

Univerzita Pardubice

Fakulta restaurování

Ateliér restaurování sochařských děl z kamene a souvisejících materiálů

I.

Teoretická část diplomové práce:

Možnosti konsolidace zavlhčeného kamene s případovou studií reliéfu Klanění pastýřů
v Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu

II.

Praktická část diplomové práce:

Dokumentace restaurování sádrové plastiky Apollóna

Vypracovala: BcA. Kristýna Bittnerová

Vedoucí práce: doc. Mgr. art. Jakub Ďoubal, Ph.D.

Odborní konzultanti: Ing. Karol Bayer,

Ing. Renata Tišlová, Ph.D., Mgr. Petra Hečková, Ph.D., MgA. Zuzana Auská

Diplomová práce

2025

Univerzita Pardubice
Fakulta restaurování
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **BcA. Kristýna Bittnerová**
Osobní číslo: **R23006**
Studijní program: **N0222A310001 Restaurování a konzervace děl hmotného kulturního dědictví**
Specializace: **Polychromovaná a nepolychromovaná sochařská díla**
Téma práce: **Dokumentace restaurování sádrové plastiky Apollóna; Možnosti konsolidace zavlhčeného kamene s případovou studií reliéfu Klanění pastýřů v Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu**
Zadávací katedra: **Ateliér restaurování kamene**

Zásady pro vypracování

Praktická část diplomové práce bude spočívat v komplexním restaurování sádrové plastiky Apollóna a dokumentaci tohoto zásahu. Před samotným restaurováním budou zpracovány a vyhodnoceny výsledky restaurátorského, chemicko-technologického a umělecko-historického průzkumu, na kterých bude vytvořena koncepce restaurátorského zásahu. Restaurátorské postupy a technologie budou navazovat na předešlé výsledky zkoušek a vše bude dokumentováno podle standardů stanovených pro restaurátorské dokumentace.

Praktické restaurování bude doplněno teoretickou studií, jež se bude zabývat problematikou zpevnování zavlhčeného kamene. Před samotným testováním proběhne rešerše dostupných zdrojů zabývajících se tímto tématem. Součástí práce bude i průzkum na reliéfu Klanění pastýřů v Novém lese u Kuksu, kde je řešení této problematiky velmi zásadní pro zachování díla. Na místě proběhne pravidelný monitoring povrchové vlhkosti a vzájemné porovnání hodnot a odběr hloubkového vrtnu pro zjištění vlhkostního profilu a obsahu vodorozpuštěných solí.

Experiment bude spočívat ve vytvoření sady vzorků z umělého kamene, které budou mít charakter narušeného kamene. Posléze budou tyto vzorky uměle zavlhčeny a následně na ně budou aplikovány vybrané konsolidanty. Případně budou ozkoušeny postupy pro dočasné povrchové snížení vlhkosti. Vzorky budou následně ponechány v hermeticky uzavřeném prostředí tak, aby se zamezilo nežádoucímu snížení vlhkosti ve vzorcích. Bude sledován průběh a úspěšnost vytvrzení konsolidantů na vlhkých vzorcích a jejich účinnost a hloubka penetrace. Na závěr budou všechny vzorky celkově vyhodnoceny a porovnány, a budou definovány možnosti konsolidace zavlhčeného kamene v kontextu daného objektu.

Práce budou probíhat pod dohledem pedagogů restaurátorů. Postup prací bude průběžně konzultován s přidělenými konzultanty a externími specialisty. Použité postupy a technologie budou voleny na základě důkladných zkoušek.

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- AMBERS, Janet a et al., ed. *Holding It All Together: Ancient and Modern Approaches to Joining, Repair and Consolidation*. London: Archetype Publications, 2009. ISBN 9781904982470.
- BENETKOVÁ, B., et al. Vliv relativní vlhkosti na míru popraskání modifikovaných organokřemičitých konsolidantů. *Nanomateriály a nanotechnologie ve stavebnictví 2015*, 1.
- DOEHNE, Eric Ferguson a Clifford A. PRICE. *Stone conservation: an overview of current research* [online]. 2nd ed. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2010
- ĎOUBAL, Jakub. *Kamenné památky Kutné Hory: Restaurování a péče o sochařská díla*. Univerzita Pardubice, 2015.
- ĎOUBAL, Jakub. *Úvod do restaurování kamenných památek*. Vydání: 1. [Litomyšl]: Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice, 2023. ISBN 978-80-7560-475-0.
- GLÁSER, P.; NEJEDLÝ, V. Organokřemičitany v české památkové praxi. *Padesát let používání organokřemičitanů na území České republiky*, 2008.
- HENRY, Alison (ed.). *Stone conservation: principles and practice*. Routledge, 2015.
- HORIE, Velson. *Materials for Conservation: Organic consolidants, adhesives and coatings*. 2. London: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-75-066905-4.
- KAŠE, Jiří a NOVOTNÝ, Jiří a ŠTAFEN, Zdeněk. Proměny a stav reliéfu Klanění pastýřů a Příjezdu Tří králů v Novém lese u Kuksu. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 387–397. ISSN 1210-5538.
- KOTLÍK, Petr. *Konsolidanty kamene – historie a současnost*. In: HEČKOVÁ, Petra, HORÁK, Petr, MACHAČKO, Luboš, eds. *Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví: sborník z konference*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, s. 187. ISBN 978-80-7395-594-6.
- MITTAL, K. L., ed. *Silanes and other coupling agents*. Leiden: VSP, 2009, Volume 5. ISBN 978-90-04-16591-5.
- SENA DA FONSECA, B. Current trends in stone consolidation research: An overview and discussion. *Buildings*, 2023, 13.2: 403.
- WHEELER, George. *Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2005. Research in conservation (Unnumbered). ISBN 08-923-6815-2.
- ZELINGER, Jiří; ŠIMŮNKOVÁ, Eva a KOTLÍK, Petr. *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. Praha: Academia, 1982.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Jakub Ďoubal, Ph.D.
Ateliér restaurování kamene

Datum zadání diplomové práce: **30. listopadu 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. srpna 2025**

L.S.

Mgr. BcA. Radomír Slovík
děkan

doc. Jakub Ďoubal, Ph.D.
vedoucí ateliéru

V Litomyšli dne 4. srpna 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Možnosti konsolidace zvlhčeného kamene s případovou studií reliéfu Klanění pastýřů v Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu a Dokumentace restaurování sádrové plastiky Apollóna 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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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. Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu své diplomové práce, doc. Jakubu Ďoubalovi, za odborné vedení, cenné konzultace a podporu při vypracovávání této práce. Mé velké poděkování patří také technologovi Ing. Karolu Bayerovi za veškerou pomoc při laboratorních pracích, odborné konzultace a asistenci při vyhodnocování výsledků.

Dále bych chtěla poděkovat Ing. Renatě Tišlové za zpracování chemicko-technologického průzkumu k praktické části diplomové práce.

Mé upřímné díky náleží také MgA. Petře Zítkové a MgA. Zuzaně Auské za podporu a cenné rady po celou dobu studia i při zpracování mé diplomové práce a s tím spojené korektury.

V neposlední řadě bych chtěla vyjádřit hlubokou vděčnost své rodině a partnerovi za trpělivost, důvěru a neustálou podporu po celou dobu mého studia.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na možnosti konsolidace pískovců s vyšším obsahem vlhkosti. Konkrétně je pak tato problematika sledována v terénu na výjevech z Braunova Betléma v Novém lese u Kuksu.

Konsolidace kamene s vyšším obsahem vlhkosti představuje značný problém, pro který doposud neexistuje jasné řešení. Většina v současnosti používaných konsolidačních prostředků je určena pro aplikaci na suché materiály a jejich použití na materiál se zvýšenou vlhkostí se nedoporučuje. V některých případech však není možné kámen před aplikací zcela vysušit.

Laboratorní podmínky testování byly stanoveny na základě sledování vlhkosti reliéfu „Klanění pastýřů“ v Braunově Betlémě a porovnání s okolními reliéfy. Cílem studie bylo ověřit chování vybraných konsolidantů na zkušebních tělíscích s různou úrovní vlhkosti. Testovány byly produkty na bázi organokřemičitanů a koloidních roztoků oxidu křemičitého. Konkrétně byly použity čtyři komerční prostředky: dva typy na bázi esterů kyseliny křemičité Remmers KSE 100, KSE 300, a dva na bázi koloidních roztoků oxidu křemičitého Levasil CC301 a Sebosil S. Vlhkost byla nastavena na 10 % a 15 % hmotnosti zkušebních tělísek. Před samotnou aplikací byly na povrchu zkušebních tělísek vyzkoušeny dvě různé metody vysoušení. Poté byla tělíska umístěna do uzavřených boxů, aby se zamezilo změnám vlhkosti. Do stejného prostředí byly umístěny i Petriho misky s jednotlivými prostředky, aby bylo možné vizuálně posoudit vznik a vytvrzení křemičitého gelu.

Kvalita vzniklých křemičitých gelů vytvořených z jednotlivých prostředků v prostředí s vysokou relativní vlhkostí vzduchu byla porovnávána s gely, které vytvrzovaly za podmínek s optimální vlhkostí vzduchu (pro organokřemičitany 50-70 % RH a pro koloidní roztoky oxidu křemičitého 20-40 % RH). U organokřemičitých prostředků se na Petriho miskách objevil mléčný zákal a v některých případech gel zcela neztvrdl. Levasil CC301 byl z dalšího testování vyřazen, protože gel v Petriho misce nevytvrdl dostatečně. Naopak Sebosil S vykazoval nejstabilnější výsledky. Jeho gel vytvrdl rychle (do 14 dní) a bez větších odchylek oproti standardním podmínkám

Hodnocení účinků jednotlivých prostředků bylo provedeno na základě srovnání hloubky penetrace jednotlivých prostředků, měření rychlosti šíření longitudálního ultrazvukového vlnění, odporového vrtání, studia mikrostruktury pomocí rastrovací elektronové mikroskopie a v neposlední řadě i porovnání změn barevnosti pomocí kolorimetrie. Většina testovaných produktů prokázala určitou míru konsolidačního účinku, který u jednotlivých prostředků zpravidla odpovídal koncentraci jejich účinných složek. To znamená, že nejvýraznější

konsolidační efekt měl organokřemičitan KSE 300, míň výrazná pak byla konsolidace organokřemičitanem KSE 100 a nejnižší efekt měl prostředek Sebosil S.

V druhé části se diplomová práce věnuje dokumentaci restaurování sádrové plastiky Apolla. Dílo bylo zrestaurováno s respektem k jeho historické a umělecké hodnotě. Tato práce obsahuje podrobnou restaurátorskou dokumentaci všech provedených úkonů a jejich fotografickou dokumentaci.

Klíčová slova

konsolidace kamene, zpevňování, vlhkost kamene, organokřemičitany, koloidní oxid křemičitý, snížení obsahu vlhkosti, Braunův Betlém, Klanění pastýřů, pískovec, restaurování, sádra, antika

Title

stone consolidation, consolidation, stone moisture, organosilicates, colloidal silica solution, moisture reduction, Braun's Bethlehem, Adoration of the Shepherds, sandstone, restoration, gypsum, antiquity

Annotation

The diploma thesis focuses on the possibilities of consolidating sandstones with higher moisture content. Specifically, this issue is examined in the field at the reliefs of Braun's Bethlehem in the Nový les near Kuks.

The consolidation of stone with elevated moisture content presents a significant problem for which no clear solution currently exists. Most of the consolidation products used today are designed for application on dry materials, and their use on damp materials is not recommended. However, in some cases, it is not possible to completely dry the stone before application.

Laboratory testing conditions were established based on the monitoring of moisture levels in the relief "Adoration of the Shepherds" in Braun's Bethlehem and comparison with the surrounding reliefs. The aim of the study was to verify the behavior of selected consolidants on test specimens with different levels of moisture. Products based on organosilicates and colloidal silica solutions were tested. Specifically, four commercial products were used: two types based on silicic acid esters (Remmers KSE 100 and KSE 300), and two based on colloidal silica solutions (Levasil CC301 and Sebosil S). The moisture content of the test specimens was set at 10 % and 15 % by weight. Before the application itself, two different drying methods were tested on the surface of the specimens. The specimens were then placed in sealed boxes

to prevent changes in moisture. Petri dishes containing the individual consolidants were placed in the same environment to allow for visual assessment of the formation and hardening of the silica gel.

The quality of the resulting silica gels formed from the individual products in high relative humidity conditions was compared with gels that hardened under optimal humidity conditions (for organosilicates 50–70 % RH, and for colloidal silica solutions 20–40 % RH). With the organosilicate products, a milky haze appeared on the Petri dishes, and in some cases the gel did not harden completely. Levasil CC301 was excluded from further testing because the gel in the Petri dish did not harden sufficiently. In contrast, Sebosil S showed the most stable results. Its gel hardened quickly (within 14 days) and without major deviations from standard conditions.

The effects of the individual agents were carried out based on a comparison of their penetration depth, measurement of the velocity of longitudinal ultrasonic waves, drilling resistance, microstructure analysis using scanning electron microscopy, and finally a comparison of color changes using colorimetry. Most of the tested products showed a certain degree of consolidation effect, which generally corresponded to the concentration of their active ingredients. This means that the most pronounced consolidation effect was achieved with the organosilicate KSE 300, a less pronounced effect with KSE 100, and the lowest effect was observed with Sebosil S.

The second part of the thesis is devoted to the documentation of the restoration of a plaster sculpture of Apollo. The artwork was restored with respect for its historical and artistic value. This part of the work includes a detailed restoration report documenting all procedures carried out, along with photographic documentation.

I. Obsah teoretické části

1	Úvod do problematiky.....	16
2	Současný stav poznání	17
2.1	Pískovec	17
2.2	Degradace	18
2.3	Konsolidace	19
2.4	Materiály používané na konsolidaci pískovců – historie a současnost.....	20
2.5	Možnosti snížení vlhkosti v kameni	24
2.6	Možnosti konsolidace vlhkých materiálů	25
2.7	Shrnutí poznatků.....	26
3	Výzkum a vývoj stavu reliéfu Klanění pastýřů v Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu.....	27
3.1	Výzkumy prováděné v minulosti.....	27
3.2	Pískovec z Nového lesa u Kuksu.....	30
3.3	Maximální nasákavost pískovce z Braunova Betléma u Kuksu	30
3.4	Monitoring povrchové vlhkosti	31
3.5	Vyhodnocení hloubkového profilu vlhkosti	33
3.6	Analýza vodorozpustných solí a hygroskopicitá	33
4	Experiment	36
4.1	Konsolidační prostředky	36
4.2	Možnosti obarvení konsolidantu pro kontrolu hloubky penetrace.....	39
4.3	Příprava vzorků.....	41
4.4	Aplikace konsolidantů a zrání vzorků.....	44
4.5	Metody hodnocení	46
4.6	Vizuální posouzení vzniklých křemičitých gelů.....	47
4.7	Ultrazvuková transmise	49
4.8	Odporové vrtání	55
4.9	Vizuální posouzení hloubky penetrace	58
4.10	Rastrovací elektronová mikroskopie s energo-disperzní analýzou.....	62
4.11	Kolorimetrie.....	75
5	Vyhodnocení experimentu a závěr.....	80
5.1	Vyhodnocení pozorování a průzkumů na Braunově Betlémě	80
5.2	Vyhodnocení testování konsolidantů při zvýšeném obsahu vlhkosti v materiálu	80
5.3	Závěr	82
6	Seznam literatury	84
6.1	Literatura.....	84

6.2	Internetové zdroje	88
7	Seznam obrázků použitých v textu	89
8	Seznam tabulek použitých v textu.....	90
9	Seznam grafů použitých v textu.....	92
10	Příloha: Podrobné výsledky měření povrchové vlhkosti na Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu.....	93

II. Obsah praktické části

1	Základní informace	105
1.1	Lokalizace památky	105
1.2	Údaje o památce.....	105
1.3	Údaje o akci	105
1.4	Údaje o dokumentaci	105
2	Úvod.....	106
3	Průzkumová zpráva.....	107
3.1	Popis díla	107
3.2	Restaurátorský průzkum	107
3.2.1	Stav díla před restaurováním	107
3.2.2	Zadání a cíle následujících průzkumů a zkoušek	113
3.3	Umělecko-historický průzkum	113
3.3.1	Ikonografie díla	113
3.3.2	Historie	114
3.3.3	Technika vzniku díla	114
3.3.4	Analogická zobrazení	114
3.3.5	Předchozí restaurátorské zásahy.....	116
3.4	Chemicko-technologický průzkum.....	116
3.4.1	Úvod do chemicko-technologického průzkumu.....	116
3.4.2	Analýza povrchových vrstev	116
3.4.3	Analýza adheziva.....	116
3.5	Vyhodnocení průzkumů.....	117
3.6	Zkoušky materiálů a technologií.....	118
3.6.1	Zkoušky čištění.....	118
3.6.2	Zkoušky tmelů.....	126
4	Koncepce restaurátorského zásahu.....	128
5	Postup prací.....	129
5.1	Etapa čištění a lokální fixace barevné vrstvy.....	129
5.2	Redukce přetěru místě pravé paže	129
5.3	Lepení odpadlých částí a injektáž.....	129
5.4	Etapa plastických retuší	130
5.5	Barevné retuše.....	131
6	Použité materiály a technologie	132
7	Nová zjištění.....	133

8	Doporučený režim památky	134
9	Seznam literatury	135
9.1	Literatura.....	135
9.2	Internetové zdroje	136
10	Seznam obrázků.....	137
11	Seznam tabulek.....	138
12	Fotografická dokumentace	139
12.1	Grafická fotodokumentace.....	141
12.2	Dílo před restaurováním	143
12.3	Stav po očištění a slepení.....	149
12.4	Dílo po etapě plastických retuší.....	155
12.5	Dílo po barevné retuši.....	161
12.6	Proces restaurování.....	167
13	Příloha: Chemicko-technologický průzkum: sádrový odlitek Apollona	171

I

Teoretická část diplomové práce:

Možnosti konsolidace zavlhčeného kamene s případovou studií reliéfu
Klanění pastýřů v Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu

1 Úvod do problematiky

Konsolidace zavlhčených pískovců představuje podle dostupných zdrojů a publikací dosud ne zcela vyřešenou oblast v rámci péče o kamenné kulturní dědictví. Většina používaných konsolidačních prostředků, dle doporučení výrobců, není vhodná pro aplikaci na materiály s vyšším obsahem vlhkosti (zpravidla nad 10 % hmotnosti). Standardním postupem při zpevňování kamene je počkat do jeho přirozeného vyschnutí. V exteriéru však poklesu vlhkosti v některých případech nelze dosáhnout – typickým příkladem je Braunův Betlém v Novém Lese u Kuksu, kde kámen zůstává dlouhodobě zavlhčený.

Tato diplomová práce se zaměřuje na hledání možných řešení této problematiky ve vztahu ke konkrétnímu dílu. Cílem bylo ověřit, zda za zvýšené vlhkosti materiálu dochází alespoň k částečnému zpevnění pískovce a současně identifikovat potenciální rizika, která mohou s takovým postupem souviset.

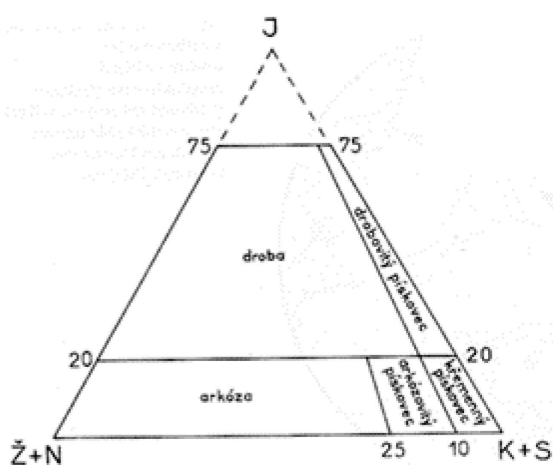
Na základě rešerše dostupné literatury byly pro experimentální testování vybrány prostředky na bázi organokřemičitanů a koloidní roztoky nanočástic oxidu křemičitého. Je známo, že při vytvrzování organokřemičitanů za podmínek vysoké relativní vlhkosti vzduchu může docházet k vyššími riziku tvorby trhlin¹ v křemičitém gelu, což představuje jedno z hlavních sledovaných kritérií.

¹ PETEROVÁ, Ing. Adéla; KOTLÍK, doc. Ing. Petr, CSc. *Vliv relativní vlhkosti na vlastnosti křemičitého gelu*. Praha: Ústav chemické technologie restaurování památek, VŠCHT Praha, 2014, s. 129-134. In: Muzea, památky a konzervace 2014.

2 Současný stav poznání

Pro důkladné porozumění zkoumané problematice a následný výběr vhodného konsolidantu bylo nezbytné nejprve detailně analyzovat samotný zpevňovaný materiál. V této souvislosti bylo rovněž nutné vymezit základní pojmy, jako jsou **degradace** a **konsolidace** kamene. Zvláštní pozornost byla věnována odborným studiím zaměřeným na problematiku konsolidace vlhkých pískovců, případně na výzkumy zabývající se samotným chováním konsolidantů ve vlhkém prostředí.

2.1 Pískovec²



Obr. TH 1 Základní klasifikace pískovců – podle prof. Jana Petránka

Pískovce, jakožto pevné klastické sedimentární horniny, jsou jedny z nejhojněji rozšířených a nejoblíbenějších užitkových kamenů. Využití našly nejenom ve stavebnictví, ale některé druhy se svými vlastnostmi hodí také na architektonické a sochařské, případně průmyslové účely. Díky své zpracovatelnosti, vzhledu a snadné dostupnosti patří k tradičním kamenickým a sochařských materiálů.

Z petrografického hlediska lze pískovce označit jako pevné úlomkovité/klastické sedimenty, tvořené psamitovými zrny (0,063–2 mm) a matrixem (neboli základní hmotou: jíl, prach, úlomky slíd). Pískovce lze dále dělit podle jejich nerostného složení na křemenné pískovce, arkózy a droby. Hlavními klasifikačními kritérii pískovců jsou: *složení klastických částic* (zahrnujících stabilní a nestabilní minerální zrna či úlomky hornin), *charakter základní hmoty* (nejčastěji jílovité povahy) a *přítomnost tmele*, tj. druhotně vyloučené, chemogenní substance diagenetického původu, která zpevňuje klastická zrna. Dále se zohledňuje příměs akcesorických minerálů, úlomků organických zbytků a dalších komponent. Významnými parametry jsou také míra vytržidění klastického materiálu a stupeň jeho opracování, které se projevují zejména ve tvaru

² RYBAŘÍK, Václav. *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Hořice v Podkrkonoší: Nadace střední průmyslové školy kamenické a sochařské, 1994
PETRÁNEK, Jan; BŘEZINA, Jiří; BŘÍZOVÁ, Eva; CHÁB, Jan; LOUN, Jan et al. *Encyklopedie geologie*. Praha: Česká geologická služba, 2016. ISBN 978-80-7075-901-1.

klastických částic. Tyto vzájemné poměry jsou pevně dané ČSN 72 1001–69 *Pojmenování a popis hornin*.

Česká republika je bohatá na významné lokality, kde se pískovec těží. Mezi nejvýznamnější patří Česká křídlová pánev, která se rozkládá v severních Čechách (rozsáhlá pánev, největší v Česku dochovaný sedimentační prostor, který se rozprostírá od Drážďan v Sasku, v Česku přes Děčín, severními Čechami přes Polabí až k Blansku u Brna³). Tato oblast je známá kvalitním pískovcem, který se využívá ve stavebnictví, sochařství a architektuře. Významné lomy se nacházejí například v oblasti Kokořínska, Broumovska a Adršpašsko-teplických skal.

V okolí Dvora Králové se nachází významná ložiska pískovce, která jsou součástí České křídlové pánve. Tato oblast je známá především těžbou světlých až žlutavých pískovců, které byly historicky využívány pro stavební a sochařské účely. Pískovce z této lokality se vyznačují dobrou opracovatelností, pevností a odolností vůči povětrnostním vlivům. Okolí Dvora Králové patří mezi významné těžební regiony, které dodávaly materiál pro mnoho historických staveb v okolí i vzdálenějších městech.

2.2 Degradace

Pojem degradace, eroze, koroze nebo zvětrávání kamene označuje procesy vedoucí k nežádoucím změnám vlastností hornin a jejich poškození, spojené obvykle se zhoršením mechanických vlastností až po úplný rozpad degradovaných částí. Tyto procesy lze obecně klasifikovat do dvou hlavních kategorií: fyzikální degradace a chemická koroze.⁴

Fyzikální degradace zahrnuje poškození kamene bez změny jeho chemického nebo mineralogického složení v důsledku teplotních změn, působení vody a vodných roztoků solí, růstu živých organismů a podobně.⁵

Chemická koroze označuje změny vyvolané chemickou přeměnou některých složek kamene, které jsou způsobeny reakcemi s okolním prostředím (polutanty z ovzduší, spodní voda, produkty živých organismů). Tento proces často vede ke změně fyzikálních vlastností

³ Česká křídlová pánev. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cesk%C3%A1_k%C5%99%C3%ADdov%C3%A1_p%C3%A1nev. [cit. 2025-08-04].

⁴ ZELINGER, Jiří. *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. 2. vyd., přeprac. a dopl. Praha: Academia, 1987
ĎOUBAL, Jakub. *Kamenné památky Kutné Hory: restaurování a péče o sochařská díla*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-905-0.

⁵ ibidem

kamene, jako je zvýšená rozpustnost určitých složek, snížená soudržnost nebo změna porézní struktury.⁶

V některých odborných zdrojích je degradace způsobená činností živých organismů zařazována do třetí hlavní kategorie, nazývané *biologická degradace* nebo *biokoroze*. Působení živých organismů na kámen se může projevovat jak fyzikálně (mechanické narušení materiálu kořenovým systémem rostlin apod.), tak chemicky (rozpuštění pojiva kyselinami produkovanými lišejníky).⁷

Ve většině případů se tyto korozní procesy v praxi vzájemně doplňují a probíhají současně, a nelze je tedy zcela izolovat.

2.3 Konsolidace⁸

Konsolidace patří mezi klíčové kroky aktivních restaurátorských zásahů pro různé typy uměleckých nebo umělecko-řemeslných děl. Tento proces slouží k prodloužení životnosti památek a zpomalení jejich degradace. Konsolidace, či zpevňování, zahrnuje aplikaci nového nebo doplňkového pojiva do materiálové struktury, čímž dochází k obnovení mechanických vlastností oslabených vlivem eroze.

Konsolidaci v širším slova smyslu můžeme dělit na *fixáž* – zpevňování povrchových vrstev (např. barevné vrstvy), *strukturální konsolidaci* – hloubkové zpevňování porézních materiálů (obnovení koheze materiálu) a *injektáž prasklin či dutin* – vyplnění.

Nejčastější využití termínu „konsolidace“ se však týká strukturální konsolidace. Materiály používané k obnově soudržnosti se nazývají konsolidanty nebo zpevňovače.

Konsolidanty jsou zpravidla kapaliny obsahující aktivní látky, které vytvoří chemickými reakcemi nebo fyzikálními mechanismy pevnou hmotu. Ta propojuje nezpevněné částice nebo vyplňuje mikropraskliny. Z chemického hlediska se konsolidanty dělí na anorganické a organické.

⁶ ibidem

⁷ KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-347-9

WASSERBAUER, Richard. Biokoroze stavebních a dekoračních kamenů. In: *Ošetření kamene v památkové péči: odborný seminář*. Praha: STOP – Společnost pro technologie ochrany památek, 1999, s. 19-24.

⁸ KOTLÍK, Petr. *Konsolidanty kamene – historie a současnost*. In: HEČKOVÁ, Petra, HORÁK, Petr, MACHAČKO, Luboš, eds. *Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví: sborník z konference*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, s. 187. ISBN 978-80-7395-594-6.

CLIFTON, James R. *Stone consolidating materials: a status report*. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980.

SIEGSMUND, Siegfried; SNETHLAGE, Rolf (ed.). *Stone in architecture: properties, durability*. Springer Science & Business Media, 2011.

Pro výběr vhodného konsolidačního prostředku musíme vzít v úvahu tato kritéria: v první řadě je to dostatečná míra výsledného zpevnění, dále pak dostatečná hloubka průniku konsolidantu (penetrace), vysoká stabilita vůči stárnutí, žádné změny vlastností povrchu materiálu (barva, lesk, uzavření povrchu), jednoduché zpracování (aplikace), inertní chování vůči zpevňovanému materiálu a žádné vedlejší produkty.

Za ideální konsolidační prostředek je považována látka, která má fyzikální vlastnosti co nejvíce odpovídající původnímu materiálu a zároveň je reverzibilní (retrieability), tedy odstranitelná bez narušení kamene. V praxi je však tento požadavek takřka nedosažitelný. Zejména u hloubkové konsolidace by to znamenalo možnost úplné extrakce prostředku z hlubších vrstev kamene, což je technicky neproveditelné.

V současné praxi se daným kritériím nejvíce přibližují konsolidanty na bázi esterů kyseliny křemičité (organokřemičitany) a vápenné nanosuspenze, zvláště u materiálů s vápenným pojivem.

2.4 Materiály používané na konsolidaci pískovců – historie a současnost

Organické konsolidanty

V minulosti byly v některých případech kamenné objekty napouštěny **oleji nebo vosky**.⁹ Jejich zpevňovací účinek byl spíše nízký a impregnace těmito látkami sloužila hlavně jako ochrana proti vodě. Z vosků byly nejčastěji používány *včelí vosk*, *parafín*, *ceresin* nebo *mikrokrystalické vosky*. Aplikace probíhala formou zředěných roztoků na zahřátý kámen. Tyto látky mají obecně velmi malou penetrační schopnost a jejich používání bylo především na metamorfované neporézní materiály. Při použití na sedimenty bylo nutno roztoky velmi zředit, aby nedošlo k uzavření povrchu. Dále se s používáním vosků a olejů na impregnaci kamene pojí nevýhody spojené s tmavnutím kamene a zvýšením lesku povrchu.

Dalšími hojně používanými konsolidanty jsou polymerní materiály s nízkou viskozitou. Patří k nim například **konsolidanty na bázi akrylátových polymerů**. Tyto konsolidanty jsou makromolekulární látky, které jsou vyrobeny z monomerů na bázi kyseliny akrylové, metakrylové a jejich esterů. Mezi nejznámější a nejpoužívanější polymery této skupiny v oblasti restaurování patří *polyakryláty* a *polymethakryláty*, vznikající polymerací esterů těchto kyselin jako homopolymery nebo kopolymery. Oproti jiným typům polymerů, například těm na bázi PVAC, jsou mnohem stabilnější. Používají se buď jako roztoky v organických rozpouštědlech,

⁹ ibidem

nebo jako disperze ve vodě. Výsledné filmy jsou velmi průhledné, pevné a houževnaté, s vysokou odolností proti povětrnostním vlivům. K dalším výhodám patří jejich vynikající odolnost vůči UV záření a biologickým škůdcům. S postupem času nemění barvu a zůstávají rozpustné v organických rozpouštědlech. Roztoky jsou viskóznější než disperze.¹⁰ Mezi jejich hlavní nevýhody při použití na kámen patří jejich nízká penetrační schopnost a vliv na změnu barvy – tmavnutí zpevňovaného povrchu. Nejznámější zástupce těchto konsolidantů v oblasti restaurování kamene je akrylátová pryskyřice *Paraloid B72*.

Akrylátové homopolymery nebo kopolymery jsou na trhu dostupné ve formě vodních disperzí. Pevné částice polymeru jsou rozptýleny převážně ve vodě, přičemž velikost těchto částic se pohybuje okolo 1–10³ μm. Stabilita systému je zajištěna pomocí disperzního činidla. Po odpaření vody se vytvoří jednotný film, který již není ve vodě rozpustný.¹¹ Kvůli velmi malé penetraci se tyto materiály v současnosti na konsolidaci přírodního kamene nepoužívají.

Dalšími historicky používanými materiály ke konsolidaci především vysoce degradovaného kamene byly **epoxidové a polyesterové pryskyřice**. Jejich aplikace byla někdy prováděna za sníženého tlaku, jelikož klasickou metodou smáčení povrchu by nebylo možno docílit dobré penetrace do hloubky materiálu.¹² Tyto látky jsou nereverzibilní, nestabilní při působení UV záření a materiál po jejich použití tmavne. V dnešní památkové péči se používají tyto látky výhradně na lepení, a to především bodově, tj. lepidlo nepokrývá celou lepenou plochu.

V neposlední řadě do této skupiny patří konsolidanty na **bázi esteru kyseliny křemičité**. Organokřemičitany (alkoxysilany) jsou látky obsahující estery kyseliny křemičité (tetraalkoxysilany). Při jejich vytvrzování za běžné teploty, přítomnosti vhodného katalyzátoru a malého množství vody dochází k chemické reakci (kondenzaci) při které vzniká amorfni gel oxidu křemičitého, který ve zpevňovaném materiálu funguje jako dodatečné pojivo.¹³

¹⁰ ZÍTKOVÁ, Petra. *Restaurování sádrové plastiky Havíře ze sbírek Českého muzea stříbra v Kutné Hoře: Možnosti konsolidace sádry a fixace barevných vrstev na sádrovém podkladu*. Online, diplomová práce. Univerzita Pardubice, 2016-08-02T10:50:29Z. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/64992>. [cit. 2025-01-14].

¹¹ TŘESOHLAVÁ, Magdalena. *Srovnání tradičních a moderních konsolidačních prostředků pro zpevňování barevné vrstvy nástěnné malby*. Online, bakalářská práce. Univerzita Pardubice, 2007-09-30T12:03:29Z. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/17401>. [cit. 2025-01-14].

¹² TEPLÝ, Bohumil. *Konzervování a restaurování kamene*. Hořice v Podkrkonoší: Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské, 1997. ISBN 80-238-0893-1.

ZELINGER, Jiří; ŠIMŮNKOVÁ, Eva a KOTLÍK, Petr. *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. Praha: Academia, 1982.

¹³ KOTLÍK, Petr. *Konsolidanty kamene – historie a současnost*. In: HEČKOVÁ, Petra, HORÁK, Petr, MACHAČKO, Luboš, eds. *Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví: sborník z konference*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, s. 187. ISBN 978-80-7395-594-6.

Konsolidanty na bázi kyseliny křemičité jsou v restaurátorské praxi rozšířené již od 50. let 20. století.¹⁴ Jejich výhodou je výborná penetrační schopnost daná nízkou viskozitou, snadná aplikace a vysoká odolnost vůči stárnutí a povětrnostním podmínkám. Dále mají tyto látky minimální dopad na změny kamene po jeho ošetření např. změna barvy, nežádoucí lesk či propustnost pro vodní páry.¹⁵ Jejich nevýhodou je nemožnost odstranění nebo alespoň částečné extrakce po vytvrzení a křehkost vzniklého gelu. Gel, který vzniká po vytvrzení, má tendenci praskat. To může mít za následek postupný úbytek pevnosti a nutnost opakované konsolidace.¹⁶ Navzdory výše jmenovaným omezením jsou organokřemičitany, resp. prostředky na bázi esterů kyseliny křemičité v současnosti nejvyužívanějšími prostředky pro konsolidaci kamene, zejména pískovců.

Anorganické konsolidanty

Mezi čistě anorganické konsolidanty můžeme zařadit především vápennou a barytovou vodu, nanodisperze hydroxidu vápenatého, dále prostředky na bázi kyseliny hexafluorokřemičité a jejich solí tzv. fluáty a prostředky na bázi vodního skla.

Vápenná voda (roztok hydroxidu vápenatého) byla dříve hojně využívána ke zpevnění kamene, především vápenců. Po její aplikaci na kámen dochází ke karbonataci hydroxidu na uhličitan vápenatý, který je chemicky kompatibilní s materiály na bázi uhličitanu vápenatého. Výhodou je nízká cena a dostupnost, nevýhodou pak velmi nízký konsolidační účinek daný špatnou rozpustností hydroxidu vápenatého. Pro dosažení viditelného efektu je nutné aplikaci opakovat až několik desítek cyklů – literatura uvádí přibližně 40.¹⁷ Na účinky vápenné vody jako možného konsolidantu vápenných omítek a malt byla provedena studie,¹⁸ která zjistila že na to, aby byl znatelný alespoň nějaký konsolidační efekt, je nutno opakovat napouštěcí cyklus

TEPLÝ, Bohumil. *Konzervování a restaurování kamene*. Hořice v Podkrkonoší: Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské, 1997. ISBN 80-238-0893-1.

ZELINGER, Jiří; ŠIMŮNKOVÁ, Eva a KOTLÍK, Petr. *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. Praha: Academia, 1982.

KOTLÍK, Petr a ŠKRDLANTOVÁ, Markéta. Chemické možnosti zpevnění a povrchové ochrany kamene. In: *Ošetření kamene v památkové péči: odborný seminář*. Praha: STOP – Společnost pro technologie ochrany památek, 1999, s. 25-32.

