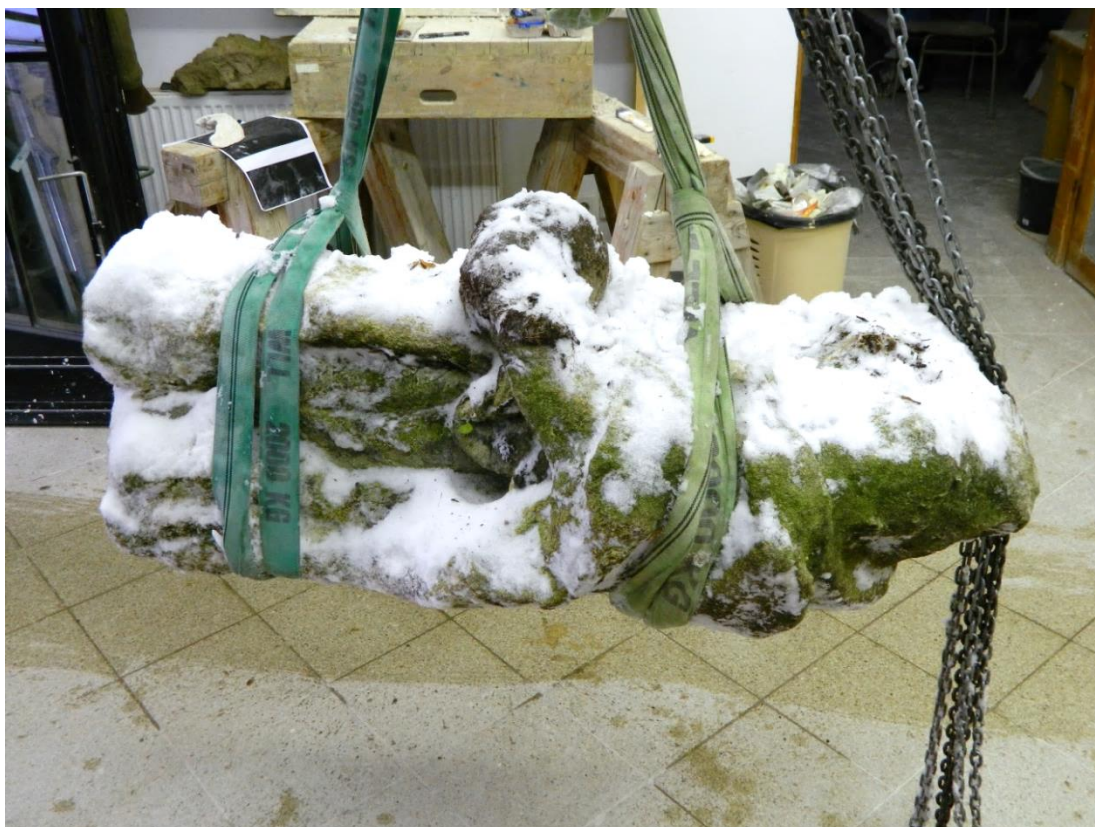
**Obr. 101: Transfer fragmentu nohou světice č. 1 přes ohradní zeď ČMS; pohled na místo původního umístění sochy**



**Obr. 102: Místo a způsob původního uložení fragmentů sochy**



**Obr. 103: Transfer fragmentu trupu světice; uložení fragmentu na vozík do připraveného podloží**



Obr. 104: Fragment trupu svěčice č. 1 bezprostředně po transferu do ateliéru FR v Litomyšli



Obr. 105: Okamžité očištění fragmentů od sněhu a hrubých nečistot



Obr. 106: Stav sochy den po transferu; patrná biogenní kolonizace v aktivní fázi růstu



Obr. 107: Sanace biogenních růstů v aktivní fázi růstu biocidním prostředkem

## ***Stav sochy před restaurováním<sup>80</sup>***

---

<sup>80</sup> před fotodokumentací stavu před restaurováním, byla socha světičky ponechána mírně vyschnout, aby vysoký kontrast způsobený vlhkostí kamene nezkresloval možnost porovnání fotodokumentace jednotlivých fází restaurování



**Obr. 108:** Stav fragmentu trupu před restaurováním – zředu (částečně vysušený)



**Obr. 109:** Stav fragmentu trupu před restaurováním – zezadu (částečně vysušený)



**Obr. 110: Stav fragmentu trupu před restaurováním – levý bok (částečně vysušený)**



**Obr. 111: Stav fragmentu trupu před restaurováním – pravý bok (částečně vysušený)**





**Obr. 112: Stav fragmentu nohou před restaurováním – zředu (částečně vysušený)**



**Obr. 113 Stav fragmentu nohou před restaurováním – zezadu (částečně vysušený)**



**Obr. 114:** Stav fragmentu nohou před restaurováním – levý bok (částečně vysušený)



**Obr. 115:** Stav fragmentu nohou před restaurováním – pravý bok (částečně vysušený)



**Obr. 116: Stav odlomené hlavy před restaurováním – zředu (zcela suché, nebylo exponováno v exteriéru)**

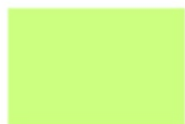
## ***Zákresy poškození***

## **Legenda k zákresům poškození:**



**exogenní nečistoty – zemina**

---



**biologická kolonizace zelenými řasami**

---



**biologická kolonizace mechorosty**

---



**odlomené části, místa lomů jednotlivých fragmentů**

---



**plošně se vyskytující vysoce degradovaný povrch kamene zaslepený, případně pojený sekundárně vzniklým sádrovcem – na povrchu není přítomna křusta v pravém smyslu, ale povrch je „křustovitý“ tj. křustě se blíží**

---



**povrch pokrytý souvislou křustou bílé nebo světlé barvy**

---

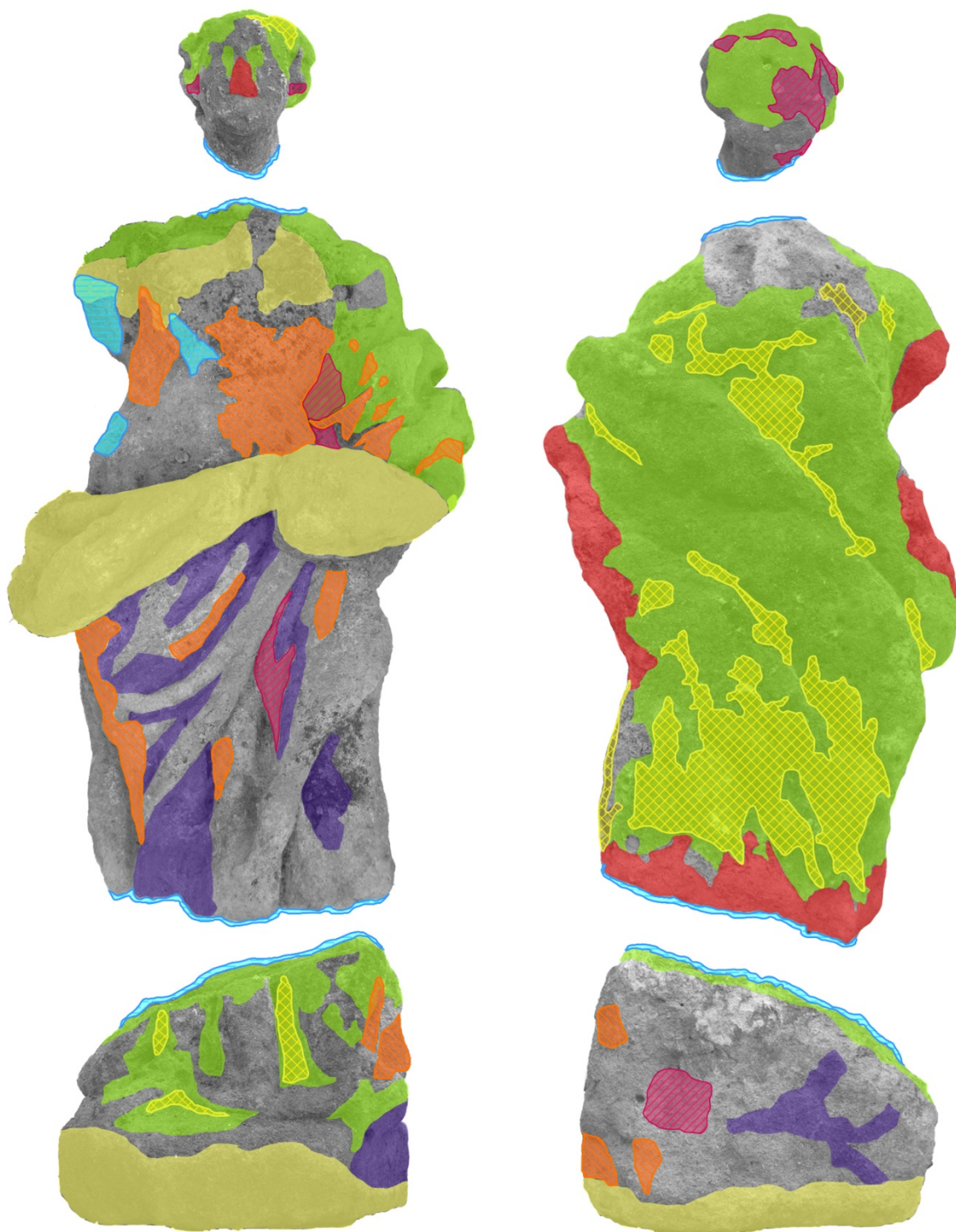


**silné, tmavé sádrovcové křusty**

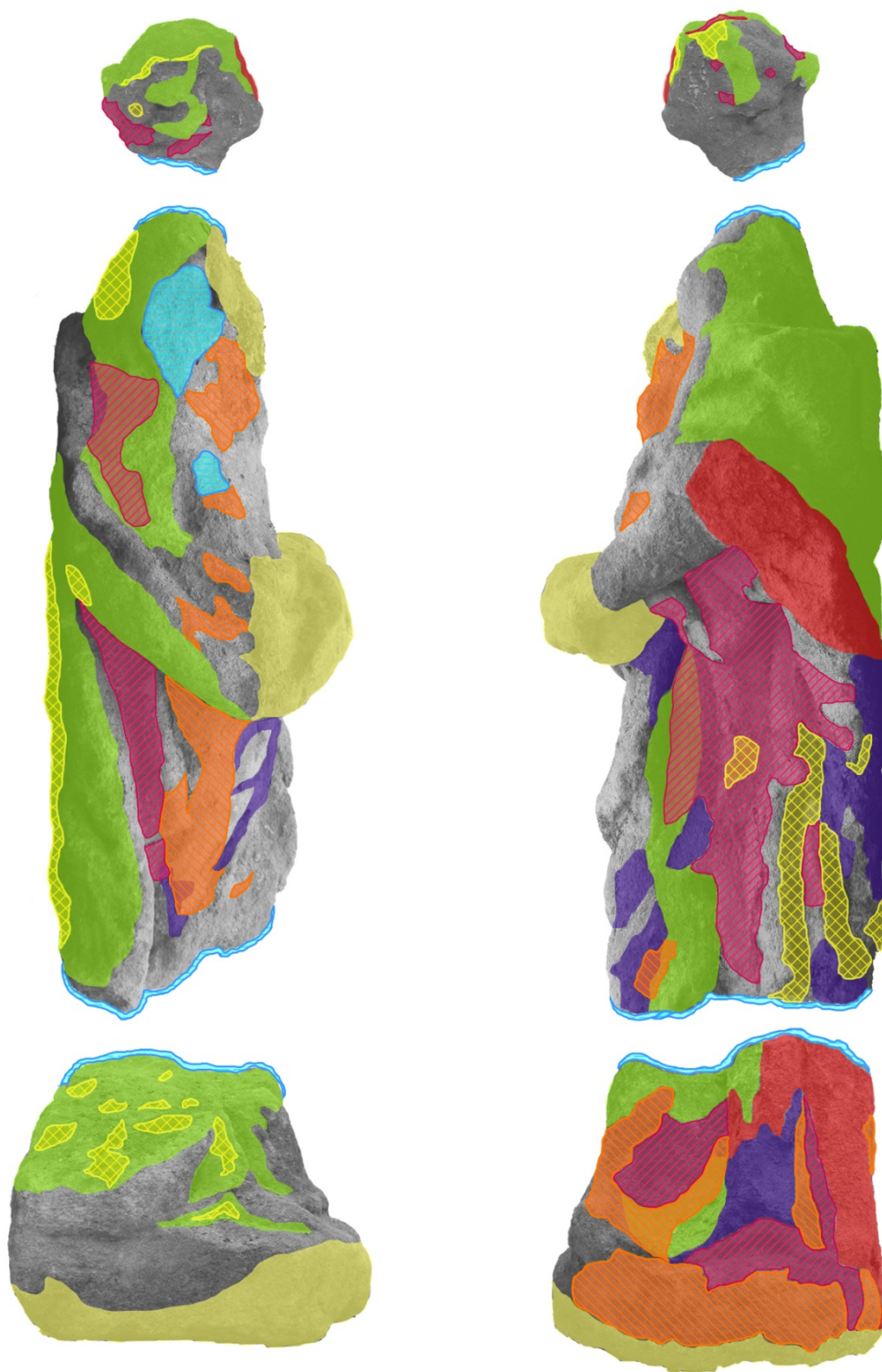
---



**masivní ztráty původní modelace**



Obr. 117: Grafické znázornění poškození sochy před restaurováním – pohled zepředu a zezadu



Obr. 118: Grafické znázornění poškození sochy před restaurováním – boční pohled zprava a zleva