¹⁴ ibidem

¹⁵ ibidem

¹⁶ ibidem

¹⁷ ibidem

¹⁸ DRDÁCKÝ, Miloš a SLÍŽKOVÁ, Zuzana. Zpevňování omítek vápennou vodou. In: DRDÁCKÝ, Miloš; SLÍŽKOVÁ, Zuzana a VALACH, Jaroslav. *Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i., Centrum excelence Telč, 2015, s. 171-186. ISBN 978-80-86246-43-7.

minimálně 100krát. Tento vysoký počet aplikačních cyklů sebou nese rizika nadměrného smáčení povrchu vodou, která může mobilizovat vodorozpustné soli či jiné vodorozpustné látky (např. zmýdelněné oleje) a způsobit tak jejich migraci k povrchu. Dalším problémem spojeným s aplikací vápenné vody jako konsolidantu bylo její nesprávné použití na silikátové materiály s absencí vápenného pojiva, kde docházelo vlivem oxidů síry v ovzduší k přeměně vzniknutého uhličitanu vápenatého na vodorozpustný síran vápenatý a následné tvorbě síranových krust.¹⁹

Ve snaze nahradit vápennou vodu účinnějším prostředkem byl hydroxid vápenatý nahrazen lépe rozpustným **hydroxidem barnatým**. Výhodou této metody byla nejen vyšší rozpustnost výchozí látky, ale také tvorba málo rozpustného síranu barnatého při reakci s kyselými složkami z ovzduší. Pro urychlení karbonatace se někdy přidávala močovina jako katalyzátor. Použití barytové vody však naráželo na závažný problém – toxicitu vodorozpustných solí bária. I z tohoto důvodu se dnes již v restaurátorské praxi nepoužívá.²⁰

Zejména ve 2. polovině 20. století bylo ke konsolidaci kamene využíváno tzv. **fluátování**, které je založeno na aplikaci vodných roztoků solí kyseliny fluorokřemičité (fluátů) na kámen. Konsolidace probíhá reakcí fluátu s uhličitanem vápenatým, a proto je metoda vhodná pouze pro materiály s dostatečným obsahem vápenatých sloučenin. Výsledkem jsou nerozpustné fluoridy a gel kyseliny křemičité, který po dehydrataci vytváří pevný oxid křemičitý. Ten však může uzavřít povrchové póry kamene. Vzhledem k nízké penetrační schopnosti fluátů je hloubka konsolidace velmi omezená a často vznikají poměrně tenké, zpevněné povrchové vrstvy, které mají většinou tendenci se oddělovat od nezpevněného podkladu.²¹

Posledním zástupcem anorganických konsolidantů je tzv. **vodní sklo**²² neboli koloidní roztok křemičitanů ve vodě nebo ethanolu. Vodní sklo se může vyskytovat jako sol (kapalina) nebo gel (želatinová hmota). Sol obsahuje drobné částice, které jsou samostatnou fází oddělenou od zbytku roztoku. Tyto částice mají velký povrch, což způsobuje, že jsou nestabilní a mohou se snadno přeměnit na pevnou látku. Výroba vodního skla probíhá alkalickým tavením oxidu křemičitého s uhličitanem sodným nebo draselným, čímž vzniká látka podobná sklu,

¹⁹ BAYER, Karol. *Přednášky k výuce předmětu: Technologie restaurování*. Univerzita Pardubice. Fakulta restaurování. Litomyšl, 2019-2024

²⁰ ZELINGER, Jiří; ŠIMŮNKOVÁ, Eva a KOTLÍK, Petr. *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. Praha: Academia, 1982.

TEPLÝ, Bohumil. *Konzervování a restaurování kamene*. Hořice v Podkrkonoší: Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské, 1997. ISBN 80-238-0893-1.

²¹ ibidem

²² MROVĚC, Vojtěch. *Porovnání konsolidantů na bázi křemičitých solí pro konsolidaci vápenných omítek: restaurování části nástěnné malby "Obrácení sv. Augustina" v kostele sv. Lamberta v Subenu (Rakousko)*. Online, diplomová práce. Univerzita Pardubice, 2024-10-13T16:26:57Z. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/84374>. [cit. 2025-01-14].

kteřá se rozpouští ve vodě na alkalický roztok. Historicky se používalo od 1. poloviny 19. století jako prostředek na zpevnění kamene, zdiva a omítek. Ovšem s používáním těchto látek jako zpevňovačů se pojila řada nevýhod. Kvůli vysokému obsahu alkalických látek docházelo k zasolení památky a někdy k barevným změnám materiálu. Později tyto problémy částečně vyřešila výroba dezalkalizovaného vodního skla, které má snížený obsah alkalických látek. I když má relativně dobré penetrační schopnosti (hlavně u poréznějších materiálů) a dlouhodobou stabilitu, může také snížit paropropustnost materiálů.

2.5 Možnosti snížení vlhkosti v kameni

Konsolidace vlhkých hornin či obecně vlhkých porézních materiálů představuje, jak již bylo výše uvedeno, poměrně náročný úkol. Aplikace většiny konsolidačních prostředků je výrobcem doporučována na podklady s vlhkostí nižší než 10 % nebo na zcela suchý materiál. Zvýšený obsah vody v porézní struktuře kamene může negativně ovlivnit především hloubku průniku a účinnost těchto látek. V určitých případech může nadměrná vlhkost dokonce způsobit zpětnou migraci konsolidantu směrem k povrchu ošetřovaného materiálu.²³

Jednou z možných cest, jak čelit problémům spojeným s konsolidací zavlhklých objektů, je snaha o dočasné snížení vlhkosti zpevňovaného materiálu těsně před aplikací konsolidačního prostředku. První z technik spočívá v použití ohřívačů, přičemž se kolem ošetřovaného povrchu (nebo celého objektu) vytvoří uzavřený prostor („stan“) který se postupně vyhřívá s cílem odpařit přebytečnou vlhkost z povrchu památky. Při využití této metody je však nutné zohlednit potenciální rizika, zejména hořlavost některých konsolidantů a možnost přehřátí povrchu kamene, což by mohlo vést k jeho poškození.²⁴

Druhou metodou pro dočasné snížení povrchové vlhkosti před aplikací konsolidačních prostředků je využití rozpouštědel schopných tvořit s vodou azeotropní směsi. Tento přístup spočívá ve smáčení povrchu vhodným rozpouštědlem (typicky acetonem nebo etanolem), které by mělo pomoci rychleji odpařovat vodu z materiálu. I přesto je při použití této metody třeba dbát zvýšené opatrnosti kvůli hořlavosti použitých rozpouštědel a případné interakci s vysušovaným materiálem.²⁵

²³ ibidem

²⁴ WHEELER, George. *Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2005. Research in conservation (Unnumbered). ISBN 08-923-6815-2.

²⁵ ibidem

2.6 Možnosti konsolidace vlhkých materiálů

V rámci rešerše bylo zjištěno, že problematice konsolidace zavlhčených pískovců se dosud věnovalo jen velmi omezené množství studií. Při přípravě na experimentální část se nepodařilo dohledat dostatek výzkumů, které by se přímo zaměřovaly na konsolidaci pískovců s křemičitým pojivem, jež byly dlouhodobě vystaveny zvýšené vlhkosti.

Jedním z mála relevantních výzkumů z minulosti bylo testování chování organokřemičitanů a jejich reakčních produktů (křemičitého gelu) za podmínek zvýšené vlhkosti vzduchu během vytvrzování.²⁶ Autoři zjistili, že při vysoké relativní vzdušné vlhkosti dochází k výrazně vyššímu smrštění gelu ve srovnání s podmínkami považovanými za optimální pro vytvrzování těchto materiálů (cca 60–80 % relativní vzdušné vlhkosti).

Další nalezená studie se zabývala vlivem relativní vzdušné vlhkosti (RH) na účinnost použití nanočástic oxidu křemičitého (SiO₂) při konsolidaci historického kamene.²⁷ Výzkum ukázal, že při vysoké relativní vlhkosti (95 % RH) dochází k aglomeraci těchto nanočástic do větších amorfních struktur, které se svými vlastnostmi podobají silikagelu – tedy materiálu schopnému reverzibilně adsorbovat a desorbovat vodu. Tyto aglomerované částice obsahují vyšší množství vázané vody, ale vykazují nižší koncentraci aktivních silanolových skupin na svém povrchu. Výsledky studie naznačují, že sušší podmínky během aplikace vedou k efektivnějšímu zpevnění kamene, stabilnějším fyzikálním vlastnostem a menším vizuálním změnám, protože nedochází k vzniku popraskaných povrchových vrstev. Autoři zároveň zdůrazňují důležitost dlouhodobých testů, jako jsou cykly simulující střídání vlhkého a suchého prostředí, s cílem ověřit stabilitu a životnost takto ošetřeného materiálu.

Další studovanou prací byla studie zaměřená na konsolidaci vlhkého kamene a sádry s využitím křemičitanu lithného (tzv. lithné vodní sklo).²⁸ Výsledky se ukázaly jako slibné, zejména při aplikaci na materiály s vápenným pojivem. Přítomnost vlhkosti v podkladu přitom neovlivnila účinnost procesu zpevnění. V některých případech však byly zaznamenány nežádoucí vedlejší účinky, jako je tmavnutí povrchu nebo vznik bílých výkvětů při aplikaci na zasolené materiály.

²⁶ PETEROVÁ, Ing. Adéla; KOTLÍK, doc. Ing. Petr, CSc. *Vliv relativní vlhkosti na vlastnosti křemičitého gelu*. Praha: Ústav chemické technologie restaurování památek, VŠCHT Praha, 2014, s. 129-134. In: Muzea, památky a konzervace 2014.

²⁷ ZORNOZA-INDART, Ainara; LOPEZ-ARCE, Paula. Silica nanoparticles (SiO₂): Influence of relative humidity in stone consolidation. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, 18: 258-270.

²⁸ THORN, Andrew. Lithium silicate consolidation of wet stone and plaster. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. 2012. p. 00-10.

Slibné výsledky z hlediska stability gelu za vysoké relativní vlhkosti vykázaly také křemičité vodní soly (např. Levasil CC301 a Sebosil S) v rámci studie porovnávací dostupné konsolidanty na bázi křemičitých solů určené pro zpevnění vápenných omítek.²⁹

2.7 Shrnutí poznatků

Konsolidace vlhkých porézních materiálů, zejména pískovce, je technicky náročná, protože většina běžně používaných konsolidačních prostředků je určena pro suché nebo jen mírně vlhké podklady. Vysoký obsah vody snižuje jejich účinnost, omezuje hloubku průniku a může způsobit migraci účinné látky zpět na povrch.

Jako možné řešení tohoto problému se uplatňuje dočasné snížení vlhkosti před aplikací konsolidantu. Mezi doporučené metody patří vyhřívání uzavřeného prostoru okolo materiálu („stan“) nebo smáčení povrchu rozpouštědly tvořícími azeotropní směsi s vodou (např. aceton, etanol). Obě metody však nesou již výše zmiňovaná rizika (viz. Možnosti snížení vlhkosti v kameni).

Rešerše dále ukázala, že konsolidace dlouhodobě zavlhčených pískovců s křemičítým pojivem je stále nevyřešené téma. Výsledky dostupných studií naznačují, že vysoká relativní vlhkost negativně ovlivňuje vlastnosti gelů vznikajících z organokřemičitanů. Naopak křemičitan lithný a některé křemičité vodní soly (např. Levasil CC301) vykazují dobrou stabilitu i ve vlhkém prostředí, byť s rizikem vizuálních změn, jako je tmavnutí nebo bílé výkvěty.

V kontextu konsolidace uměleckých a umělecko-řemeslných děl z kamene je třeba zdůraznit, že i přes rozsáhlý a dlouhodobý výzkum zůstává tato oblast nadále velmi diskutovaná a v mnoha ohledech i kontroverzní. Důvodem jsou opakovaně neuspokojivé výsledky a obtíže při převodu laboratorních poznatků do praxe, zejména při aplikaci v reálných podmínkách. Dalším limitem je nedostatek dobře zdokumentovaných případových studií a chybějící standardizace výzkumných protokolů, což představuje významnou překážku pro další rozvoj v této oblasti. Tato situace zároveň poukazuje na nutnost intenzivnější komunikace mezi výzkumnými institucemi a praxí a důsledného ověřování účinnosti navrhovaných metod.³⁰

²⁹ MROVĚC, Vojtěch. *Porovnání konsolidantů na bázi křemičitých solů pro konsolidaci vápenných omítek: restaurování části nástěnné malby "Obrácení sv. Augustina" v kostele sv. Lamberta v Subenu (Rakousko)*. Online, diplomová práce, Univerzita Pardubice, 2024-10-13T16:26:57Z. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/84374>. [cit. 2025-01-14].

³⁰ DELGADO RODRIGUES, J. *Stone consolidation: research and practice*. 2010.

3 Výzkum a vývoj stavu reliéfu Klanění pastýřů v Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu

3.1 Výzkumy prováděné v minulosti

V minulosti bylo provedeno několik studií zabývajících se problematikou péče o Braunův Betlém v Novém lese u Kuksu.³¹ V rámci minulých průzkumů byl sledován aktuální stav kamenných reliéfů a jeho vývoj v čase, s důrazem na dlouhodobý vliv biologického znečištění na jejich povrch a strukturu. Součástí terénního šetření byl rovněž cílený odběr vzorků pro následnou



Obr. TH 2 Biologický povlak na reliéfu Klanění pastýřů (2021)
Foto. P. Zítková

detailní petrografickou analýzu. Dále byly provedeny testy účinnosti několika způsobů ekologického odstraňování biologických nárůstů s cílem identifikovat nejvhodnější postupy pro jejich šetrné a zároveň efektivní odstranění.³² Dopad těchto výzkumů se přímo promítl na současnou péči o tuto památku. Už Josef Wágner pozoroval, že když byla památka pravidelně čištěna, mělo to velmi pozitivní dopad na zpomalení jejího stárnutí.³³

³¹ KOTLIK, P.; HEIDINGSFELD, V. Monitoring of stone sculptures and reliefs in Bethlehem near Kuks (Eastern Bohemia, Czech Republic). *Understanding and managing stone decay*, 2002, 285-293. KOTLIK, Petr, et al. The rescue of M. Braun's sculptures in the area of Betlém near Kuks (CZ): a case study on sandstone deterioration in the frame of an international project. In: *8th = eighth international congress on deterioration and conservation of stone, Berlin, 30 Sept.-4 Oct. 1996: proceedings*. 1996. p. 955-967.

KOTLIK, P.; HEIDINGSFELD, V. Monitoring of stone sculptures and reliefs in Bethlehem near Kuks (Eastern Bohemia). *ACTA-UNIVERSITATIS CAROLINAE GEOLOGICA*, 2001, 1: 17-18.

KOTLÍK, Petr. Možnosti biocidní ochrany souboru kamenných sochařských děl v Novém lese u Kuksu. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 396–401. ISSN 1210-5538. NEJEDLÝ, Vratislav. Braunův „Betlém“ – kamenosochařské dílo v přírodě a problematika jeho recepce a restaurování. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 407–416. ISSN 1210-5538.

KAŠE, Jiří a NOVOTNÝ, Jiří a ŠTAFEN, Zdeněk. Proměny a stav reliéfu Klanění pastýřů a Příjezdu Tří králů v Novém lese u Kuksu. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 387–397. ISSN 1210-5538.

³² KOTLÍK, Petr. Ekologický způsob biocidní ochrany kamenných památek. Online. *Projekt Vybrané památkové postupy pro zkvalitnění péče o sochařské a stavební památky DF11P01OVV027*. Roč. 2016, s. 1-4. Dostupné z: <https://projekty.upce.cz/sites/default/files/groups/admins/luva3059/pam-postup-04-zprava.pdf>. [cit. 2025-07-29].

³³ KAŠE, Jiří a KOTLÍK, Petr. *Braunův Betlém: drama krajiny a umění v proměnách času*. Praha: Paseka, 1999. ISBN 80-7185-233-3.

S ohledem na bližší poznání samotného materiálu se tato kapitola zaměřila hlavně na petrografický průzkum, který byl na reliéfech proveden v letech 2012–2014. Bylo odebráno několik vzorků z hlavních výjevů. Výsledky ukázaly, že skulptury v areálu Braunova Betléma náleží ke skalnímu masivu stanovických vrstev perucko-korycanského souvrství svrchnokřídové sedimentace (cenomanu). Z litologického hlediska jsou tvořeny *středně zrnitými, silicifikovanými, křemennými pískovci* vysoké mechanické a chemické odolnosti.³⁴

Jedním z cílů analýz bylo detekovat v dalších vzorcích kalcit či sádrovec, který byl nalezený na povrchu kamene v 1. etapě (2012). Konkrétně se přítomnost kalcitu potvrdila na těchto vzorcích: KB-2, KB-4, KB-6, KB-12/4, KB-A a KN-1.³⁵ U vzorku KN-1 byla odebrána přímo domnělá vápenná vrstva. Průzkumem se zjistilo, že v tomto případě kalcit téměř přeměnil strukturu pískovce a vyplnil jeho póry. Z petrografického hlediska by se takovýto materiál dal označit jako: *pískovec křemenný, vápenatý, silicifikovaný*.³⁶

Hlavní příčinou přítomnosti kalcitu ve struktuře pískovce (která je druhotná) je zřejmě napouštění povrchu vápennou vodou v minulém století.³⁷ Další příčinou by mohl být průsak a stékání vápenatých výluhů z cementových úprav v horní části památky.³⁸ Pravděpodobně skrze přítomnost kalcitu v povrchové vrstvě kamene se na památce nacházejí řasy, které se nejčastěji vyskytují na vápencích.³⁹

³⁴ ŠTAFEN, Zdeněk. *Petrografické vyhodnocení: Petrografické vyhodnocení vzorků hornin z objektu Betlému v Kuksu*. 2012,2013,2014.

³⁵ *ibidem*

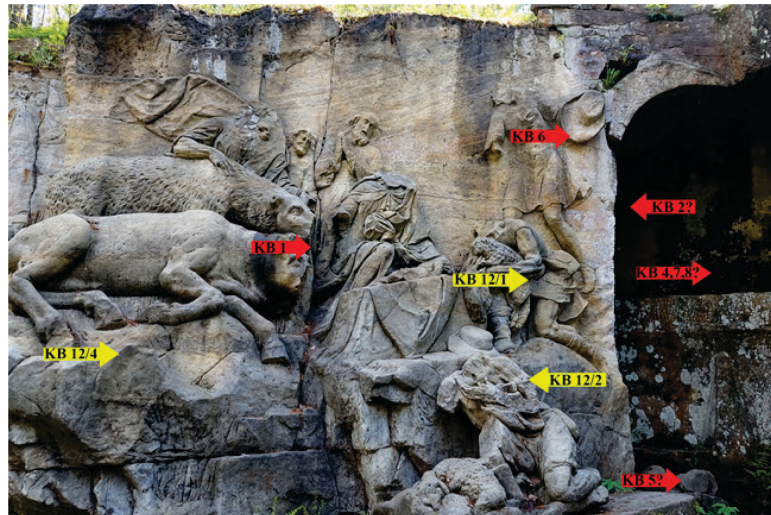
³⁶ *ibidem*

³⁷ KAŠE, Jiří a KOTLÍK, Petr. *Braunův Betlém: drama krajiny a umění v proměnách času*. Praha: Paseka, 1999. ISBN 80-7185-233-3.

³⁸ ŠTAFEN, Zdeněk. *Petrografické vyhodnocení: Petrografické vyhodnocení vzorků hornin z objektu Betlému v Kuksu*. 2012

³⁹ HALDA, J.; KOTLÍK, P.; ŠTAFEN, Z. Biologické napadení kamene soch a reliéfů v Novém lese u Kuksu a možnosti jeho potlačení. *Zprávy památkové péče*, 2013, 73: 536-542.

KAŠE, Jiří a NOVOTNÝ, Jiří a ŠTAFEN, Zdeněk. Proměny a stav reliéfu Klanění pastýřů a Příjezdu Tří králů v Novém lese u Kuksu. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 387–397. ISSN 1210-5538.



Obr. TH 3 Zákresy míst odběru vzorků na výjevu Klanění pastýřů pro petrologickou analýzu (2012 - KB1,2,4,5,6,7,8, 2013 - KB12/1-4)



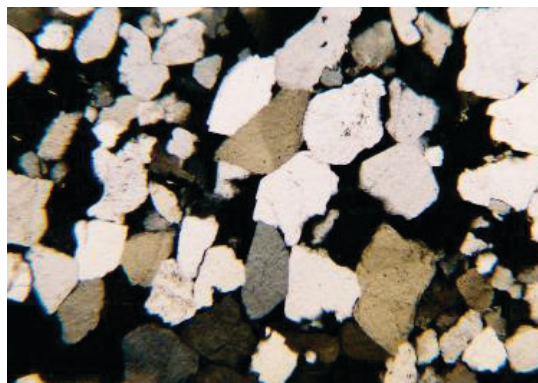
Obr. TH 4 Zákresy míst odběru vzorků na výjevu Příchod tří králů pro petrologickou analýzu (2014 – KB – A, B, C)



Obr. TH 5 Zákresy míst odběru vzorků na výjevu sv. Huberta pro petrologickou analýzu (2013 – KB 12/3)

3.2 Pískovec z Nového lesa u Kuksu⁴⁰

Skalní masiv, do nějž byl vytesán Braunův Betlém u Kuksu, tvoří středně zrnitý, křemenný silicifikovaný pískovec tzv. *stanovických vrstev*, náležících *perucko-korycanskému souvrství svrchnokřídové sedimentace české křídové pánve*. Pískovec je složen z méně vytríděných křemenných úlomků (klastů) spojených chemogenním křemenem. Lokálně se vyskytuje jemnozrná slídnato-křemenná hmota, která oslabuje diagenezi a snižuje mechanickou odolnost horniny. Druhotně se v některých partiích koncentruje limonit, jenž dává kameni rezavě žluté zbarvení.



Obr. PR 6 Výbrus vzorku KB-C (2014) struktura křemenných, nedokonale opracovaných úlomků tmelených silicifikací (foto: Z. Štaffen)

Masiv je litologicky rozčleněn na dvě polohy – spodní, masivní, pevnou vrstvu s mocností 4–5 m a vrstevnatostí cca 2 m, která tvoří podklad pro reliéf, a svrchní, méně pevnou položenou výše, která byla při těžbě odstraněna. Sochy i reliéfy byly vytvořeny ve spodní, dobře zpevněné vrstvě. Z hydrogeologického hlediska mají pískovce stanovických vrstev puklino-průlinovou propustnost a tvoří *zvodeň kolektoru A* cenomanského stáří v rajónu Královédvorská synklinála. Oblast Betléma se nachází na okraji infiltračního území, kde se podzemní voda akumuluje a proudí především puklinami. Významným vývěrovým místem je „jeskyně s pramenem“, sledující tektonické směry SSZ a JZZ.

3.3 Maximální nasákavost pískovce z Braunova Betléma u Kuksu

Pro stanovení maximální nasákavosti pískovce z Nového lesa byl odebrán vzorek z lomové stěny na okraji Braunova Betléma. Celkem byly odebrány tři vzorky, které byly nejprve vysušeny na konstantní hmotnost a poté ponořeny do demineralizované vody až do úplného nasycení. Na základě hmotnosti vzorků před a po nasycení byl vypočten jejich obsah vlhkosti a výsledné hodnoty byly zprůměrovány. Maximální nasákavost pískovce z této lokality činí 4,8 % hm. Pro lepší přehled byla ještě tato hodnota porovnána s hodnotami pískovců těžených v blízkém okolí.⁴¹

⁴⁰ ŠTAFEN, Zdeněk. *Geologické a úložné poměry skalního masivu Kuks – Nový les (Betlém)2014*

⁴¹ KOUTNÍK, Petr; ANTOŠ, Petr; HÁJKOVÁ, Pavlína; MARTINEC, Petr; ANTOŠOVÁ, Barbora et al. *Dekorační kameny Čech, Moravy a Slezska*. Vydání: první. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2015. ISBN 978-80-7414-974-0.

Ve srovnání s hodnotami obsahu vlhkosti zjištěnými ze vzorků (vrtné moučky) odebraných přímo z reliéfu (až 17 % hm.) je zřejmé, že nasákavost samotných reliéfů je velmi vysoká. A to jak v porovnání s lokálním pískovcem, tak i s pískovci těženými v okolních lokalitách. To může souviset buď s rozdílnými vlastnostmi pískovce v různých polohách, nebo s vysokým stupněm materiálové degradace a přítomností hygroskopických solí.

Lokalita	Vzdálenost od Braunova Betléma (vzdušnou čarou)	Nasákavost
Nový les u Kuksu	0 km	4,80 %
Lom Kocbeře	5,55 km	3,21 %
Lom Vyhnánov	9,03 km	3,61 %
Lom Javorka	20,02 km	4,30 %
Lom Dubenec	5,72 km	7,32 %
Lom Podhorní Újezd	22,63 km	8,69 %

Tab. TH 1 Porovnání nasákavosti pískovců v okolí Braunova Betléma

3.4 Monitoring povrchové vlhkosti⁴²

Za účelem sledování změn povrchové vlhkosti reliéfů v Braunově Betlémě u Kuksu bylo v pravidelných měsíčních intervalech (od května do listopadu 2024, v červenci měření nebylo provedeno, v zimních měsících bylo měření přerušeno kvůli ovlivňování dat napadlým sněhem) prováděno měření vlhkosti na identických místech. K tomuto účelu byl použit kapacitní vlhkoměr Moisture Monitor M49 od společnosti Physical & Electronic Laboratories Ltd.

Kapacitní přístroje pracují na principu měření relativní permitivity materiálu, přičemž využívají skutečnosti, že voda má výrazně vyšší permitivitu než většina stavebních materiálů. Ačkoliv se jedná o bezkontaktní metodu, pro správnou funkci je nutný těsný kontakt měřicí sondy s povrchem; výrazné nerovnosti mohou výsledky měření zkreslovat. Hloubka průniku signálu přitom závisí na hustotě materiálu – u lehkých porézních podkladů může dosáhnout až 12 cm, zatímco u hutnějších materiálů, jako je beton, je maximální dosah přibližně 3 cm.⁴³

Měření vlhkosti bylo pouze orientační, a jeho výsledky je proto nutné interpretovat s určitou mírou opatrnosti. V průběhu měření se ukázalo, že v některých případech docházelo k výraznému zkreslení hodnot v důsledku morfologické členitosti povrchu reliéfů. Nerovnosti

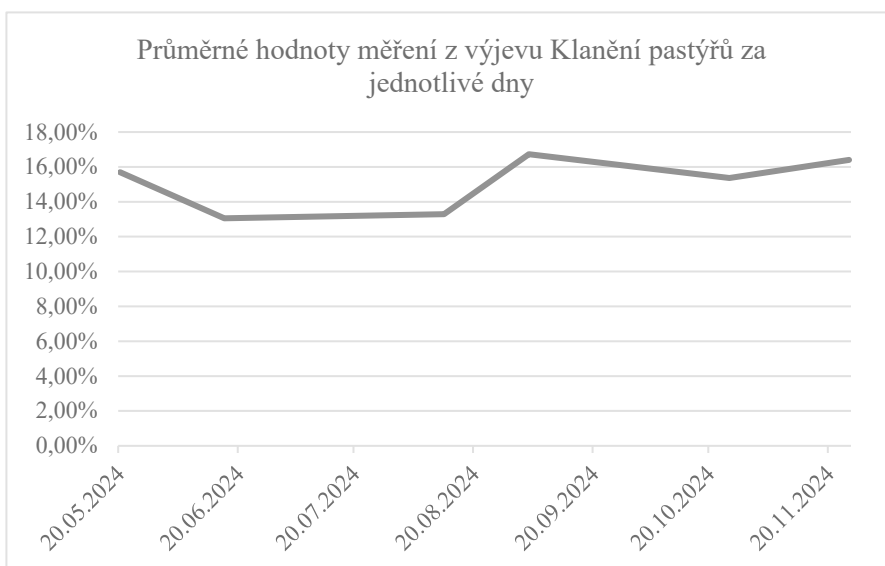
⁴² Příloha: Podrobné výsledky měření povrchové vlhkosti na Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu

⁴³ SOMMEROVÁ, Anna. Měření vlhkosti pískovce: Laboratorní a terénní techniky. 2014.

materiálu způsobovaly nedostatečný kontakt měřicí sondy s podkladem, čímž byla přesnost naměřených dat ovlivněna.

Průměrné hodnoty povrchové vlhkosti v jednotlivých výjevech za celé sledované období byly následující: *Klanění pastýřů* 15,11 %, *Příchod Tří králů* 15,56 %, *Vidění sv. Huberta* 11,79 % a prostor uvnitř „jeskyně“ 19,36 %. Ze získaných dat vyplývá, že vlhkost na výjevu *Vidění sv. Huberta* byla po celé sledované období podstatně nižší než u ostatních reliéfů. Lze předpokládat, že tato skutečnost souvisí s prostorovým uspořádáním – reliéf je z rubové strany částečně otevřen do uměle vytvořeného prostoru („jeskyně“), který umožňuje proudění vzduchu a částečné vysychání kamene i ze zadní strany. Naopak u výjevů *Klanění pastýřů* a *Příchod Tří králů* se z druhé strany nachází skalní masiv a zemina, které mohou přispívat k trvalejšímu zvlhčování materiálu ze zadních partií.

Měření na výrazně poškozeném reliéfu *Klanění pastýřů*, kde je na některých místech povrchová vrstva kamene silně degradovaná, ukázalo sice částečně sníženou vlhkost v letních měsících, avšak hodnoty zůstávaly i nadále vysoké právě v kritických oblastech (J1,2,4,5,7). Tyto podmínky neumožňují bezpečnou aplikaci



Graf TH 1 Průměrné hodnoty měření z výjevu Klanění pastýřů za jednotlivé dny

běžně používaných konsolidačních prostředků, které vyžadují nízkou vlhkost podkladu.

V rámci sledování povrchové vlhkosti byly rovněž shromážděny podpůrné údaje z Českého hydrometeorologického ústavu⁴⁴, konkrétně týdenní úhrny srážek a průměrné teploty vzduchu. Tyto hodnoty sloužily především jako pomocný nástroj pro interpretaci změn vlhkosti. Vzhledem k vzdálenosti nejbližší meteorologické stanice od sledované lokality a rozdílné nadmořské výšce je však třeba tyto údaje vnímat pouze jako orientační. Z porovnání jednotlivých dat dále vyplývá, že většina měření byla provedena po obdobích s nižším úhrnem

⁴⁴ Portál ČHMÚ. Online. Archiv týdenních zpráv. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/informace-a-sluzby/tydenni-vyhodnoceni>. [cit. 2025-01-12].

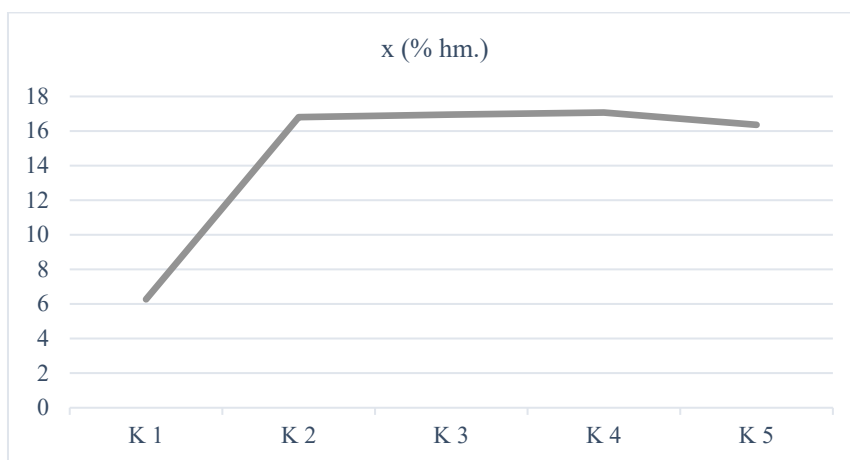
srážek, a tudíž lze vyloučit přímý vliv dešťových srážek jako hlavní příčinu zvýšené povrchové vlhkosti v daných místech.⁴⁵

3.5 Vyhodnocení hloubkového profilu vlhkosti

V oblasti problematického reliéfu Klanění pastýřů byl za účelem bližšího určení obsahu vlhkosti v hloubce proveden jeden vrt. Z něj byla odebírána vrtná moučka po jednom centimetru do hloubky 5 cm. Stanovení obsahu vlhkosti bylo provedeno gravimetricky po vysušení do konstantní hmotnosti (provedeno Ing. Eliškou Bečkovou, KCHT FR UPCE)

Vzorek	x (% hm.)
K 1	6,27
K 2	16,80
K 3	16,95
K 4	17,07
K 5	16,36

Tab. TH 2 Vyhodnocení hloubkového profilu vlhkosti



Graf TH 2 Vyhodnocení hloubkového profilu vlhkosti

Měření ukázalo, že na povrchu je obsah vlhkosti nejmenší (6,27 % hm.). V hloubce dvou centimetrů však rapidně narůstá a je zhruba stejný v celé měřené hloubce (cca 17 % hm.).⁴⁶

3.6 Analýza vodorozpustných solí a hygroskopicit

V rámci dalšího zkoumání byl z vrtné moučky stanoven obsah vodorozpustných solí a hygroskopicit. Přítomnost vodorozpustných solí v kameni (zejména chloridů, dusičnanů a síranů) má velký podíl v urychlení degradace materiálu. Soli narušují jeho soudržnost a pevnost vlivem opakovaných krystalizačních a rekrystalizačních tlaků. Tyto tlaky postupně způsobují mikropraskliny v kameni a přispívají tak k jeho degradaci. Vodorozpustné soli jsou navíc hygroskopické, to znamená, že některé z nich jsou schopny na sebe navázat větší

⁴⁵ Příloha: Podrobné výsledky měření povrchové vlhkosti na Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu

⁴⁶ BEČKOVÁ, Eliška. *Analýza pro stanovení obsahu vlhkosti, hygroskopicity a přítomnosti vodorozpustných solí z reliéfu Klanění Pastýřů v Braunově Betlémě*. [rukopis] Fakulta restaurování Univerzita Pardubice, 2024.

množství vzdušné vlhkosti, což hlavně v zimním období při mrazových cyklech přispívá ve velké míře k narušení soudržnosti materiálu.

Stanovení obsahu vodorozpustných solí detekuje blíže jejich přítomnost v kameni, určí typ a také jejich zastoupení. Jejich obsah je stanovován ve vodních extraktech vzorků demineralizovanou vodou, standartní metodikou pro stanovení obsahu síranů, chloridů a dusičnanů pomocí UV/VIS spektrometru.

Analýza hygroskopicity proběhla pomocí gravimetrického stanovení hygroskopické nasákavosti (RH=45 %; RH=96 %).

Pro tyto analýzy byla použita moučka ze stejného vrtu jako na rozbor hloubkového profilu vlhkosti. Odběr proběhl v následujících hloubkách: K1 - 1 cm, K2 - 2 cm, K3 - 3 cm, K4 - 4 cm a K5 - 5 cm. Analýzy provedla Ing. Eliška Bečková z chemicko-technologické katedry Fakulty restaurování.⁴⁷

Vzorek	Sírany		Dusičnany		Chloridy	
	X (%hm.)	C (mmol/kg)	X (%hm.)	C (mmol/kg)	X (%hm.)	C (mmol/kg)
K 1	0,13	14	<0,01	<2	<0,01	<2,5
K 2	0,09	9	<0,01	<2	<0,01	<2,5
K 3	0,11	12	<0,01	<2	0,01	2,5
K 4	0,13	14	<0,01	<2	0,01	2,5
K 5	0,08	8	<0,01	<2	0,01	2,5

Tab. TH 3 Výsledky stanovení obsahu vodorozpustných solí

Vzorek	X (% hm.)	
	RH 45 %	RH 96 %
K 1	0,48	3,83
K 2	0,26	5,67
K 3	0,28	7,18
K 4	0,19	7,97
K 5	0,11	5,05

Tab. TH 4 Výsledky hygroskopické nasákavosti

⁴⁷ ibidem

Výsledky:

Obsah dusičnanů a chloridů ve vzorcích byl nižší než 0,01, což nevyžaduje žádná opatření související s jejich redukcí. V případě síranů analýza ukázala zvýšené množství, a to zejména v hloubce 1, 3 a 4 cm. Tyto hodnoty podle rakouské normy nevyžadují okamžité řešení. I přes to je nutné zvážit další opatření, neboť naměřené hodnoty nejsou zanedbatelné a poškození spojené s jejich působením je viditelné na povrchu díla (puchýře a lokální degradace povrchových vrstev).

Hygroskopická nasákavost při RH 45 % byla nejvyšší v hloubce 1 cm. Při RH 96 % byla nejvyšší v hloubce 3 a 4 cm.

4 Experiment

4.1 Konsolidační prostředky

Na základě rešerše dostupných konsolidantů na trhu a jejich možnosti použití na vlhký kámen, byl výběr prostředků zúžen pouze na prostředky na bázi křemičitých solů a esterů kyseliny křemičité. Hlavním kritériem pro výběr testovaných prostředků byla chemická kompatibilita finálního produktu a schopnost penetrace.