## ***Stav sochy po předčištění před konsolidací***





**Obr. 119: Stav fragmentu trupu po předčištění před konsolidací – zředu**



**Obr. 120: Stav fragmentu trupu po předčištění před konsolidací – zezadu**



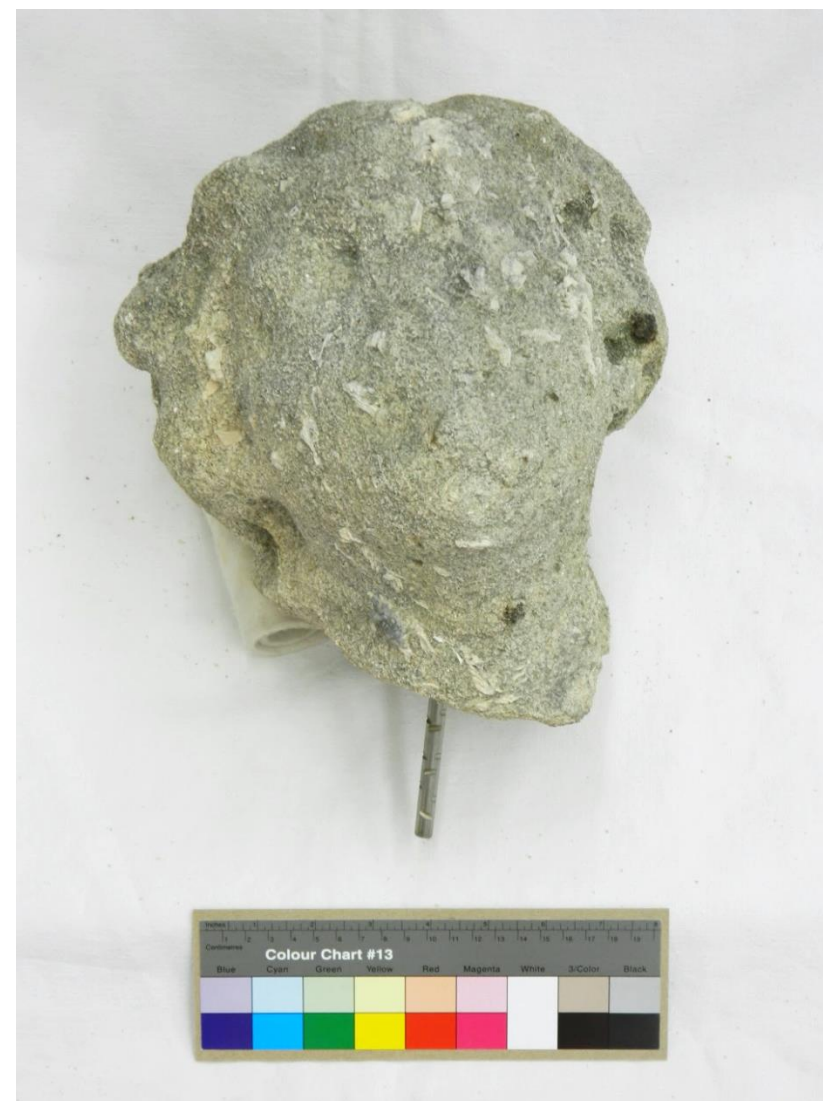
**Obr. 121: Stav fragmentu trupu po předčištění před konsolidací – boční pohled zleva**



**Obr. 122: Stav fragmentu nohou po předčištění před konsolidací – zředu**



**Obr. 123: Stav fragmentu nohou po předčištění před konsolidací – boční pohled zprava**



**Obr. 124: Stav odlomené hlavy po předčištění před konsolidací – zředu (s již vlepeným čepem pro opětovné osazení)**

## ***Průběh jednotlivých kroků restaurování***



**Obr. 125: Detail trupu v oblasti levého podpaží sochy; stav před sejmutím biogenních zbytků**



**Obr. 126: Detail trupu v oblasti levého podpaží sochy; stav po sejmutím biogenních zbytků**



**Obr. 127: Fragment nohou – zředu; poloviční čištění mikropískováním**



**Obr. 128: Odlomená hlava světice – zředu; poloviční čištění mikropískováním**



**Obr. 129: Průběh konsolidace fragmentu trupu vápennou nanosuspenzí**



**Obr. 130: Průběh konsolidace fragmentu trupu vápennou nanosuspenzí; detail aplikace pomocí stříčky**



**Obr. 131: Zkouška sesazení hlavy a trupu; zákres os – boční pohled pravý bok**



**Obr. 132: Zkouška sesazení hlavy a trupu; zákres os – zředu**



**Obr. 133: Vlepení čepu z nerezové oceli pro osazení hlavy**



**Obr. 134: Hlava a trup před slepením**





**Obr. 135: Vrtání otvoru pro čep jádrovým vrtákem do spodní části sochy – fragmentu nohou s plintem**



**Obr. 136: Zkouška sesazení sochy svěťice; zákres os pro sesazení a lokalizace místa vyvrtání protilehlého otvoru v trupu sochy**



**Obr. 137:** Detail způsobu otištění místa pro vyvrtání protilehlého otvoru v trupu sochy



**Obr. 138:** Otištěné místo vrtu na spodní lomové ploše trupu sochy



**Obr. 139:** Nastavení směru vrtáku



**Obr. 140:** Vrtání otvoru jádrovým vrtákem do trupu sochy



Obr. 141: Vlepení čepu do trupu sochy



Obr. 142: Sesazení fragmentů trupu a nohou sochy

***Stav sochy po konsolidaci a injektáži vápennou nanosuspenzí***



**Obr. 143: Stav sochy po sesazení a dokončení konsolidace**



Obr. 144: Injektáž dutiny mezi lomovými plochami fragmentů trupu a nohou sochy



Obr. 145: Injektáž dutiny pod krustami nesoucí dochované tvarosloví sochy



**Obr. 146: Stav sochy po polovičním očištění po konsolidaci  
– pohled zředu a zezadu**



Obr. 147: Stav sochy po konsolidaci, očištění a tmelení – pohled  
zpředu a zezadu



## ***Dokumentace vybraného místa v průběhu restaurování***



**Obr. 148: Detail levé ruky světice – stav před restaurováním**



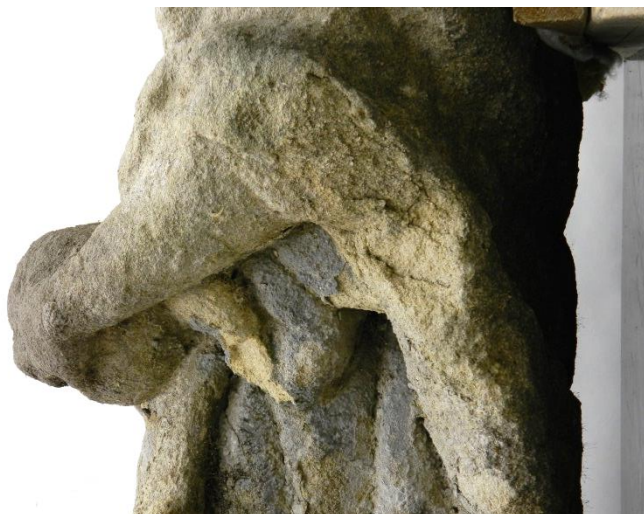
**Obr. 149: Detail levé ruky světice – stav po předčištění před konsolidací**



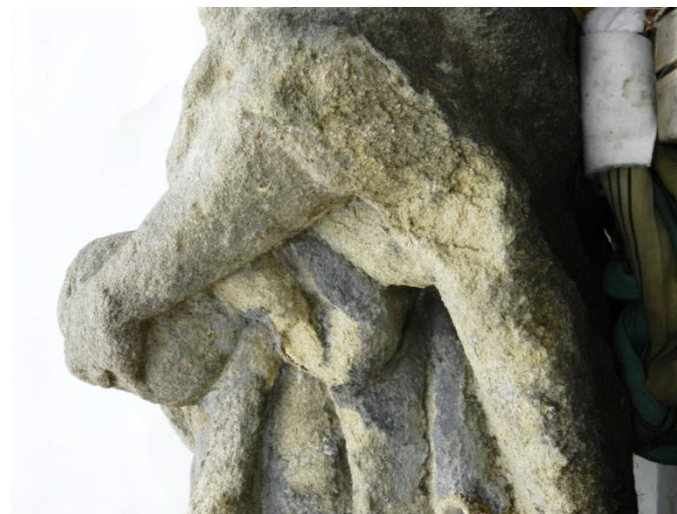
**Obr. 150: Detail levé ruky světice – stav po konsolidaci**



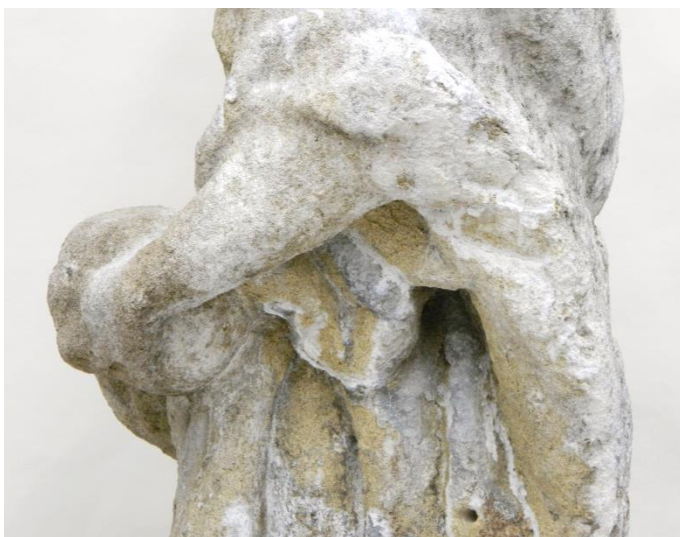
**Obr. 151: Detail levé ruky světice – stav po konsolidaci, očištění a tmelení**



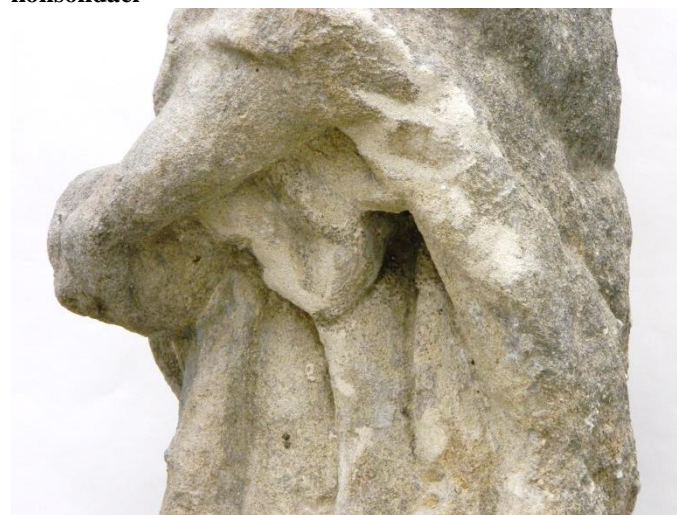
**Obr. 152: Detail levé ruky světice – stav před restaurováním**



**Obr. 153: Detail levé ruky světice – stav po předčištění před konsolidací**



**Obr. 154: Detail levé ruky světice – stav po konsolidaci**

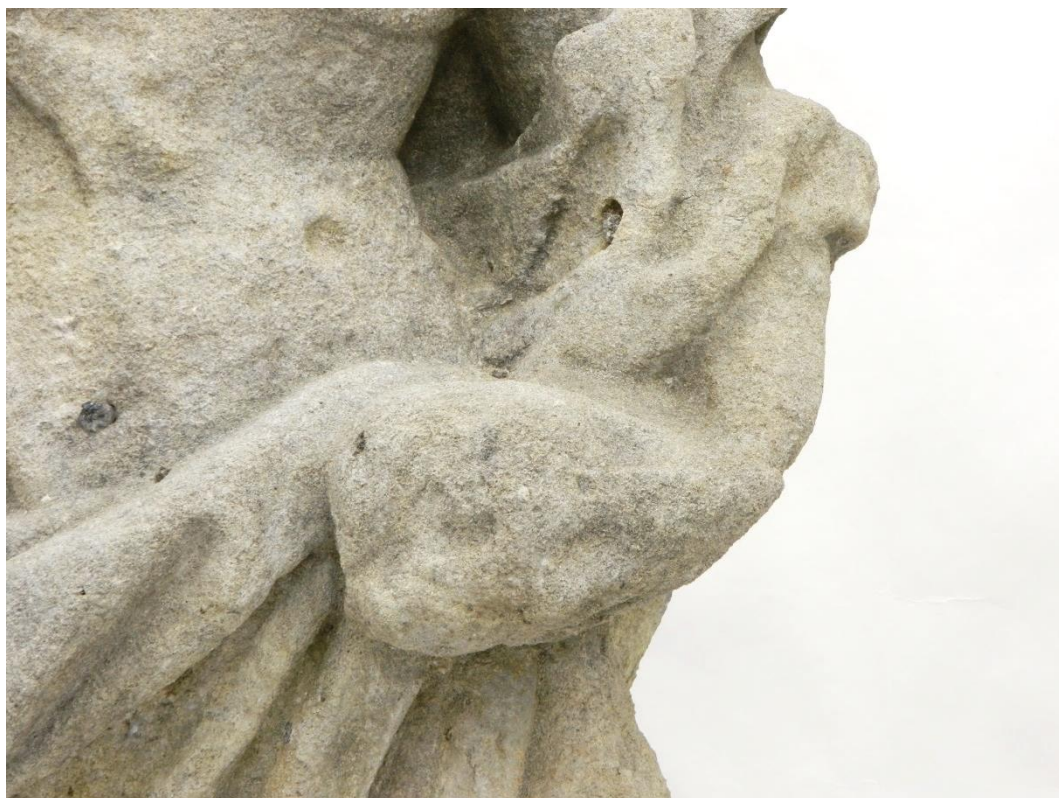


**Obr. 155: etail levé ruky světice – stav po konsolidaci, očištění a tmelení**

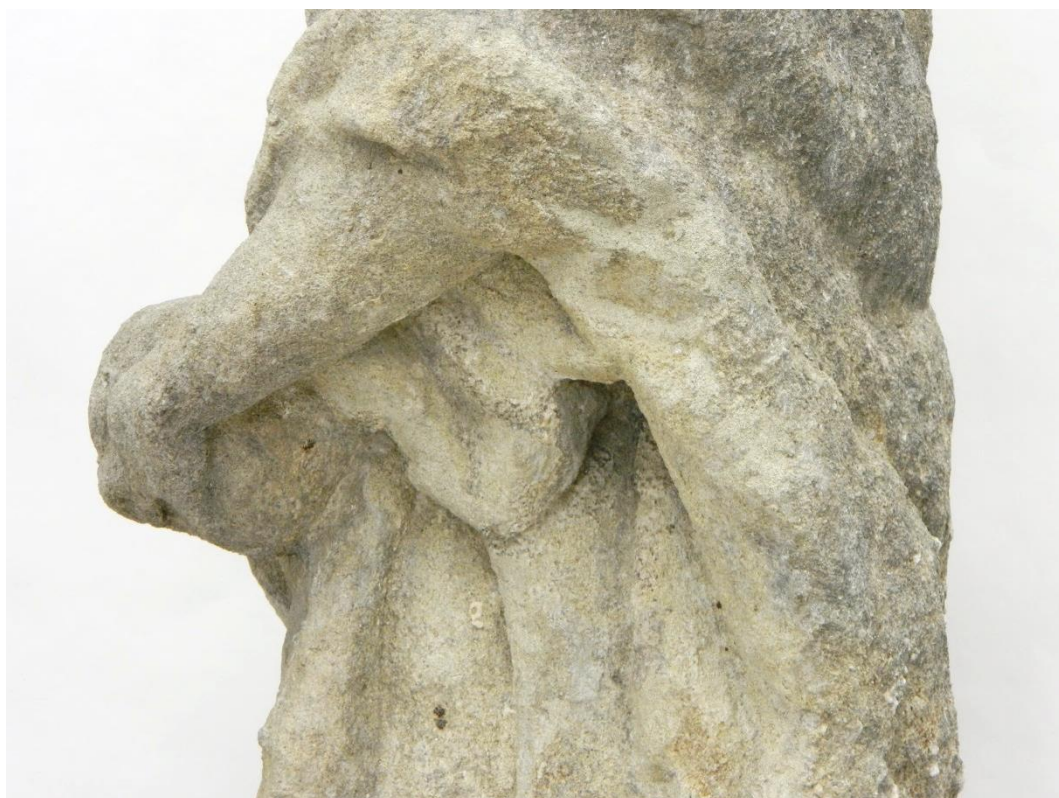
## ***Stav sochy po restaurování***



Obr. 156: Stav sochy po restaurování



**Obr. 157: Detail levé ruky svěťice po restaurování – zředu**

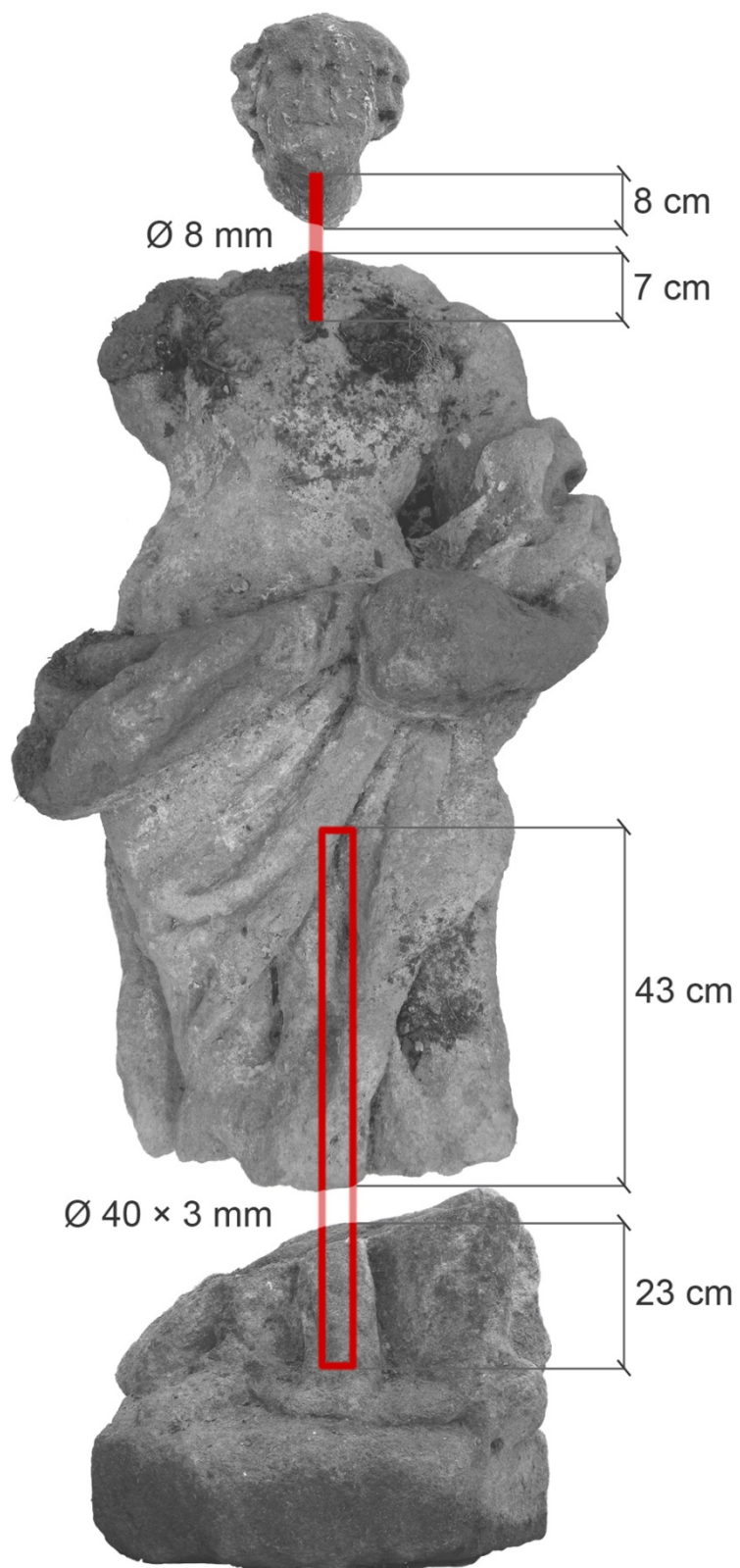


**Obr. 158: Detail levé ruky svěťice po restaurování – levý boční pohled**



**Obr. 159: Detail hlavy sochy po restaurování**

## Znázornění kovových spojovacích prvků





## 8 Použitá literatura a prameny

### Literatura a prameny:

- ALTOVÁ, Blanka. *Mariánský kult v Kutné Hoře ve 13. – 18. stol., Sborník muzea v Kolině. VI/96 (str. 232).*
- AMBROSI, M., DEI, L., GIORGI, R., NETO, Ch., BAGLIONI, P.: Colloidal Particles of Ca(OH)<sub>2</sub>: Properties and Applications to Restoration of Frescoes. In: *Langmuir*, 2001.
- AMBROSI, M., DEI, L., GIORGI, R., NETO, Ch., BAGLIONI, P.: Stable dispersions of Ca(OH)<sub>2</sub> in aliphatic alcohols: properties and application in cultural heritage conservation. In: *Progress in Colloid and Polymer Science*, Volume 118, 2001, s. 68-72.
- BARTOŠ, Martin. *Kutnohorský sborník 10/08. Hrádek nad Páchem v Kutné Hoře. Kutná Hora: Kuttna, 2008. ISBN 1212-6098. Dostupné z: [http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorskovlastivedny\\_sbornik\\_10-08.pdf](http://www.cms-kh.cz/sites/default/files/books/kutnohorskovlastivedny_sbornik_10-08.pdf).*
- BAYER, K., D. MACOUNOVÁ a L. MACHAČKO. Nanosuspence hydroxidu vápenatého jako konsolidanty porézních vápenců a vápenných omítek – od laboratorních testů k praktické aplikaci. In: *Acta Artis Academica 2012: Znalost a praxe ve výtvarném umění; Sborník 4. mezinárodní konference ALMA*. Praha: Akademie výtvarných umění v Praze, 2012, s. 325-346. ISBN 978-80-871108-33-8.
- DAEHNE, A., HERM, Ch., Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials - results from EU-STONECORE. In: *Heritage Science* 2013, 1:11, pp. 2.
- DELIVERABLE D 6.1: Collaborative Project NANOFORART. Project no. ENV-NMP.2011.2.2-5; ENV-NMP.2011.3.2.1-1- 282816.
- DELIVERABLE D 7.2: Results of trial testing on objects in the Czech Republic; (UPFR, ITAM); Collaborative Project STONECORE (Stone Conservation for the Refurbishment of Buildings); NMP-SE-2008-213651; FP-2007-SSP-5A.
- DELFORT, B., BORN, M., CUIVÉ, A., BARRÉ, L.: Colloidal Calcium Hydroxide in Organic Medium. In: *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 189. s. 151–157, 1997.
- DRDÁČKÝ, Miloš; SLÍŽKOVÁ, Zuzana. Calcium hydroxide based consolidation of lime mortars and stone. In J.M.MIMOSO, J.Delgado-Rodrigues, et al. In: *Proceedings of the Int. Symp. „Stone consolidation in cultural heritage“*. Lisabon : LNEC, May 2008. s. 299-308. ISBN 978-972-49-2135-8.
- GIORGI, R., DEI, L., BAGLIONI, P.: A New Method For Consolidating Wall Paintings Based on Dispersion of Lime in Alcohol. In: *Studies in Conservation* 45, 2000, s. 154-161.
- GRIMM, Wolf-Dieter. Naturwerksteine und Denkmalgesteine: Gewinnung, Verwendung und Verwitterung unter geogenen und anthropogenen Umwelteinflüssen. In: *Die Geowissenschaften*. 1992, roč. 1992, 9-10, s. 251-256.
- HALL, James. *Slovník námětů a symbolů ve výtvarném umění*. Praha, Litomyšl: Paseka, 2008. 520 s. ISBN 978-80-7185-902-4.
- KOTLÍK, Petr. *Konsolidanty kamene – historie a současnost: Příspěvek na konferenci "Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví II"*. Litomyšl, 2013.
- RATHOUSKÝ, Jiří. Konzervační prostředky pro kámen, případně i jiné stavební materiály. In: *Příloha Zpráv památkové péče*. 1994, roč. 54, č. 6. ISBN 1210-5538.
- RULÍŠEK, Hynek. *Postavy, atributy, symboly: slovník křesťanské ikonografie*. Vyd. 1. V Hluboké nad Vltavou: Alšova jihočeská galerie, 2005. ISBN 978-808-5857-481.
- SLÍŽKOVÁ, Zuzana. FRANKEOVÁ, Dita, Strukturní zpevnění vápenné omítky a vápence nanodisperzí CaLoSiL. In: *Zpravodaj STOP: časopis společnosti pro technologie ochrany památek*. Roč. 14, č. 3., s. 47-52., 2012, ISSN 1212-4168.
- ŠTAFEN, Zdeněk. *Petrologické vyhodnocení horninového vzorku ze sochy Anděla v Kutné Hoře*, 2010. 4 s.
- VELOSA, Ana Luísa a Maria do Rosário VEIGA. The use of pozzolans as additives in lime mortars for employment in building rehabilitation. In: *Historical Constructions 2001, Possibilities of numerical and experimental techniques: Proceedings of the 3rd International Seminar*. 2001, s. 373-380. Dostupné z: [http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Historical%20constructions/page%20373-380%20\\_88\\_.pdf](http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications/Historical%20constructions/page%20373-380%20_88_.pdf)
- Zpravodaj STOP 2/2000 - na téma Vápno z pohledu památkářů a technologií
- ZAHRADNÍK, Pavel. *Dějiny domu: Dějiny domu čp. 48 v Kutné Hoře*. 28 s. soukromý dokument JUDr. Miroslava Ďoubala

### Oborové práce:

- DUNAJSKÁ, Jana. *Zhodnocení současných možností konsolidace vápenných omítek konsolidanty na bázi hydroxidu vápenatého*. Litomyšl, 2009. 53 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování v Litomyšli.

- ČEPELKA, Josef. *Srovnání vybraných vlastností vápenno-cementových tmelů modifikovaných přísádkem hlinitanového cementu*. Litomyšl, 2004. 54 s. Bakalářská práce. Institut restaurování a konzervačních technik Litomyšl, o. p. s.
- MACOUNOVÁ, Dana. *Restaurování vápencové sochy anděla z domu čp. 48 v Kutné Hoře s využitím nanosuspenzí na bázi hydroxidu vápenatého pro konsolidaci organodetrického vápence: Rozšířená restaurátorská zpráva*. Litomyšl, 2011. 218 s. Dostupné z: <http://dspace.upce.cz/handle/10195/42082>. Bakalářská práce. Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Mgr. Art. Jakub Ďoubal.

### Přednášky:

- BAYER, Karol. *Přednášky k výuce předmětu: Technologie restaurování a konzervace*. Univerzita Pardubice. Fakulta restaurování. Litomyšl, 2008-2012.