Z každé skupiny byly vybráni dva zástupci. Ze skupiny organokřemičitanů se jednalo o produkty KSE 100 a 300 od značky Remmers, které jsou dlouhodobě používané pro konsolidaci pískovců. V případě konsolidantů ze skupiny křemičitých solů byl výběr založen na poznacích MgA. Vojtěcha Mrověče⁴⁸, který ve své diplomové práci tyto soly blíže zkoumal. Zásadním kritériem výběru byla stabilita vytvořeného gelu při vysoké relativní vzdušné vlhkosti. Tomuto kritériu vyhověl nejvíce prostředek Levasil CC301, velmi dobré výsledky měl také produkt Sebosil S, u kterého byl předpoklad lepšího vytvrnutí, protože je ředěn lihem.

Pro testování byly proto vybrány následující 4 konsolidační prostředky: KSE 100 a KSE 300 od firmy Remmers, Levasil CC 301 od firmy Nouryon Chemicals B.V. a produkt Sebosil S 10 % od firmy Kallies Feinchemie AG. Poslední dva produkty (Levasil CC 301 a Sebosil S 10 %) budou zředěny tak, aby koncentrace účinných látek byla 5 %, kvůli snížení rizika přezpevněného povrchu a tím případné tvorby krust.

Charakteristika testovaných konsolidantů

Produkty KSE

KSE modulový systém od společnosti Remmers představuje specializovaný soubor produktů určených pro konsolidaci a ochranu minerálních stavebních materiálů, jako je přírodní kámen, cihly, omítky a další porézní substráty. Tento systém využívá ethylsilikáty (resp. předpolymerované oligomerní produkty tetraethoxysilanu) jako účinné látky, které pronikají do povrchu materiálu a chemicky reagují s vlhkostí, čímž vytvářejí stabilní křemičité struktury. Tento proces vede ke zpevnění a stabilizaci ošetřeného materiálu, zvyšuje jeho odolnost vůči povětrnostním vlivům a prodlužuje životnost historických i moderních stavebních prvků.⁴⁹

⁴⁸ MROVĚC, Vojtěch. *Porovnání konsolidantů na bázi křemičitých solů pro konsolidaci vápenných omítek: restaurování části nástěnné malby "Obrácení sv. Augustina" v kostele sv. Lamberta v Subenu (Rakousko)*. Online, diplomová práce. Univerzita Pardubice, 2024-10-13T16:26:57Z. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/84374>. [cit. 2025-01-14].

⁴⁹ Remmers. „KSE modul systém.“. Online. Remmers. Dostupné z: <https://www.remmers.cz/cs/ochrana-a-obnova-pamatek/kse-modul-system/c/c6386>. [cit. 2025-01-13].

*KSE 100*⁵⁰

Jedná se o konsolidant na organokřemičité bázi z modulové řady KSE od firmy Remmers. Tento konsolidant má nízké množství vyloučeného gelu (cca 10 % hm.) a obsahuje speciální rozpouštědlo, které by mělo zabránit zpětné migraci k povrchu během reakční doby. Není hydrofobní. Výrobce uvádí minimální reakční dobu 28 dní. Podklad musí být suchý a čistý. Konsolidant při vytvrzovací reakci reaguje se vzdušnou vlhkostí a jako vedlejší produkt se uvolňuje ethanol.

Charakteristika (dle technického listu):	
Hustota (20 °C)	0,80 g/cm ³
Barva	čirý až lehce zakalený, ev. mírně nažloutlý
Katalytický systém	neutrální
Obsah účinných látek	cca 20 % hm.

*KSE 300*⁵¹

KSE 300 je bezrozpouštědlový konsolidant na organokřemičité bázi. Množství vyloučeného gelu je cca 30 %. Produkt není hydrofobní. Výrobce doporučuje při použití produktu KSE 300 na konsolidovaný povrch nejprve použít prostředek KSE 100. Výrobce doporučuje použití na suchý čistý podklad. Reakční doba je stanovena minimálně 28 dní. Konsolidant při vytvrzovací reakci reaguje se vzdušnou vlhkostí a jako vedlejší produkt se uvolňuje ethanol.

Charakteristika (dle technického listu):	
Hustota (20 °C)	0,98 g/cm ³
Barva	čirý až lehce zakalený, ev. mírně nažloutlý
Katalytický systém	neutrální
Obsah účinných látek	cca 99 % hm.

Sebosil S 10 %

Sebosil S je křemičitý sol rozpuštěný v ethanolu, určený pro zpevnění porézních přírodních kamenů a minerálních stavebních materiálů. Podle technického listu je tento produkt

⁵⁰ Remmers, *Technický list KSE 100*. Online. Dostupné z: https://media.remmers.com/celum/export/documents/TM_0719_cs_CZ_189_74780.pdf. [cit. 2025-01-18].

⁵¹ Remmers, *Technický list KSE 300*. Online. Dostupné z: https://media.remmers.com/celum/export/documents/TM_0720_cs_CZ_185_74879.pdf [cit. 2025-01-18].

určen pro použití v interiéru. Sebosil obsahuje nanodisperzní oxid křemičitý dispergovaný v etanolovém roztoku, což mu umožňuje lepší penetraci do pórů materiálu než voda. Po odpaření ethanolu se oxid křemičitý agreguje a vytváří gel, který postupně síťuje. Tato struktura zůstává po mineralizaci stabilní a hloubka penetrace spolu s koncentrací oxidu křemičitého určují míru zpevnění. Úplná impregnace je možná pouze tlakem nebo vakuem. Výrobce tohoto produktu je Kallies Feinchemie AG.⁵²

Pro účely testování byl tento produkt zředěn lihem do koncentrace 5 % SiO₂.

Specifikace dle technického listu:	
Hustota	1,15 g/cm ³
pH při 20°C	5–6
Obsah SiO ₂	10 % hm.
Viskozita při 20°C	3–5 mPa.s
Vzhled, barva	Čirá kapalina

Levasil CC 301

Levasil CC 301 je zástupce z produktové řady koloidních roztoků oxidu křemičitého Levasil od společnosti Nouryon Chemicals B. V.

Levasil CC 301 je neutrální vodná koloidní disperze oxidu křemičitého s cca 30% obsahem sušiny. Částice oxidu křemičitého jsou sféricky stabilizované a amorfni částice nesou záporný povrchový náboj a jsou povrchově modifikovány epoxysilanem.

Specifikace dle technického listu:	
Hydroxylové číslo	0.45 mol OH/kg produktu
Hustota při 20oC	1.172–1.205 g/cm ³
SiO ₂	26.0–30.0 wt %
pH při 20oC	5.0–9.0
Viskozita při 20oC	≤8 cP

Vlastnosti dle technického listu:	
Ethanol	2.5 wt %
Průměrná velikost částic	7 nm
Vzhled/barva	Čirá kapalina

⁵² Kallies Feinchemie AG. (2017). TECHNISCHES MERKBLATT: *Steinverfestiger SEBOSIL S*. [online] Dostupné z: http://www.feinchemie.de/media/download_gallery/Technisches%20Merkblatt_SEBOSIL_S.pdf [cit. 2025-01-13].

4.2 Možnosti obarvení konsolidantu pro kontrolu hloubky penetrace

Pro viditelné zjištění hloubky penetrace a distribuce konsolidantu ve vzorku byly vyzkoušeny možnosti jeho obarvení barvivy rozpustnými v rozpouštědlech, resp. samotných konsolidantech. Pro tyto účely byly na základě konzultace s technologem vybráni 2 zástupci barviv – Methylčerveně a Sudan černý.

Methylčerveně je azobarvivo využívané při indikaci pH. Z chemického hlediska se jedná o 4'-(dimethylamino)azobenzen-2-karboxylovou kyselinu. V kyselém prostředí je její chování zásadité a barva se mění do červena. S rostoucím pH se pak jeho barva mění do žluta.⁵³

Dalším zkoušeným barvivem byl Sudan černý. Sudan černý je barvivo rozpustné ve většině rozpouštědel a jeho primární využití je v oblasti daktyloskopie, kde se využívá ke zviditelnění daktyloskopických stop.⁵⁴

Obě tato barviva byla nejprve v malém množství smíchána v kádince s lihem (líh je kompatibilní se všemi zkoušenými konsolidanty). Ukázalo se, že rozpustnost obou barviv v lihu je vyhovující. V dalším kroku byl připraven koncentrovaný roztok těchto barviv v lihu, který byl následně přimíchán do malého množství každého zkoušeného konsolidantu. Tato směs byla poté nakapána doprostřed filtračních papírků (3 kapky směsi) a sledována distribuce konsolidantu s barvivem. Účelem bylo zjistit, zda bude rozpuštěné barvivo distribuovat společně s konsolidantem či nikoliv. Zároveň s tím byly na papírky aplikovány i konsolidanty bez barviva a barviva bez konsolidantu pro porovnání.


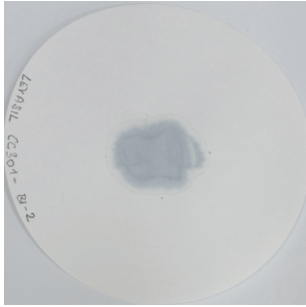
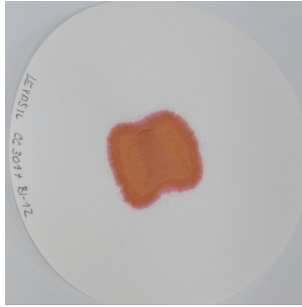




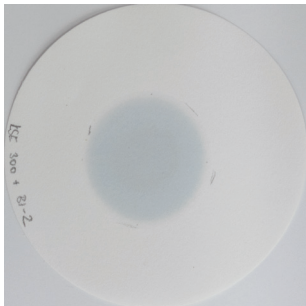


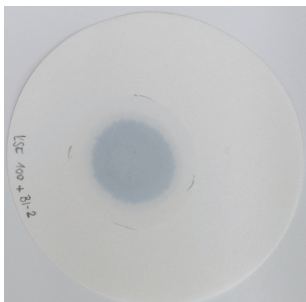
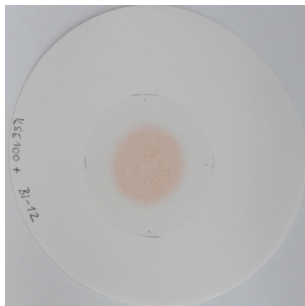
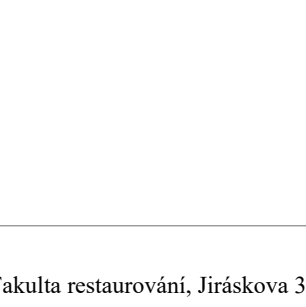
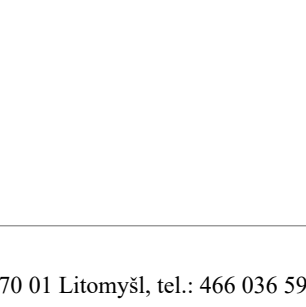

Ukázalo se, že obě tato barviva migrují společně s konsolidanty. Sudan černý měl u konsolidantů rozpustných v rozpouštědlech lepší efekt než Methylčerveně, avšak u konsolidantu ředitelném vodou byl efekt Sudanu viditelně horší než u Methylčerveně.

Na základě těchto výsledků bylo tedy rozhodnuto, že jako barvivo pro kontrolu penetrace pro produkt Levasil CC301 (rozpustný ve vodě) bude použita Methylčerveně a barvivo ostatních zkoušených konsolidantů bude Sudan černý.

V průběhu testování však vyšlo najevo, že přidání Sudanu černého do testovaného konsolidantu pravděpodobně zvyšuje dobu potřebnou k úplnému vytvrzení organokřemičitanů. V některých případech byl vzorek svrchu hydrofobní i po 2 měsících, kdy ostatní vzorky bez barviva byly již nasákavé.

⁵³ SEIDELMANNOVÁ, Julie. *Nanovlákněné struktury z biopolymerů jako pH sensory*. Online. Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. 2018. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/pft9h/>.

⁵⁴ *LT seznam - Sudan Black, prášek*. Online. LT seznam. Dostupné z: <https://www.krimi-ltsezam.cz/cs/sudan-black-prasek/>. [cit. 2025-01-13].

	Čistý produkt	Sudan černý	Methylčerveně
Bez konsolidantu			
Levasil CC 301 (5%)			
Sebosil S 10% (5%)			
KSE 300			
KSE 100			

4.3 Příprava vzorků

Pro přípravu vzorků se stejným stupněm degradace na všech vzorcích byla nakonec zvolena metoda dusání. Vzorky byly připraveny ze směsi křemičitých slévárenských písků z lomu Střeleč s označením ST54 a ST56. Jejich zrnitostní rozsah je znázorněn v Tab. TH 5. Hlavním důvodem použití těchto písků bylo jejich čisté křemenné složení. Frakce byla vybrána tak, aby se rozsahem podobala jemnozrnným až středně zrnitým pískovcům (rozsah jemnozrnné frakce: 0,025–0,063 mm, rozsah středně zrné frakce: 0,25–0,5 mm).

Jako pojivo byl vybrán produkt SioXal A10 od firmy IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG. Jedná se o disperzi koloidního oxidu křemičitého obsahující 30 % nanočástic (10 nm) SiO₂ ve vodě. Poměr směsi je znázorněn v Tab. TH 6.

Druh	D 50 (mm)	Zrnitostní rozsah (mm)
ST 54	0,22	0,10–0,63
ST 56	0,14	0,063–0,40

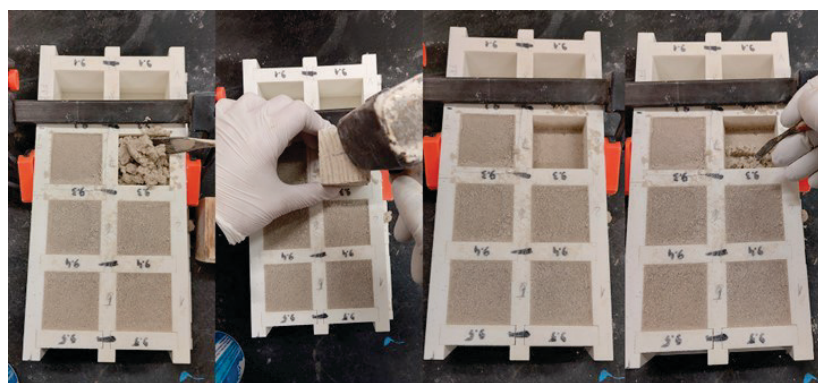
Tab. TH 5 Zrnitostní rozsah použitých písků

	Písky		Pojivo
	ST 54	ST 56	SioXaL A10
Hmotnostní díl	1	2	
	5		1

Tab. TH 6 Poměr směsi použité k dusání vzorků

Postup

Připravená směs byla dusána do tvárnic ve tvaru krychle o rozměrech 4x4x4 cm pomocí dřevěného špalíčku o rozměrech vnitřku tvárnice. Váha potřebné hmoty na jeden vzorek byla definována na 120 g. Po zvážení byla směs postupně vkládána do formy a rovnoměrně stlačena pomocí špalíčku a palice. Aby se minimalizovalo riziko oddělení jednotlivých dusaných vrstev byl jejich povrch před přidáním dalšího materiálu narušen špachtlí na celé ploše vzorku. Vzorky byly poté sušeny v pokojové teplotě. Po uplynutí 24 h byly odebrány bočnice tvárnic a vzorky se nechaly doschnout opět v pokojové teplotě po dobu 3 dnů. Dále byly vzorky vysušeny v sušárně (na max. 30°C) do konstantní hmotnosti. Celkem bylo takto připraveno 93 vzorků s průměrnou hmotností 102,4 g.

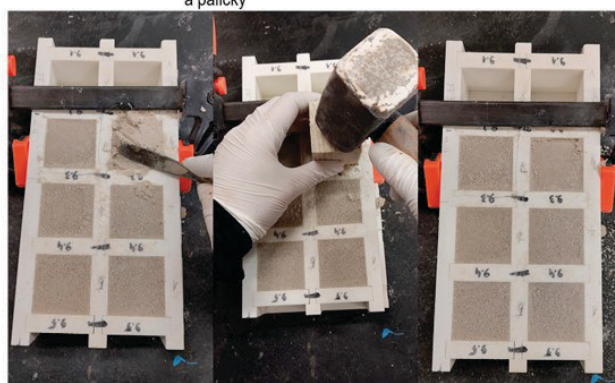


Nanesení části směsi do tvárnice

Udušení směsi pomocí dřev. špalíčku a paličky

Udušaná vrstva

Narušení udušané vrstvy špachtlí

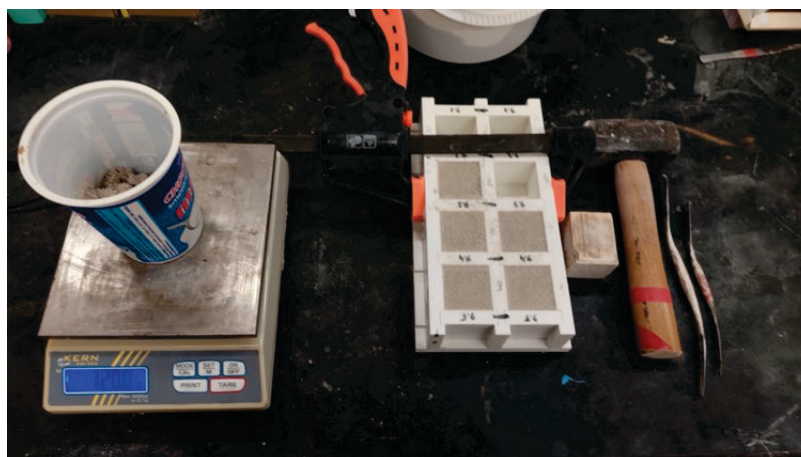


Nanesení zbytku směsi do tvárnice

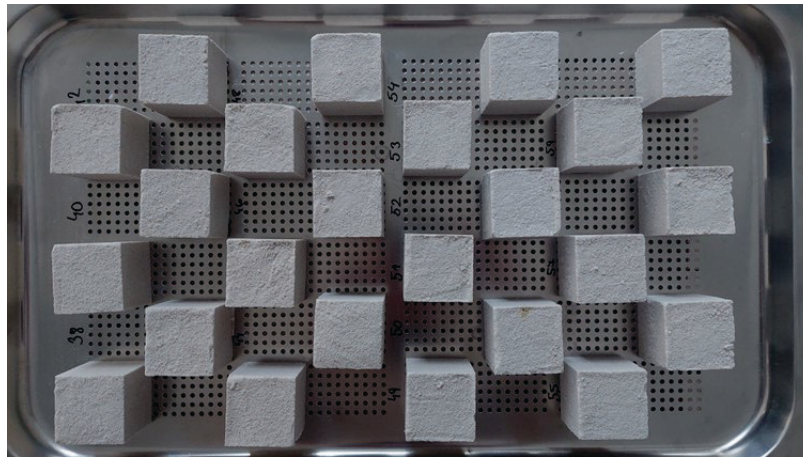
Udušení směsi pomocí dřev. špalíčku a paličky

Udušaná směs ve tvárnici

Obr. TH 7 Postup při dusání vzorků



Obr. TH 8 Pomůcky při dusání vzorků



Obr. TH 9 Vydusané vzorky

Umělé zavlhčování vzorků

Před samotným testováním bylo nejprve nutné ověřit, zda je možné vzorky rovnoměrně zavlhčit na požadovaný obsah vody. Byly porovnány dvě metody:

1. Maximální nasycení ponořením vzorku do vody s následným řízeným vysušováním na požadovanou hmotnost.
2. Aplikace přesného množství vody, které odpovídá cílovému obsahu vlhkosti, na Petriho misku a její následné nasátí testovacím tělískem.



Po provedení těchto zkoušek zavlhčení byly vzorky umístěny na dvě hodiny do hermeticky uzavřeného prostředí, aby byla vlhkost uvnitř vzorku (zkušebního tělíška) co nejvíce rovnoměrně rozložena. Následně byly rozřezány a odebrány dílčí části z jejich povrchu a středu.

Výsledky tohoto testování ukázaly, že 1. metoda s řízeným vysoušením je nejen časově náročnější, ale zároveň u ní docházelo k nerovnoměrnému rozložení vlhkosti – povrch obsahoval méně vody než vnitřek. Oproti tomu při zavlhčení přesně definovaným množstvím vody (2.) se voda ve vzorku distribuovala rovnoměrněji a rozdíl mezi obsahem vlhkosti na povrchu a uvnitř byl zanedbatelný.

Na základě těchto zjištění byla pro další testování zvolena metoda zavlhčování kapilární absorpcí přesného množství demineralizované vody.

Pro experimentální účely byly stanoveny dvě úrovně vlhkosti: 10 % a 15 % hmotnostního procenta. S ohledem na maximální nasákavost vzorku (cca 16 % hm.) odpovídá 15 % obsah vody přibližně 94 % zaplnění pórů ve vzorku, zatímco 10 % odpovídá přibližně 63 % zaplnění pórů.

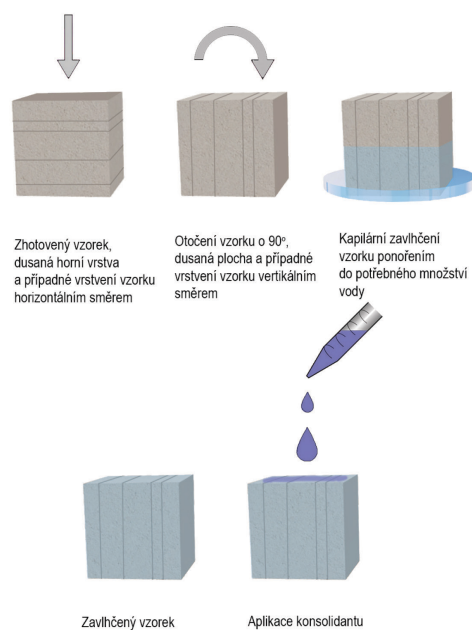
Byly tedy připraveny dvě sady vzorků – každá se specifickým obsahem vlhkosti (10 % a 15 %), přičemž každá sada obsahovala 39 vzorků (36 testovacích a 3 referenční). Zavlhčení bylo provedeno pomocí kapilárního nasátí. Průměrné množství vody potřebné k dosažení 10 % vlhkosti bylo 11,5 g H₂O, pro 15% vlhkost 18,2 g H₂O.

Po zavlhčení byly vzorky ponechány jednu hodinu v uzavřené nádobě, aby se zabránilo jejich vysychání. Obě sady byly uloženy odděleně, aby nedocházelo k přenosu vlhkosti mezi vzorky s různým obsahem vody.

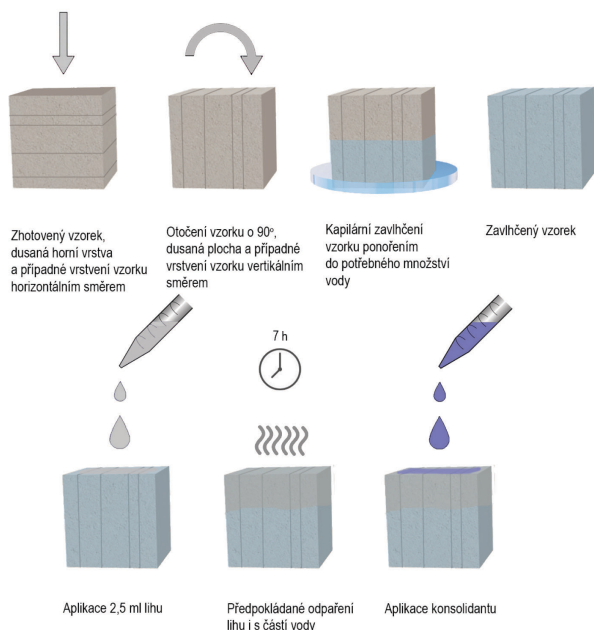
4.4 Aplikace konsolidantů a zrání vzorků

Po odležení byly na testovací vzorky aplikovány zkoušené konsolidanty. Sada pro testování jednoho konsolidantu činila 9 vzorků s 10% obsahem vody a 9 vzorků s 15% obsahem vody. Obsah vody byl u některých vzorků uměle snižován metodami, které jsou blíže popsány v kapitole Možnosti snížení vlhkosti v kameni. Tyto dvě metody byly aplikovány vždy na tři vzorky v sadě pro každou metodu, přičemž byl na jeden vzorek použit konsolidant s barvivem.

Na 3 vzorky v sadě byly aplikovány zkoušené konsolidanty bez předchozí úpravy vzorku (vysoušení). Na aplikaci jednoho ze tří vzorků byl vždy použit konsolidant obarvený pomocí barviva (Sudan černý/ Methylčerveň) pro sledování hloubky a rovnoměrnosti penetrace.



Obr. TH 11 Postup aplikace konsolidantu

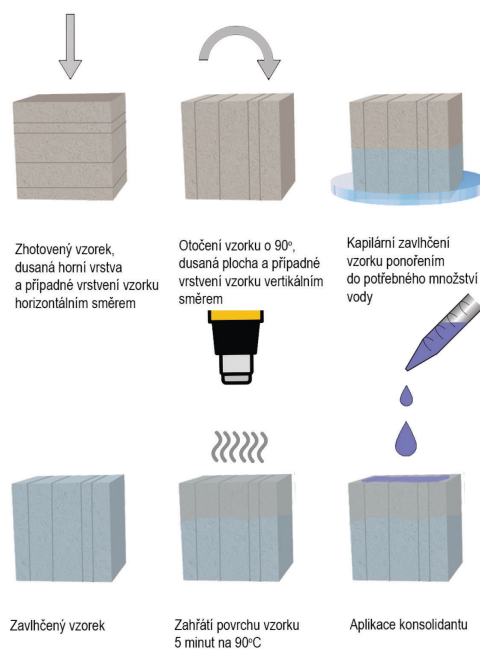


Obr. TH 12 Postup aplikace konsolidantu se smočením povrchu lihem před konsolidací

Poslední tři vzorky byly vysušeny svrchu pomocí horkovzdušné pistole. Povrch vzorku byl vystaven po dobu 5 minut proudu horkého vzduchu z horkovzdušné pistole ze vzdálenosti 5–10 cm o teplotě 90°C. Poté byl vzorek ponechán do vychladnutí v pokojové teplotě. Následně proběhla aplikace konsolidantů (2 vzorky bez barviva, 1 s barvivem). Opět byl sledován úbytek vody (hmotnosti) ve vzorcích. Průměrný úbytek váhy u vzorků zavlhčených na 15 % byl 1,5 % a u vzorků s 10% obsahem H₂O 1,7 %.

Jako poslední proběhla aplikace konsolidantů na „suché, porovnávací“ vzorky. Porovnávací sada pro jeden konsolidant čítala 3 vzorky. Opět proběhla na dva vzorky aplikace čistého konsolidantu, a na dva vzorky aplikace konsolidantu s barvivem.

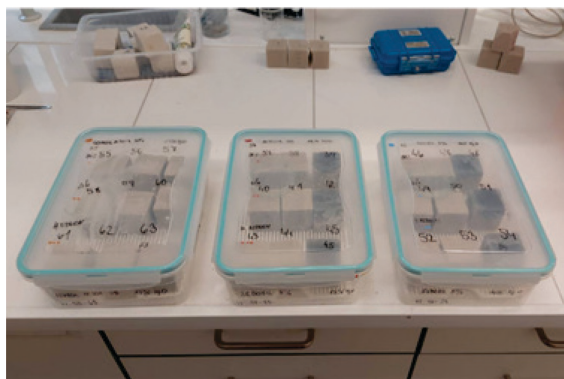
Na další tři vzorky v sadě bylo nejprve aplikováno pipetou 2,5 ml lihu a po 7 h byl opět aplikován konsolidant (2 vzorky) a konsolidant s barvivem (1 vzorek). Po dobu 7 hodin byla sledována změna hmotnosti, která byla porovnávána s jiným zavlhčeným vzorkem, zda líh urychlí odpařování vody či pomůže penetraci do hloubky. Průměrný úbytek u vzorků zavlhčených na 15 % obsahu H₂O byl 2,4 % a u vzorků s 10% obsahem vlhkosti 2,7 %. Kontrolní vzorky bez lihu měly za stejný čas úbytek 1,8 % (15 % H₂O) a 1,7 % (10 % H₂O).



Obr. TH 13 Postup aplikace konsolidantu s předsušením povrchu horkým vzduchem

Zrání vzorků

Po aplikaci konsolidantů se nechaly jednotlivé testovací sady (9 vzorků) v hermeticky uzavíratelné nádobě. Několikrát týdně docházelo k otevření a vyvětrání krabiček, kvůli minimalizaci rizika kondenzace vody na stěnách. Relativní vzdušná vlhkost uvnitř jednotlivých krabiček se pohybovala v případě sad s 10% obsahem vody okolo 95 % RH (s odchylkou max. 5 %) a v případě sad s 15% obsahem vody okolo 99 % RH (s odchylkou max. 5 %). Ke každé sadě byla přidána Petriho miska s příslušným konsolidantem (cca 2 g) pro sledování vzniklého křemičitého gelu.



Obr. TH 14 Vzorky v hermeticky uzavřené nádobě

Porovnávací vzorky se po aplikaci konsolidantů i se zpevňovači na Petriho miskách ponechaly při pokojové teplotě a do jejich blízkosti byla umístěna nádoba s vodou pro docílení optimální vlhkosti vzduchu (v případě organokřemičitanů). V průběhu reakční doby se relativní vzdušná vlhkost pohybovala v rozmezí 50–70 % v případě organokřemičitanů a u křemičitých solí 20–40 %.

Doba zrání jednotlivých vzorků se pohybovala okolo 8 týdnů (u organokřemičitanů). Jako ukazatel vytvrzení organokřemičitanů byla brána absence hydrofobidity povrchu. Tato kontrola probíhala drop testem. V případě Sebosilu S byla doba výrazně kratší (alespoň dle prostředku na Petriho misce), a to cca 1–2 týdny.

4.5 Metody hodnocení

Metody hodnocení konsolidace byly limitovány značným množstvím vody ve vzorcích. V první fázi bylo přistoupeno pouze ke čtyřem metodám. Konkrétně k neinvazivnímu měření ultrazvukovou transmisí a invazivnímu odporovému vrtání, dále ke kontrole hloubky penetrace konsolidantu uvnitř vzorku a metodě zkoumání úlomků ze vzorku pomocí rastrovací elektronové mikroskopie s energo-disperzní analýzou pro bližší poznání vzniklého křemičitého gelu.

V druhé fázi se nechala část vzorků při pokojové teplotě vyschnout a poté na nich bylo provedeno měření pomocí spektrofotometru Konica Minolta CM-2600d, který umožňuje přesné stanovení barevného odstínu a jeho změn vůči referenčním nezpevněným vzorkům.

Testování bylo dále doplněné o vizuální posouzení vzniklých gelů na Petriho miskách, které zrály/vytvrzovaly ve stejném prostředí jako zavlhčené vzorky.

4.6 Vizuální posouzení vzniklých křemičitých gelů

V rámci testování proběhla aplikace samotných konsolidantů na Petriho misky. Množství jednotlivých konsolidantů bylo 2 g. Misky se poté umístily do příslušných boxů s testovacími vzorky. Doba zrání konsolidantů na Petriho miskách byla 8 týdnů. Pro porovnání byly gely srovnávány s gely, které vytvrzovaly ve stejném prostředí jako porovnávací vzorky (tj. 50–70 % RH v případě KSE 100 a 300 a 20–40 % RH u Sebosilu S a Levasilu CC301).

Výsledky:

Dle vizuálního srovnání vzniklých gelů vykazoval nejlepší výsledky prostředek Sebosil S 5 %. Změny gelu v podmínkách s vyšší vzdušnou vlhkostí byly oproti gelu, který vytvrzoval v optimálních podmínkách minimální.

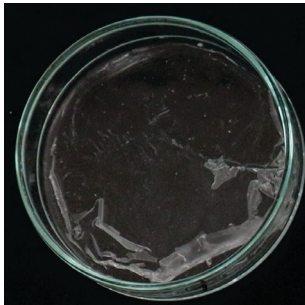
Organokřemičité konsolidanty KSE 100 a 300 se při vyšší relativní vzdušné vlhkosti začaly silně zakalovat. O trochu lepší výsledky měly v prostředí s 99 % RH (odchylka max. 5 %), zakalení bylo o méně znatelné a u obou prostředků došlo k vytvrzení. V prostředí s RH 95 % (s odchylkou max. 5 %) prostředek KSE 100 zcela nevytvrdl a u KSE 300 byla míra zakalení větší než v případě prostředí s 99 % RH. Míra popraskání křemičitého gelu byla oproti vytvrzování za běžných podmínek nižší.

Prostředek Levasil CC301 po 8 týdnech nevytvrdnul vůbec. V prostředí s vyšší RH (99 %) začal pouze gelovatět. Kvůli tomu došlo k vyřazení obou sad s tímto konsolidantem z dalšího testování.

	KSE 100	KSE 300	Sebosil S 5 %	Levasil CC301 5 %
Ideální podmínky	Čirý gel, začínající praskliny	Lehce zakalený gel, popraskaný	Čirý gel	Lehce zakalený gel, drobné praskliny
RH cca 99 %	Zakalený gel	Silně zakalený, praskliny	Čirý gel	Začínající gelovatění, zcela nevytvrdnul
RH cca 95 %	Začínající gelovatění, zcela nevytvrdnul	Mléčně zabarvené zakalení, praskliny	Čirý gel	Nevytvrdnul, zcela tekutý

Tab. TH 7 Výsledky vizuálního posouzení vzniklých gelů na Petriho miskách

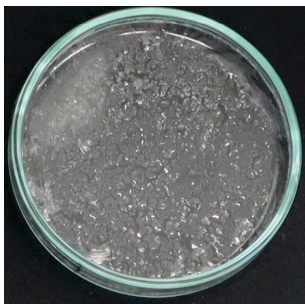
**Vytvrzování za ideálních
podmínek**



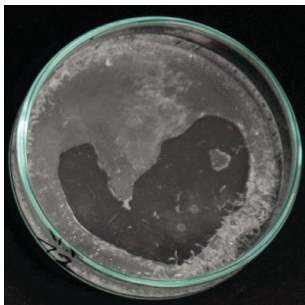
KSE 100 – RH 50–70 %



KSE 300 – RH 50–70 %



Sebosil S 5 % – RH 20–40 %

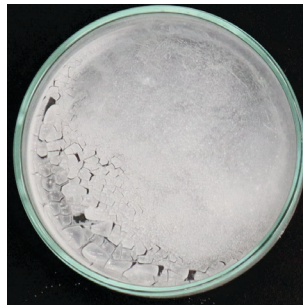


Levasil CC301 5 % – RH
20–40 %

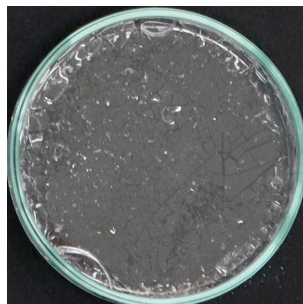
**Vytvrzování v uzavřeném
prostoru se vzorky s 15 %
obsahem vlhkosti (RH cca 99 %)**



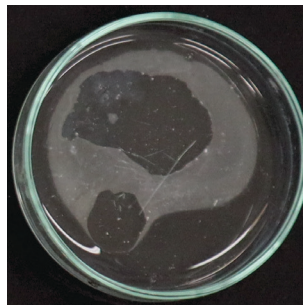
KSE 100



KSE 300

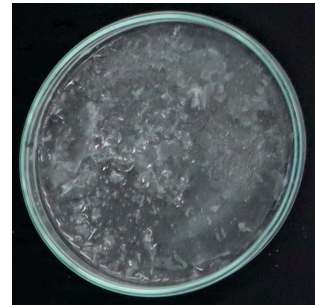


Sebosil S 5 %

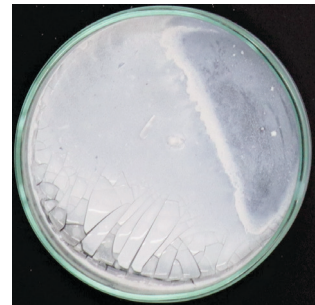


Levasil CC301 5 %

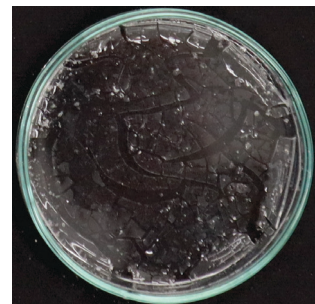
**Vytvrzování v uzavřeném
prostoru se vzorky s 10 %
obsahem vlhkosti (RH cca 95 %)**



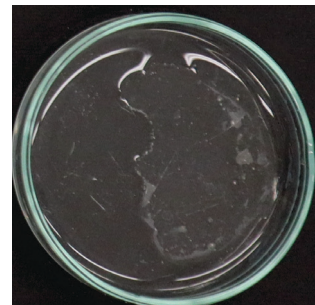
KSE 100



KSE 300



Sebosil S 5 %



Levasil CC301 5 %

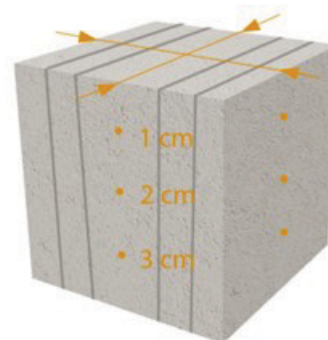
Tab. TH 8 Srovnání vzniklých gelů na Petriho miskách

4.7 Ultrazvuková transmise

Tato metoda je založena na průchodu ultrazvukového signálu materiálem za určitou dobu. Každý materiál má svou specifickou rychlost šíření signálu. Čím je materiál hustší a méně porézní, tím rychleji signál prochází. Naopak v místech s prasklinami, trhlinami nebo poškozeným povrchem je průchod signálu zpomalen nebo zcela znemožněn.