### Internetové zdroje:

- *Bryum algovicum* Sendtn. ex Müll. Hal. – prutník převislý [online]. [cit. 2013-08-03]. Dostupné z: <http://kopecek.pionyr.cz/nauc/rostliny/Mechy/Bryum%20algovicum.htm>.
- ČESKÉ MUZEUM STRÍBRA, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE. Sběrka Českého muzea stříbra: Podsbírky - CES. In: [Http://www.cms-kh.cz/](http://www.cms-kh.cz/) [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-07-19]. Dostupné z: <http://www.cms-kh.cz/sbirka-ceskeho-muzea-stibra>.
- Český hydrometeorologický ústav: Územní srážky. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4\\_Historicka\\_data/P4\\_1\\_Pocasi/P4\\_1\\_5\\_Uzemni\\_srazky&last=false](http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_5_Uzemni_srazky&last=false).
- Český hydrometeorologický ústav: Územní teploty. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: Český hydrometeorologický ústav: Územní srážky. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal\\_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4\\_Historicka\\_data/P4\\_1\\_Pocasi/P4\\_1\\_5\\_Uzemni\\_srazky&last=false](http://portal.chmi.cz/portal/dt?portal_lang=cs&nc=1&menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_5_Uzemni_srazky&last=false).
- <http://cs.wikipedia.org/wiki/síla>.
- <http://www.stonecore-europe.eu/>.
- The Unique Benefits of PVA Sponge: About PVA Sponge. [online]. [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: <http://www.super-cool-products.com/infofaqs/aboutpvasponge.html>.
- *Závornatka černavá* [online]. [cit. 2013-07-21]. Dostupné z: <http://www.radula.estranky.cz/clanky/zavornatka-cernava.html>.

## 9 Seznam obrázků

Obr. 1: Fotografie Hrádku s již neexistující vstupní bránou na severní straně objektu; převzato z publikace Martina Bartoše .....	23
Obr. 2: Grafické znázornění orientace trupu světice, ve které byl tento fragment několik posledních let exponován v exteriéru. Spodní část sochy byla zabořena do zeminy. ....	27
Obr. 3: Nábrus vzorku SR1 .....	49
Obr. 4: Nábrus vzorku SR1 .....	49
Obr. 5: Nábrus vzorku SR1 .....	49
Obr. 6: Nábrus vzorku SR1 .....	49
Obr. 7: Nábrus vzorku SR2 .....	51
Obr. 8: Nábrus vzorku SR2 .....	51
Obr. 9: Nábrus vzorku SR2 .....	51
Obr. 10: Nábrus vzorku SR2 .....	51
Obr. 11: Nábrus vzorku SR3 .....	53
Obr. 12: Nábrus vzorku SR3 .....	53
Obr. 13: Nábrus vzorku SR3 .....	53
Obr. 14: Nábrus vzorku SR3 .....	53
Obr. 15: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	55
Obr. 16: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	55
Obr. 17: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	55
Obr. 18: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	55
Obr. 19: Nábrus vzorku SR5 .....	57
Obr. 20: Nábrus vzorku SR5 .....	57
Obr. 21: Nábrus vzorku SR5 .....	57
Obr. 22: Nábrus vzorku SR5 .....	57
Obr. 23: Nábrus vzorku SR6 .....	59
Obr. 24: Nábrus vzorku SR6 .....	59
Obr. 25: Nábrus vzorku SR6 .....	59
Obr. 26: Nábrus vzorku SR6 .....	59
Obr. 27: Nábrus vzorku SR7 .....	61
Obr. 28: Nábrus vzorku SR7 .....	61
Obr. 29: Nábrus vzorku SR7 .....	61
Obr. 30: Nábrus vzorku SR7 .....	61
Obr. 31: Nábrus vzorku C1 .....	63
Obr. 32: Nábrus vzorku C1 .....	63
Obr. 33: Úlomek vzorku SR7 .....	64
Obr. 34: Úlomek vzorku SR7 .....	64
Obr. 35: Úlomek vzorku SR7 z rubové strany .....	64
Obr. 36: Mech pevně vrůstající do struktury kamene shora .....	65
Obr. 37: Mech se silnou vrstvou mikrozóny půdy snadno oddělitelný od struktury kamene, příčný řez .....	65
Obr. 38: Mech pevně vrůstající do struktury kamene v příčném řezu .....	65
Obr. 39: Místa sledování obsahu vlhkosti v kameni; z leva: levý bok trupu sochy světice, spodní lomová plocha trupu světice, nohy světice – zdaní část .....	81
Obr. 40: Místo odběru série vzorků z hloubkového vrtu; pravý bok trupu sochy světice .....	81
Obr. 41: Grafické znázornění vrtného jádra sochy světice č. 1, jehož části byly použity pro stanovení základních fyzikálních vlastností horniny (červeně zvýrazněné) .....	84
Obr. 42: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	87
Obr. 43: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	87
Obr. 44: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	87
Obr. 45: Výbrus vzorku SR4 (7RKH1) .....	87

Obr. 46: CaLoSil®E25 .....	104
Obr. 47: CaLoSil®IP25 .....	104
Obr. 48: Nanorestore 1P35 .....	104
Obr. 49: Nanorestore E35 .....	104
Obr. 50: MBN Nf070.....	104
Obr. 51: ZFB 703k.....	104
Obr. 52: Nástroje a forma ke zhotovení laboratorních zkušebních tělísek.....	107
Obr. 53: Příprava zkušebních tělísek dusáním do formy – závěrečné zhutnění směsi kameniva speciálně připraveným nástrojem .....	108
Obr. 54: Zkušební tělísko 4 × 4 × 4 cm, zhotovené ze směsi kameniva ze zvětralého kutnohorského vápence (označení směsi kameniva SLKH2) .....	108
Obr. 55: Popis přípravy dusaných zkušebních tělísek imitujících silně degradovanou horninu .....	110
Obr. 56: Metodika měření rychlosti průchodu UZ signálu na neošetřených tělískách .....	120
Obr. 57: Neošetřené zkušební tělísko a jeho orientace při měření pevnosti v talku – kolmo na dusanou plochu i případné vrstvy vzniklé dusáním.....	125
Obr. 58: Neošetřené zkušební tělísko a jeho orientace při měření pevnosti v tlaku – rovnoběžně s dusanou plochu i s případnými vrstvami vzniklé dusáním .....	125
Obr. 59: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> _KH <sub>2</sub> , povrch .....	127
Obr. 60: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> _KH <sub>2</sub> , povrch .....	127
Obr. 61: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> _KH <sub>2</sub> .....	127
Obr. 62: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> _KH <sub>2</sub> .....	127
Obr. 63: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> _KH <sub>2</sub> , povrch .....	127
Obr. 64: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> _KH <sub>2</sub> .....	127
Obr. 65: Konsolidované zkušební tělísko se znázorněním případné vrstevnatosti vzorku a s možným gradientem koncentrace pojiva vzniklým v důsledku nerovnoměrného rozložení konsolidantu.....	132
Obr. 66: Metodika měření rychlosti průchodu UZ signálu na tělískách po konsolidaci .....	132
Obr. 67: Měření pevnosti v tlaku na zkušebních tělískách, orientace aplikační plochy vzorku vyznačená modrou značkou.....	133
Obr. 68: Neošetřené zkušební tělísko a jeho orientace při měření pevnosti v tlaku – kolmo na dusanou plochu i případné vrstvy vzniklé dusáním.....	133
Obr. 69: Stejná situace jako na obrázku vlevo u ošetřených zkušebních tělísek, s modře vyznačenou aplikační plochou a směrem penetrace konsolidantů .....	133
Obr. 70: Pevnostní profil pískovatění povrchu – degradace povrchové vrstvy kamene .....	147
Obr. 71: Příklad pohybu rozpouštědla při jeho odparu – tělísko přibližně 15 h po ošetření prostředkem NR 1P 10.....	148
Obr. 72: Posouzení barevných změn APLIKAČNÍ PLOCHY testovacích tělísek po konsolidaci prostředky na bázi nanosuspenzí hydroxidu vápenatého.....	157
Obr. 73: Posouzení barevných změn APLIKAČNÍ PLOCHY testovacích tělísek po konsolidaci prostředky na bázi esterů kyseliny křemičité.....	158
Obr. 74: Posouzení barevných změn BOČNÍ PLOCHY (dusané plochy) testovacích tělísek po konsolidaci prostředky na bázi nanosuspenzí hydroxidu vápenatého .....	159
Obr. 75: Lomové plochy středů zkušebních tělísek konsolidovaných vápennými nanosuspenzemi o přibližné koncentraci 25 g/l.....	162
Obr. 76: Lomové plochy středů zkušebních tělísek konsolidovaných vápennými nanosuspenzemi o přibližné koncentraci 10 g/l.....	163
Obr. 77: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> (KH <sub>2</sub> ), před konsolidací .....	165
Obr. 78: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>x</sub> (KH <sub>2</sub> ), před konsolidací .....	165
Obr. 79: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>204</sub> (KH <sub>2</sub> ), po konsolidaci .....	165
Obr. 80: Výbrus vzorku 7MSLCO <sub>204</sub> (KH <sub>2</sub> ), po konsolidaci .....	165

Obr. 81: Výbrus vzorku 7MSLCO204 (KH2), po konsolidaci .....	165
Obr. 82: Výbrus vzorku 7MSLCOx (KH2), po konsolidaci .....	165
Obr. 83: Grafické znázornění vrtného jádra sochy světice č. 1, jehož část byla použita pro posouzení efektivity předčištění testovací plochy (červeně zvýrazněné).....	170
Obr. 84: Detail povrchu vrtného jádra pokrytého biogenním povlakem před očištěním .....	170
Obr. 85: Referenční zkušební plocha po částečném očištění mikropískováním (vpravo neočištěná část).....	172
Obr. 86: Referenční zkušební plocha po částečném očištění, připravena na testování konsolidantů.....	172
Obr. 87: Vymezení zkušebních ploch papírovými šablonami a natření jejich okolí samovulkanizační pastou .....	172
Obr. 88: Vymezené testovací aplikační plochy po odstranění papírových šablon před zaschnutím samovulkanizační pasty.....	172
Obr. 89: Samovulkanizační pasta po zaschnutí a dodatečné ohraničení zkušebních aplikačních ploch plastickým tmelem.....	172
Obr. 90: Aplikace konsolidantů pomocí injekční stříkačky a jehly o průměru 1,6 mm.....	172
Obr. 91: Barevné změny aplikačních povrchů testovacích ploch na soše světice č. 1 .....	177
Obr. 92: Zkouška odstranění bílého zákalu mikroabrazivní metodou – mikropískováním s využitím měkkého jemného abraziva z dolomitického vápence.....	180
Obr. 93: Zkoušky čištění povrchu sochy světice č. 1 suchou a mokrou metodou.....	185
Obr. 94: Zkoušky čištění povrchu sochy světice č. 1 abrazivní metodou tzv. mikropískováním .....	186
Obr. 95: Detail efektu vybraného způsobu čištění na základě zkoušky CL4 – mikropískování moučkou z dolomitu .....	186
Obr. 96: Vyznačení jednotlivých napouštěných ploch, u kterých byla následně stanovena spotřeba konsolidantu v litrech na m <sup>2</sup> .....	190
Obr. 97: Schematické znázornění vztahu měřené vzdálenosti a hloubky od povrchu sochy....	194
Obr. 98: Měření hloubky penetrace konsolidantu pomocí testu roztoku fenolftaleinu ve vrtu zhotoveném po konsolidaci – bílé i černé dílky na měřicí tyčce odpovídají 1 cm.....	195
Obr. 99: Promítnutí polohy původního otvoru pro čep na lomovou plochu fragmentu a následné vyvrtání nového otvoru pro sesazení fragmentů sochy světice č. 1 .....	197
Obr. 100: Zkoušky tmelů; vybraný tmel je na obrázku označen.....	201
Obr. 101: Transfer fragmentu nohou světice č. 1 přes ohradní zeď ČMS; pohled na místo původního umístění sochy .....	210
Obr. 102: Místo a způsob původního uložení fragmentů sochy.....	211
Obr. 103: Transfer fragmentu trupu světice; uložení fragmentu na vozík do připraveného podloží.....	211
Obr. 104: Fragment trupu světice č. 1 bezprostředně po transferu do ateliéru FR v Litomyšli	212
Obr. 105: Okamžité očištění fragmentů od sněhu a hrubých nečistot.....	212
Obr. 106: Stav sochy den po transferu; patrná biogenní kolonizace v aktivní fázi růstu.....	213
Obr. 107: Sanace biogenních růstů v aktivní fázi růstu biocidním prostředkem.....	213
Obr. 108: Stav fragmentu trupu před restaurováním – zředu (částečně vysušený) .....	215
Obr. 109: Stav fragmentu trupu před restaurováním – zezadu (částečně vysušený).....	215
Obr. 110: Stav fragmentu trupu před restaurováním – levý bok (částečně vysušený).....	216
Obr. 111: Stav fragmentu trupu před restaurováním – pravý bok (částečně vysušený).....	216
Obr. 112: Stav fragmentu nohou před restaurováním – zředu (částečně vysušený) .....	217
Obr. 113 Stav fragmentu nohou před restaurováním – zezadu (částečně vysušený) .....	217
Obr. 114: Stav fragmentu nohou před restaurováním – levý bok (částečně vysušený) .....	218
Obr. 115: Stav fragmentu nohou před restaurováním – pravý bok (částečně vysušený) .....	218
Obr. 116: Stav odlomené hlavy před restaurováním – zředu (zcela suché, nebylo exponováno v exteriéru).....	219

Obr. 117: Grafické zná zornění poškození sochy před restaurováním – pohled zepředu a zezadu .....	222
Obr. 118: Grafické zná zornění poškození sochy před restaurováním – boční pohled zprava a zleva.....	223
Obr. 119: Stav fragmentu trupu po předčištění před konsolidací – zepředu.....	225
Obr. 120: Stav fragmentu trupu po předčištění před konsolidací – zezadu.....	225
Obr. 121: Stav fragmentu trupu po předčištění před konsolidací – boční pohled zleva.....	226
Obr. 122: Stav fragmentu nohou po předčištění před konsolidací – zepředu .....	226
Obr. 123: Stav fragmentu nohou po předčištění před konsolidací – boční pohled zprava.....	227
Obr. 124: Stav odlomené hlavy po předčištění před konsolidací – zepředu (s již vlepeným čepem pro opětovné osazení) .....	227
Obr. 125: Detail trupu v oblasti levého podpaží sochy; stav před sejmutím biogenních zbytků .....	229
Obr. 126: Detail trupu v oblasti levého podpaží sochy; stav po sejmutím biogenních zbytků .....	229
Obr. 127: Fragment nohou – zepředu; poloviční čištění mikropískováním.....	230
Obr. 128: Odlomená hlava světice – zepředu; poloviční čištění mikropískováním.....	230
Obr. 129: Průběh konsolidace fragmentu trupu vápennou nanosuspenzí.....	231
Obr. 130: Průběh konsolidace fragmentu trupu vápennou nanosuspenzí; detail aplikace pomocí stříčky .....	231
Obr. 131: Zkouška sesazení hlavy a trupu; zákres os – boční pohled pravý bok .....	232
Obr. 132: Zkouška sesazení hlavy a trupu; zákres os – zepředu .....	232
Obr. 133: Vlepení čepu z nerezové oceli pro osazení hlavy.....	232
Obr. 134: Hlava a trup před slepením.....	232
Obr. 135: Vrtání otvoru pro čep jádrovým vrtákem do spodní části sochy – fragmentu nohou s plintem .....	233
Obr. 136: Zkouška sesazení sochy světice; zákres os pro sesazení a lokalizace místa vyvrtání protilehlého otvoru v trupu sochy.....	233
Obr. 137: Detail způsobu otištění místa pro vyvrtání protilehlého otvoru v trupu sochy .....	234
Obr. 138: Otištěné místo vrtu na spodní lomové ploše trupu sochy.....	234
Obr. 139: Nastavení směru vrtáku .....	234
Obr. 140: Vrtání otvoru jádrovým vrtákem do trupu sochy .....	234
Obr. 141: Vlepení čepu do trupu sochy .....	235
Obr. 142: Sesazení fragmentů trupu a nohou sochy .....	235
Obr. 143: Stav sochy po sesazení a dokončení konsolidace.....	237
Obr. 144: Injektáž dutiny mezi lomovými plochami fragmentů trupu a nohou sochy.....	238
Obr. 145: Injektáž dutiny pod krustami nesoucí dochované tvarosloví sochy .....	238
Obr. 146: Stav sochy po polovičním očištění po konsolidaci – pohled zepředu a zezadu.....	239
Obr. 147: Stav sochy po konsolidaci, očištění a tmelení – pohled zepředu a zezadu .....	240
Obr. 148: Detail levé ruky světice – stav před restaurováním.....	242
Obr. 149: Detail levé ruky světice – stav po předčištění před konsolidací .....	242
Obr. 150: Detail levé ruky světice – stav po konsolidaci .....	242
Obr. 151: Detail levé ruky světice – stav po konsolidaci, očištění a tmelení .....	242
Obr. 152: Detail levé ruky světice – stav před restaurováním.....	243
Obr. 153: Detail levé ruky světice – stav po předčištění před konsolidací .....	243
Obr. 154: Detail levé ruky světice – stav po konsolidaci .....	243
Obr. 155: etail levé ruky světice – stav po konsolidaci, očištění a tmelení.....	243
Obr. 156: Stav sochy po restaurování.....	245
Obr. 157: Detail levé ruky světice po restaurování – zepředu .....	246
Obr. 158: Detail levé ruky světice po restaurování – zezadu .....	246
Obr. 159: Detail hlavy sochy po restaurování .....	247

## 10 Seznam tabulek

Tab. 1: Dokumentace a popis vzhledu referenční horniny ze středu bloku sochy světice č. 1 ...	29
Tab. 2: Dokumentace a popis poškození jednotlivých typů povrchů sochy světice č. 1 .....	30
Tab. 3: Lokalizace a dokumentace místa odběru vzorku na mikrochemickou analýzu přítomnosti síranu vápenatého na povrchu sochy světice č. 1, včetně jejího vyhodnocení.....	43
Tab. 4: Vzorek SR1 – masivní, oddělující se krusta.....	49
Tab. 5: Vzorek SR2 – masivnější krusta, pevně spjatá s podkladní horninou.....	51
Tab. 6: Vzorek SR3 – zvětralý povrch pokrytý bílým povlakem / výkvětem (?) .....	53
Tab. 7: Vzorek SR4 – masivní krusta odtržená s vrstvou horniny .....	55
Tab. 8: Vzorek SR5 – silně degradovaná hornina, velké ztráty hmoty kamene.....	57
Tab. 9: Vzorek SR6 – nejlépe dochovaná povrchová vrstva horniny bez známek výrazných alterací – pouze kolonizováno řasami.....	59
Tab. 10: Vzorek SR7 – biologická kolonizace – řasy, silný biogenní povlak.....	61
Tab. 11: Vzorek C1 – barevná povrchová úprava, nalezená na draperii na zádech světice .....	63
Tab. 12: Vzorek biologické kolonizace – řasy .....	64
Tab. 13: Vzorek biologické kolonizace – mechorost .....	65
Tab. 14: Vzorek biologické kolonizace – závornatka černavá .....	67
Tab. 15: Vlastnosti měřicího bloku houby Blitz Fix .....	71
Tab. 16: Charakteristika a lokalizace míst měření nasákavosti.....	72
Tab. 17: Výsledky měření na daných plochách sochy světice č. 1 vyjádřené jako součinitel nasákavosti.....	75
Tab. 18: Údaje ČHMÚ o teplotě a úhrnu srážek v lednu roku 2013 pro Prahu a Středočeský kraj .....	78
Tab. 19: Hodnoty obsahu vlhkosti v kameni naměřené dotekovým vlhkoměrem ve sledovaném období v režimu „medium density“ .....	81
Tab. 20: Výsledky měření obsahu vlhkosti a anionů vodorozpustných solí z vrtu – trup sochy světice č. 1 .....	82
Tab. 21: Základní fyzikální vlastnosti originální horniny z hloubkových vrtů .....	86
Tab. 22: Mikroskopická charakteristika horniny z exponované povrchové vrstvy sochy světice .....	87
Tab. 23: Průměr, horní a dolní hranice naměřených hodnot při UZ transmisi.....	90
Tab. 24: Charakteristika testovaných konsolidantů.....	103
Tab. 25: Fotografie REM-BSE (rastrovací elektronový mikroskop, režim odražených elektronů) pořízené vždy při stejném zvětšení tj. 100 000 × dokumentující tvar a velikost částic jednotlivých testovaných nanosuspenzí hydroxidu vápenatého .....	104
Tab. 26: Distribuce velikosti zrn stanovená síťovou analýzou jako záchyt a propad a vynesení hodnot do grafu.....	106
Tab. 27: Receptura přípravy zkušebních tělísek.....	107
Tab. 28: Přehled použitých konsolidantů, jejich zkratk dále používaných v textu; obsah výrobci udávaných účinných látek a jejich ověření navážkami sušin v laboratoři KCHT FR UPCE.....	114
Tab. 29: Přehled použitých konsolidantů; počet aplikačních cyklů na jedno testovací tělísko; množství aplikovaného konsolidantu na m <sup>2</sup> ; množství aplikované účinné látky na jedno tělísko – skutečné a vztahené k jeho hmotnosti v % hm. ....	115
Tab. 30: Výsledky měření základních fyzikálních vlastností a jejich srovnání s hodnotami naměřenými na reálné hornině ze sochy světice č. 1 .....	122
Tab. 31: Výsledky měření rychlostí průchodu ultrazvukového signálu materiálem neošetřených zkušebních těles.....	123
Tab. 32: Průměrná mez pevnosti [MPa] u neošetřených tělísek – dva způsoby měření .....	125
Tab. 33: Základní požadavky strukturální konsolidace.....	130
Tab. 34: Výsledky měření pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci .....	149

Tab. 35: Výsledky měření základních fyzikálních vlastností u konsolidovaných zkušebních tělísek a jejich porovnání se standardem a kamenem ze sochy světice č. 1 .....	154
Tab. 36: Vzájemné porovnání součinitelů nasákavosti na testovací referenční ploše před a po očištění a srovnání výsledných hodnot se zdravou horninou na lomové ploše .....	170
Tab. 37: Vyřazené, nebo nově přiřazené konsolidanty k testování s uvedením těch se kterými by mohlo dojít k vzájemné záměně — viz poznámka.....	173
Tab. 38: Hodnocení rychlosti penetrace stanovených objemů testovaných konsolidantů do přírodního kamene .....	175
Tab. 39: Zkoušky čištění povrchu sochy před konsolidací.....	185
Tab. 40: Měření rychlostí průchodu UZ signálu kamenem sochy světice č. 1 před a po konsolidaci.....	191
Tab. 41: Posouzení efektu konsolidace u provedených měření v závislosti na síle měřeného místa.....	193
Tab. 42: Seznam použitých materiálů a jejich zkratky použité v následující tabulce s recepturami .....	200
Tab. 43: Receptury zkoušených tmelů.....	200



## 11 Seznam grafů

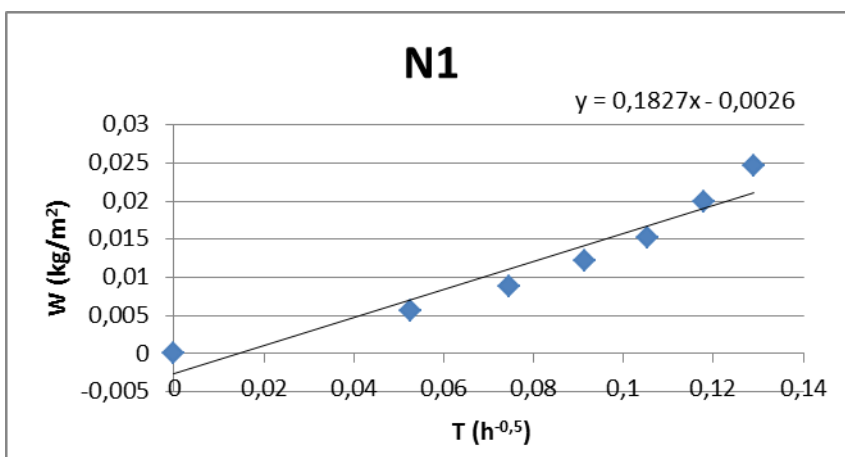
Graf 1: Výsledky měření na vybraných plochách sochy světice č. 1 – vynesené do grafu jako hmotnost vsáknuté vody na plochu za čas.....	76
Graf 2: Výsledky měření na vybraných plochách sochy světice č. 1 – vynesené do grafu jako hmotnost vsáknuté vody na plochu za čas – pro přehlednost uvedeno jako lineární závislost vycházející ze směrnic v Graf 1.....	76
Graf 3: Hodnoty obsahu vlhkosti v kameni naměřené dotekovým vlhkoměrem ve sledovaném období v režimu „ <i>medium density</i> “ – vynesené do grafu .....	82
Graf 4: Profil rychlostí UZ (závislost rychlosti na tloušťce měřeného místa) .....	90
Graf 5: Distribuce velikosti zrn směsi kameniva pro simulovaný vápenec.....	106
Graf 6: Gradient rychlostí průchodu ultrazvukového signálu ve směru od dusané plochy směrem do hloubky materiálu zkušebních těles .....	124
Graf 7: Hloubkový profil rychlostí průchodu ultrazvukového signálu ve směru od budoucí aplikační plochy zkušebních těles .....	124
Graf 8: Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zkušebními tělísky po konsolidaci – přehled všech konsolidantů.....	138
Graf 9: Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělísky po konsolidaci – konsolidanty na bázi nanosuspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o přibližné koncentraci 25 g/l.....	138
Graf 10: Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělísky po konsolidaci – konsolidanty na bázi nanosuspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o přibližné koncentraci 10 g/l.....	139
Graf 11: Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělísky po konsolidaci – produkty KSE o přibližné koncentraci 300 g/l $\text{SiO}_2$ gelu – porovnání průběhu zrání po 13 a 41 dnech.....	139
Graf 12: Průměrný nárůst rychlostí průchodu UZ signálu zk. tělísky po konsolidaci – konsolidanty výrobců MBN a ZFB na bázi nanosuspenzí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o přibližných koncentracích vždy 10 a 25 g/l.....	140
Graf 13: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí NR 1P 10.....	140
Graf 14: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí NR E 10.....	140
Graf 15: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí ZFB 10 .....	141
Graf 16: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí MBN 10.....	141
Graf 17: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí CaL E25 .....	141
Graf 18: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí CaL IP25 .....	142
Graf 19: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí MBN 22.....	142
Graf 20: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená nanosuspenzí ZFB 25 .....	142
Graf 21: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená produktem KSE 300 po 41 dnech zrání.....	143
Graf 22: Výsledky měření rychlostí průchodu UZ signálu ve čtyřech hloubkách tělísek ve směru od aplikační plochy – tělíska ošetřená produktem KSE HV po 41 dnech zrání.....	143
Graf 23: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků – přehled všech testovaných konsolidantů.....	150
Graf 24: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci nanosuspenzemi na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o přibližné koncentraci 10 g/l v deseti cyklech, se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků .....	150