Cílem měření bylo srovnání rychlosti šíření longitudálního ultrazvukového vlnění před konsolidací a po ní.

Měření probíhalo vždy do kříže ve třech hloubkách (1 cm, 2 cm a 3 cm od povrchu, kde byl aplikován konsolidant). Každý vzorek byl tedy změřen celkem na 6 místech. Na závěr byl porovnán průměr hodnot každého konsolidantu a metody vysoušení viz. tabulky a grafy níže.



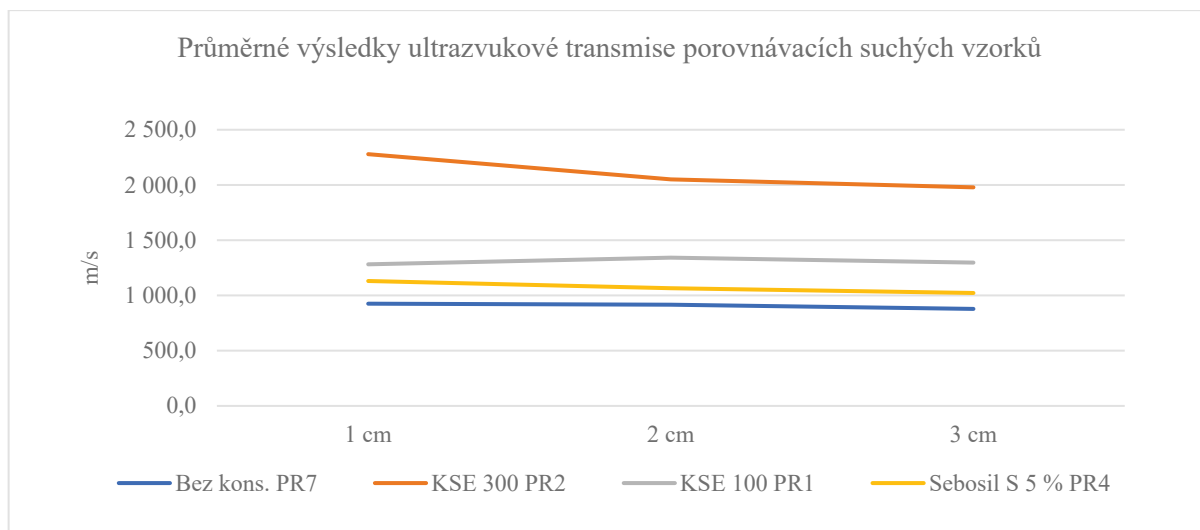
Obr. TH 15 Místa měření UZ transmise na vzorcích

Výsledky konsolidantů na porovnávacích suchých vzorcích:

Výsledky kontrolních testů aplikace konsolidantů na suché vzorky odpovídají koncentraci účinných látek v jednotlivých konsolidantech. Nejlépe fungoval prostředek KSE 300, poté KSE 100 a nejhorší, ale stále znatelný efekt měl produkt Sebosil S 5 %. Křivka zpevnění byla poměrně rovnoměrná ve všech případech. V případě KSE 300 byl znatelný vyšší nárůst pevnosti v hloubce 1 cm.

Průměrné hodnoty porovnávacích suchých vzorků				
Hloubka	Bez konsolidantu	KSE 300	KSE 100	Sebosil S 5 %
	PR7	PR2	PR1	PR3
1 cm	925 m/s	2 279 m/s	1 282 m/s	1 301 m/s
2 cm	916 m/s	2 051 m/s	1 342 m/s	1 175 m/s
3 cm	878 m/s	1 979 m/s	1 297 m/s	1 143 m/s

Tab. TH 9 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise porovnávacích suchých vzorků



Graf TH 3 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise porovnávacích suchých vzorků

Výsledky konsolidantů na vzorcích s obsahem vlhkosti 15 %:

U vzorků bez jakékoliv úpravy dosáhl prostředek KSE 100 oproti ostatním prostředkům výraznějšího zlepšení koheze, a to nejvíce v hloubce 2 cm. Prostředek KSE 300 měl pozorovatelný efekt až v hloubce 3 cm a Sebosil S byl téměř bez efektu.

V případě napuštění vzorku lihem a následném odpaření části vody před aplikací, měl největší efekt konsolidant KSE 300. U prostředku KSE 100 byla největší rychlost zaznamenaná ve 2 centimetrech a u prostředku Sebosil S byl efekt v porovnání s neošetřeným vzorkem téměř zanedbatelný.

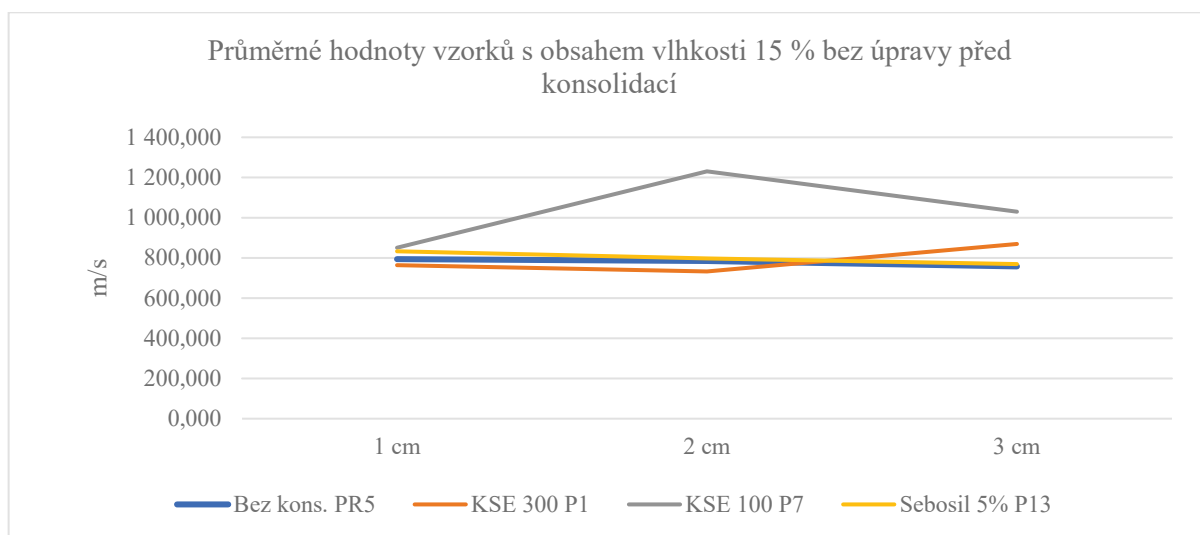
Při vysušení povrchu vzorku horkým vzduchem se jako neúčinnější opět jevil prostředek KSE 300. Jeho efekt však s rostoucí hloubkou rapidně klesal. Zbylé dva přípravky byly v tomto případě srovnatelné s neošetřeným vzorkem, průchod signálu trochu zvýšil konsolidant Sebosil S.

Oproti porovnávacím vzorkům bylo zrychlení UZ signálu na konsolidovaných vzorcích při 15% obsahu vlhkosti velmi nízké. Na účinek konsolidantu KSE 300 měly kladný vliv metody vysoušení před jeho aplikací. U KSE 100 bylo zrychlení signálu nejvýraznější v hloubce dvou centimetrů v případě aplikace bez vysoušení povrchu a s po vysoušení povrchu lihem. Při vysušení povrchu horkým vzduchem měl prostředek KSE 100 téměř nulový efekt.

Sebosil S měl obdobné výsledky ve všech případech. Ve srovnání s porovnávacími hodnotami byl jeho efekt velmi mírný. Nejvíce pozorovatelný byl v případě vysoušení povrchu horkým vzduchem před aplikací.

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 15 % bez úpravy před konsolidací				
Hloubka	Bez konsolidantu	KSE 300	KSE 100	Sebosil S 5 %
	PR5	P1	P7	P13
1 cm	794 m/s	764 m/s	851 m/s	833 m/s
2 cm	784 m/s	733 m/s	1 231 m/s	798 m/s
3 cm	758 m/s	869 m/s	1 030 m/s	769 m/s

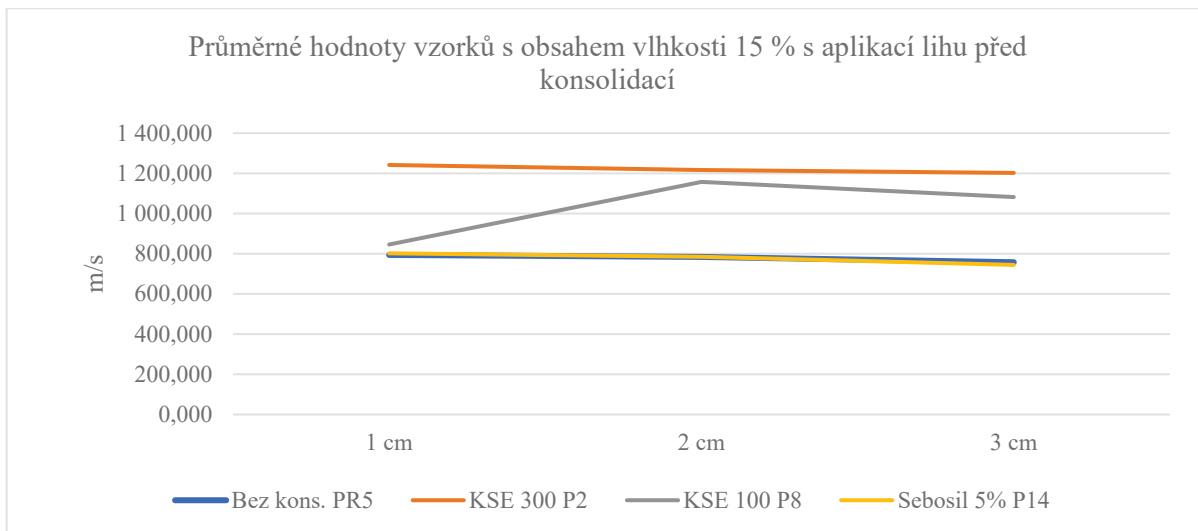
Tab. TH 10 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu



Graf TH 4 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 15 % s aplikací lihu před konsolidací				
Hloubka	Bez konsolidantu	KSE 300	KSE 100	Sebosil S 5 %
	PR5	P2	P8	P14
1 cm	794 m/s	1 242 m/s	846 m/s	802 m/s
2 cm	784 m/s	1 217 m/s	1 157 m/s	785 m/s
3 cm	758 m/s	1 202 m/s	1 082 m/s	744 m/s

Tab. TH 11 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s aplikací lihu

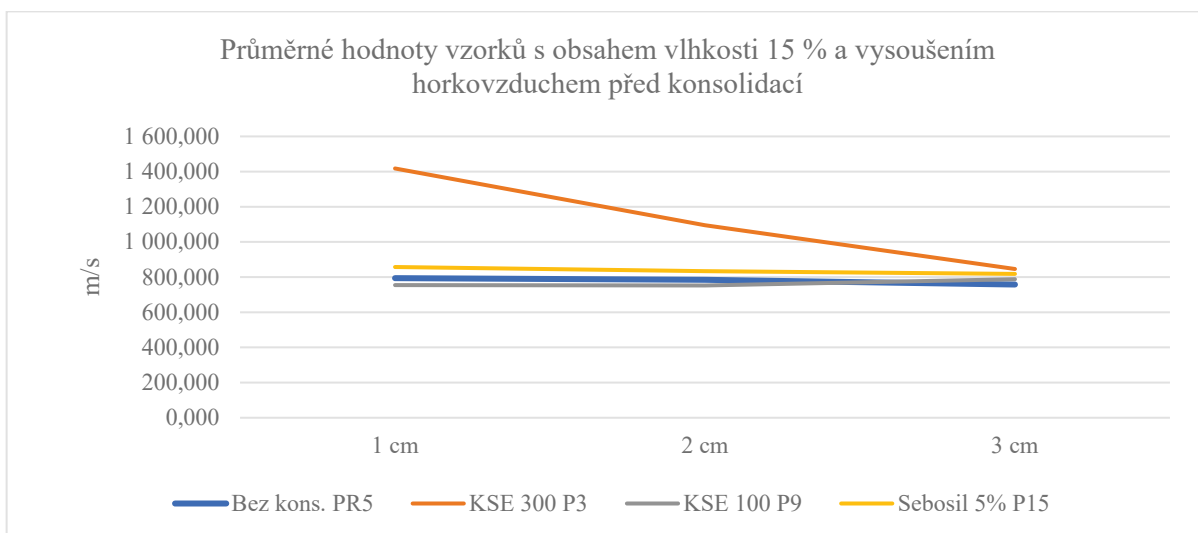


Graf TH 5 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s aplikací lihu

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 15 % a vysoušením horkým vzduchem před konsolidací

Hĺoubka	Bez konsolidantu PR5	KSE 300 P3	KSE 100 P9	Sebosil S 5 % P15
1 cm	794 m/s	1 418 m/s	754 m/s	857 m/s
2 cm	784 m/s	1 095 m/s	752 m/s	833 m/s
3 cm	758 m/s	846 m/s	788 m/s	818 m/s

Tab. TH 12 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s vysoušením povrchu horkým vzduchem



Graf TH 6 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s vysoušením povrchu horkým vzduchem

Výsledky konsolidantů na vzorcích s obsahem vlhkosti 10 %

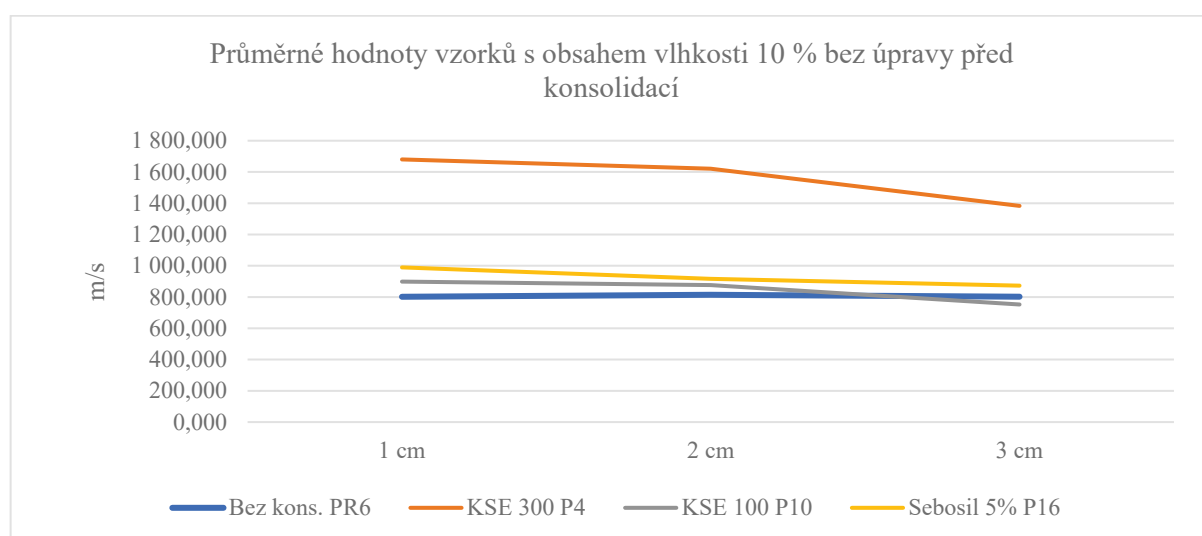
U neošetřených vzorků s 10% obsahem vody bylo výrazné zlepšení šíření signálu po aplikaci konsolidantu KSE 300. S rostoucí hloubkou jeho efekt mírně slábl. Oproti tomu u ostatních dvou prostředků se rychlost zvýšila pouze mírně. Prostředek Sebosil S měl na průchod signálu o trochu lepší vliv než prostředek KSE 100, jehož vliv by se tentokrát dal označit za zanedbatelný.

V případě ošetření povrchu jak lihem, tak při vysoušení horkým vzduchem byl nejúčinnější prostředek KSE 300, měl rovnoměrný efekt v celém vzorku a hodnoty dosahovaly víc jak dvojnásobného nárůstu proti neošetřenému vzorku. KSE 100 a Sebosil S měli stejný efekt, který trochu zlepšil průchod signálu než u nezpevněného vzorku.

Oproti porovnávacím vzorkům byl vliv konsolidantů na rychlost průchodu signálu slabší. V případě KSE 300 a Sebosilu S byly hodnoty méně, ale stále zřetelné. U prostředku KSE 100 se efekt ukázal jako výrazně nižší oproti porovnávacím hodnotám.

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 10 % bez úpravy před konsolidací				
Hloubka	Bez konsolidantu	KSE 300	KSE 100	Sebosil S 5 %
	PR6	P4	P10	P16
1 cm	802 m/s	1 680 m/s	899 m/s	990 m/s
2 cm	814 m/s	1 621 m/s	877 m/s	916 m/s
3 cm	802 m/s	1 383 m/s	752 m/s	873 m/s

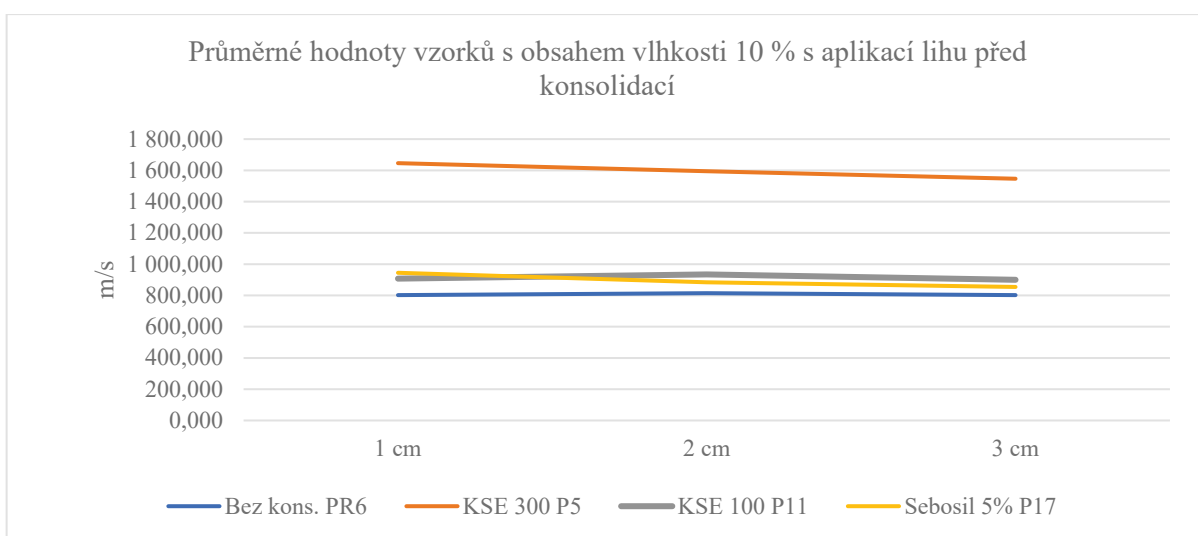
Tab. TH 13 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, bez úpravy povrchu



Graf TH 7 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, bez úpravy povrchu

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 10 % s aplikací lihu před konsolidací				
Hloubka	Bez konsolidantu	KSE 300	KSE 100	Sebosil S 5 %
	PR6	P5	P11	P17
1 cm	802 m/s	1 646 m/s	908 m/s	945 m/s
2 cm	814 m/s	1 594 m/s	934 m/s	884 m/s
3 cm	802 m/s	1 547 m/s	890 m/s	854 m/s

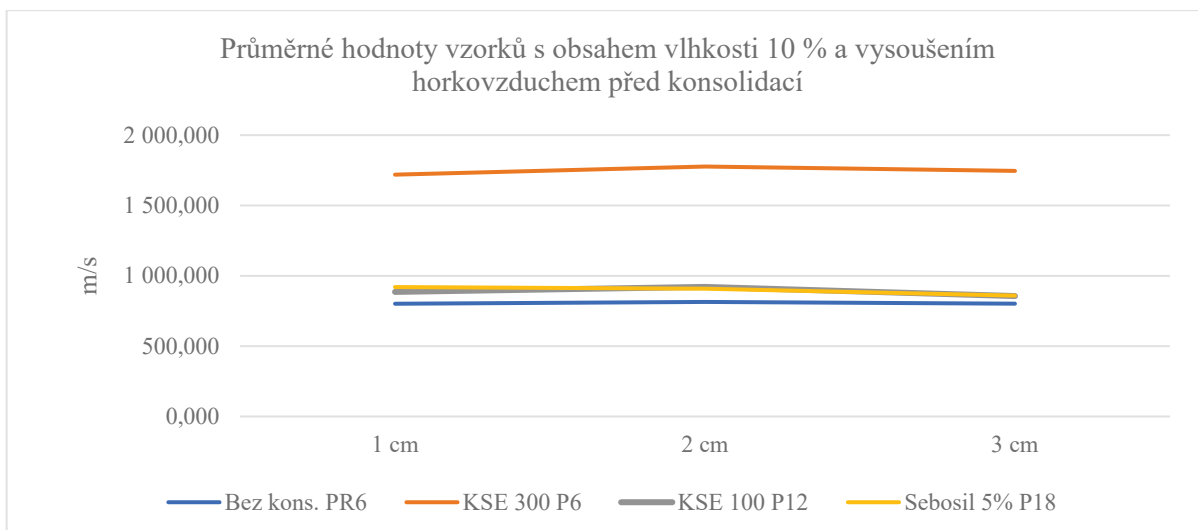
Tab. TH 14 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s aplikací lihu



Graf TH 8 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s aplikací lihu

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 10 % a vysoušením horkým vzduchem před konsolidací				
Hloubka	Bez konsolidantu	KSE 300	KSE 100	Sebosil S 5 %
	PR6	P6	P12	P18
1 cm	802 m/s	1 719 m/s	886 m/s	920 m/s
2 cm	814 m/s	1 777 m/s	921 m/s	909 m/s
3 cm	802 m/s	1 746 m/s	856 m/s	859 m/s

Tab. TH 15 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s vysoušením povrchu horkým vzduchem



Graf TH 9 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s vysoušením povrchu horkým vzduchem

4.8 Odporové vrtání

Odporové vrtání je invazivní metoda sloužící k podrobnějšímu určení homogenity kamenného materiálu. Tato technika je založena na principu měření odporu, který materiál klade při vrtání. Proces probíhá za konstantní rychlosti a rovnoměrného posunu vrtáku do materiálu. Energie, respektive síla potřebná k posunu vrtáku, je kontinuálně zaznamenávána a následně interpretována ve formě grafu. Tato metoda umožňuje stanovit tvrdost materiálu v definované hloubce kamene a poskytuje cenné informace o jeho vnitřní struktuře.

Měření na testovaných vzorcích probíhalo vždy do hloubky 3 cm od zpevňovaného povrchu přístrojem od SINT Technology. Otáčky byly nastaveny na 600 rpm a vrtání probíhalo rychlostí 10 milimetrů za minutu.

Výsledky průměrné síly/odporu při vrtání:

Průměrné hodnoty konsolidovaných porovnávacích suchých vzorků	
Typ vzorku	Odpor vůči vrtání
Bez konsolidantu	15,52 N
KSE300	39,48 N
KSE100	17,89 N
Sebosil S 5 %	31,87 N

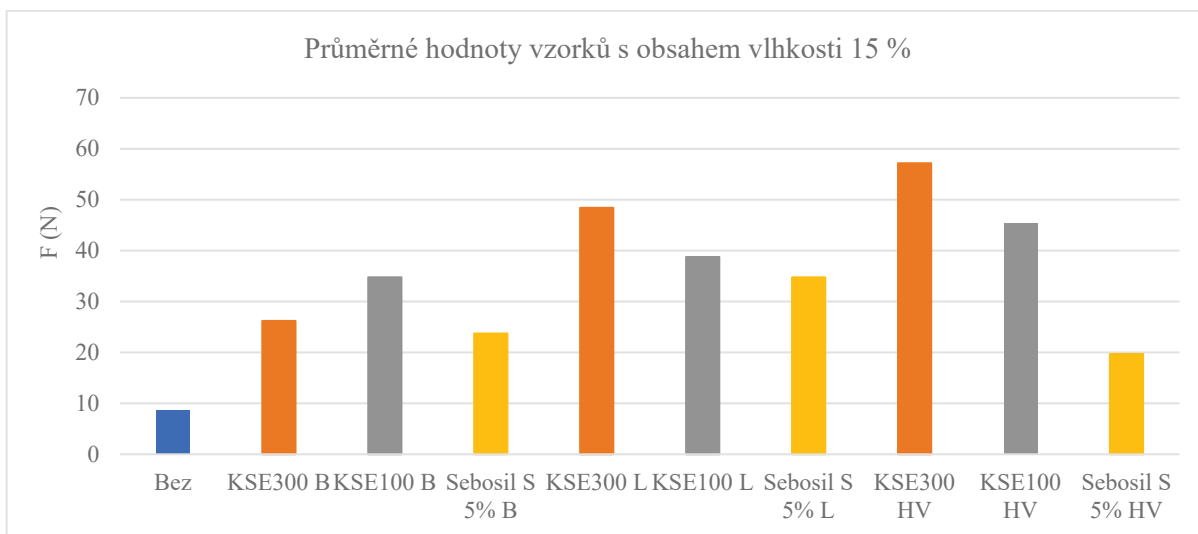
Tab. TH 16 Průměrné výsledky odporu při vrtání, konsolidované porovnávacích vzorky



Graf TH 10 Průměrné výsledky odporu při vrtání, konsolidované porovnávacích vzorky

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 15 %	
Typ vzorku	Odpor vůči vrtání
Bez konsolidantu	8,76 N
KSE300 B – bez vysoušení	26,19 N
KSE100 B – bez vysoušení	34,76 N
Sebosil S 5 % B – bez vysoušení	23,72 N
KSE300 L – vysoušení povrchu líhem	48,41 N
KSE100 L – vysoušení povrchu líhem	38,75 N
Sebosil S 5 % L – vysoušení povrchu líhem	34,75 N
KSE300 H – vysoušení povrchu horkým vzduchem	57,16 N
KSE100 H – vysoušení povrchu horkým vzduchem	45,29 N
Sebosil S 5 % H – vysoušení povrchu horkým vzduchem	19,7 N

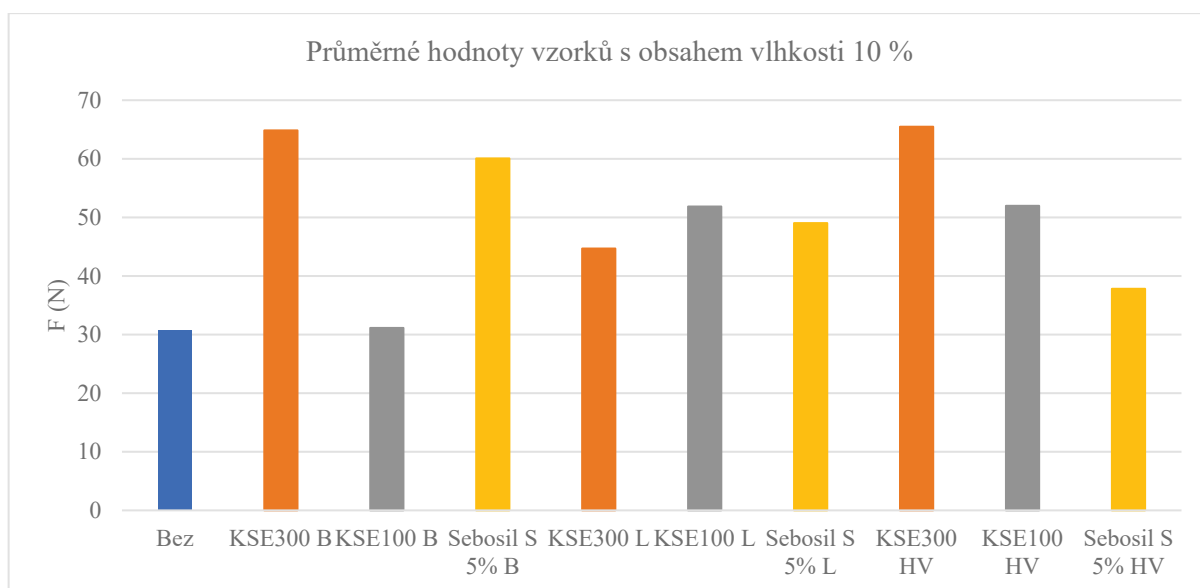
Tab. TH 17 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 15 % obsahem vlhkosti



Graf TH 11 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 15 % obsahem vlhkosti

Průměrné hodnoty vzorků s obsahem vlhkosti 10 % bez ošetření před konsolidací	
Typ vzorku	Odpor vůči vrtání
Bez konsolidantu	30,8 N
KSE300 B – bez vysoušení	64,85 N
KSE100 B – bez vysoušení	31,14 N
Sebosil S 5 % B – bez vysoušení	60,07 N
KSE300 L – vysoušení povrchu lihem	44,69 N
KSE100 L – vysoušení povrchu lihem	51,86 N
Sebosil S 5 % L – vysoušení povrchu lihem	49,03 N
KSE300 H – vysoušení povrchu horkým vzduchem	65,48 N
KSE100 H – vysoušení povrchu horkým vzduchem	51,98 N
Sebosil S 5 % H – vysoušení povrchu horkým vzduchem	37,82 N

Tab. TH 18 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 10 % obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu



Graf TH 12 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 10 % obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu

Všechny konsolidanty měly vliv na zvýšení odporové síly při vrtání. Výsledná křivka na grafu byla ve všech případech celkem rovnoměrná. V žádném z testovaných vzorků s vyšším obsahem vlhkosti křivka neukázala výraznější odchylku, která by značila např. přezpevnění.

Naopak v případě konsolidovaných porovnávacích suchých vzorků křivka ukázala celkem významné přezpevnění povrchu. A to u jednoho vzorku, který byl konsolidovaný Sebosilem S 5 % a na všech vzorcích zpevněných organokřemičitanem KSE 300.

Celkově nejlepší výsledky prokázal konsolidant KSE 300 (pouze v jednom případě při aplikaci lihu před konsolidací na vzorku s 10% obsahem vlhkosti byl o něco málo účinnější konsolidant KSE 100). Sebosil S 5 % byl naopak téměř vždy nejméně účinný (pouze u neošetřených vzorků před konsolidací s 10% obsahem vlhkosti a u porovnávacích vzorků byl účinnější než prostředek KSE 100). Prostředek KSE 100 se nejčastěji v účinnosti pohyboval mezi KSE 300 a Sebosilem S 5 %. Výsledky zpevnění zpravidla odpovídají obsahu účinných látek v jednotlivých konsolidantech.

4.9 Vizuální posouzení hloubky penetrace

Pro posouzení hloubky penetrace bylo použito barvivo Sudan černý. Ten byl přidán do konsolidantu a tato směs byla následně aplikována vždy na jeden vzorek z testovací řady.

Po technologické přestávce potřebné na zrání vzorků a po provedení ostatních metod hodnocení byly tyto vzorky rozříznuty v půlce a vzájemně porovnávány. Pro větší přehlednost byla vytvořena škála míry napuštění do vzorku.

A to:

Jen na povrchu – barvivo se vyskytovalo viditelně jen po povrchu vzorku a do jeho hloubky se příliš nedostalo.

1/3 vzorku – barvivo se projevovalo na cca jedné třetina sledovaného povrchu

1/2 vzorku – cca půlka sledovaného povrchu byla obarvena

2/3 vzorku – téměř celý sledovaný povrch byl obarven

Celý vzorek – povrch celé sledované plochy byl obarven

Během doby zrání konsolidantů bylo pozorováno na některých vzorcích konsolidovaných organokřemičitany, že přidání barviva mělo vliv na zpomalení reakční doby. Vzorky konsolidované KSE 300 a 100 s příměsí Sudanu černého byly déle hydrofobní na povrchu než vzorky bez něj. Hydrofobní povrch by se dal zdůvodnit tím, že Sudan černý je nerozpustný ve vodě. Nicméně to vyvrátily jak vzorky s obarveným Sebosilem, které byly hydrofilní, tak i neošetřený vzorek, na který byl pro kontrolu nakapán pouze koncentrovaný Sudan černý v lihu.

Výsledky pozorování:

Ve vzorcích s 15% obsahem vody bez ošetření povrchu před konsolidací byla hlubší penetrace pozorována pouze u produktu Sebosil S 5 % a to v jedné třetině povrchu zkoumané plochy.

Vzorky s 10% obsahem vody bez ošetření před konsolidací vykazovaly ve všech případech o něco lepší absorpci konsolidantů než ty s 15 % H₂O. Nejlépe penetrující se ukázal prostředek KSE 100, u kterého bylo zbarvení povrchu zkoumané plochy ze dvou třetin. Sebosil S prokázal také dobrou penetraci, a to cca do 1/2 povrchu. Prostředek KSE 100 v tomto případě obarvil pouze 1/3 zkoumané plochy.

U vzorků napuštěných lihem před aplikací byla míra penetrace velmi podobná u všech prostředků. V případě vzorku s 15% obsahem vody měl o trochu lepší výsledek v probarvení povrchu organokřemičitý prostředek KSE 100 a to v 1/2 povrchu. Produkty KSE 300 a Sebosil S měly efekt obdobný, zbarvena byla zhruba 1/3 povrchu. U vzorku s 10% obsahem vody byly výsledky podobné. Opět o něco lepší výsledky vykazoval konsolidant KSE 100, kdy došlo k zbarvení celého zkoumaného povrchu. Produkty KSE 300 a Sebosil S měly obdobné výsledky, a to zbarvení cca 2/3 zkoumané plochy.

V případě vysoušení povrchu horkým vzduchem se opět výsledky jednotlivých konsolidantů pohybovaly podobně. Na zkoumaném povrchu vzorků s 15% obsahem vody měly

organokřemičité prostředky KSE 300 a 100 podobný výsledek, a to zabarvení cca na 1/3 plochy. O něco lepší efekt měl v tomto případě Sebosil S. Zabarvení bylo viditelné cca na 1/2 vzorku. Vzorky s 10% obsahem vody opět vykazovaly znatelně lepší výsledky penetrace konsolidantů. Celý zkoumaný povrch se povedlo probarvit v případě organokřemičitanů KSE 300 a 100. Sebosil S měl o trochu menší zabarvení, a to cca na 2/3 povrchu.

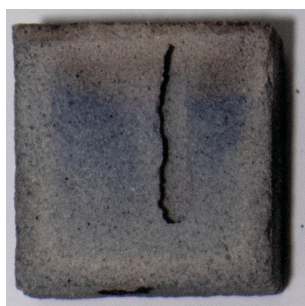
Pro porovnání došlo na závěr ještě ke kontrole míry zabarvení uvnitř porovnávacích suchých konsolidovaných vzorků. Tam byla probarvena celá plocha v případě KSE 300 a Sebosilu S. U konsolidantu KSE 100 byly výsledky horší – barvivo bylo spíše u povrchu vzorku. Je možné, že během vysychání došlo ke zpětné migraci barviva, anebo i samotného konsolidantu, k povrchu.

	KSE 300						KSE 100						Sebosil S 5 %											
	15 % H2O			10 % H2O			15 % H2O			10 % H2O			15 % H2O			10 % H2O								
	B	L	H	B	L	H	B	L	H	B	L	H	B	L	H	B	L	H						
Jen na povrchu	X						X																	
1/3 vzorku		X	X	X					X						X	X								
1/2 vzorku								X							X	X								
2/3 vzorku					X					X											X	X		
Celý vzorek					X						X	X												

Tab. TH 19 Zhodnocení hloubky penetrace jednotlivých konsolidantů

B	Bez úpravy před konsolidací
L	Aplikace lihu před konsolidací
H	Vysoušení horkým vzduchem před konsolidací

Aplikace na
suché
vzorky



KSE 300

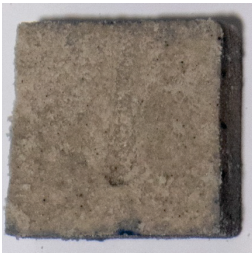
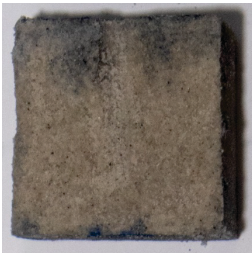
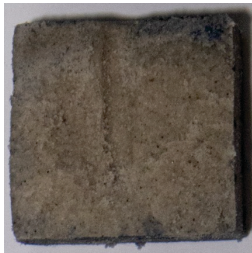
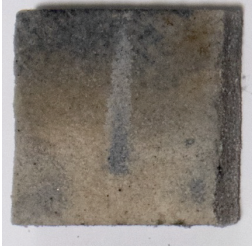
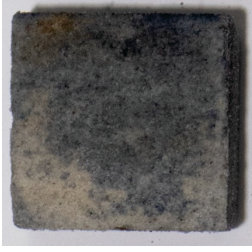








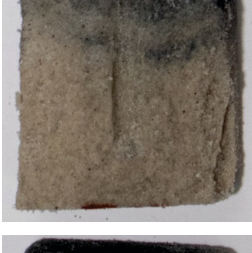






KSE 100



Sebosil S 5 %

Tab. TH 20 Zhodnocení hloubky penetrace na porovnávacích vzorcích (bez obsahu vlhkosti)

	Bez úpravy vzorku	S aplikací lihu	S vysoušením horkovzduchem
KSE 300 15 % H2O RH 99 % (+- 5%)			
KSE 300 10 % H2O RH 95 % (+- 5%)			
KSE 100 15 % H2O RH 99 % (+- 5%)			
KSE 100 10 % H2O RH 95 % (+- 5%)			
Sebosil S 5 % 15 % H2O RH 99 % (+- 5%)			
Sebosil S 5 % 10 % H2O RH 95 % (+- 5%)			

Tab. TH 21 Zhodnocení hloubky penetrace jednotlivých konsolidantů

4.10 Rastrovací elektronová mikroskopie s energo-disperzní analýzou

Při vyhodnocování vzorků byl použit elektronový mikroskop Tescan MIRA 3 s energo-disperzním analyzátozem Bruker, detektor odražených elektronů a urychlovací napětí 20 kV.