Graf 25: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci nanosuspensemi na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o přibližné koncentraci 25 g/l v pěti cyklech, se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků .....	151
Graf 26: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci nanosuspensemi na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků – porovnání rozdílů v aplikacích podobného množství výsledné účinné látky u stejných suspenzí aplikovaných $10 \times$ o přibližné koncentraci 10 g/l a $5 \times$ o přibližné koncentraci 25 g/l .....	151
Graf 27: Výsledky průměrných naměřených pevností v tlaku zkušebních tělísek po konsolidaci estery kyseliny křemičité o přibližné koncentraci 300 g/l v jednom cyklu, se znázorněním směrodatné odchylky pro danou skupinu vzorků .....	152
Graf 28: Výsledky měření kapilární nasákavosti na konsolidovaných zkušebních tělískách – vynesené do grafu jako hmotnost vsáknuté vody na plochu za čas – závislost vychází ze směrnic uvedených v tabulce.....	155
Graf 29: Průměry jednotlivých nárůstů rychlostí míst měřených po konsolidaci, rozdělených do skupin dle tloušťky měřeného místa.....	193
Graf 30: Profil rychlostí UZ po konsolidaci – závislost rychlosti na měřené vzdálenosti .....	195

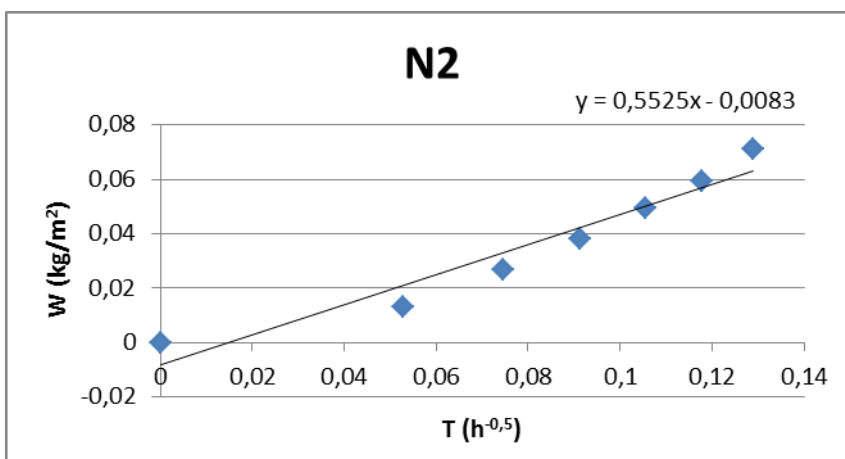
## 12 Přílohy

**Příloha č. 1: Měření nasákavosti na soše světice č. 1 houbou Blitz Fix**

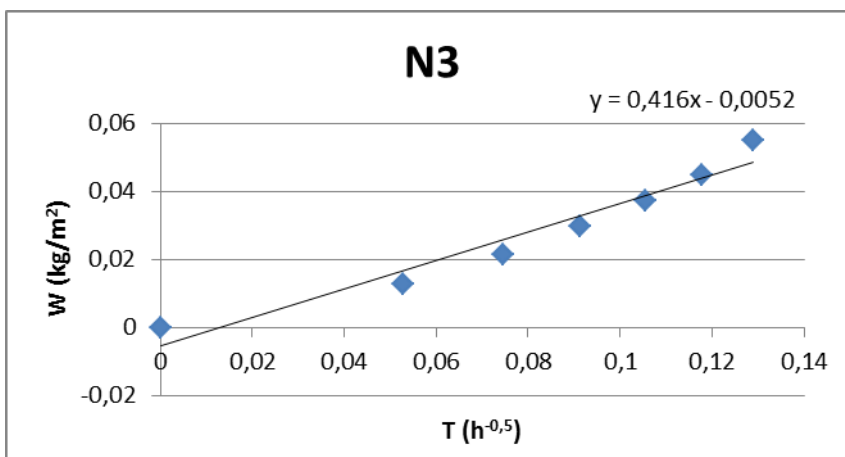
Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	0,470
20	0,739
30	1,019
40	1,279
50	1,664
60	2,060



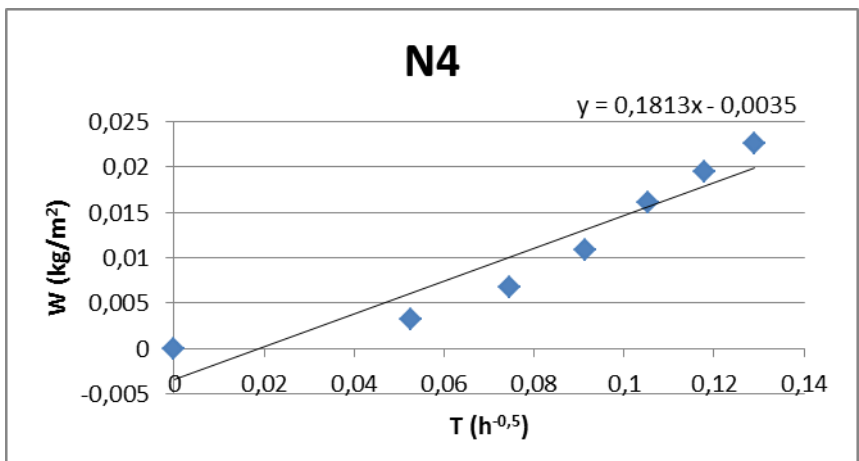
Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	1,101
20	2,252
30	3,165
40	4,124
50	4,969
60	5,938



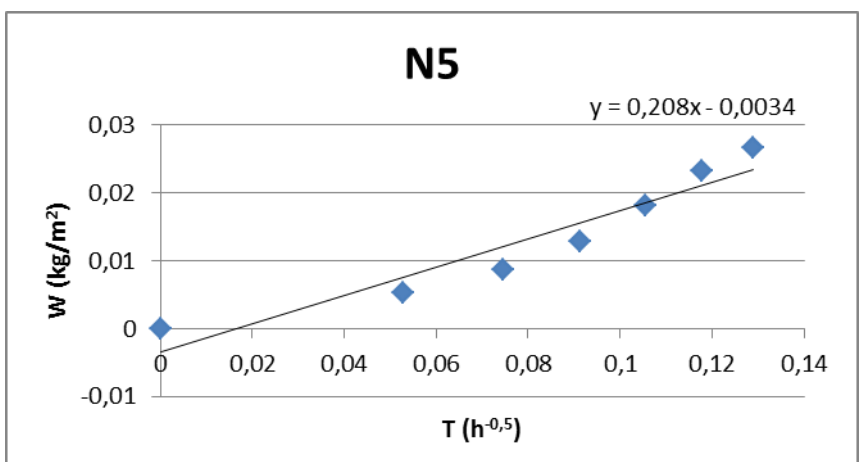
Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	1,082
20	1,813
30	2,482
40	3,113
50	3,761
60	4,603



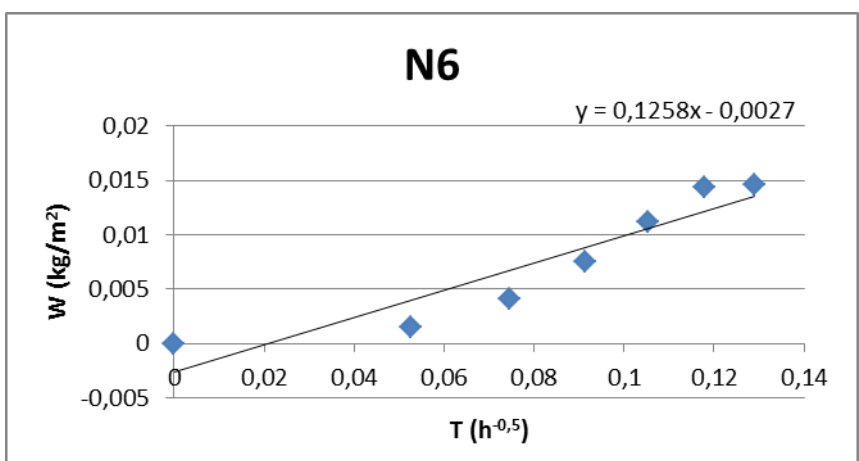
Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	0,264
20	0,568
30	0,903
40	1,351
50	1,631
60	1,893



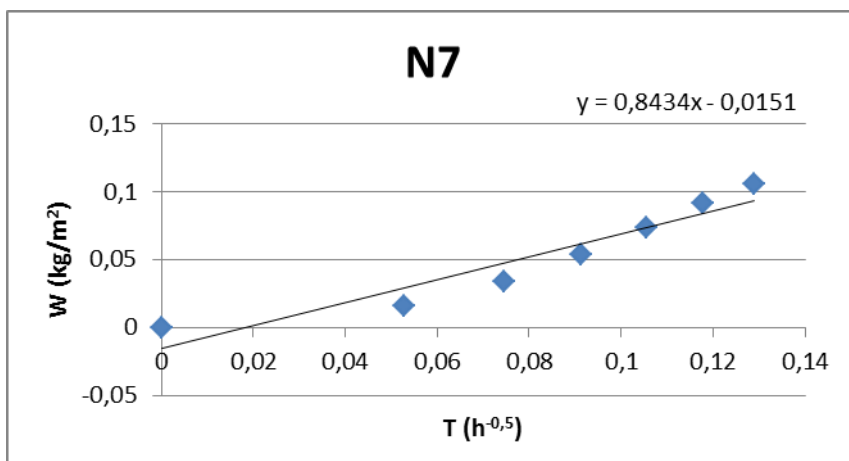
Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	0,446
20	0,731
30	1,072
40	1,524
50	1,942
60	2,222



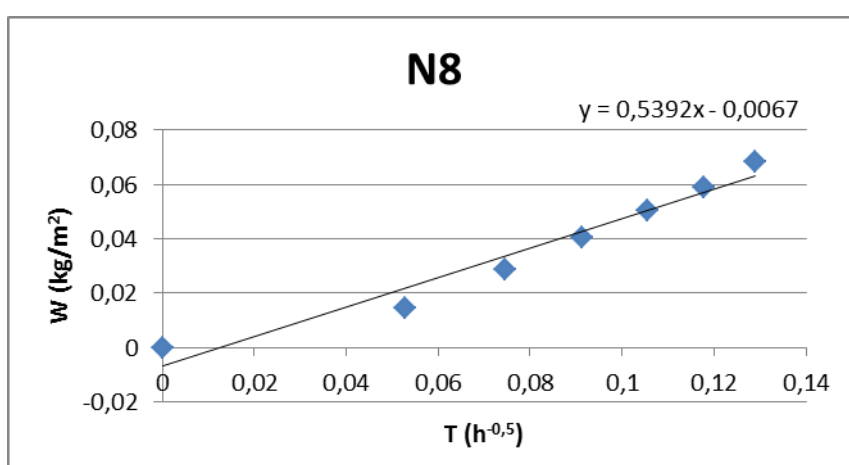
Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	0,124
20	0,344
30	0,631
40	0,930
50	1,200
60	1,220



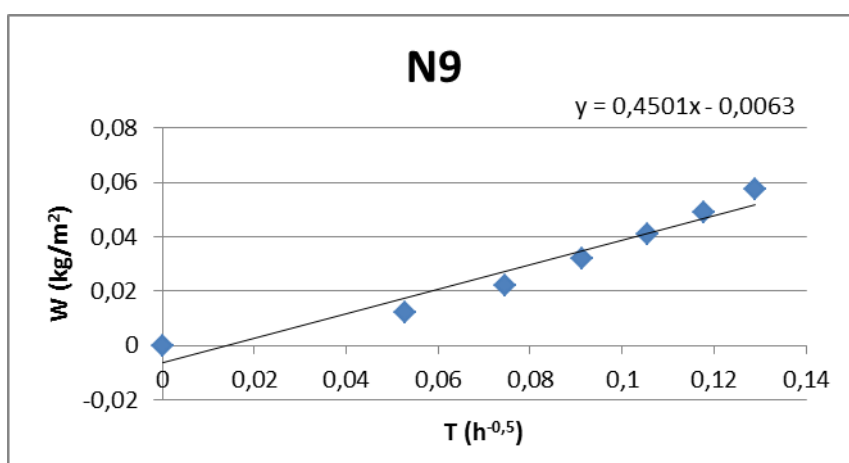
Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	1,378
20	2,868
30	4,485
40	6,180
50	7,641
60	8,882



Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	1,195
20	2,411
30	3,394
40	4,207
50	4,913
60	5,697

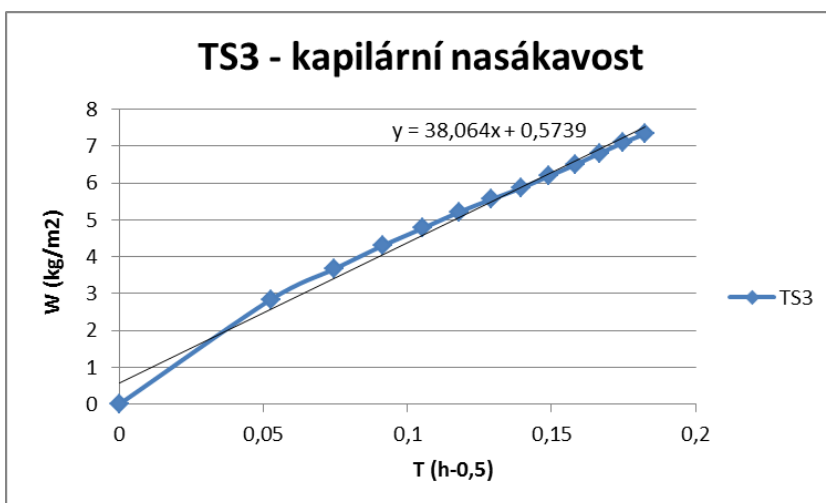


Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0
10	1,000
20	1,822
30	2,651
40	3,423
50	4,096
60	4,814

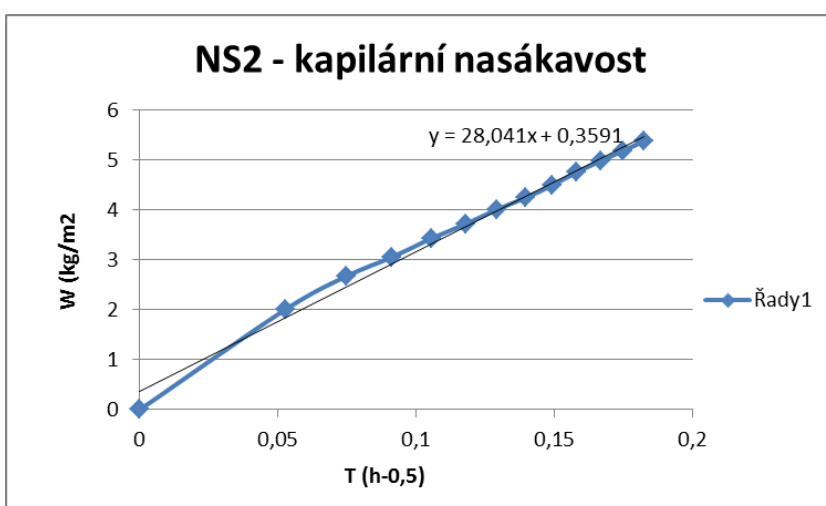


**Příloha č. 2: Měření nasákavosti volným kapilárním vztlínáním na hornině z vrtného jádra sochy světice č. 1**

Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0,000
10	4,013
20	5,170
30	6,060
40	6,740
50	7,350
60	7,840
70	8,270
80	8,730
90	9,160
100	9,600
110	10,010
120	10,350



Čas t [s]	Objem V [ml]
0	0,000
10	2,830
20	3,760
30	4,310
40	4,830
50	5,240
60	5,650
70	5,980
80	6,330
90	6,710
100	7,020
110	7,310
120	7,590



### **Příloha č. 3: Zpráva z měření rychlosti průchodu UZ signálu na soše světice č. 1 před restaurováním**

#### **Socha světice č.1 (Muzeum stříbra, Kutná Hora)**

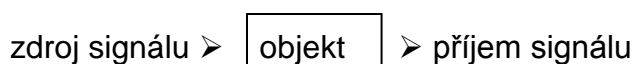
#### **Posouzení stavu metodou ultrazvukové transmise**

**Zadání:** nedestruktivní zjištění stavu

#### **Metoda měření:**

Princip metody spočívá v měření rychlosti přechodu longitudální vlny (p-vlny) zkoumaným materiálem. Rychlost uz-signálu je pro daný materiál charakteristickou veličinou. V masivnějších horninách s vyšší mírou stmelení je rychlost ultrazvuku vyšší než v horninách poréznějších, obvykle méně stmelěných. Tato souvislost platí i mezi stejným typem zvětralé a nezvětralé horniny. V poškozených, korodovaných kamenných objektech, jejich částech nebo vrstvách, je proto rychlost ultrazvuku nižší než v nepoškozených, „zdravých“ objektech resp. jeho částech. V místech s výraznými poškozeními, nehomogenními zónami nebo trhlinami je uz-signál zpomalený, deformovaný nebo neprochází vůbec.

Měřením se zjišťuje čas  $t$  přechodu uz-signálu zkoumaným objektem o tloušťce  $d$ .



Z naměřeného času  $t$  a vzdálenosti (tloušťky)  $d$  lze rychlost  $v$  vypočítat dle vztahu:

$$v = d/t \text{ [m/s] příp. [km/s]}$$

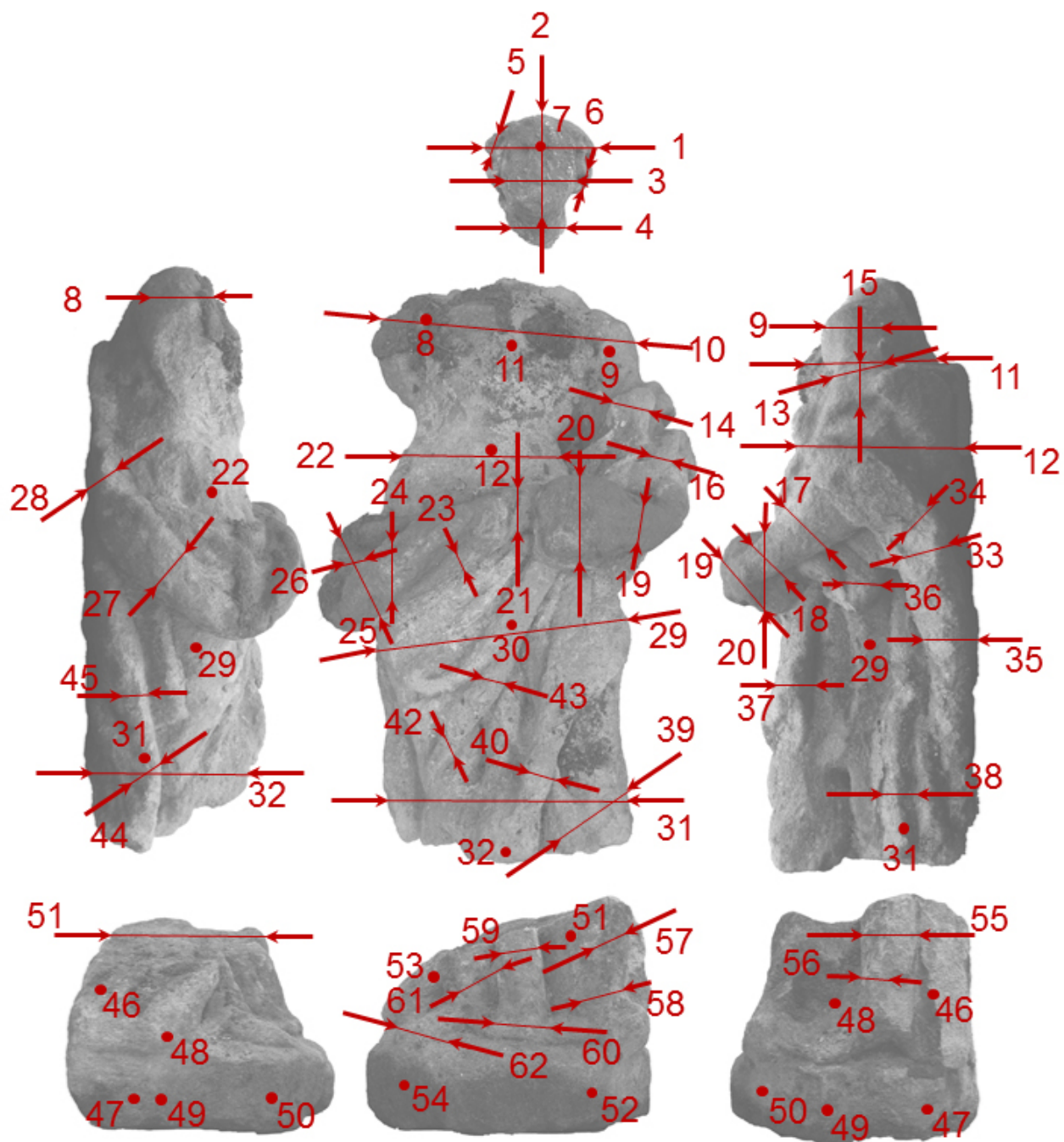
$v$  - rychlost uz

$d$  - měřená vzdálenost

$t$  - čas přechodu signálu

Vlastní měření bylo provedeno přístrojem USME-C (fa. Krompholz, BRD) s měřicí frekvencí 250 kHz. Jako spojovací materiál pro přiložení sond byl použit trvale plastický tmel na bázi silikonového kaučuku (bez přísady změkčovadel).





Zákres měřících bodů rychlostí průchodu UZ signálu na soše svěťice č. 1

**Legenda:**

šipky znázorňují směry měření

puntítky znázorňují měření provedené kolmo k zobrazené hmotě kamene

**Tab. 1. Výsledky měření**

V tabulce je uvedeno číslo měření **č. m.**, naměřený čas **t**, naměřený čas po odečtení korekce pro danou frekvenci **t<sub>kor</sub>**, směr měření, vzdálenost **d** pro dané měření a rychlost šíření p-vlny ultrazvukového signálu **v**.

č. m.	Místo měření	směr	t (μs)	t <sub>kor</sub> (μs)	d (cm)	v (km/s)	poznámka
1	přes vlasy	lp	120,0	118,6	23,2	1,96	
2	brada – temeno	v	89,4	88,0	19,4	2,20	
3	tváře	lp	61,3	59,9	12,8	2,14	
4	krk	lp	66,1	64,7	10,5	1,62	
5	vlasy nad pravým uchem	v	23,1	21,7	5,4	2,49	
6	vlasy pod levým uchem	v	31,3	29,9	6,2	2,07	
7	čelo – zátylek	pz	127,3	125,9	24,3	1,93	
8	pravé rameno	pz	57,2	55,8	13,1	2,35	
9	levé rameno	pz	68,0	66,6	13,5	2,03	
10	přes ramena	lp	229,8	228,4	52,0	2,28	
11	hrud' – záda	pz	165,6	164,2	27,7	1,69	
12	břicho – záda	pz	268,2	266,8	36,2	1,36	
13	levá paže	pz	69,7	68,3	14,2	2,08	
14	draperie na levé paži	lp	39,1	37,7	8,6	2,28	
15	draperie na levé paži	v	38,5	37,1	8,3	2,24	
16	draperie na levém předloktí	lp	15,2	13,8	3,0	2,17	
17	levé předloktí	v	48,3	46,9	8,7	1,86	
18	levé zápěstí	v	32,6	31,2	5,4	1,73	
19	levá ruka	v	43,4	42,0	7,8	1,86	
20	lebka	v	85,0	83,6	15,0	1,79	
21	draperie na břiše vedle lebky	v	43,2	41,8	9,2	2,2	
22	přes bedra	plp	177,3	175,9	37,5	2,13	
23	draperie na břiše	v	20,7	19,3	3,8	1,97	
24	draperie na břiše	v	39,7	38,3	7,9	2,06	
25	draperie na pravém boku	v	102,1	100,7	18,7	1,86	
26	draperie na pravém boku	lp-v	14,7	13,3	3,6	2,71	
27	draperie na pravém boku	v	67,0	65,6	9,1	1,39	
28	draperie na pravém boku	pz	43,3	41,9	6,6	1,58	
29	přes stehna	lp	377,5	376,1	47,5	1,26	ss, ds
30	draperie mezi stehny – zadní	pz	341,6	340,2	40,5	1,19	ss

	část						
31	přes lýtka	lp	345,1	343,7	49,6	1,44	ss
32	draperie mezi lýtky – zadní část	pz	250,6	249,2	36,8	1,48	ss (spodek světiice)
33	draperie pod levým předloktím	pz	75,9	74,5	8,5	1,14	
34	draperie pod levým předloktím	pz	51,3	49,9	5,6	1,12	
35	draperie pod levým předloktím	pz	61,4	60,0	7,3	1,22	
36	draperie pod levým předloktím	pz	28,2	26,8	4,2	1,57	ds, přes krustu
37	draperie pod levou rukou	pz	40,2	38,8	5,4	1,39	
38	draperie vlevo dole	pz	45,2	43,8	4,6	1,05	
39	draperie vlevo dole	lp	72,7	71,3	13,0	1,82	
40	draperie mezi lýtky	lp	31,1	29,7	5,1	1,72	
41	draperie mezi stehny	lp	92,0	90,6	10,6	1,17	přes krustu
42	draperie na levém koleni	lp-v	25,2	23,8	3,3	1,39	
43	draperie nad levým kolenem	lp	37,1	35,7	4,0	1,12	
44	draperie na pravé straně	pz	85,3	83,9	7,9	0,94	
45	draperie na pravé straně	pz	25,9	24,5	3,5	1,43	
46	zadní část	lp	449,8	448,4	50,3	1,12	vss, téměř ns
47	sokl vzadu	lp	377,2	375,8	57	1,52	ss
48	střední část	lp	448,2	446,8	47,8	1,07	vss, téměř ns
49	sokl střed	lp	384,5	383,1	57,7	1,51	vss, téměř ns
50	sokl přední část	lp	235,8	234,4	45,3	1,93	
51	levá noha – zadní část	pz	256,4	255,0	38,1	1,49	ss
52	sokl pod levou nohou	pz	297,5	296,1	52,5	1,77	vss
53	pravá noha draperie zadní část	pz	176,5	175,1	27,8	1,59	
54	sokl pod pravou nohou	pz	264,5	263,1	46,5	1,77	ss
55	draperie za levou nohou	pz	77,5	76,1	10,6	1,39	
56	draperie za levou nohou	pz	56,5	55,1	4,6	0,83	
57	levá noha nahoře	lp	81	79,6	13,1	1,65	

58	levá noha dole	lp	65,8	64,4	11,7	1,82	
59	draperie mezi nohama nahoře	lp	59,3	57,9	7,4	1,28	
60	draperie mezi nohama dole	lp	49,2	47,8	9,2	1,92	
61	pravá noha	lp	54,4	53,0	9,7	1,83	
62	pravá noha chodidlo	lp	52,0	50,6	9,8	1,94	