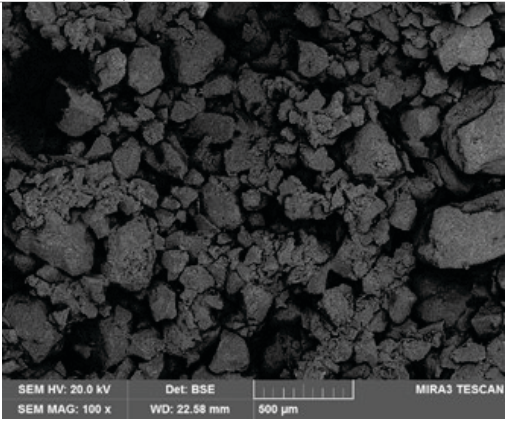
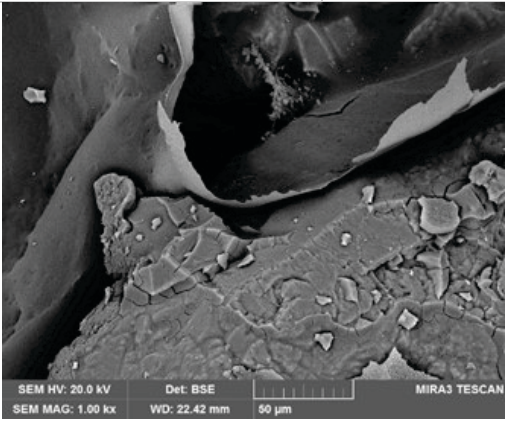
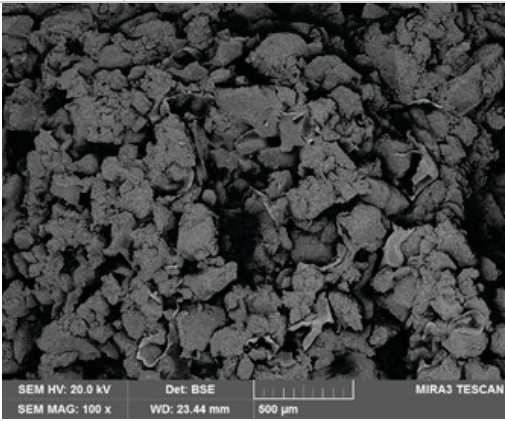
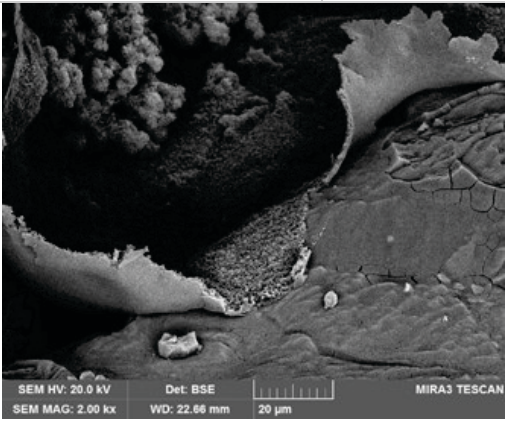
Skenovací elektronová mikroskopie s prvkovou mikroanalýzou (SEM-EDX) je moderní analytická metoda, která umožňuje detailní zobrazení povrchu materiálu pomocí svazku elektronů s vysokým rozlišením a hloubkou ostrosti. Ve spojení s energiově-disperzní rentgenovou spektroskopií (EDX) poskytuje zároveň možnost prvkové analýzy zvolených míst vzorku. Tato technika je vhodná pro studium mikrostruktury a chemického složení pevných materiálů, včetně identifikace pigmentů, korozních vrstev, nečistot či degradačních produktů. Díky své přesnosti a univerzálnímu využití nachází široké uplatnění v materiálovém výzkumu, ochraně kulturního dědictví i v technických oborech.

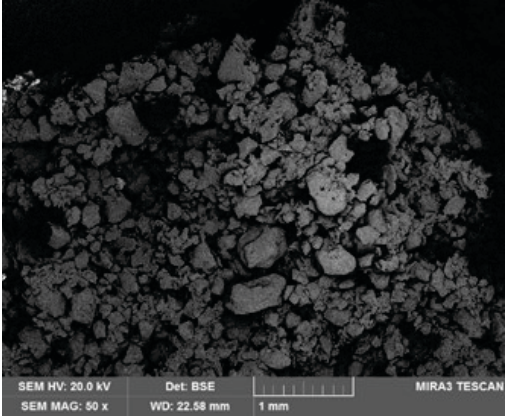
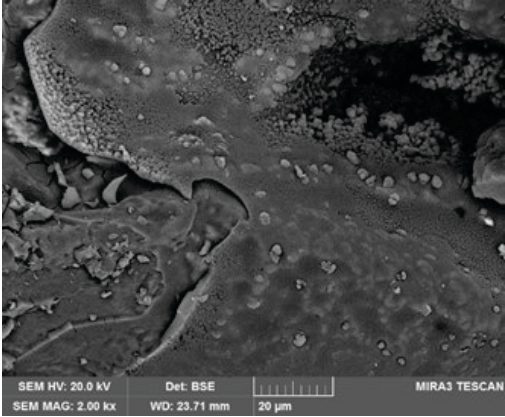
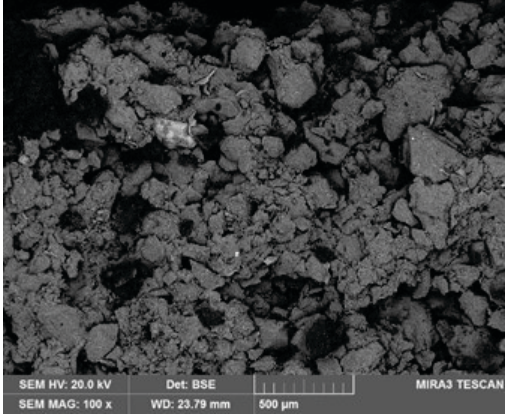
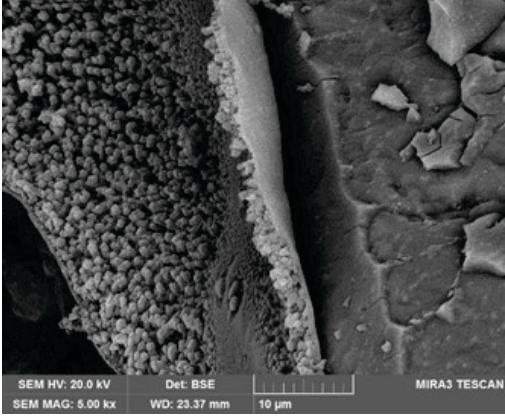
Vzorky na průzkum elektronovým mikroskopem byly odebrány od aplikační plochy do hloubky jednoho centimetru. Odběr probíhal vždy z jednoho vzorku ze sady a konsolidované vzorky byly porovnávány s referenčními nekonsolidovanými a referenčními, které byly konsolidovány za optimálních podmínek (suchý podklad a vlhkost 60–80 %). Před samotnou analýzou byly tyto úlomky vzorků naprášeny zlatem. Průzkum elektronovým mikroskopem provedl Ing. Karol Bayer z katedry chemicko-technologické Fakulty restaurování Univerzity Pardubice.

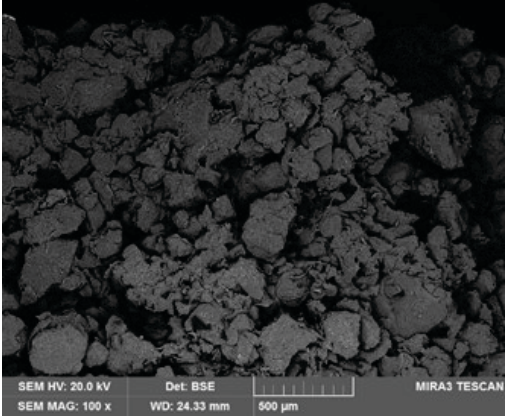
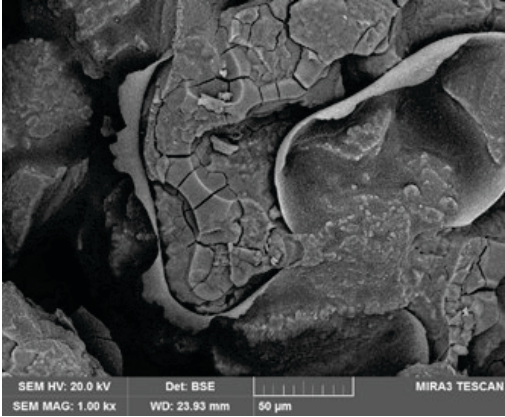
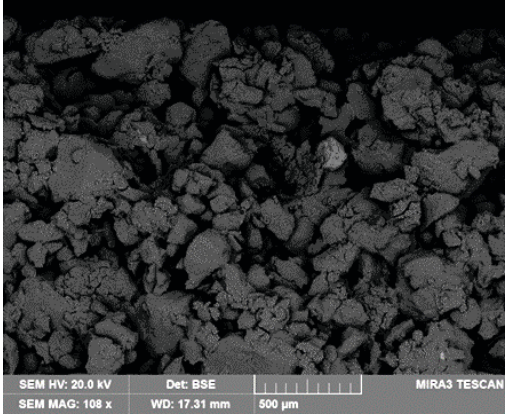
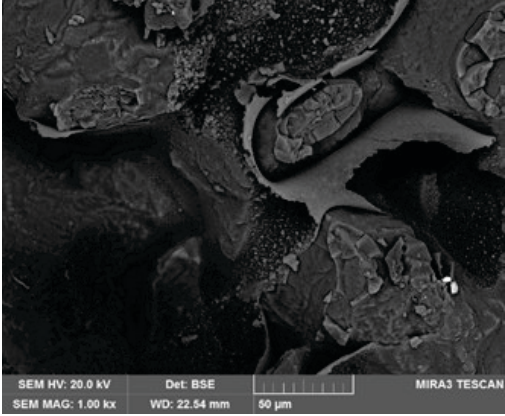
Výsledky:

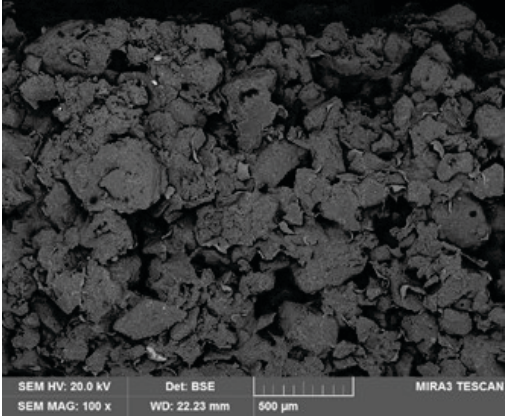
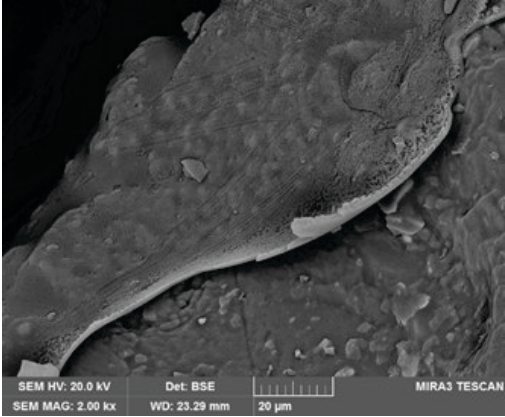
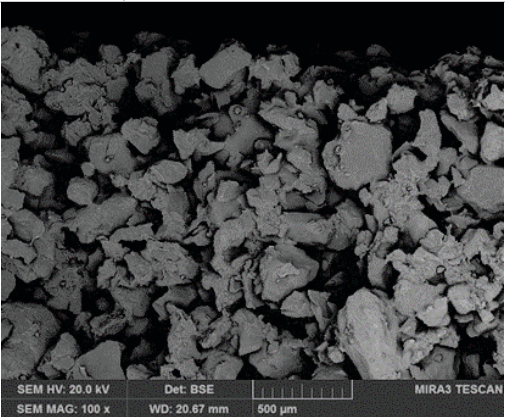
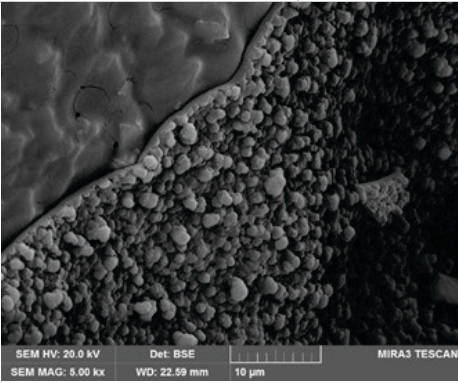
Měření dokázalo úspěšnou konsolidaci ve všech zkoumaných případech. Na žádném vzorku nebyl prokázán vznik přezpevněné vrstvy na povrchu. U vzorků s organokřemičitaný se ve všech případech projevila omezená adheze vzniklého gelu ke křemičitým zrnům. Vzniklý gel se odděloval od stěny pórů. Dá se předpokládat, že je to způsobeno přítomnou vlhkostí, která mohla fungovat jako částečná separace od stěn pórů. Tento jev se v menší míře podařilo eliminovat při vysoušení povrchu. Na popraskání vzniklého křemičitého gelu dle výsledků neměla přítomná vlhkost vliv a gel byl popraskaný minimálně.

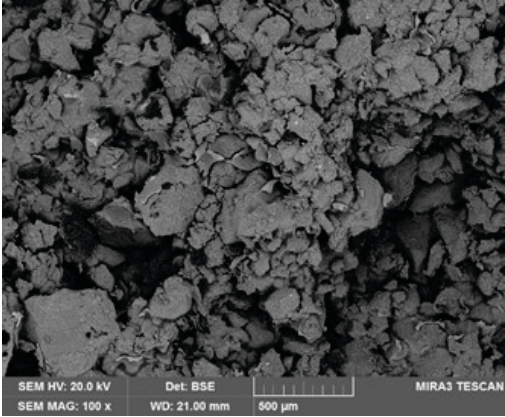
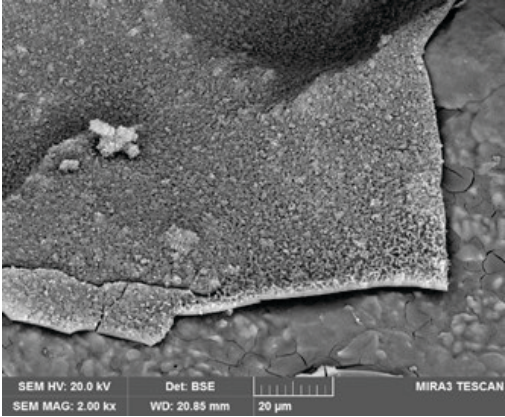
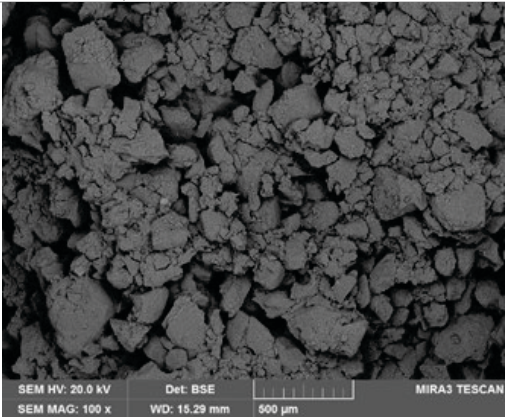
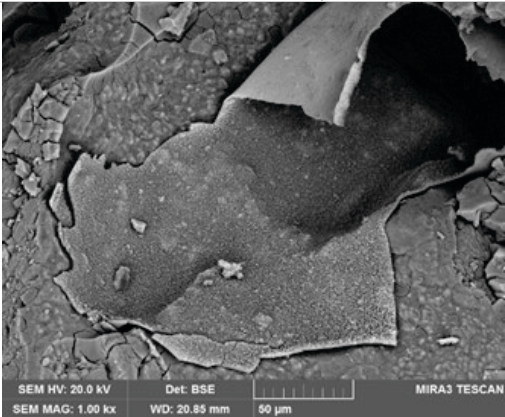
U konsolidantu Sebosil S jev spojený s odlupováním gelu od stěn pórů pozorován nebyl. Míra popraskání byla vyšší, než u organokřemičitanů ale současně byla na povrchu křemenných zrn zjištěna lepší adheze gelu vytvořeného z prostředku Sebosil S než v případě organokřemičitanů. Kvůli nízké koncentraci však byl jeho konsolidační efekt minimální.

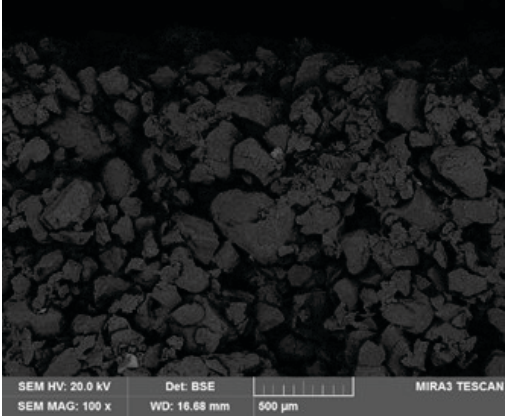
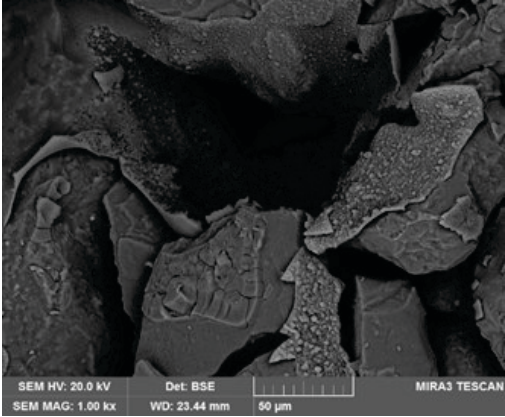
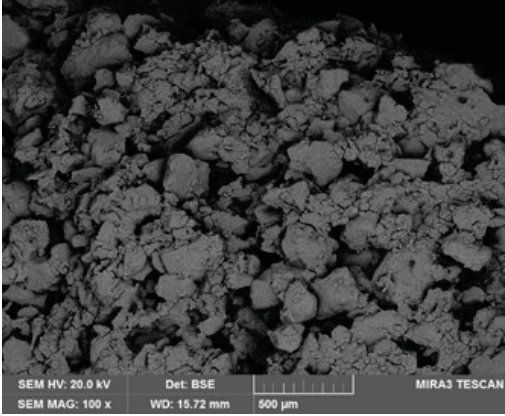
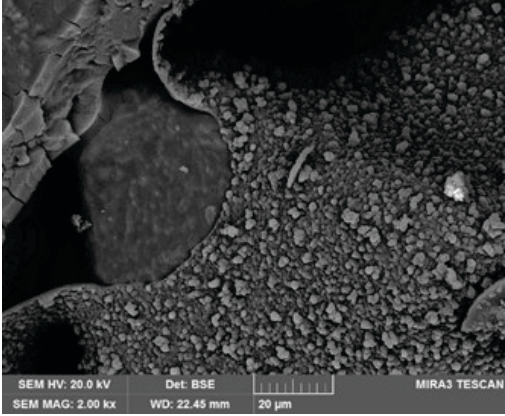
Vzorek	Konsolidant	Metoda vysoušení před kons.	Obsah H ₂ O
2	KSE 300	bez vysoušení	15 %
 <p>SEM HV: 20.0 kV Det: BSE MIRA3 TESCAN SEM MAG: 100 x WD: 22.58 mm 500 µm</p>		 <p>SEM HV: 20.0 kV Det: BSE MIRA3 TESCAN SEM MAG: 1.00 kx WD: 22.42 mm 50 µm</p>	
SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů		SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem	
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1-3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			
L8	KSE 300	Vysoušení lihem	15 %
 <p>SEM HV: 20.0 kV Det: BSE MIRA3 TESCAN SEM MAG: 100 x WD: 23.44 mm 500 µm</p>		 <p>SEM HV: 20.0 kV Det: BSE MIRA3 TESCAN SEM MAG: 2.00 kx WD: 22.66 mm 20 µm</p>	
SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů		SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem	
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na některých místech dochází k částečnému oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku částečně omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený, ale vyšší než v případě vzorku 2. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			

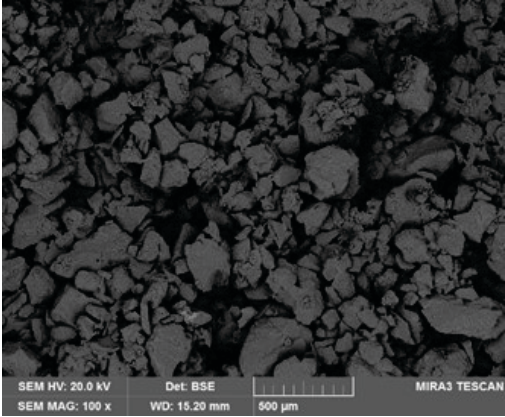
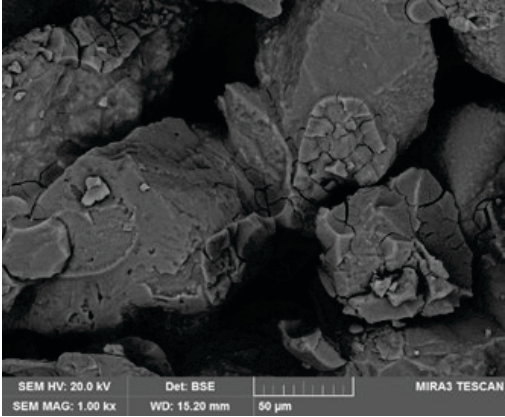
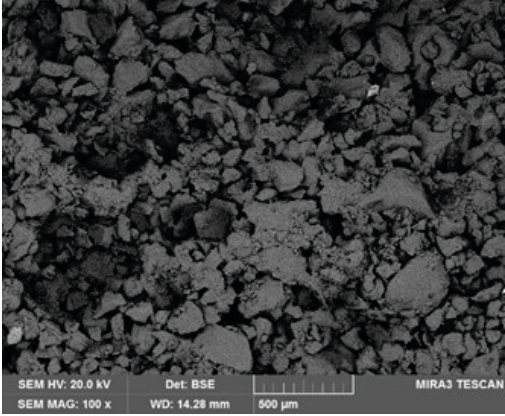
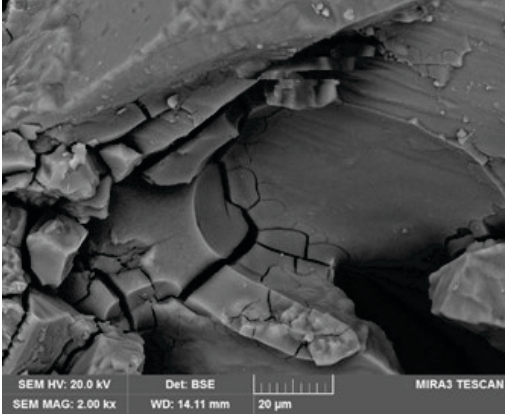
8	KSE 300	Vysoušení horkým vzduchem	15 %
 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 50 x Det: BSE WD: 22.58 mm MIRA3 TESCAN</p>	<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE WD: 23.71 mm MIRA3 TESCAN</p>	<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 μm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na některých místech dochází k částečnému oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku částečně omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený, ale vyšší než v případě vzorku 2. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			
11	KSE 300	Bez vysoušení	10 %
 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 100 x Det: BSE WD: 23.79 mm MIRA3 TESCAN</p>	<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 5.00 kx Det: BSE WD: 23.37 mm MIRA3 TESCAN</p>	<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 μm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			

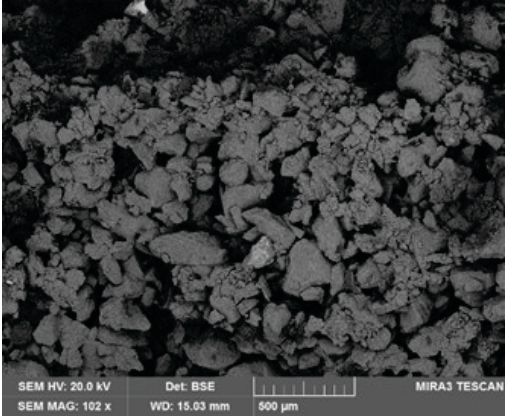
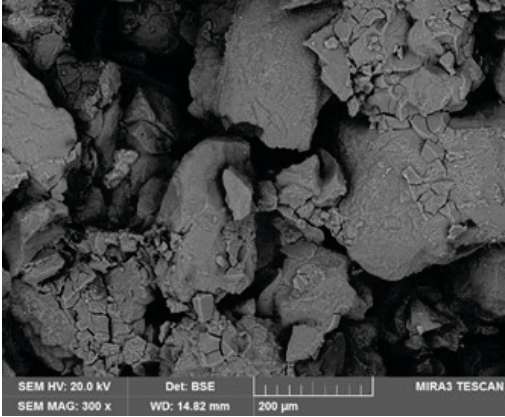
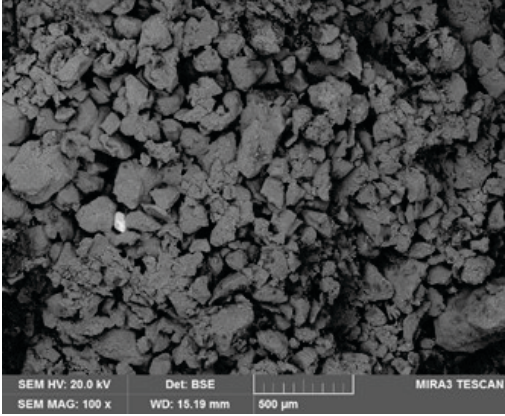
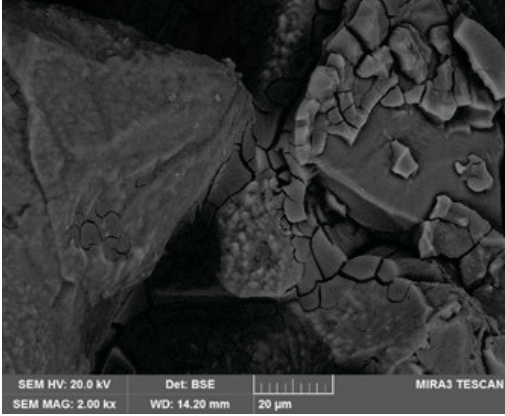
17	KSE 300	Vysoušení horkým vzduchem	10 %
 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 100 x Det: BSE WD: 24.33 mm 500 µm MIRA3 TESCAN</p>	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 1.00 kx Det: BSE WD: 23.93 mm 50 µm MIRA3 TESCAN</p>	SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů	SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na některých místech dochází k částečnému oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku částečně omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený, ale vyšší než v případě vzorku 2. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			
20	KSE 100	Bez vysoušení	15 %
 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 108 x Det: BSE WD: 17.31 mm 500 µm MIRA3 TESCAN</p>	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 1.00 kx Det: BSE WD: 22.54 mm 50 µm MIRA3 TESCAN</p>	SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů	SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			

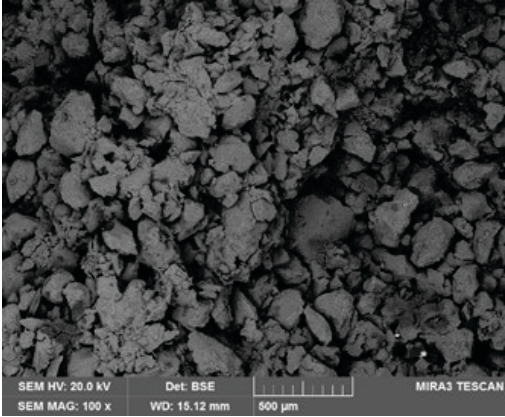
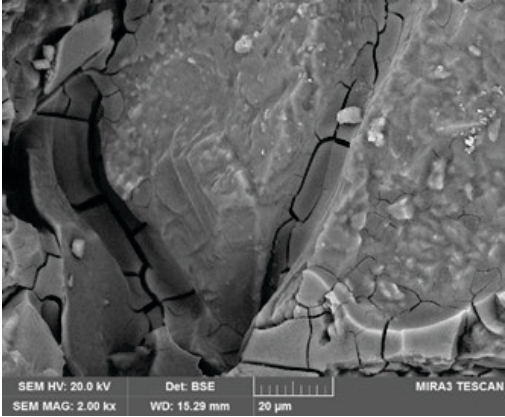
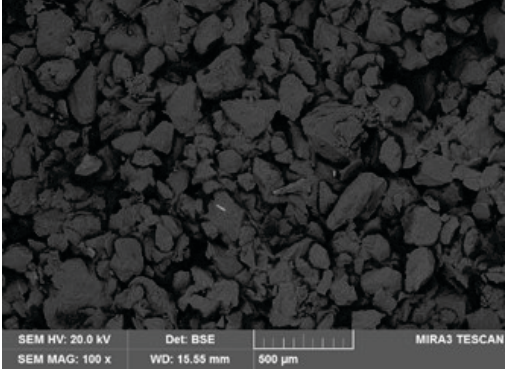
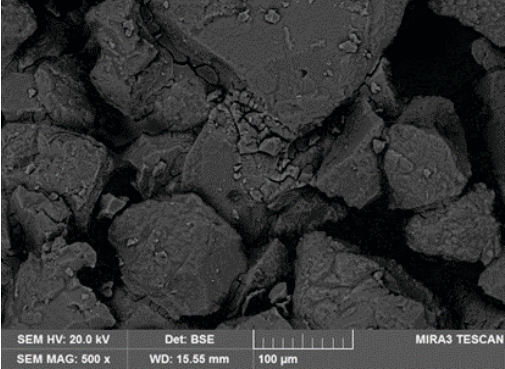
L2	KSE 100	Vysoušení lihem	15 %
		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			
24	KSE 100	Vysoušení lihem	15 %
		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>			

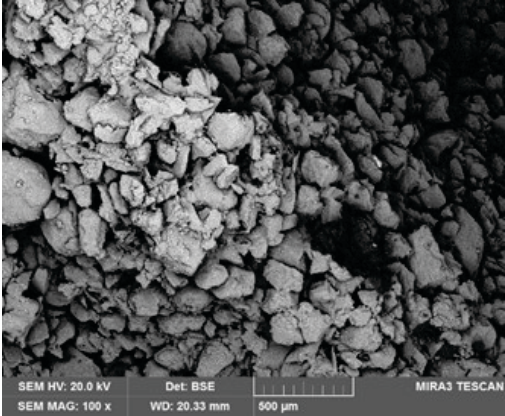
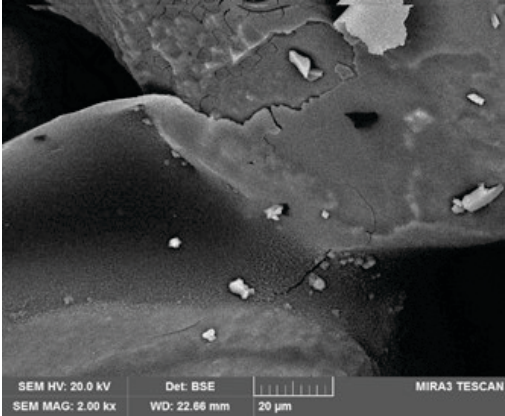
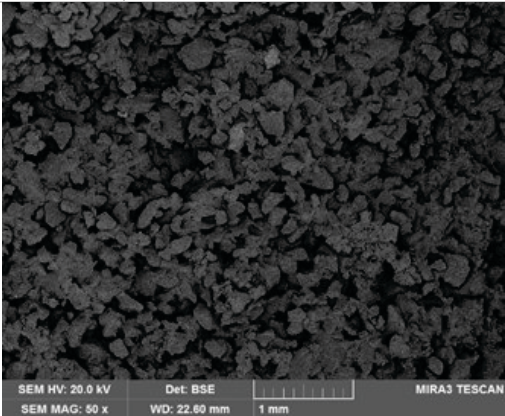
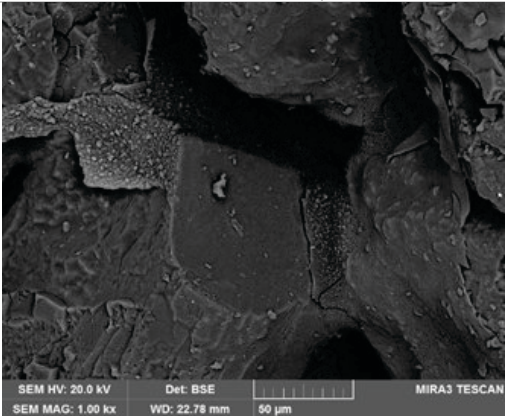
26	KSE 100	Vysoušení horkým vzduchem	15 %
 <p data-bbox="240 723 810 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	 <p data-bbox="834 723 1430 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	<p data-bbox="240 819 1430 1077">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>	
29	KSE 100	Bez vysoušení	10 %
 <p data-bbox="240 1568 810 1646">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	 <p data-bbox="834 1568 1430 1646">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	<p data-bbox="240 1664 1430 1921">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>	

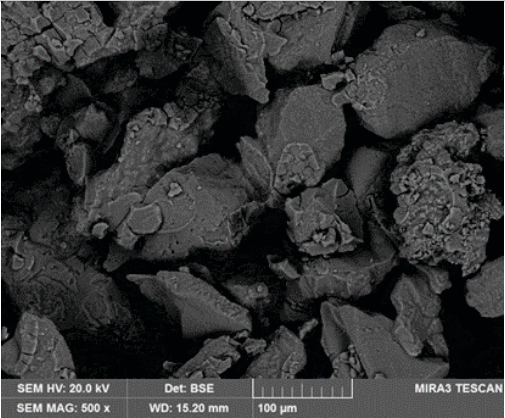
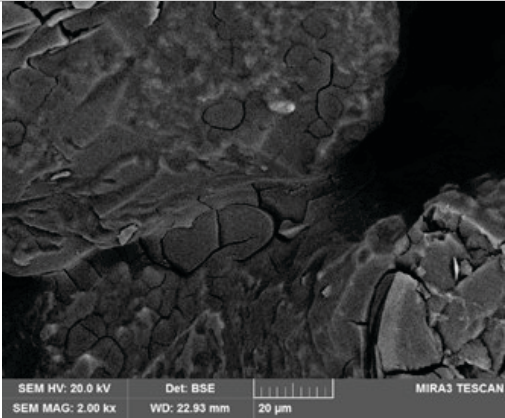
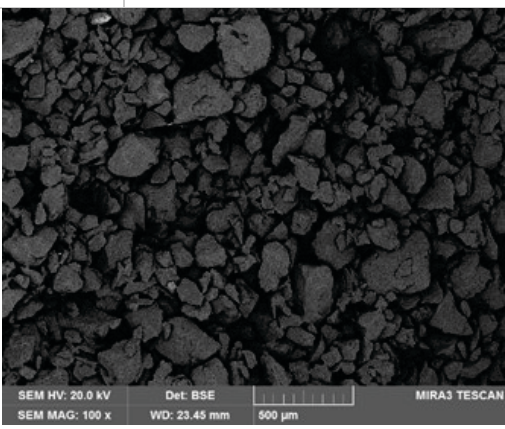
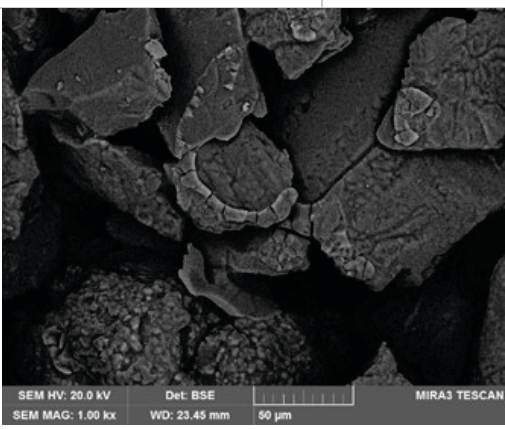
L5	KSE 100	Vysoušení lihem	10 %
 <p data-bbox="240 723 810 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	 <p data-bbox="834 723 1430 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	<p data-bbox="240 819 1430 1077">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na mnoha místech dochází k oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>	
35	KSE 100	Vysoušení horkým vzduchem	10 %
 <p data-bbox="240 1572 810 1650">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	 <p data-bbox="834 1572 1430 1650">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	<p data-bbox="240 1668 1430 1921">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Na některých místech dochází k částečnému oddělování gelu od stěny pórů nebo povrchu křemenných zrn. Lze proto usuzovat, že konsolidační efekt je v důsledku částečně omezené adheze gelu na povrchu křemenných zrn snížený, ale vyšší než u vzorků 20, L2, 24, 26, L5 a 29. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 8–10 mm.</p>	

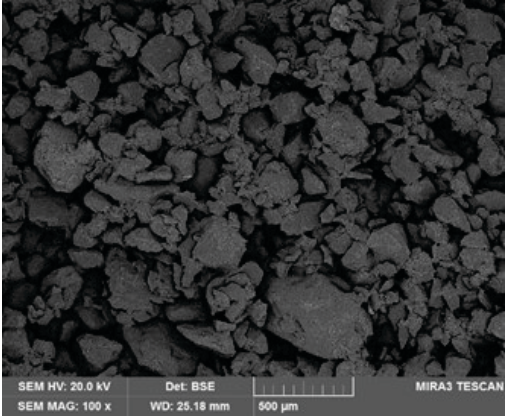
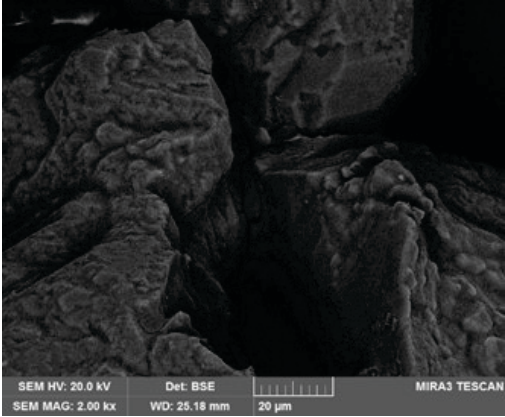
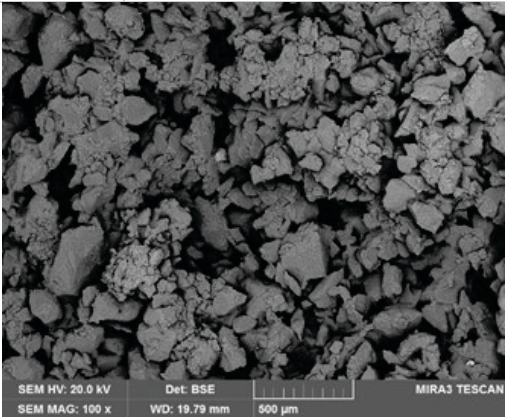
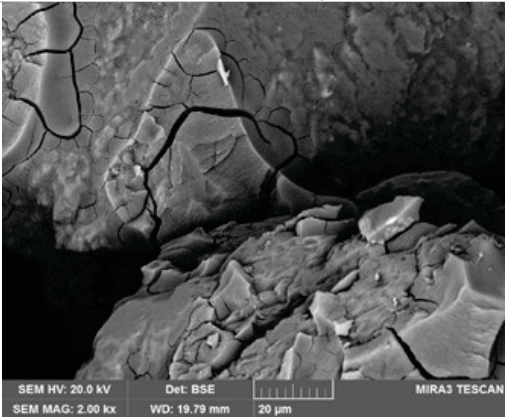
38	Sebosil S 5 %	Bez vysoušení	15 %
 <p data-bbox="240 723 810 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		 <p data-bbox="834 723 1430 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p data-bbox="229 813 1441 1093">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Gel je částečně popraskaný a je poměrně obtížné odlišit gel vzniklý z konsolidace pomocí křemičitého solu Sebosil S a gelu vzniklého z pojiva (Sioxal) při přípravě testovacích vzorků. Nově vzniklý gel vytváří gelové ostrůvky na povrchu pórů, resp. křemenných zrn a také propojení v místech kontaktu křemenných zrn. Oddělování gelu od povrchu křemenných zrn nebylo pozorováno. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 10 mm.</p>			
41	Sebosil S 5 %	Vysoušení lihem	15 %
 <p data-bbox="240 1572 810 1650">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		 <p data-bbox="834 1572 1430 1650">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p data-bbox="229 1662 1441 1928">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Gel je částečně popraskaný a je poměrně obtížné odlišit gel vzniklý z konsolidace pomocí křemičitého solu Sebosil S a gelu vzniklého z pojiva (Sioxal) při přípravě testovacích vzorků. Nově vzniklý gel vytváří gelové ostrůvky na povrchu pórů, resp. křemenných zrn a také propojení v místech kontaktu křemenných zrn. Oddělování gelu od povrchu křemenných zrn nebylo pozorováno. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 10 mm.</p>			

44	Sebosil S 5 %	Vysoušení horkým vzduchem	15 %
 <p data-bbox="240 723 810 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	<p data-bbox="240 817 1441 1081">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Gel je částečně popraskaný a je poměrně obtížné odlišit gel vzniklý z konsolidace pomocí křemičitého solu Sebosil S a gelu vzniklého z pojiva (Sioxal) při přípravě testovacích vzorků. Nově vzniklý gel vytváří gelové ostrůvky na povrchu pórů, resp. křemenných zrn a také propojení v místech kontaktu křemenných zrn. Oddělování gelu od povrchu křemenných zrn nebylo pozorováno. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 10 mm.</p>		 <p data-bbox="834 723 1430 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>
46	Sebosil S 5 %	Bez vysoušení	10 %
 <p data-bbox="240 1572 810 1650">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>	<p data-bbox="240 1666 1441 1930">Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Gel je částečně popraskaný a je poměrně obtížné odlišit gel vzniklý z konsolidace pomocí křemičitého solu Sebosil S a gelu vzniklého z pojiva (Sioxal) při přípravě testovacích vzorků. Nově vzniklý gel vytváří gelové ostrůvky na povrchu pórů, resp. křemenných zrn a také propojení v místech kontaktu křemenných zrn. Oddělování gelu od povrchu křemenných zrn nebylo pozorováno. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 10 mm.</p>		 <p data-bbox="834 1572 1430 1650">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>

49	Sebosil S 5 %	Vysoušení lihem	10 %
			
	<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel, vzniklý z konsolidačního prostředku, pokrývá stěny pórů nebo povrch křemenných zrn. Gel je částečně popraskaný a je poměrně obtížné odlišit gel vzniklý z konsolidace pomocí křemičitého solu Sebosil S a gelu vzniklého z pojiva (Sioxal) při přípravě testovacích vzorků. Nově vzniklý gel vytváří gelové ostrůvky na povrchu pórů, resp. křemenných zrn, a také propojení v místech kontaktu křemenných zrn. Oddělování gelu od povrchu křemenných zrn nebylo pozorováno. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 10 mm.</p>			
53	Sebosil S 5 %	Vysoušení horkým vzduchem	10 %
			
	<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Gel je částečně popraskaný a je poměrně obtížné odlišit gel vzniklý z konsolidace pomocí křemičitého solu Sebosil S a gelu vzniklého z pojiva (Sioxal) při přípravě testovacích vzorků. Nově vzniklý gel vytváří gelové ostrůvky na povrchu pórů, resp. křemenných zrn a také propojení v místech kontaktu křemenných zrn. Oddělování gelu od povrchu křemenných zrn nebylo pozorováno. Hloubka penetrace konsolidantu je nejméně 10 mm.</p>			

R2	KSE 100	Referenční	Suchý
	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 100 x Det: BSE WD: 20.33 mm 500 µm MIRA3 TESCAN</p>	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE WD: 22.66 mm 20 µm MIRA3 TESCAN</p>	
<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Lokálně se okraje gelu oddělují od povrchu křemenných zrn.</p>			
R5	KSE 300	Referenční	Suchý
	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 50 x Det: BSE WD: 22.60 mm 1 mm MIRA3 TESCAN</p>	 <p>SEM HV: 20.0 kV SEM MAG: 1.00 kx Det: BSE WD: 22.78 mm 50 µm MIRA3 TESCAN</p>	
<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, etail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Je poměrně tenký s tloušťkou ca 1–3 µm. Gel není popraskaný, resp. jsou viditelné jen ojedinělé praskliny. Lokálně se okraje gelu oddělují od povrchu křemenných zrn.</p>			

R11	Sebosil S 5 %	Referenční	Suchý
			
<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p>Vzorek je po konsolidaci vysoce pórovitý, nebyla zjištěna tvorba uzavřené, méně pórovité vrstvy. Křemičitý gel vzniklý z konsolidačního prostředku pokrývá stěny pórů, nebo povrch křemenných zrn. Gel je částečně popraskaný a je poměrně obtížné odlišit gel vzniklý z konsolidace pomocí křemičitého solu Sebosil S a gelu vzniklého z pojiva (Sioxal) při přípravě testovacích vzorků. Nově vzniklý gel vytváří gelové ostrůvky na povrchu pórů, resp. křemenných zrn a také propojení v místech kontaktu křemenných zrn.</p>			
R14	Nezpevněný	Referenční	15 %
			
<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		<p>SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p>Vzorek je vysoce pórovitý, použité pojivo na bázi křemičitého solu (Sioxal) vytváří propojení mezi zrny křemene v místech kontaktu jednotlivých zrn a lokálně pokrývá povrch křemenných zrn. Gel je popraskaný.</p>			

R18	Nezpevněný	Referenční	10 %
 <p data-bbox="240 723 810 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		 <p data-bbox="834 723 1431 801">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p data-bbox="240 819 1431 893">Vzorek je vysoce pórovitý, použité pojivo na bázi křemičitého solu (Sioxal) vytváří propojení mezi zrnky křemene v místech kontaktu jednotlivých zrn a lokálně pokrývá povrch křemenných zrn. Gel je popraskaný.</p>			
R20	Nezpevněný	Referenční	Suchý
 <p data-bbox="240 1391 810 1469">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů</p>		 <p data-bbox="834 1391 1431 1469">SEM-EDS, lomová plocha, detektor zpětně odražených elektronů, detail s vytvořeným křemičitým gelem</p>	
<p data-bbox="240 1480 1431 1554">Vzorek je vysoce pórovitý, použité pojivo na bázi křemičitého solu (Sioxal) vytváří propojení mezi zrnky křemene v místech kontaktu jednotlivých zrn a lokálně pokrývá povrch křemenných zrn. Gel je popraskaný.</p>			

4.11 Kolorimetrie⁵⁵

V rámci hodnocení změn barevnosti a optických vlastností povrchů byla využita kolorimetrická metoda založená na výpočtu barevného rozdílu ΔE (Delta E). Tento rozdíl vyjadřuje míru odlišnosti mezi dvěma barevnými vjemy a vychází z měření v barvovém prostoru CIELAB (L^* , a^* , b^*), který je mezinárodně uznávaným standardem pro popis barev v trojrozměrném prostoru.

K měření optických změn – konkrétně změn barevnosti a výskytu bílého zákalu – byl použit spektrofotometr Konica Minolta CM-2600d, který umožňuje přesné stanovení barevného odstínu a základních optických vlastností různých typů materiálů. Tento přístroj pracuje na principu měření odraženého světla a výsledné údaje zaznamenává v kolorimetrickém systému CIELAB.

Pro každý měřený bod byla provedena tři jednotlivá měření, jejichž výsledky byly automaticky zprůměrovány, aby se minimalizoval vliv náhodných odchylek a zlepšila opakovatelnost výsledků.

Naměřené hodnoty jsou zaznamenávány jako trojice souřadnic:

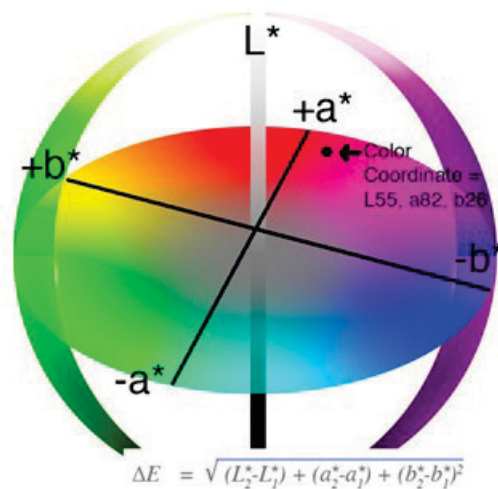
L^* – vyjadřuje světlost vzorku, přičemž hodnota 0 odpovídá černé a 100 bílé.

a^* – reprezentuje osu mezi zelenou ($-a^*$) a červenou ($+a^*$).

b^* – popisuje osu mezi modrou ($-b^*$) a žlutou ($+b^*$).

Barevný odstín je určen úhlem ve stupních v rovině a^*/b^* , přičemž výchozí hodnota 0° leží na kladné ose a^* (červená). Směr 90° odpovídá žluté (kladná osa b^*), 180° zelené ($-a^*$) a 270° modré ($-b^*$).

Sytost barvy (chroma, C^*) je definována jako vzdálenost bodu od počátku roviny a^*/b^* a udává intenzitu barvy.



Obr. TH 16 $L^* a^* b^*$ souřadnice (zdroj: <https://www.optixs.cz/mereni-a-porovnavani-barev/>)

⁵⁵ SAPUSEK, Shelby. Dissecting Delta E and the Mathematical Difference Between Colors. ColorBase, 2024 [cit. 2025-07-08]. Dostupné z: <https://colorbase.com/blog-dissecting-delta-e-and-the-mathematical-difference-between-colors/>

ZMEŠKAL O., ČEPPAN M., DZIK P. Barevné prostory a správa barev. 2002, dostupné z: http://imagesci.fch.vut.cz/download/stud06_rozn02.pdf

Měření:

Před zahájením měření bylo nezbytné všechny vzorky důkladně vysušit, aby nedošlo ke zkreslení výsledků vlivem rozdílného obsahu vlhkosti. Následně byl z každé testovací sady vybrán jeden vzorek, na kterém byla provedena měření ve třech různých bodech v oblasti aplikace konsolidantu. Pro každý bod byla provedena tři po sobě jdoucí měření, jejichž hodnoty byly zprůměrovány. Na závěr byl vypočten celkový průměr ze tří měřených bodů, a to samostatně pro každý hodnocený vzorek.

Hodnoty barevných změn byly porovnávány s referenčními hodnotami naměřenými na standardním (neconsolidovaném) vzorku, který sloužil jako výchozí cílová hodnota (target). Na základě kolorimetrických údajů v systému CIELAB, byl následně vypočten celkový barevný rozdíl (ΔE^*).

Výpočet ΔE^* vychází z rozdílů jednotlivých souřadnic následovně:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}.$$

kde:

- L^*_1 a L^*_2 reprezentují míru světlosti na vzorcích před a po konsolidaci
- a^*_1 a a^*_2 vyjadřují změnu na ose červená – zelená na vzorcích před a po konsolidaci
- b^*_1 a b^*_2 popisují změnu na ose žlutá – modrá na vzorcích před a po konsolidaci

V rámci této studie byly do tabulek a grafů zaznamenány hodnoty celkové barevné difference (ΔE^*) a také změny světlosti (ΔL^*), která udává posun barevnosti na ose černá – bílá, tedy informuje o míře zesvětlení nebo ztmavnutí povrchu. Výpočet ΔE^* umožňuje kvantifikovat rozdíl mezi dvěma barevnými stavy vzorku, čímž poskytuje objektivní hodnocení vlivu použitého zásahu na barevné vlastnosti sledovaného materiálu.

Pro snadnější orientaci ve výsledcích byla přejata tabulka Tab. TH 22.⁵⁶

ΔE^*	Rozdíl	ΔE^*	Rozdíl
0,0–0,2	Nepostřehnutelný		
0,2–0,5	Velmi slabý	0,2–1,0	Postřehnutelný
0,5–1,5	Slabý	1,0–2,0	Rozeznatelný
1,5–3,0	Jasně postřehnutelný	2,0–4,0	Ještě nerušící
3,0–6,0	Střední	4,0–8,0	Mírně rušící
6,0–12,0	Výrazný		
12,0–16,0	Velmi výrazný		
> 16,0	Rušící		

Tab. TH 22 Přehled rozdílů ve změně barevnosti

Samostatně lze vzorky porovnávat i podle jednotlivých hodnot:

- $\Delta L^* > 0$ vzorek je světlejší (a naopak)
- $\Delta a^* > 0$ vzorek je červenější (a naopak zelenější)
- $\Delta b^* > 0$ vzorek je žlutější (a naopak modřejší)
- $\Delta C^*_{ab} > 0$ vzorek je sytější – více chromatický

Výsledky:

Analýza ukázala v několika případech světlejší povrch vůči referenčnímu vzorku. A to konkrétně u konsolidantu KSE 300 při 15 % obsahu vlhkosti a 10 % vlhkosti při vysoušení povrchu horkým vzduchem. Tmavnutí povrchu bylo nejvíce znatelné u porovnávacího vzorku s KSE 300 na suchém podkladu a při 10 % vlhkosti s vysoušením povrchu lihem. U KSE 100 se výraznější změny projeví pouze u 10 % obsahu vlhkosti bez vysoušení kdy byl povrch slabě tmavší.

U Sebosilu S se změna světlosti povrchu projevila nejméně a výraznější byla jen při 10 % vlhkosti a vysoušení povrchu horkým vzduchem, kdy byl povrch slabě světlejší.

Výsledky celkového barevného odstínu a jejich změny byly rozeznatelné hlavně při použití organokřemičitanu KSE 300 a to ve 4 z 6 zkoumaných vzorků. Porovnávací vzorek, kdy byl konsolidant KSE 300 aplikován na suchý podklad jevil mírně rušící efekt.

⁵⁶ ZMEŠKAL O., ČEPPAN M., DZIK P. Barevné prostory a správa barev. 2002, dostupné z: http://imagesci.fch.vut.cz/download/stud06_rozn02.pdf

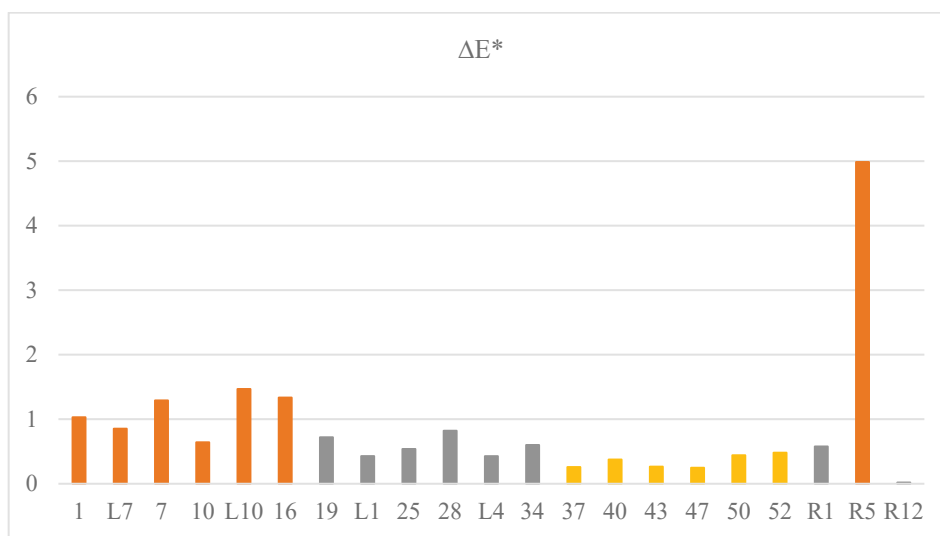
Postřehnutelné barevné změny pak vykazoval konsolidant KSE 100 ve všech případech. Sebosil S vykazoval nejmenší barevné změny, a to velmi slabé.

Vzorek	Konsolidant, vlhkost vzorku a metoda vysoušení	L*	a*	b*
1	KSE 300 15 % H ₂ O – B	0,9167	0,0800	0,4633
L7	KSE 300 15 % H ₂ O – L	-0,2567	0,0267	0,8133
7	KSE 300 15 % H ₂ O – HV	-0,5600	0,1267	1,1567
10	KSE 300 10 % H ₂ O – B	-0,0667	0,0500	0,6367
L10	KSE 300 10 % H ₂ O – L	-0,8133	0,1733	-1,2100
16	KSE 300 10 % H ₂ O – HV	1,2933	0,0433	0,3300
19	KSE 100 15 % H ₂ O – B	-0,1333	0,0767	0,7033
L1	KSE 100 15 % H ₂ O – L	0,0900	0,0400	0,4167
25	KSE 100 15 % H ₂ O – HV	-0,1167	0,0500	0,5233
28	KSE 100 10 % H ₂ O – B	-0,5333	0,0767	0,6200
L4	KSE 100 10 % H ₂ O – L	0,2167	0,0600	0,3633
34	KSE 100 10 % H ₂ O – HV	-0,0433	0,0500	0,5967
37	Sebosil S 15 % H ₂ O – B	0,1900	0,0233	0,1733
40	Sebosil S 15 % H ₂ O – L	0,3733	0,0100	-0,0333
43	Sebosil S 15 % H ₂ O – HV	0,2567	0,0167	0,0633
47	Sebosil S 10 % H ₂ O – B	0,2033	0,0200	0,1400
50	Sebosil S 10 % H ₂ O – L	0,4267	-0,0233	0,1100
52	Sebosil S 10 % H ₂ O – HV	0,4700	0,0033	0,1033
R1	Referenční vzorek KSE 100 0 % H ₂ O	-0,2133	0,0067	0,5367
R5	Referenční vzorek KSE 300 0 % H ₂ O	-4,6867	0,3400	1,6700
R12	Referenční vzorek Sebosil S 0 % H ₂ O	0,0133	0,0067	0,0100

Tab. TH 23 Porovnání jednotlivých hodnot ve změně barevnosti, zejména hodnoty L* která indikuje změny ve světlosti povrchu

Vzorek	Konsolidant, vlhkost vzorku a metoda vysoušení	ΔE^*
1	KSE 300 15 % H ₂ O – bez vysoušení	1,03
L7	KSE 300 15 % H ₂ O – vysoušení pomocí lihu	0,85
7	KSE 300 15 % H ₂ O – vysoušení horkým vzduchem	1,29
10	KSE 300 10 % H ₂ O – bez vysoušení	0,64
L10	KSE 300 10 % H ₂ O – vysoušení lihem	1,47
16	KSE 300 10 % H ₂ O – vysoušení horkým vzduchem	1,34
19	KSE 100 15 % H ₂ O – bez vysoušení	0,72
L1	KSE 100 15 % H ₂ O – vysoušení lihem	0,43
25	KSE 100 15 % H ₂ O – vysoušení horkým vzduchem	0,54
28	KSE 100 10 % H ₂ O – bez vysoušení	0,82
L4	KSE 100 10 % H ₂ O – vysoušení lihem	0,43
34	KSE 100 10 % H ₂ O – vysoušení horkým vzduchem	0,60
37	Sebosil S 15 % H ₂ O – bez vysoušení	0,26
40	Sebosil S 15 % H ₂ O – vysoušení lihem	0,38
43	Sebosil S 15 % H ₂ O – vysoušení horkým vzduchem	0,26
47	Sebosil S 10 % H ₂ O – bez vysoušení	0,25
50	Sebosil S 10 % H ₂ O – vysoušení lihem	0,44
52	Sebosil S 10 % H ₂ O – vysoušení horkým vzduchem	0,48
R1	Referenční vzorek KSE 100 0 % H ₂ O	0,58
R5	Referenční vzorek KSE 300 0 % H ₂ O	4,99
R12	Referenční vzorek Sebosil S 0 % H ₂ O	0,02

Tab. TH 24 Výsledky celkové barevné difference jednotlivých hodnocených vzorků



Graf TH 13 Grafické znázornění celkové barevné difference jednotlivých vzorků

5 Vyhodnocení experimentu a závěr

5.1 Vyhodnocení pozorování a průzkumů na Braunově Betlémě

V současné době stávající péče o Braunův Betlém spočívá v pravidelném šetrném odstranění biologických povlaků, mechů a lišejníků a následným postřikem denaturovaného ethanolu pro co nejlepší eliminaci všech biologických zbytků (2x do roka).

Z nasbíraných dat v rámci této diplomové práce vyplývá, že úroveň vlhkosti zkoumaných reliéfů zůstává po většinu roku natolik vysoká (nad 10 %), že znemožňuje použití standardních konsolidačních metod. Vyplývá to jak z dat měření povrchové vlhkosti kapacitním vlhkoměrem, tak také z gravimetrického stanovení obsahu vlhkosti z odebrané vrtné moučky. Výsledky ukazují, že s narůstající hloubkou dochází k výraznému nárůstu vlhkosti materiálu, hlavně v hloubce 3 a 4 centimetrů od povrchu. Vzhledem ke zjištěnému vlhkostnímu gradientu, který stoupá směrem do hloubky kamene lze předpokládat, že zdrojem vlhkosti není pouze nárazová srážková vlhkost, ale i dlouhodobá vlhkost hlouběji v kameni, případně vztlínání vody z okolního terénu.

Současně s vlhkostí byla na několika místech zjištěna poměrně výrazná eroze povrchu pískovce, která se projevuje zejména oslabením koheze zrn křemene a pískovatěním povrchu, což představuje riziko brzkého a nenávratného poškození detailů modelace. Pravděpodobných příčin postupné eroze povrchu pískovce může být několik např. důsledky předcházejícího osídlení nižšími rostlinami (řasy, lišejníky, mechy), cyklické zamrzání vody v porézním systému v zimním období nebo i případný negativní vliv síranů, které byly detekovány v povrchu i v hloubce 3 a 4 centimetrů. Tyto výsledky přímo korelují s vyšší hygroskopickou nasákavostí ve stejné hloubce (3 a 4 cm). Je možné předpokládat, že hygroskopická solí může částečně přispívat ke zvýšenému obsahu vlhkosti v pískovci.

5.2 Vyhodnocení testování konsolidantů při zvýšeném obsahu vlhkosti v materiálu

Prováděné testování prokázalo ve většině případů účinnost konsolidantů, zejména z hlediska zlepšení soudržnosti testovacích tělísek po jejich aplikaci. Výjimku tvořil prostředek Levasil CC301 v koncentraci 5 %, u kterého nebylo pozorováno vytvrzení (na Petriho miskách) ani po uplynutí 10 týdnů. Z tohoto důvodu byl tento produkt před zahájením hlavní fáze testování vyřazen.

Výsledky testování vytvrzených gelů ostatních testovaných konsolidantů v Petriho miskách odhalily výrazné zakalení organokřemičitanů při zvýšené relativní vlhkosti vzduchu.

U produktu Sebosil S gely na Petriho miskách vykazovaly minimální změny v prostředí s vysokou relativní vlhkostí ve srovnání s prostředím s běžnou relativní vlhkostí vzduchu.

Nejrovnoměrnější penetraci do hloubky i pevnostní gradient vykazoval prostředek Sebosil S. Naopak u konsolidantů KSE 300 a KSE 100 se hloubka penetrace výrazně lišila v závislosti na způsobu aplikace. Nejlepší penetrační efekt byl pozorován v případě použití konsolidantu KSE 100 na vzorcích s vlhkostí 10 %, kdy se ve všech případech podařilo téměř kompletně zabarvit celou zkoumanou plochu.

Obecně lze konstatovat, že při vyšším obsahu vlhkosti v materiálu (15 %) vykazovaly všechny testované prostředky horší hloubku penetrace ve srovnání se vzorky s nižším obsahem vlhkosti (10 %), což přirozeně odpovídá nižšímu procentuálnímu zaplnění pórů vodou.

Ultrazvuková měření prokázala zvýšení rychlosti šíření longitudálního ultrazvukového vlnění u většiny testovaných konsolidantů. Nejrovnoměrnější efekt v rámci hloubkového profilu byl pozorován u prostředku Sebosil S v koncentraci 5 %, kde je pokles rychlosti směrem do hloubky prakticky nepatrný. Současně je rozdíl v rychlosti šíření longitudálního ultrazvukového vlnění před a po konsolidaci tímto prostředkem velmi malý, a proto lze předpokládat, že míra zpevnění je nízká. V případě konsolidantu KSE 300 je pokles rychlosti šíření longitudálního ultrazvukového vlnění dobře viditelné, ovšem tento pokles je kontinuální, bez indikace výrazně zpevněného povrchu. U prostředku KSE 100 bylo zaznamenáno výrazné zvýšení rychlosti šíření UZ v hloubce 2 cm ve dvou případech (u vzorků s 15% vlhkostí bez úpravy a s aplikací lihu). Toto zrychlení však s větší hloubkou opět sláblo.

Při odporovém vrtání vykazovaly křivky všech vzorků rovnoměrný průběh. Výjimku tvořily porovnávací „suché“ vzorky konsolidované prostředky KSE 300 (3/3) a Sebosil S (1/3), u nichž byla pozorována vyšší míra zpevnění povrchu, následovaná poklesem hodnot v hloubce. Průměrné hodnoty síly odporu ve většině případů odpovídaly výsledkům měření ultrazvukové transmise. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pomocí prostředek KSE 300, zatímco nejhorších pomocí prostředku Sebosil S o koncentraci 5 %. Konsolidant KSE 100 se hodnotově pohyboval mezi zbývajícími dvěma prostředky, s výjimkou porovnávacích vzorků a vzorků s 10% vlhkostí (bez předchozího ošetření), kde vykazoval horší výsledky než Sebosil S 5 %.

Výsledky měření pomocí ultrazvukové transmise a odporového vrtání docela dobře korelují. Zároveň se ukázalo, že míra zpevnění je logicky závislá od celkového finálního množství konsolidantu (v tomto případě křemičitého gelu) v zpevňovaném materiálu.

Kolorimetrická měření a srovnání barevné odchylky ukázala, že u všech testovaných prostředků, lze změnu barevnosti po konsolidaci vlhkých testovacích tělísek hodnotit jako

velmi slabou až slabou. Mírně větší rozdíly byly zaznamenány v případě prostředku KSE 300, ale i v tomto případě je možné předpokládat, že změny jsou lidským zrakem viditelné jen nepatrně nebo vůbec.

Studium mikrostruktury pomocí rastrovací elektronové mikroskopie ukázalo zajímavý jev, který zatím nebyl pozorován, resp. publikován v dostupné literatuře. V případě použití konsolidantů na bázi esterů kyseliny křemičité bylo prokázáno oddělování nebo částečné oddělování vzniklého křemičitého gelu od povrchu křemenných zrn, což indikuje zhoršení adheze gelu a tím i účinnosti konsolidace zejména u tělísek s vyšším obsahem vlhkosti. U Sebosilu S tento jev nebyl pozorován.

U žádného z testovaných konsolidantů nebyly zaznamenány známky přezpevnění povrchu a výsledky všech měření z hlediska míry zpevnění obecně korelují s obsahem účinných látek v jednotlivých konsolidantech.

Efekt vysušování povrchu vzorků byl znatelný ve většině případů. Hlavně na konsolidaci pomocí prostředku KSE 300 měly obě metody velmi příznivý efekt. V zásadě se dá říct, že díky snížení vlhkosti se podařilo do materiálu aplikovat více konsolidantu a efekt byl tím pádem větší. Avšak i přes snahu vysušení vzorků, se nepovedlo snížit naplněnost pórů testovacích tělísek natolik, aby byl výsledný efekt konsolidace bližší porovnávacím vzorkům.

5.3 Závěr

Při testování se nepotvrdilo riziko přezpevnění povrchu materiálu při konsolidaci za vyššího obsahu vlhkosti v kameni. Nejlepších výsledků v míře zpevnění dosáhly prostředky na bázi organokřemičitanů, což lze částečně přičíst jejich vyššímu obsahu účinných látek. Při elektronové mikroskopii se však ukázalo, že tyto látky se kvůli vyššímu obsahu vlhkosti v materiálu, nedokážou plně navázat na stěny pórů a odlupují se. Na tento jev nemělo žádný vliv, zda byl vzorek před aplikací vysušován či nikoliv. Dále také tyto konsolidanty vykazovaly větší barevné změny po zpevnění. Riziko barevných změn se potvrdilo i na základě optického porovnání gelů vzniklých na Petriho miskách, kde došlo k mléčnému zabarvení organokřemičitých gelů.

Pro budoucí testování v této oblasti, se jako velmi slibný ukázal prostředek Sebosil S, který ve většině případů přispěl ke zlepšení kohezivních vlastností materiálu, i když menší kvůli použití slabé koncentrace. Povrch nebyl přezpevněný a hloubka penetrace byla vyhovující, zejména v případě povrchové konsolidace. Vytvořený gel dobře přilnul ke stěnám pórů a vykazoval minimální změny barevnosti.

Otázky dalších výzkumů:

V rámci dalšího výzkumu se nabízí možnost opakované aplikace Sebosilu S a ověření, zda postupné aplikace přispějí k budování pevnostního profilu materiálu či nikoliv. Další variantou je testování tohoto prostředku při vyšších koncentracích (10 %, 15 %) a případná kombinovaná aplikace, tzn. například postupné nanášení nejprve nízké, a následně vyšší koncentrace. V neposlední řadě je nutno se také zaměřit na stárnutí konsolidantu ve zpevněném zavlhčeném materiálu a jeho snášenlivost vůči střídání teplot a obsahu vlhkosti.

Výsledky dosavadního testování rovněž vyvolávají otázky ohledně efektivity vysoušení povrchu, které se ukázalo jako vcelku účinné. Je však nezbytné zjistit, zda by tento přístup bylo možné aplikovat na větší objekty.

6 Seznam literatury

6.1 Literatura

BAYER, Karol. *Přednášky k výuce předmětu: Technologie restaurování*. Univerzita Pardubice. Fakulta restaurování. Litomyšl, 2019-2024

BEČKOVÁ, Eliška. *Analýza pro stanovení obsahu vlhkosti, hygroskopicity a přítomnosti vodorozpustných solí z reliéfu Klanění Pastýřů v Braunově Betlémě*. [rukopis] Fakulta restaurování Univerzita Pardubice, 2024.

CLIFTON, James R. *Stone consolidating materials: a status report*. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980.

DELGADO RODRIGUES, J. *Stone consolidation: research and practice*. 2010.

ĎOUBAL, Jakub. *Kamenné památky Kutné Hory: restaurování a péče o sochařská díla*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-905-0.

DRDÁCKÝ, Miloš a SLÍŽKOVÁ, Zuzana. Zpevňování omítek vápennou vodou. In: DRDÁCKÝ, Miloš; SLÍŽKOVÁ, Zuzana a VALACH, Jaroslav. *Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i., Centrum excelence Telč, 2015, s. 171-186. ISBN 978-80-86246-43-7.

HALDA, J.; KOTLÍK, P.; ŠTAFEN, Z. Biologické napadení kamene soch a reliéfů v Novém lese u Kuksu a možnosti jeho potlačení. *Zprávy památkové péče*, 2013, 73: 536-542.

KAŠE, Jiří a KOTLÍK, Petr. *Braunův Betlém: drama krajiny a umění v proměnách času*. Praha: Paseka, 1999. ISBN 80-7185-233-3.

KAŠE, Jiří a NOVOTNÝ, Jiří a ŠTAFEN, Zdeněk. Proměny a stav reliéfu Klanění pastýřů a Příjezdu Tří králů v Novém lese u Kuksu. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 387–397. ISSN 1210-5538.

KOTLIK, P.; HEIDINGSFELD, V. Monitoring of stone sculptures and reliefs in Bethlehem near Kuks (Eastern Bohemia, Czech Republic). *Understanding and managing stone decay*, 2002, 285-293.

KOTLIK, P.; HEIDINGSFELD, V. Monitoring of stone sculptures and reliefs in Bethlehem near Kuks (Eastern Bohemia). *ACTA-UNIVERSITATIS CAROLINAE GEOLOGICA*, 2001, 1: 17-18.

KOTLÍK, Petr a ŠKRDLANTOVÁ, Markéta. Chemické možnosti zpevnění a povrchové ochrany kamene. In: *Ošetření kamene v památkové péči: odborný seminář*. Praha: STOP – Společnost pro technologie ochrany památek, 1999, s. 25-32.

KOTLIK, Petr, et al. The rescue of M. Braun's sculptures in the area of Betlém near Kuks (CZ): a case study on sandstone deterioration in the frame of an international project. In: *8th= eighth international congress on deterioration and conservation of stone, Berlin, 30 Sept.-4 Oct. 1996: proceedings*. 1996. p. 955-967.

KOTLÍK, Petr. Ekologický způsob biocidní ochrany kamenných památek. Online. *Projekt Vybrané památkové postupy pro zkvalitnění péče o sochařské a stavební památky DF11P01OVV027*. Roč. 2016, s. 1-4. Dostupné z: <https://projekty.upce.cz/sites/default/files/groups/admins/luva3059/pam-postup-04-zprava.pdf>. [cit. 2025-07-29].

KOTLÍK, Petr. *Konsolidanty kamene – historie a současnost*. In: HEČKOVÁ, Petra, HORÁK, Petr, MACHAČKO, Luboš, eds. *Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví: sborník z konference*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, s. 187. ISBN 978-80-7395-594-6.

KOTLÍK, Petr. Možnosti biocidní ochrany souboru kamenných sochařských děl v Novém lese u Kuksu. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 396–401. ISSN 1210-5538.

KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů: materiály, koroze, sanace*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-347-9

KOUTNÍK, Petr; ANTOŠ, Petr; HÁJKOVÁ, Pavlína; MARTINEC, Petr; ANTOŠOVÁ, Barbora et al. *Dekorační kameny Čech, Moravy a Slezska*. Vydání: první. V Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, Fakulta životního prostředí, 2015. ISBN 978-80-7414-974-0.

MROVĚC, Vojtěch. *Porovnání konsolidantů na bázi křemičitých solí pro konsolidaci vápenných omítek; restaurování části nástěnné malby "Obrácení sv. Augustina" v kostele sv. Lamberta v Subenu (Rakousko)*. Online, diplomová práce. Univerzita Pardubice, 2024-10-13T16:26:57Z. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/10195/84374>. [cit. 2025-01-14].

NEJEDLÝ, Vratislav. Braunův „Betlém“ – kamenosochařské dílo v přírodě a problematika jeho recepcce a restaurování. *Zprávy památkové péče*. Roč. 76, č. 4 (2016), s. 407–416. ISSN 1210-5538.

PETEROVÁ, Ing. Adéla; KOTLÍK, doc. Ing. Petr, CSc. *Vliv relativní vlhkosti na vlastnosti křemičitého gelu*. Praha: Ústav chemické technologie restaurování památek, VŠCHT Praha, 2014, s. 129-134. In: Muzea, památky a konzervace 2014. Studie vznikla v rámci projektu č. DF11P01OVV012, který se zaměřuje na nové materiály a technologie pro konzervaci materiálů památkových objektů a preventivní památkovou péči. Tento projekt je součástí programu Ministerstva kultury NAKI.

PETRÁNEK, Jan; BŘEZINA, Jiří; BŘÍZOVÁ, Eva; CHÁB, Jan; LOUN, Jan et al. *Encyklopedie geologie*. Praha: Česká geologická služba, 2016. ISBN 978-80-7075-901-1.

RYBAŘÍK, Václav. *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Hořice v Podkrkonoší: Nadace střední průmyslové školy kamenické a sochařské, 1994

SEIDELMANNOVÁ, Julie. *Nanovláknenné struktury z biopolymerů jako pH sensory*. Online. Bakalářská práce. Brno: Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. 2018. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/pft9h/>.

SIEGESMUND, Siegfried; SNETHLAGE, Rolf (ed.). *Stone in architecture: properties durability*. Springer Science & Business Media, 2011.

SOMMEROVÁ, Anna. *Měření vlhkosti pískovce: Laboratorní a terénní techniky*. 2014.

ŠTAFFEN, Zdeněk. *Geologické a úložné poměry skalního masivu Kuks – Nový les (Betlém)* 2014

ŠTAFFEN, Zdeněk. *Petrografické vyhodnocení: Petrografické vyhodnocení vzorků hornin z objektu Betlému v Kuksu*. 2012,2013,2014.

TEPLÝ, Bohumil. *Konzervování a restaurování kamene*. Hořice v Podkrkonoší: Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské, 1997. ISBN 80-238-0893-1.

THORN, Andrew. Lithium silicate consolidation of wet stone and plaster. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. 2012. p. 00-10.

TŘESOHLAVÁ, Magdalena. *Srovnání tradičních a moderních konsolidačních prostředků pro zpevňování barevné vrstvy nástěnné malby*. Online, bakalářská práce. Univerzita Pardubice, 2007-09-30T12:03:29Z. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/17401>. [cit. 2025-01-14].

WASSERBAUER, Richard. Biokoroze stavebních a dekoračních kamenů. In: *Ošetření kamene v památkové péči: odborný seminář*. Praha: STOP – Společnost pro technologie ochrany památek, 1999, s. 19-24.

WHEELER, George. *Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2005. Research in conservation (Unnumbered). ISBN 08-923-6815-2.

ZELINGER, Jiří; ŠIMŮNKOVÁ, Eva a KOTLÍK, Petr. *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. Praha: Academia, 1982.

ZÍTKOVÁ, Petra. *Restaurování sádrové plastiky Havíře ze sbírek Českého muzea stříbra v Kutné Hoře; Možnosti konsolidace sádry a fixace barevných vrstev na sádrovém podkladu*. Online, diplomová práce. Univerzita Pardubice, 2016-08-02T10:50:29Z. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10195/64992>. [cit. 2025-01-14].

ZMEŠKAL O., ČEPPAN M., DZIK P. Barevné prostory a správa barev. 2002, dostupné z: http://imagesci.fch.vut.cz/download/stud06_rozn02.pdf

ZORNOZA-INDART, Ainara; LOPEZ-ARCE, Paula. Silica nanoparticles (SiO₂): Influence of relative humidity in stone consolidation. *Journal of Cultural Heritage*, 2016, 18: 258-270.

6.2 Internetové zdroje

Česká křídlová pánev. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cesk%C3%A1_k%C5%99%C3%ADdov%C3%A1_p%C3%A1nev. [cit. 2025-08-04].

Kallies Feinchemie AG. (2017). TECHNISCHES MERKBLATT: *Steinverfestiger SEBOSIL S*. [online] Dostupné z: http://www.feinchemie.de/media/download_gallery/Technisches%20Merkblatt_SEBOSIL_S.pdf [cit. 2025-01-13].

LT seznam – Sudan Black, prášek. Online. LT seznam. Dostupné z: <https://www.krimi-ltsezam.cz/cs/sudan-black-prasek/>. [cit. 2025-01-13].

Portál ČHMÚ. Online. Archiv týdenních zpráv. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/informace-a-sluzby/tydenni-vyhodnoceni>. [cit. 2025-01-12].

Remmers. „KSE modul systém.“. Online. Remmers. Dostupné z: <https://www.remmers.cz/cs/ochrana-a-obnova-pamatek/kse-modul-system/c/c6386>. [cit. 2025-01-13].

SAPUSEK, Shelby. Dissecting Delta E and the Mathematical Difference Between Colors. ColorBase, 2024 [cit. 2025-07-08]. Dostupné z: <https://colorbase.com/blog-dissecting-delta-e-and-the-mathematical-difference-between-colors/>

7 Seznam obrázků použitých v textu

Obr. TH 1 Základní klasifikace pískovců – podle prof. Jana Petránka	17
Obr. TH 2 Biologický povlak na reliéfu Klanění pastýřů (2021).....	27
Obr. TH 3 Zákresy míst odběru vzorků na výjevu Klanění pastýřů pro petrologickou analýzu (2012 - KB1,2,4,5,6,7,8, 2013 - KB12/1-4)	29
Obr. TH 4 Zákresy míst odběru vzorků na výjevu Příchod tří králů pro petrologickou analýzu (2014 – KB – A, B, C).....	29
Obr. TH 5 Zákresy míst odběru vzorků na výjevu sv. Huberta pro petrologickou analýzu (2013 – KB 12/3)	29
Obr. PR 6 Výbrus vzorku KB-C (2014) struktura křemenných, nedokonale opracovaných úlomků tmelených silicifikací (foto: Z. Štaffen)	30
Obr. TH 7 Postup při dusání vzorků.....	42
Obr. TH 8 Pomůcky při dusání vzorků	42
Obr. TH 9 Vydusané vzorky	43
Obr. TH 10 Zavlhčování vzorku metodou 2	43
Obr. TH 11 Postup aplikace konsolidantu.....	44
Obr. TH 12 Postup aplikace konsolidantu se smočením povrchu lihem před konsolidací	45
Obr. TH 13 Postup aplikace konsolidantu s předsušením povrchu horkým vzduchem	45
Obr. TH 14 Vzorky v hermeticky uzavřené nádobě.....	46
Obr. TH 15 Místa měření UZ transmise na vzorcích	49
Obr. TH 16 L* a* b* souřadnice (zdroj: https://www.optixs.cz/mereni-a-porovnavani-barev)	75
Obr. TH 17 Zákresy míst měření na výjevu Klanění pastýřů.....	93
Obr. TH 18 Zákresy míst měření na výjevu Příchodu tří králů.....	95
Obr. TH 19 Zákresy míst měření na výjevu sv. Huberta.....	97
Obr. TH 20 Zákresy míst měření uvnitř jeskyně	99
Obr. TH 21 Poloha hydrometeorologických stanic v královéhradeckém kraji vůči Braunovu Betlému.....	100

8 Seznam tabulek použitých v textu

Tab. TH 1 Porovnání nasákavosti pískovců v okolí Braunova Betléma.....	31
Tab. TH 2 Vyhodnocení hloubkového profilu vlhkosti	33
Tab. TH 3 Výsledky stanovení obsahu vodorozpustných solí	34
Tab. TH 4 Výsledky hygroskopické nasákavosti	34
Tab. TH 5 Zrnitostní rozsah použitých písků.....	41
Tab. TH 6 Poměr směsi použité k dusání vzorků.....	41
Tab. TH 7 Výsledky vizuálního posouzení vzniklých gelů na Petriho miskách.....	47
Tab. TH 8 Srovnání vzniklých gelů na Petriho miskách.....	48
Tab. TH 9 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise porovnávacích suchých vzorků.....	49
Tab. TH 10 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu.....	51
Tab. TH 11 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s aplikací lihu	51
Tab. TH 12 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s vysoušením povrchu horkým vzduchem	52
Tab. TH 13 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, bez úpravy povrchu.....	53
Tab. TH 14 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s aplikací lihu	54
Tab. TH 15 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s vysoušením povrchu horkým vzduchem	54
Tab. TH 16 Průměrné výsledky odporu při vrtání, konsolidované porovnávacích vzorky.....	55
Tab. TH 17 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 15 % obsahem vlhkosti	56
Tab. TH 18 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 10 % obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu.....	57
Tab. TH 19 Zhodnocení hloubky penetrace jednotlivých konsolidantů	60
Tab. TH 20 Zhodnocení hloubky penetrace na porovnávacích vzorcích (bez obsahu vlhkosti)	60
Tab. TH 21 Zhodnocení hloubky penetrace jednotlivých konsolidantů	61
Tab. TH 22 Přehled rozdílů ve změně barevnosti	77
Tab. TH 23 Porovnání jednotlivých hodnot ve změně barevnosti, zejména hodnoty L* která indikuje změny ve světlosti povrchu	78

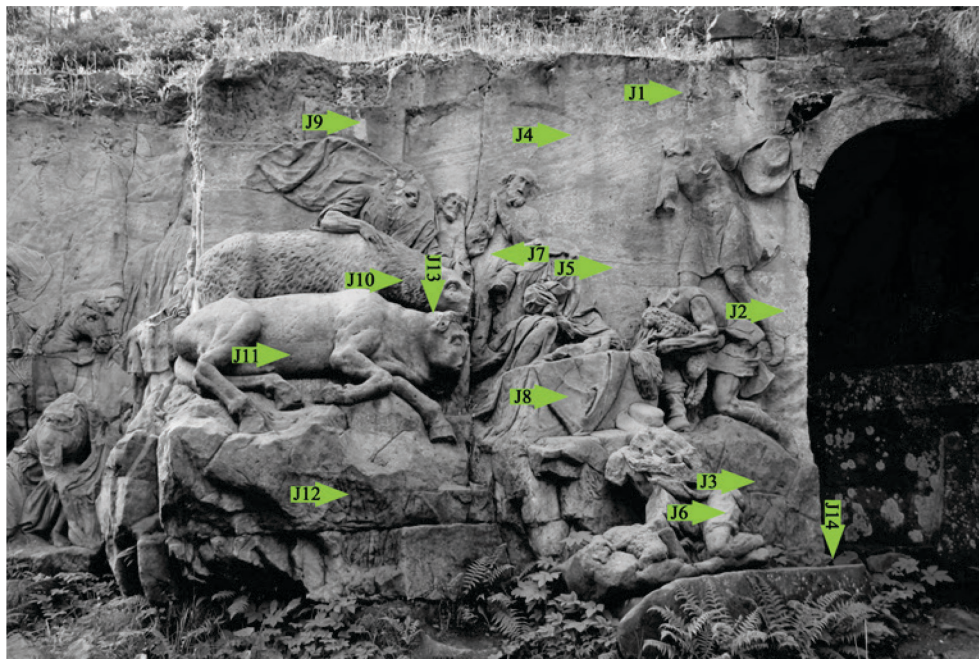
Tab. TH 24 Výsledky celkové barevné diference jednotlivých hodnocených vzorků.....	79
Tab. TH 25 Výsledky měření na výjevu Klanění pastýřů	93
Tab. TH 26 Výsledky měření na výjevu Příchodu tří králů	95
Tab. TH 27 Výsledky měření na výjevu sv. Huberta	97
Tab. TH 28 Výsledky měření uvnitř jeskyně	99
Tab. TH 29 Týdenní úhrn srážek.....	101
Tab. TH 30 Týdenní průměr teploty.....	102

9 Seznam grafů použitých v textu

Graf TH 1 Průměrné hodnoty měření z výjevu Klanění pastýřů za jednotlivé dny	32
Graf TH 2 Vyhodnocení hloubkového profilu vlhkosti	33
Graf TH 3 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise porovnávacích suchých vzorků.....	50
Graf TH 4 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu.....	51
Graf TH 5 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s aplikací lihu	52
Graf TH 6 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 15% obsahem vlhkosti s vysoušením povrchu horkým vzduchem	52
Graf TH 7 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, bez úpravy povrchu.....	53
Graf TH 8 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s aplikací lihu	54
Graf TH 9 Průměrné výsledky ultrazvukové transmise, vzorky s 10% obsahem vlhkosti, s vysoušením povrchu horkým vzduchem	55
Graf TH 10 Průměrné výsledky odporu při vrtání, konsolidované porovnávacích vzorky	56
Graf TH 11 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 15 % obsahem vlhkosti	57
Graf TH 12 Průměrné výsledky odporu při vrtání, vzorky s 10 % obsahem vlhkosti bez úpravy povrchu.....	58
Graf TH 13 Grafické znázornění celkové barevné diference jednotlivých vzorků.....	79
Graf TH 14 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Klanění pastýřů J1-J7.....	94
Graf TH 15 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Klanění pastýřů J8-J14.....	94
Graf TH 16 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Příchodu tří králů V1-V5	96
Graf TH 17 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Příchodu tří králů V6-V10	96
Graf TH 18 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu sv. Huberta H1-H9	98
Graf TH 19 Výsledky měření povrchové vlhkosti uvnitř jeskyně S1 a S2	99
Graf TH 20 Týdenní úhrn srážek.....	103
Graf TH 21 Týdenní průměr teploty.....	103

10 Příloha: Podrobné výsledky měření povrchové vlhkosti na Braunově Betlémě v Novém lese u Kuksu

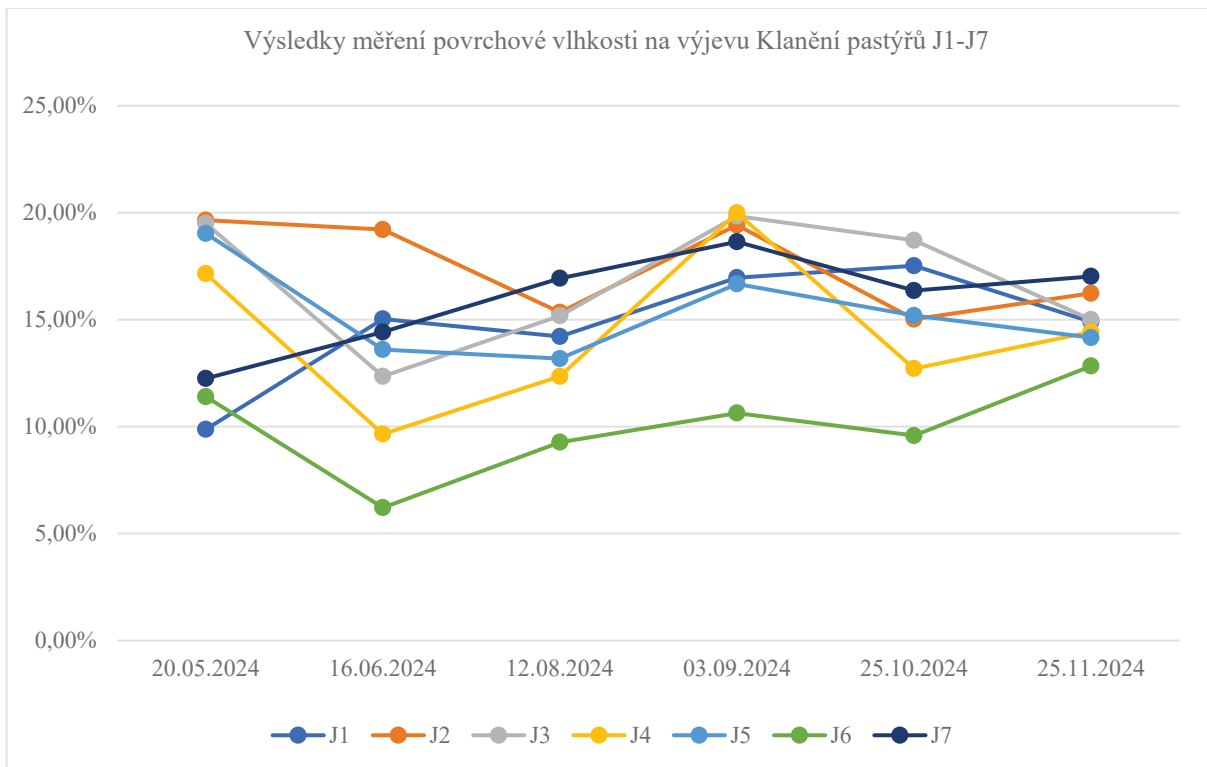
Měření na výjevu Klanění pastýřů



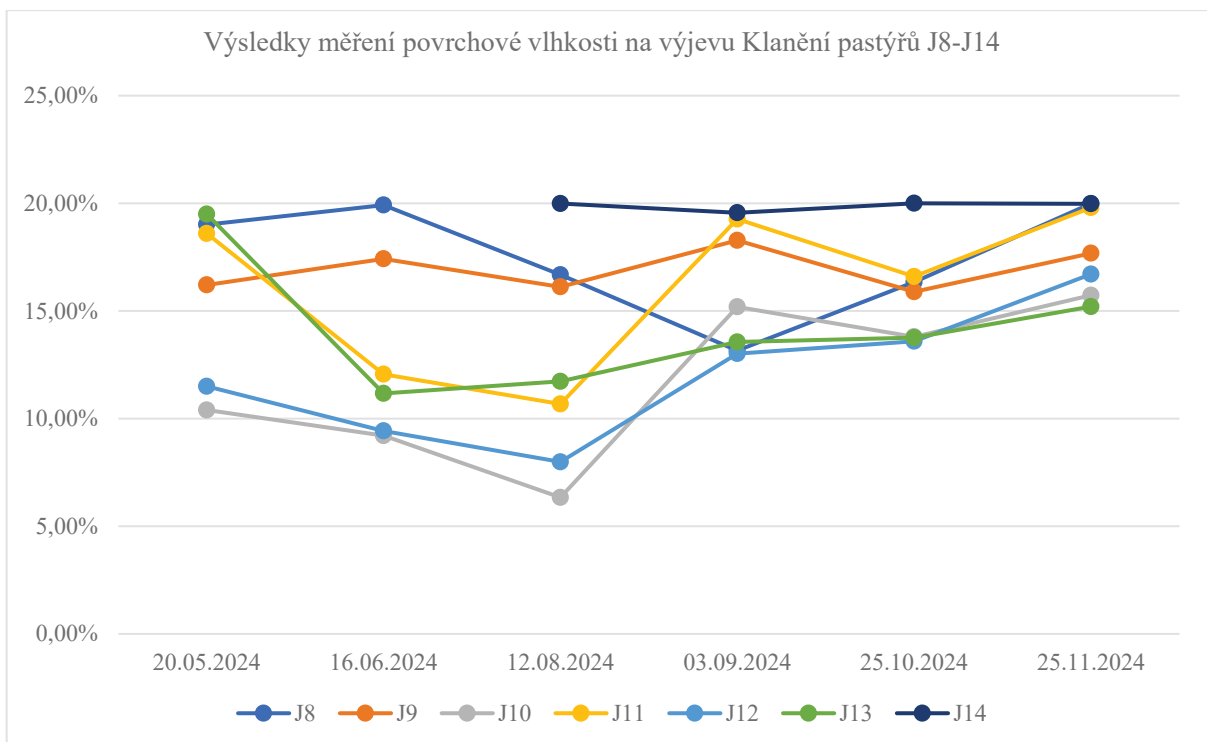
Obr. TH 17 Zákresy míst měření na výjevu Klanění pastýřů

	20.05.2024	16.06.2024	12.08.2024	03.09.2024	25.10.2024	25.11.2024
J1	9,87 %	15,03 %	14,21 %	16,96 %	17,52 %	14,90 %
J2	19,65 %	19,21 %	15,34 %	19,42 %	15,02 %	16,23 %
J3	19,50 %	12,35 %	15,18 %	19,84 %	18,71 %	15,00 %
J4	17,15 %	9,65 %	12,35 %	19,99 %	12,71 %	14,43 %
J5	19,03 %	13,60 %	13,18 %	16,67 %	15,19 %	14,16 %
J6	11,40 %	6,21 %	9,27 %	10,63 %	9,58 %	12,83 %
J7	12,25 %	14,42 %	16,93 %	18,64 %	16,36 %	17,02 %
J8	19,01 %	19,92 %	16,68 %	13,16 %	16,34 %	19,99 %
J9	16,21 %	17,42 %	16,12 %	18,28 %	15,89 %	17,68 %
J10	10,40 %	9,21 %	6,34 %	15,19 %	13,80 %	15,73 %
J11	18,60 %	12,06 %	10,68 %	19,27 %	16,60 %	19,80 %
J12	11,50 %	9,43 %	7,99 %	13,02 %	13,59 %	16,71 %
J13	19,50 %	11,17 %	11,73 %	13,56 %	13,76 %	15,20 %
J14	–	–	19,99 %	19,56 %	20,00 %	19,98 %

Tab. TH 25 Výsledky měření na výjevu Klanění pastýřů

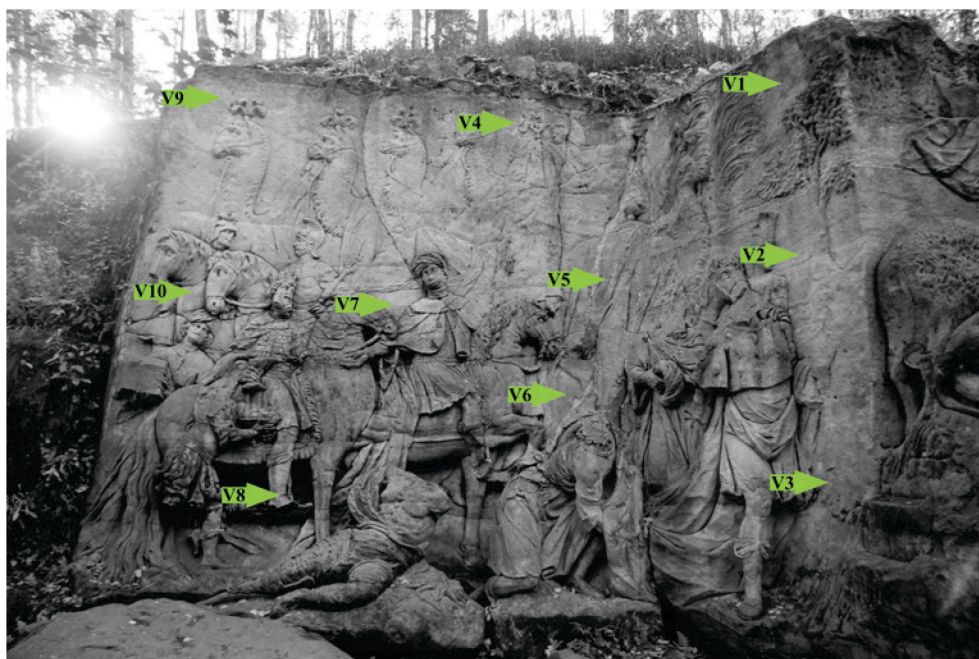


Graf TH 14 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Klanění pastýřů J1-J7



Graf TH 15 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Klanění pastýřů J8-J14

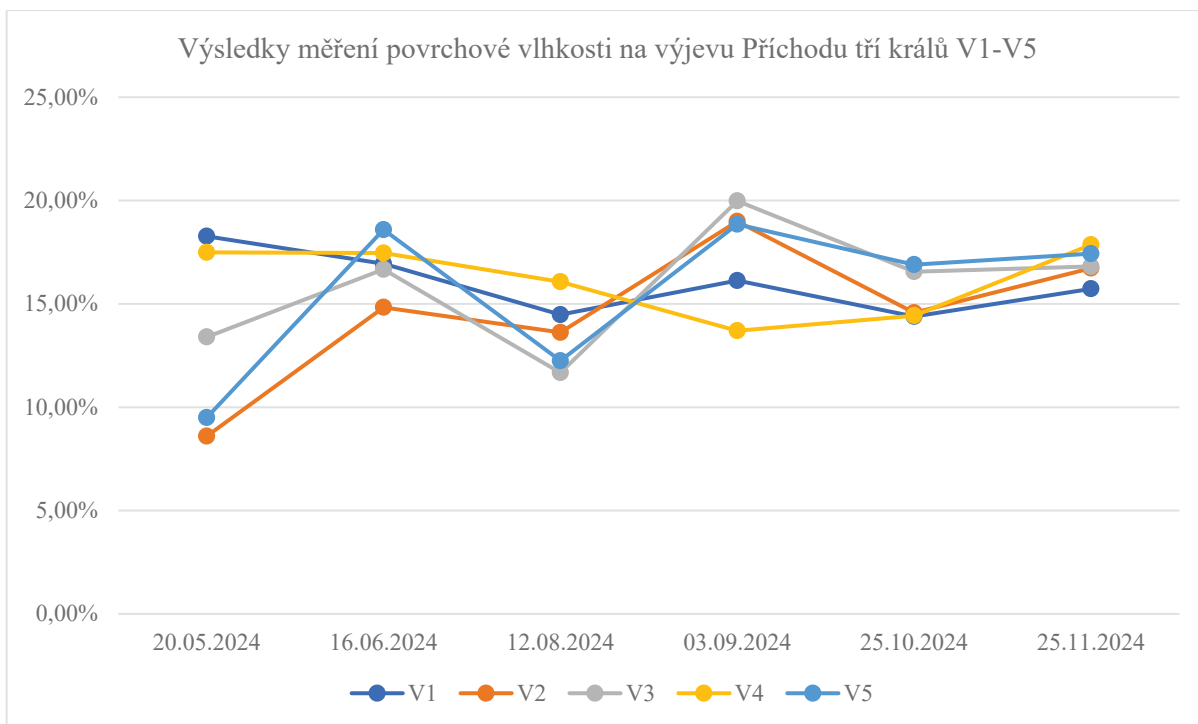
Měření na výjevu Příchodu tří králů



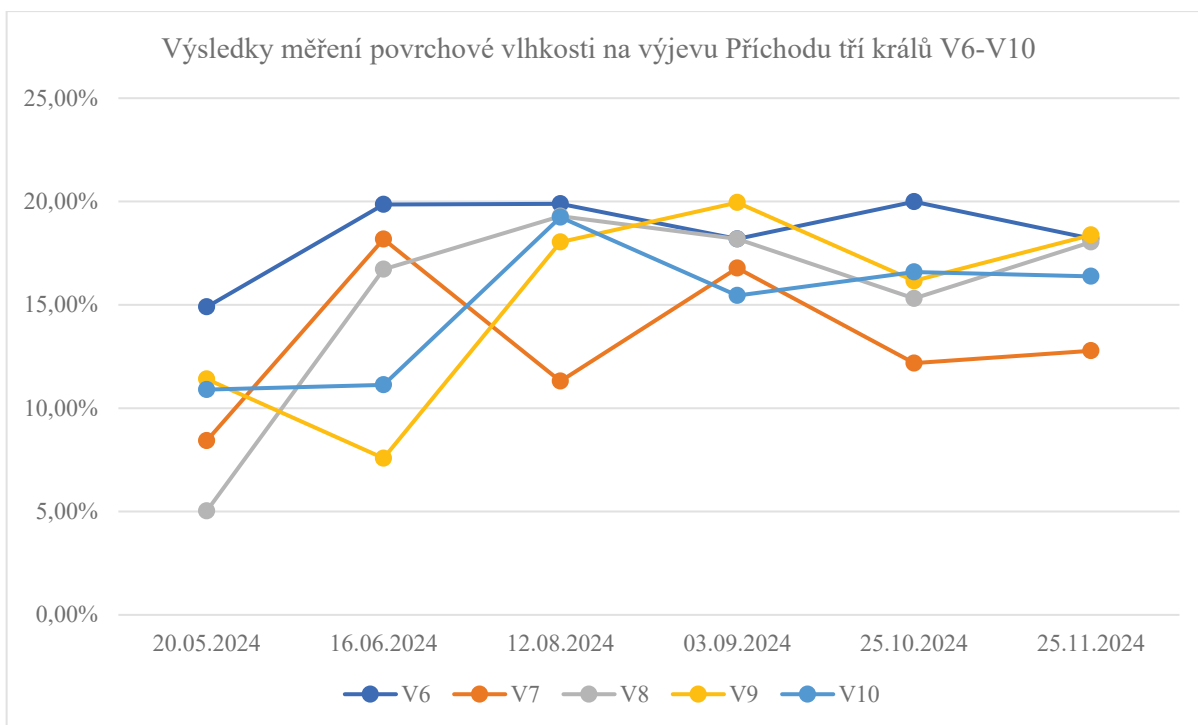
Obr. TH 18 Zákresy míst měření na výjevu Příchodu tří králů

	20.05.2024	16.06.2024	12.08.2024	03.09.2024	25.10.2024	25.11.2024
V1	18,27 %	16,94 %	14,48 %	16,13 %	14,39 %	15,73 %
V2	8,60 %	14,83 %	13,62 %	18,99 %	14,57 %	16,73 %
V3	13,40 %	16,67 %	11,67 %	19,98 %	16,56 %	16,81 %
V4	17,49 %	17,46 %	16,07 %	13,70 %	14,43 %	17,86 %
V5	9,50 %	18,59 %	12,25 %	18,85 %	16,90 %	17,43 %
V6	14,90 %	19,86 %	19,89 %	18,19 %	19,99 %	18,21 %
V7	8,43 %	18,18 %	11,31 %	16,78 %	12,18 %	12,78 %
V8	5,03 %	16,72 %	19,29 %	18,19 %	15,31 %	18,04 %
V9	11,41 %	7,58 %	18,04 %	19,95 %	16,16 %	18,38 %
V10	10,90 %	11,13 %	19,24 %	15,45 %	16,59 %	16,38 %

Tab. TH 26 Výsledky měření na výjevu Příchodu tří králů

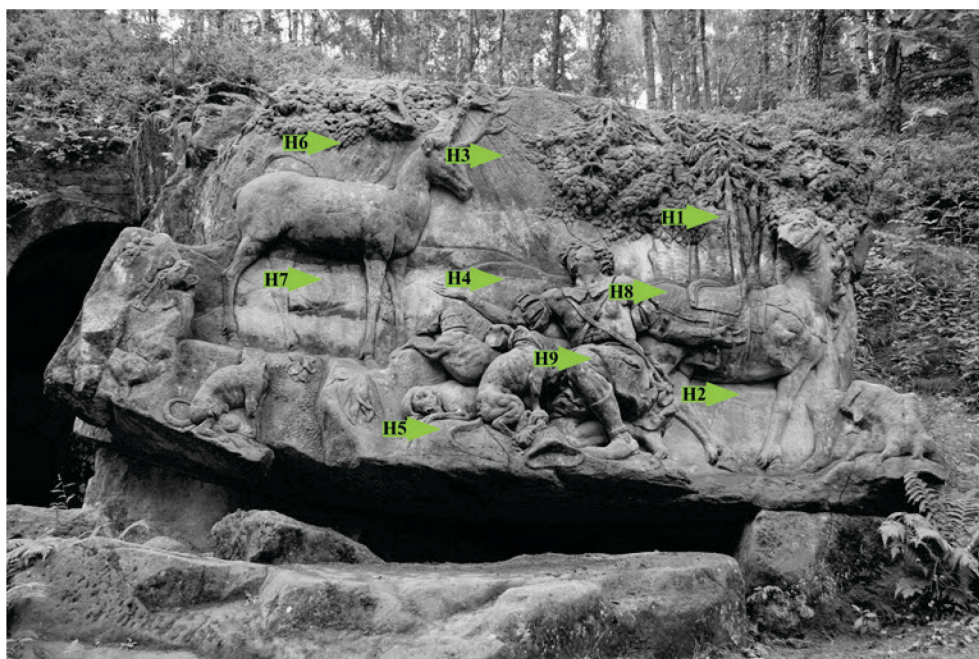


Graf TH 16 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Příchodu tří králů V1-V5



Graf TH 17 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu Příchodu tří králů V6-V10

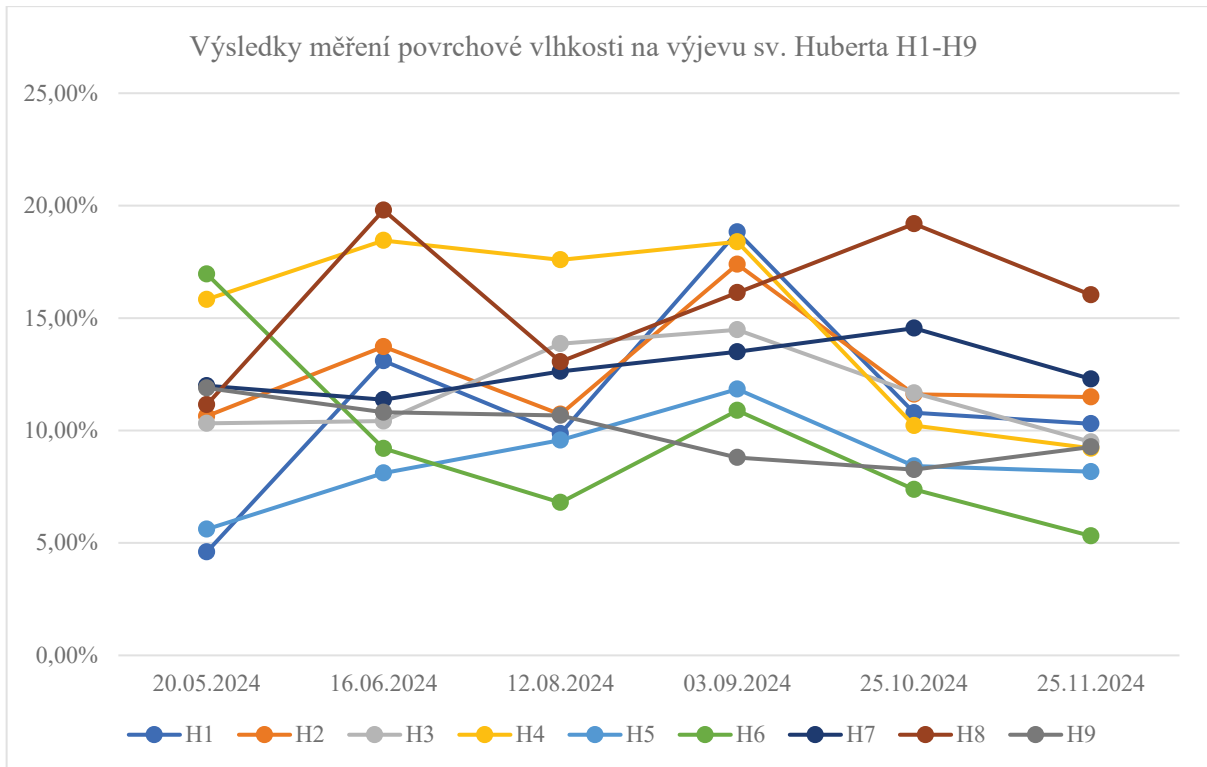
Měření na výjevu sv. Huberta



Obr. TH 19 Zákresy míst měření na výjevu sv. Huberta

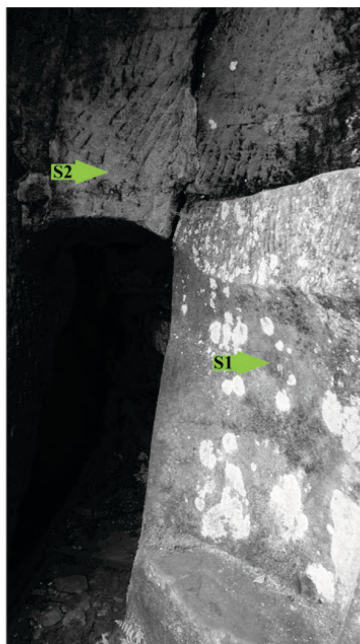
	20.05.2024	16.06.2024	12.08.2024	03.09.2024	25.10.2024	25.11.2024
H1	4,60 %	13,10 %	9,86 %	18,83 %	10,79 %	10,30 %
H2	10,64 %	13,73 %	10,72 %	17,39 %	11,61 %	11,49 %
H3	10,32 %	10,42 %	13,86 %	14,48 %	11,67 %	9,49 %
H4	15,83 %	18,45 %	17,59 %	18,39 %	10,22 %	9,21 %
H5	5,61 %	8,11 %	9,57 %	11,84 %	8,42 %	8,17 %
H6	16,96 %	9,20 %	6,80 %	10,89 %	7,38 %	5,31 %
H7	11,99 %	11,37 %	12,63 %	13,50 %	14,55 %	12,29 %
H8	11,15 %	19,80 %	13,06 %	16,13 %	13,19 %	16,03 %
H9	11,89 %	10,81 %	10,67 %	8,80 %	8,26 %	9,27 %