### Legenda:

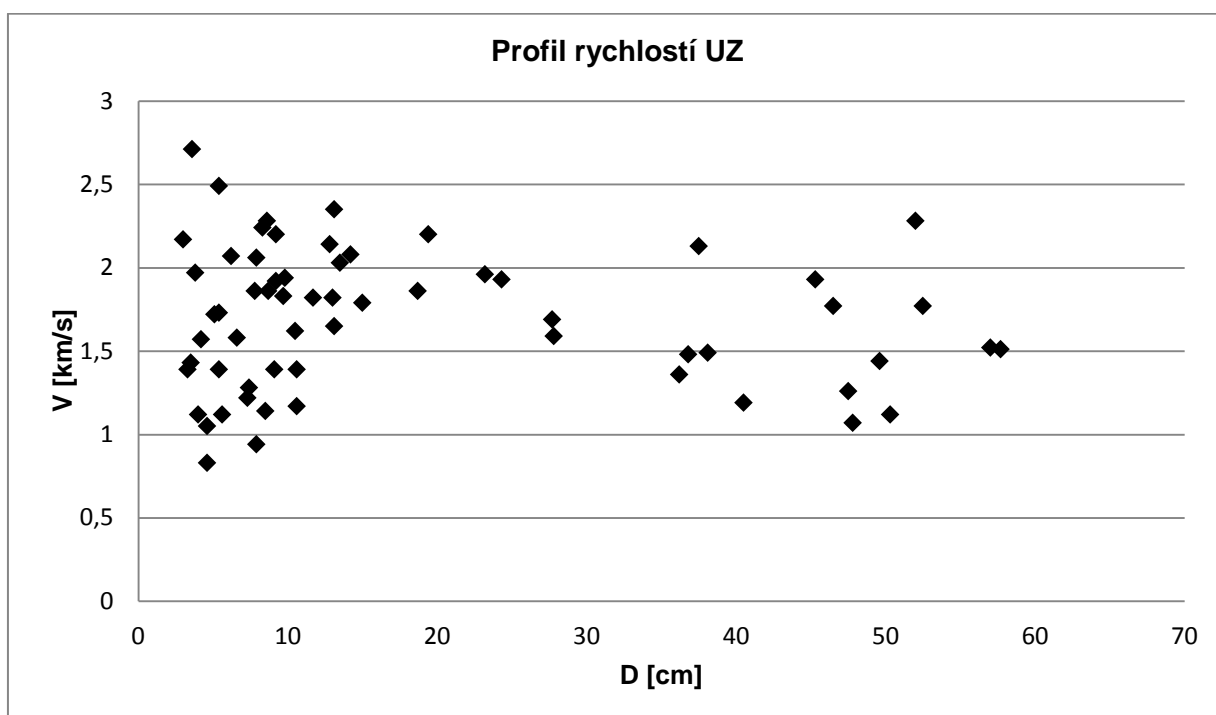
Směr měření..... LP: levopravý; PZ: předozadní, V: vertikální

Poznámka..... charakteristika tvaru nebo amplitudy uz-signálu  
vss: výrazně utlumená amplituda  
ss: utlumená amplituda  
ds: deformovaný signál

**Tab. 2. Průměrné rychlosti UZ**

Průměrná hodnota naměřených rychlostí	1,69 km/s
Nejnižší hodnota naměřených rychlostí	0,83 km/s
Nejvyšší hodnota naměřených rychlostí	2,71 km/s

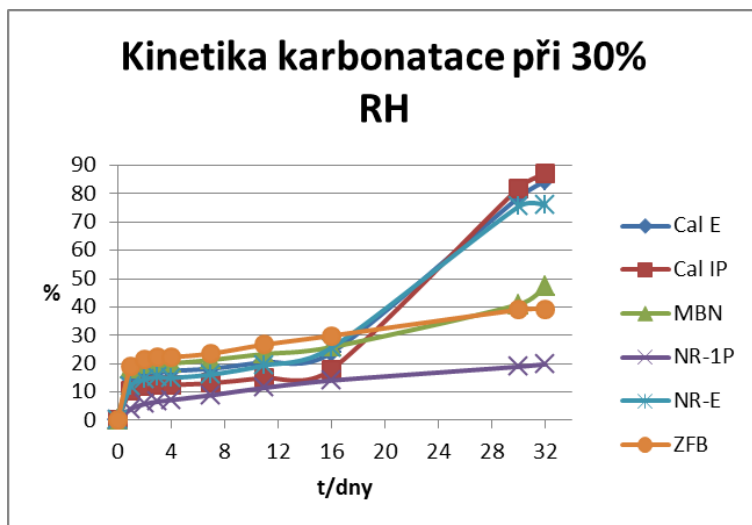
**Graf 1. Profil rychlostí UZ (rychlost UZ v závislosti na tloušťce měřeného místa)**



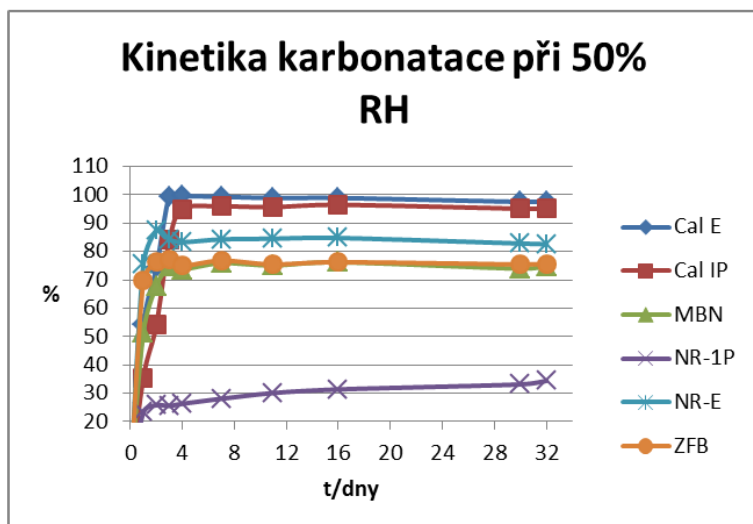
## Vyhodnocení:

- Průměrná rychlost UZ je poměrně nízká (1,69 km/s), co odpovídá na jedné straně vlastnostem použité horniny, kterou je poměrně porézní organodetrický vápenec. U poréznějších typů obdobných vápenců se rychlosti p-vlny UZ pohybují mezi 2,0 až 2,5 km/s, pro méně porézní organodetrické vápence se rychlosti UZ pohybují 2,5 až 3,5 km/s a pro lešitelné vápence a mramory až 6,0 – 6,5 km/s. Nízká naměřená průměrná rychlost je kromě základních vlastností vápence ovlivněna i rozsáhlou korozí kamene resp. vysokým počtem měření na poškozených místech sochy. Poškozená místa jsou v tabulce odlišena červeným písmem. Výrazná lokální poškození vápence jsou i důvodem značného rozdílu mezi maximální (2,71 km/s) a minimální (0,83 km/s) hodnotou naměřených rychlostí ultrazvuku (longitudální vlnění).
- V místech s výraznou korozí vápence jsou rychlosti UZ velmi nízké, často klesají pod hodnotu 1 km/s. Měření potvrzují výsledky vizuálního restaurátorského průzkum a tato místa jsou nejvíce ohroženými částmi sochy. Lze sem zařadit zejména draperii na levé straně - pod levým předloktím, vedle levého boku a lýtka, částečně i na pravém boku a mezi stehny.
- Pod krustami je často narušená hornina, krusty nejsou pevně propojeny s podkladem
- Na profilu rychlostí UZ je viditelné, že v poškozených částech sochy dochází směrem k povrchu (tj. k menším měřícím vzdálenostem) k poklesu rychlostí, které indikuje snížení míry stmelení (pevnosti) vápence. Lze předpokládat, že poškození zasahují nejvíce zónu do hloubky cca. 4-6 cm.

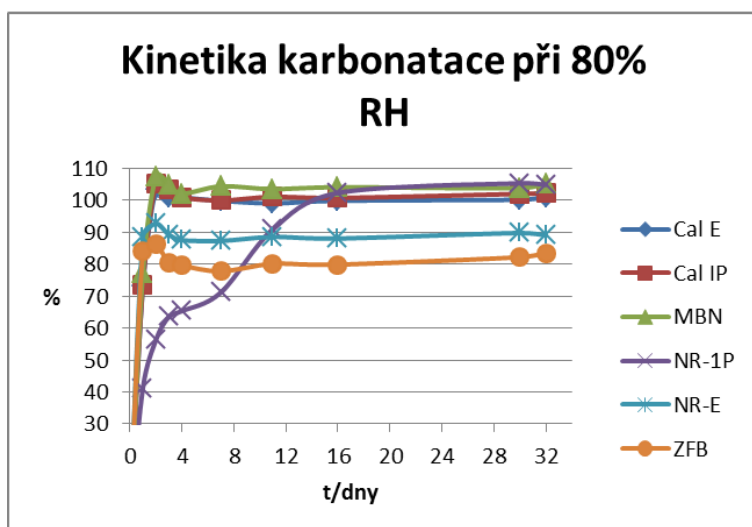
**Příloha č. 4: Doba a podmínky zrání suspenzí na bázi hydroxidu vápenatého**



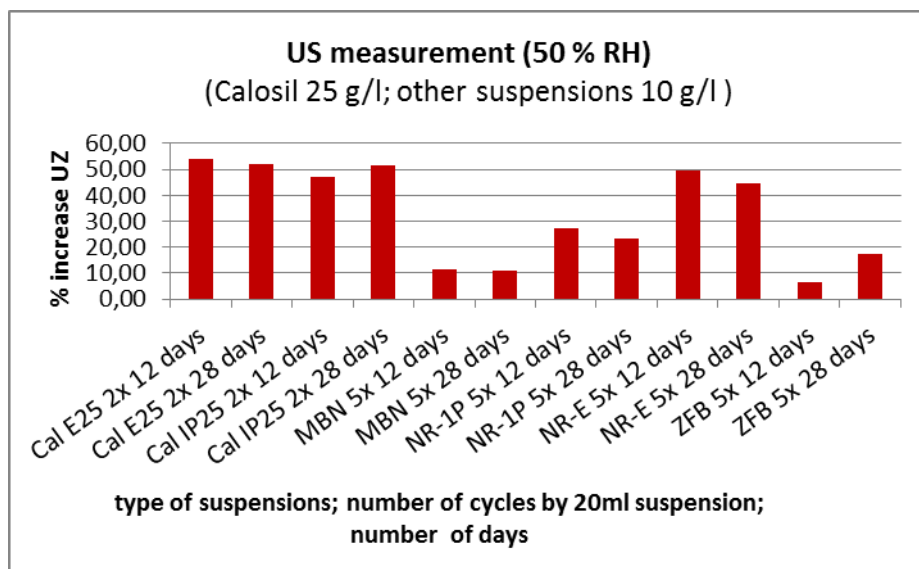
**Kinetika karbonatace vápenných nanosuspenzí na Petriho miskách v 30% RH**



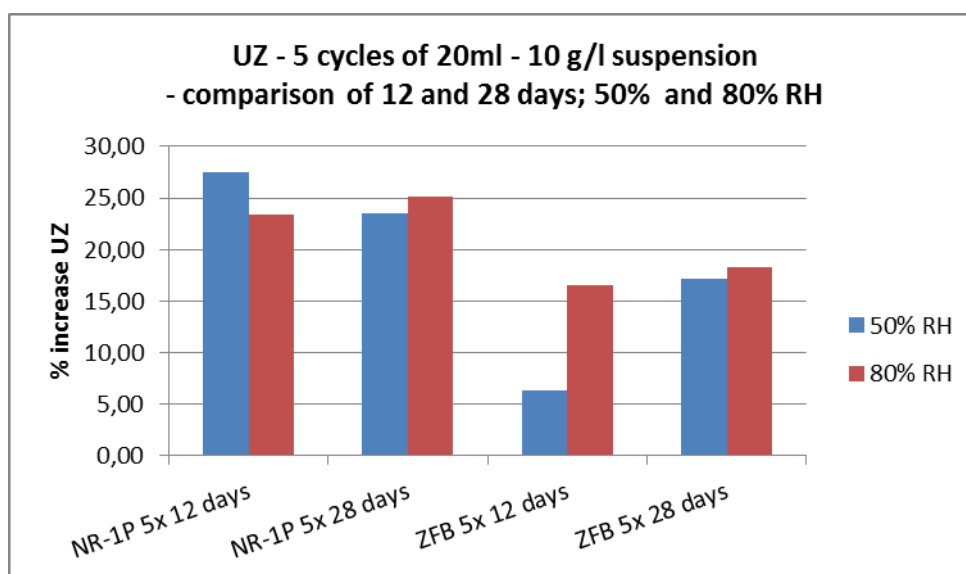
**Kinetika karbonatace vápenných nanosuspenzí na Petriho miskách v 50% RH**



**Kinetika karbonatace vápenných nanosuspenzí na Petriho miskách v 80% RH**



Nárůst rychlosti UZ u zkušebních tělísek po 12 a 28 dnech zrání



Nárůst rychlosti UZ v závislosti na době zrání a podmínkách karbonatace, měřeno po 12 a 28 dnech zrání v 50% a 80% relativní vzdušné vlhkosti

**Příloha č. 5: Fotodokumentace soch dvou světic z ČMS  
pořízené v srpnu roku 2004**



**Hlava svěťice; svěťice č. 1 evidenční číslo fotografie 104a**



**Trup s hlavou; svěťice č. 1; evidenční číslo fotografie 104b**





**Nohy s plintem; svěťice č. 1; evidenční číslo fotografie 104c**



**Trup s hlavou a nohami po přiložení; svěťice č. 1; evidenční číslo fotografie 104d**



**Trup s hlavou a nohami po přiložení; světice č. 1; evidenční číslo fotografie 104e**



**Trup s hlavou; světice č. 2; evidenční číslo fotografie 100**

**Srovnání stavu světiče č. 2 na fotografiích z 08/2004 a 12/2012<sup>81</sup>**



**Trup s hlavou; světiče č. 2; evidenční číslo fotografie 175**



**Trup s hlavou; světiče č. 2; evidenční číslo fotografie 175**

---

<sup>81</sup> Stav sochy světiče č. 1 je možné podobně porovnat s fotografiemi v obrazové příloze stavu před restaurováním