Tab. TH 27 Výsledky měření na výjevu sv. Huberta



Graf TH 18 Výsledky měření povrchové vlhkosti na výjevu sv. Huberta H1-H9

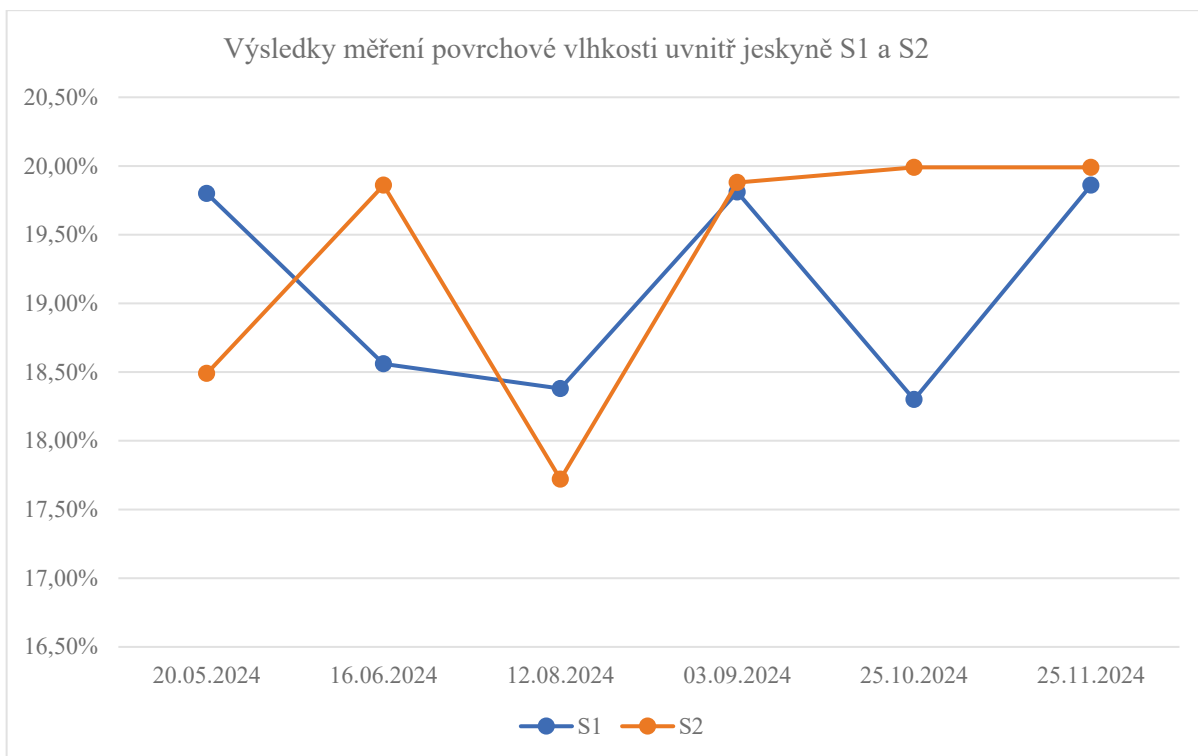
Měření uvnitř Jeskyně



Obr. TH 20 Zákresy míst měření uvnitř jeskyně

	20.05.2024	16.06.2024	12.08.2024	03.09.2024	25.10.2024	25.11.2024
S1	19,80 %	18,56 %	18,38 %	19,81 %	18,30 %	19,86 %
S2	18,49 %	19,86 %	17,72 %	19,88 %	19,99 %	19,99 %

Tab. TH 28 Výsledky měření uvnitř jeskyně



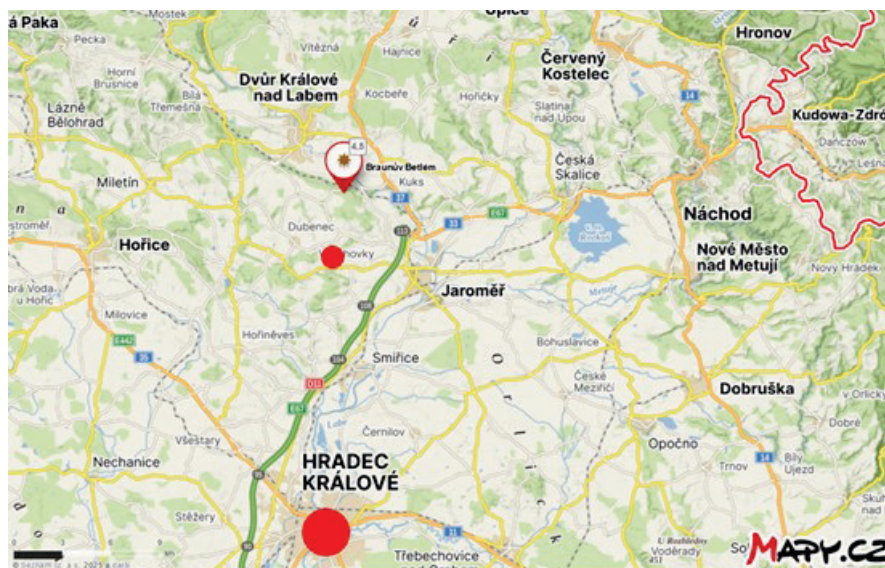
Graf TH 19 Výsledky měření povrchové vlhkosti uvnitř jeskyně S1 a S2

Týdenní úhrn srážek a teplota z hydrometeorologických stanic v období měření⁵⁷

Tyto hodnoty slouží především jako pomůcka při sledování proměn výše povrchové vlhkosti. Vzhledem ke vzdálenosti nejbližší stanice od sledovaného objektu a rozdílné nadmořské výšky na ně nelze 100 % spoléhat a jsou tedy pouze orientační.

Nejvyšší úhrn srážek zaznamenaly stanice v období mezi 9.–15. zářím roku 2024, úhrn srážek v celém královehradeckém kraji byl 176 mm. V tomto období postihly celé území České republiky záplavy a mohutné deště.

Další období, s větším úhrnem srážek v královehradeckém kraji bylo 27. 5.–2. 6. 2024 kdy byl v celém kraji úhrn srážek 49 mm, dále pak 8.7.–14. 7. 2024 kdy napadlo 63 mm, 22.–8. 7. 2024 47 mm a 18.–24. 11. 2024 38 mm.



Obr. TH 21 Poloha hydrometeorologických stanic v královehradeckém kraji vůči Braunovu Betlému

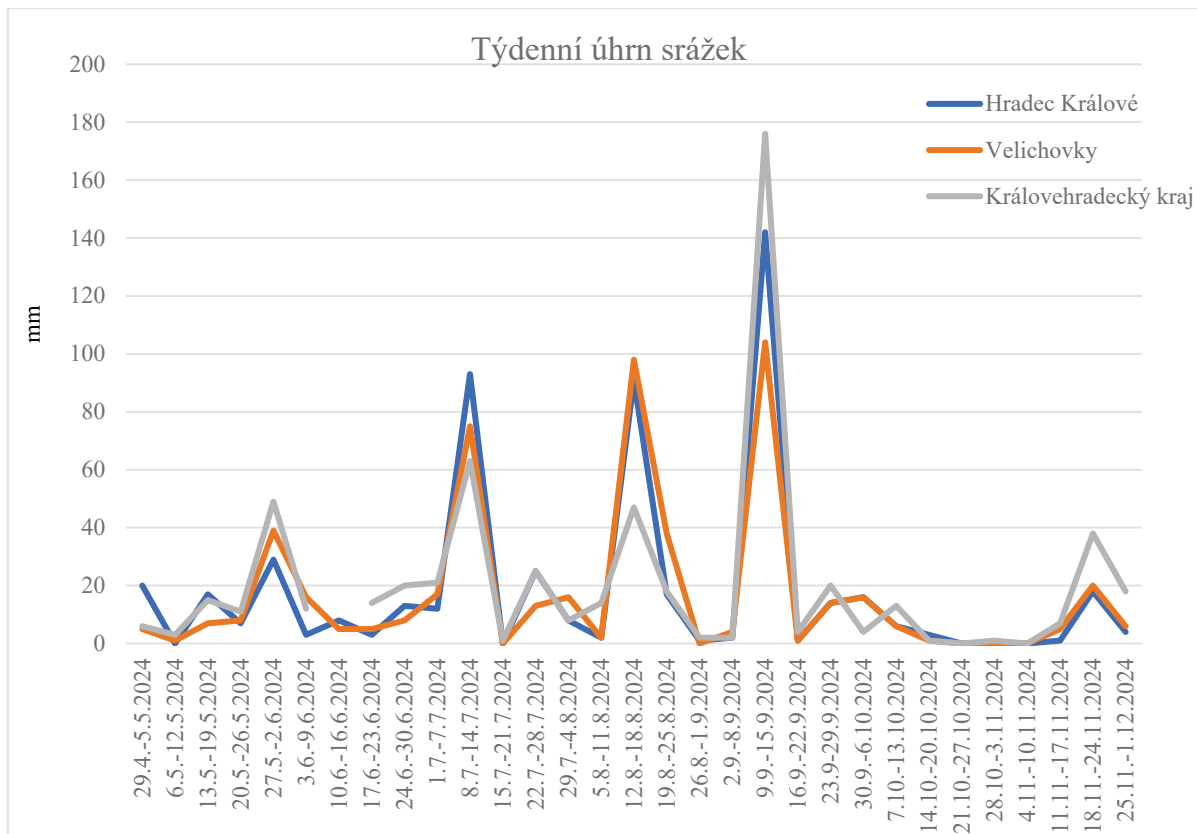
⁵⁷ Portál ČHMÚ. Online. Archiv týdenních zpráv. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/informace-a-sluzby/tydenni-vyhodnoceni>. [cit. 2025-01-12].

Týden	Hradec Králové	Velichovky	Královehradecký kraj
29.4.-5.5.2024	20 mm	5 mm	6 mm
6.5.-12.5.2024	0 mm	1 mm	3 mm
13.5.-19.5.2024	17 mm	7 mm	15 mm
20.5.-26.5.2024	7 mm	8 mm	11 mm
27.5.-2.6.2024	29 mm	39 mm	49 mm
3.6.-9.6.2024	3 mm	16 mm	12 mm
10.6.-16.6.2024	8 mm	5 mm	
17.6.-23.6.2024	3 mm	5 mm	14 mm
24.6.-30.6.2024	13 mm	8 mm	20 mm
1.7.-7.7.2024	12 mm	17 mm	21 mm
8.7.-14.7.2024	93 mm	75 mm	63 mm
15.7.-21.7.2024	0 mm	0 mm	1 mm
22.7.-28.7.2024	25 mm	13 mm	25 mm
29.7.-4.8.2024	8 mm	16 mm	8 mm
5.8.-11.8.2024	2 mm	2 mm	14 mm
12.8.-18.8.2024	91 mm	98 mm	47 mm
19.8.-25.8.2024	17 mm	38 mm	18 mm
26.8.-1.9.2024	1 mm	0 mm	2 mm
2.9.-8.9.2024	2 mm	4 mm	2 mm
9.9.-15.9.2024	142 mm	104 mm	176 mm
16.9.-22.9.2024	1 mm	1 mm	4 mm
23.9.-29.9.2024	14 mm	14 mm	20 mm
30.9.-6.10.2024	16 mm	16 mm	4 mm
7.10.-13.10.2024	6 mm	6 mm	13 mm
14.10.-20.10.2024	3 mm	1 mm	1 mm
21.10.-27.10.2024	0 mm	0 mm	0 mm
28.10.-3.11.2024	0 mm	0 mm	1 mm
4.11.-10.11.2024	0 mm	0 mm	0 mm
11.11.-17.11.2024	1 mm	5 mm	7 mm
18.11.-24.11.2024	18 mm	20 mm	38 mm
25.11.-1.12.2024	4 mm	6 mm	18 mm

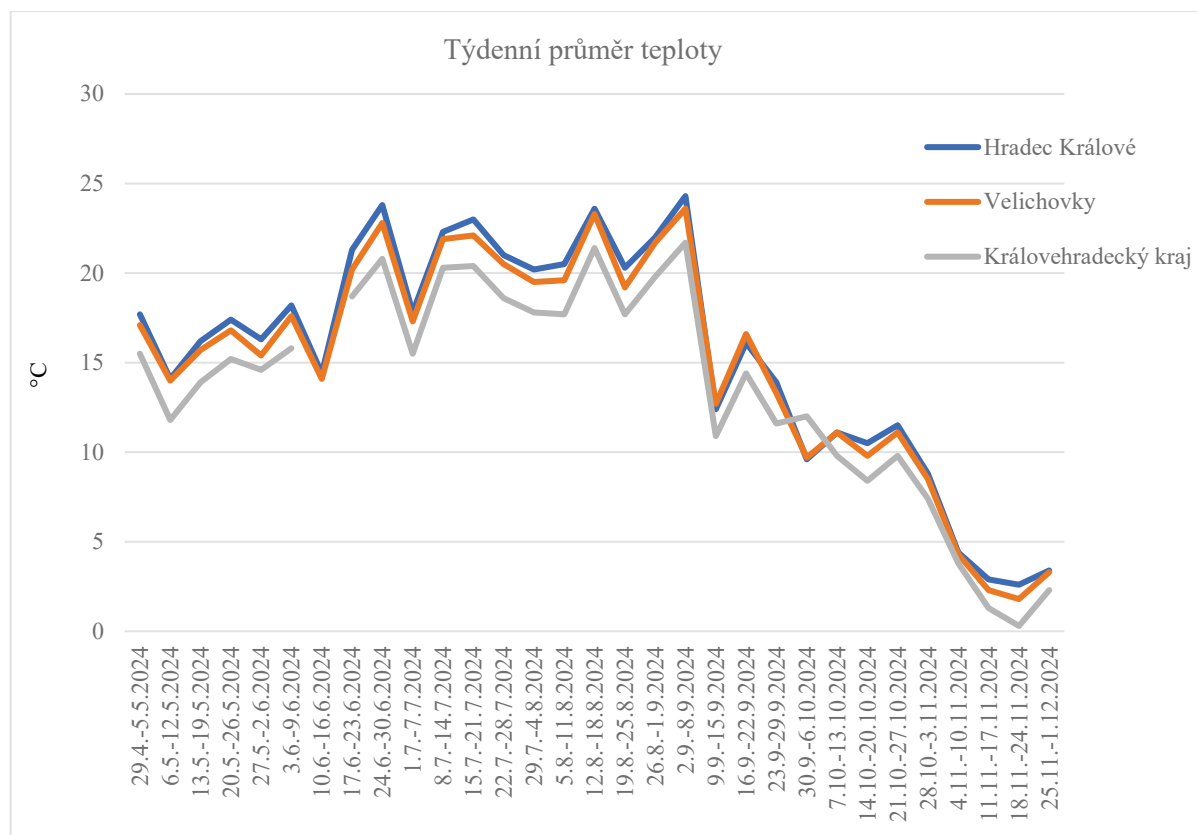
Tab. TH 29 Týdenní úhrn srážek

Týden	Hradec Králové	Velichovky	Královohradecký kraj
29.4.-5.5.2024	17,7 °C	17,1 °C	15,5 °C
6.5.-12.5.2024	14,1 °C	14 °C	11,8 °C
13.5.-19.5.2024	16,2 °C	15,7 °C	13,9 °C
20.5.-26.5.2024	17,4 °C	16,8 °C	15,2 °C
27.5.-2.6.2024	16,3 °C	15,4 °C	14,6 °C
3.6.-9.6.2024	18,2 °C	17,6 °C	15,8 °C
10.6.-16.6.2024	14,4 °C	14,1 °C	
17.6.-23.6.2024	21,3 °C	20,2 °C	18,7 °C
24.6.-30.6.2024	23,8 °C	22,8 °C	20,8 °C
1.7.-7.7.2024	17,8 °C	17,3 °C	15,5 °C
8.7.-14.7.2024	22,3 °C	21,9 °C	20,3 °C
15.7.-21.7.2024	23 °C	22,1 °C	20,4 °C
22.7.-28.7.2024	21 °C	20,5 °C	18,6 °C
29.7.-4.8.2024	20,2 °C	19,5 °C	17,8 °C
5.8.-11.8.2024	20,5 °C	19,6 °C	17,7 °C
12.8.-18.8.2024	23,6 °C	23,3 °C	21,4 °C
19.8.-25.8.2024	20,3 °C	19,2 °C	17,7 °C
26.8.-1.9.2024	22 °C	21,7 °C	19,8 °C
2.9.-8.9.2024	24,3 °C	23,6 °C	21,7 °C
9.9.-15.9.2024	12,4 °C	12,7 °C	10,9 °C
16.9.-22.9.2024	16,1 °C	16,6 °C	14,4 °C
23.9.-29.9.2024	13,9 °C	13,3 °C	11,6 °C
30.9.-6.10.2024	9,6 °C	9,7 °C	12 °C
7.10.-13.10.2024	11,1 °C	11,1 °C	9,8 °C
14.10.-20.10.2024	10,5 °C	9,8 °C	8,4 °C
21.10.-27.10.2024	11,5 °C	11,1 °C	9,8 °C
28.10.-3.11.2024	8,8 °C	8,5 °C	7,4 °C
4.11.-10.11.2024	4,4 °C	4,3 °C	3,8 °C
11.11.-17.11.2024	2,9 °C	2,3 °C	1,3 °C
18.11.-24.11.2024	2,6 °C	1,8 °C	0,3 °C
25.11.-1.12.2024	3,4 °C	3,3 °C	2,3 °C

Tab. TH 30 Týdenní průměr teploty



Graf TH 20 Týdenní úhrn srážek



Graf TH 21 Týdenní průměr teploty

II

Praktická část diplomové práce:
Dokumentace restaurování sádrové plastiky Apollóna

1 Základní informace

1.1 Lokalizace památky

Kraj: Pardubický kraj
Bližší určení místa: Soukromá sbírka Mgr. BcA. Radomíra Slovika

1.2 Údaje o památce

Název památky: Sádrový odlitek Apollóna
Klasifikace památky: Památka nezapsána v ÚSKP
Autor: Neznámý
Datace: 19. století
Sloh: Zmenšená kopie podle antického originálu
Materiál: Sádra
Technika vzniku díla: Odlitek
Rozměry: výška: 100 cm, šířka: 65,5 cm, hloubka: 36,5 cm

1.3 Údaje o akci

Vlastník: Mgr. BcA. Radomír Slovík
Investor: Mgr. BcA. Radomír Slovík
Zhotovitel: BcA. Kristýna Bittnerová, Fakulta restaurování Univerzity
Pardubice, Jiráskova 3, 570 01 Litomyšl, email:
dekanat.fr@upce.cz
Vypracovala: BcA. Kristýna Bittnerová
**Odborný pedagogický
dohled:** MgA. Zuzana Auská

1.4 Údaje o dokumentaci

Autor dokumentace: Kristýna Bittnerová
Autor fotografií: Kristýna Bittnerová
Použitá snímací technika: Canon EOS M50 Mark I,
Objektiv Canon EF-S 15–45 mm

2 Úvod

Předmětem restaurátorské dokumentace je sádrový odlitek vytvořený podle antického originálu Apollóna Belvederského. Ten se v současné době nachází v soukromé sbírce Mgr. BcA. Radomíra Slovika. Původně bylo dílo součástí sbírky sádrových plastik na zámku v Litomyšli. Autor díla je neznámý. Lze předpokládat, že dílo vzniklo v 19. století, tak jako většina předmětů z této sbírky.

Dokumentace obsahuje restaurátorský průzkum, jehož součástí je chemicko-technologický a umělecko-historický průzkum, na jehož základě je navržena koncepce restaurování, ze které vychází i následný podrobně popsáný postup prací a seznam použitých materiálů. Dále dokument obsahuje doporučený režim památky, seznam literatury a přílohy.

3 Průzkumová zpráva

Hlavním cílem průzkumu je získání dostatečného množství informací k poznání díla, jeho stavu a následné navržení restaurátorského zásahu. V rámci umělecko-historických souvislostí se bude průzkum zabývat datací odlitku a jeho předlohou.

Restaurátorský průzkum je zaměřen na posouzení aktuálního stavu díla, a to hlavně na jeho materiálovou, statickou a výtvarně estetickou stránku. Součástí průzkumu je vyhodnocení největších rizik a návrh jejich řešení.

3.1 Popis díla

Plastika Apollóna odpovídá typově soše Apollóna Belvederského. Postava je v kontrastu. Její pravá ruka se opírá o kmen, který je obtočen hadem Pythonem. Levá ruka je upažena směrem od těla. Hlava je natočena doleva směrem k upažené ruce. Apollón je nahý, pouze okolo krku má uchycen plášť, který je dále přehozen přes levé rameno a levou ruku. Okolo hrudi má pásek držící toulec na zádech. Přirození má zakryté javorovým listem a na nohou má sandále.

Celý povrch díla je opatřen patinou, která byla v minulosti minimálně jednou přetřena. Zejména na přední straně je zřetelný tmavší, pravděpodobně druhotný přetěr, který však není rovnoměrný.

3.2 Restaurátorský průzkum

3.2.1 Stav díla před restaurováním

Vizuální průzkum

Plastika je ve velmi špatném stavu. Největším poškozením je ulomená levá paže a rameno, dále lepená hlava se špatně provedeným spojem (lepidlo se nachází i okolo spoje a tvoří tmavší skvrny). Na povrchu díla jsou zásadním problémem barevné kontrasty, vzniklé pravděpodobně druhotným nerovnoměrným přetěrem. Dále je povrch lokálně pokryt stékancí od lepidla a slabší vrstvou prachového depozitu.

Stabilita sádrového odlitku není narušena. Materiál díla je v dobrém stavu, je kompaktní a nikde nedochází ke ztrátě koheze. Na některých místech jsou patrné větší úbytky hmoty (fragmenty prstů pravé ruky, či draperie okolo levé paže) nebo lehké oděrky.

Barevná vrstva je na několika místech ve špatném stavu, odlupuje se od podkladu (draperie pod bradou) nebo zcela chybí. Druhotný nátěr provedený hlavně z čelního pohledu je v jiném tónu (tmavší a studenější) než původní povrchová úprava. Tento nátěr tak vytváří

kontrasty, které narušují celkový pohled na dílo. Na levé holeni se nacházejí menší skvrny od rzi způsobené korodující armaturou uvnitř odlitku.

Detekce kovových prvků

Pro zjištění rozsahu použitých kovových armatur v díle byl proveden průzkum pomocí přenosného detektoru kovů Bosch GMS 120. Krom již viditelných armatur prstů pravé ruky byly detekovány i armatury v levé noze a pravé paži viz. Fotodokumentace 1 Grafické zákresy stavu před restaurováním.

UV fluorescence

UV fluorescence je běžně využívaná metoda neinvazivního průzkumu, která slouží k odhalení organických materiálů nebo složek na povrchu díla, které nemusí být na první pohled viditelné v běžném světle (VIS). Pomáhá blíže určit povrchové úpravy (případně od sebe odlišit druhotné přetěry), tmelená místa, popřípadě i biologický film.

Pro nafocení UV fluorescence na díle byly použity dva zdroje UV záření UVASPOT 400T/BL od firmy Hönle UV Technology s rozpětím vlnových délek 315–400 nm a fotoaparát Canon EOS M50 Mark I s objektivem EF-M 15–45 mm. Fotoaparát byl nastaven na manuální režim s clonou f/10 a ISO 100. Na objektiv byl nasazen filtr Tiffen UV 2E Pale Yellow. Na objektivu byla vypnuta automatická stabilizace obrazu a byl nastaven režim manuálního ostření.

Vzniklé fotografie byly následně upraveny pro správné nastavení expozice a kalibraci barevnosti pomocí vyvážení bílé (hodnota nepřesáhla 50 000 K)

Na povrchu plastiky bylo zachyceno žluté luminování povrchu na místech, která se ve viditelném světle VIS jevila jako tmavší přetěr. Patrně je luminace způsobená obsahem zinkové běloby v barevné úpravě. UV fluorescence pomohla s podrobným zmapováním těchto míst.



Obr. PR. 2 Detekce kovových armatur

Fotografie z UV fluorescence viz. níže:



Obr. PR 3 Apollón VIS před rest. pohled zředu



Obr. PR 4 Apollón UV před rest. pohled zředu



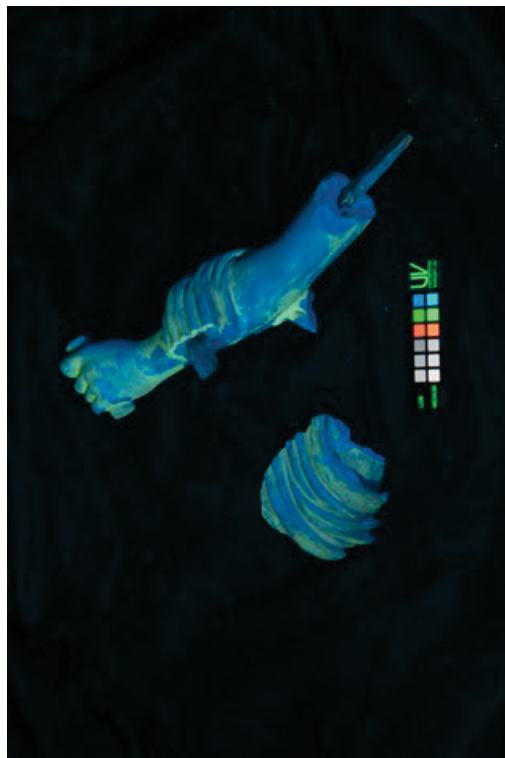
Obr. PR 5 Apollón VIS před rest. pohled zezadu



Obr. PR 6 Apollón UV před rest. pohled zezadu









Obr. PR 7 Odlomený fragment levé ruky, VIS před rest.



Obr. PR 8 Odlomený fragment ruky, UV před rest.

Tabulka poškození

	<p>Prachové depozity</p> <p>Projevy: Nánosy nečistot na povrchu díla, zejména v záhybech</p> <p>Příčiny: Špatné uskladnění díla, hlavně v prašném prostředí.</p>
	<p>Skvrny od lepidla</p> <p>Projevy: Tmavé skvrny okolo lepených míst</p> <p>Příčiny: Nesprávně provedené lepení. Lepidlo se dostalo při zásahu i mimo praskliny a nebylo odstraněno.</p>
	<p>Chybějící nebo odlomený materiál</p> <p>Projevy: I několikacentimetrový viditelný úbytek materiálu či odlomené kusy.</p> <p>Příčiny: K odlomení dochází zejména v místech, která vyčnívají, a tudíž mohou být snadno odlomena v důsledku neopatrné manipulace. Další příčinou může být postupná degradace materiálu, tvorba prasklin apod.</p>

	<p>Praskliny</p> <p>Projevy: Viditelná prasklina různého tvaru i velikosti, která se může působením dalších faktorů zvětšovat.</p> <p>Příčiny: Rozpínání degradované ocelové armatury nebo důsledek manuálního poškození. Příčinou může být i vada odlitku a tvorba prasklin v oslabených místech.</p>
	<p>Krakeláč fragmentů barevné vrstvy</p> <p>Projevy: Odlupování a popraskání barevné vrstvy</p> <p>Příčiny: Vlivem klimatických podmínek nebo kvůli špatnému stavu materiálu pod barevnou vrstvou, či stárnutí samotné barevné vrstvy.</p>
	<p>Skvrny od rzi</p> <p>Projevy: Při korozi železa dochází k migraci rzi směrem k povrchu a způsobuje rezavé nečistoty.</p> <p>Příčiny: Kov podléhá korozi při častém kontaktu se srážkovou vodou a vlivem klimatických podmínek. Kvůli korozi, oxidaci kov uvolňuje rez, která znečišťuje jeho bezprostřední okolí.</p>

Tab. PR 1 Sumarizace poškození nacházející se na díle

3.2.2 Zadání a cíle následujících průzkumů a zkoušek

Cílem dalšího průzkumu bylo zjistit složení druhotné povrchové úpravy, a to hlavně její pojivové složky. Tato informace byla stěžejní pro následné zkoušky způsobů jejího snímání. Pro odstranění skvrn od lepidla bylo důležité určení typu adheziva. Tyto dvě analýzy byly provedeny katedrou chemické technologie Fakulty restaurování (KCHT FR UPCE).

Po vyhodnocení analýz se přistoupilo ke zkouškám čištění, konkrétně prachového depozitu, a poté snímání druhotného přetěru. Tyto zkoušky byly nezbytné pro zvolení nejvíce šetrné a zároveň účinné metody. Dále byly provedeny zkoušky tmelících směsí, kde byl vybrán typ plniva a pojiva mísené ve vhodném poměru, tak aby vzhled a vlastnosti výsledné směsi nejvíce odpovídaly stavu původního materiálu.

V rámci historického průzkumu bylo důležité shromáždění dostupných analogií pro rekonstrukci chybějících prstů, šípů v toulci a nedochované drapérie.

3.3 Umělecko-historický průzkum

Umělecko-historický průzkum se věnuje dohledání analogií, historických fotografií nebo sochařských předloh k restaurovanému objektu. Hlavním cílem průzkumu bylo najít dostatečné fotografické podklady pro předpokládanou rekonstrukci chybějících částí.

3.3.1 Ikonografie díla

Plastika zobrazuje antického boha Apollóna. Ten byl podle antické mytologie syn boha Dia a Titánky Léty. Byl to bůh světla a slunce, ochránce života a pořádku a neomylný střelec a věštec. Podle básní byl hlavně výborným střelcem, je v nich nazýván jako Stříbrnoruký, Jasnözřivý, Světlorodý nebo nejčastěji jako Foibos (Zářící). Mezi jeho atributy se řadí labuť, vlci, delfini, luk se šípy, vavřínový věnec, citera či lyra, had Python nebo trojnožka jakožto symbol prorocké síly.⁵⁸

Jeho nejznámější vyobrazení je Apollón Belvederský tzv. vzor mužské krásy. Jedná se o římskou kopii podle bronzového originálu ze 4. stol. př. n. l. Tento originál je připisován sochaři Leócharovi.⁵⁹ Postava Apollóna Belvederského stojí v kontrapostu. Pravou rukou se opírá o kmen stromu, kolem kterého se vine had Python. Levá ruka je vzpažená do strany, od těla. Hlava je otočená vlevo, směrem k upažené ruce. Apollón je zcela nahý, pouze kolem krku

⁵⁸ *Apollón*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Apoll%C3%B3n>. [cit. 2024-01-11].

⁵⁹ ZAMAROVSKÝ, Vojtěch. Bohové a hrdinové antických bájí. 5. uPR vyd. V nakl. Brána 2. Praha: Brána, 2000.

má připnutý plášť, který mu splývá přes levé rameno a paži. Přes hrud' má pásek, na kterém je zavěšen toulec na zádech a na nohou má sandály. Restaurované dílo je jeho věrnou zmenšenou replikou s jediným rozdílem, a to je javorový list, který zakrývá intimní partie.

3.3.2 Historie

Dílo původně patřilo do sbírky sádrových plastik umístěné na zámku v Litomyšli, která tvořila část rozsáhlého souboru antických odlitků Univerzity Karlovy. Tato sbírka, jejíž většina pravděpodobně pochází z 19. století, byla shromážděna díky iniciativě O. Benndorfa, tehdejšího ředitele univerzity.

V roce 1968 byla podstatná část odlitků převezena do nově zřízené Galerie antického umění v Hostinném. Zbylá zhruba stovka děl byla uložena v suterénu studentských kolejí Na Větrníku v Praze.

O dvacet devět let později byla díla zrestaurována a umístěna do Muzea antického sochařství a architektury na zámku v Litomyšli. V roce 2011 byla většina exponátů převezena do Muzea města Ústí nad Labem a tři roky na to pak znovu přesunuta, tentokrát na zámek Duchcov.⁶⁰

Při přesunu sbírky z Litomyšle byla menší část odlitků vyřazena a jednotlivé exponáty si rozebrala veřejnost. Mezi nimi byl i odlitek Apollóna Belvederského, který je předmětem této dokumentace a v současnosti se nachází v soukromém vlastnictví.⁶¹

3.3.3 Technika vzniku díla

Jedná se o sádrový odlitek, který vznikl pravděpodobně litím do vytvořené formy a vyztužen kovovými a dřevěnými armaturami. Povrch odlitku byl následně opatřen monochromní povrchovou úpravou (patinou), která je u děl tohoto typu běžná.

3.3.4 Analogická zobrazení

V rámci umělecko-historického průzkumu proběhla snaha o dohledání analogií pro plánovanou rekonstrukci chybějících částí. Vzhledem k často zobrazovanému námětu se

⁶⁰ *Sbírka antické plastiky*. Online. Dostupné z: <https://antika.ff.cuni.cz/cs/sbirka-odlitku/historie-sbirky/>. [cit. 2024-06-07].

⁶¹ Ústní informace od současného majitele díla Mgr. BcA. Radomíra Slovika

podářilo dohledat fotografie a 3D model⁶² několika sochařských reprodukcí či sádrových odlitků.



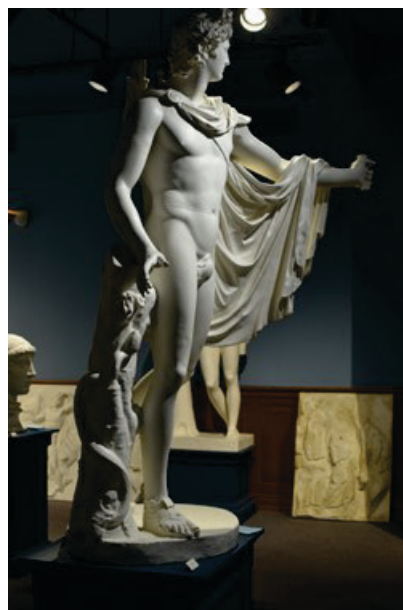
Obr. PR 9 Apollón Belvederský zdroj obrázku:
<https://www.museivaticani.va/content/museivaticani/en/collezioni/musei/museo-pio-clementino/Cortile-Ottagono/apollo-del-belvedere.html>



Obr. PR 10 Detail hlavy Apollóna Belvederského, mramor, zdroj obrázku:
<http://defterisk.blogspot.com/2013/08/apollo-belvedere-cesitli-notlar.html>



Obr. PR 11 Apollón Belvederský, mramor, zdroj obrázku:
<https://www.britannica.com/biography/Leochares>



Obr. PR 12 Apollón Belvederský, sádra, zdroj obrázku:
<https://wilcox.ku.edu/s/wilcox/item/11600>

⁶² SMK – National Gallery of Denmark. *Apollo Belvedere: 3D model*. Online. In: Sketchfab. 2016. Dostupné z: <https://sketchfab.com/3d-models/apollo-belvedere-fe5c0cfffdc2a4f3985872212c692af0c>. [cit. 2024-09-08]

3.3.5 Předchozí restaurátorské zásahy

Plastika v minulosti jistě prošla opravným zásahem ovšem není známo, zda byl proveden odborníkem či nikoliv. Došlo při něm k přilepení hlavy Apollóna a pravděpodobně i k přetření větší části povrchu sochy nátěrem obsahujícím zinkovou bělobu.

3.4 Chemicko-technologický průzkum

3.4.1 Úvod do chemicko-technologického průzkumu

Pro bližší poznání druhotného zásahu provedeném na díle byly odebrány celkem 2 vzorky. Vzorek V1 byl odebrán za účelem zjištění typu použitého lepidla a vzorek V2 pro analýzu povrchových úprav. Bylo zjišťováno materiálové složení a stratigrafie povrchových vrstev. Analýzu vzorků provedla Ing. Renata Tišlová, Ph.D. z katedry chemické technologie Fakulty restaurování Univerzity Pardubice.

3.4.2 Analýza povrchových vrstev

Pro analýzu povrchových vrstev byl nejprve odebrán vzorek V1. Ze vzorku byl zhotoven nábrus a ten byl dále zkoumán. Pozorování proběhlo pomocí optické mikroskopie nábrusů v odraženém bílém světle a fluorescencí v UV a modrém světle, skenovací elektronové mikroskopie (SEM) s mikrosondou (EDX) - prvková analýza povrchových/barevných vrstev a infračervené spektrometrie (FTIR) - identifikace organických složek pojiva vybraných vrstev.

Průzkum měl za cíl identifikovat pojivo předpokládaného druhotného nátěru na díle. Z výsledků nebylo možné přesně určit o jaké pojivo se jedná, neboť analýzou byla prokázána arabská guma, nicméně dle dalšího průzkumu, zejména zkoušek rozpustnosti a snímání druhotného přetěru se ukázalo, že vrstva přetěru je nerozpustná ve vodě i v rozpouštědlech. Ve složení vrstvy byla dále identifikována zinková běloba.⁶³

3.4.3 Analýza adheziva

Pro zjištění složení použitého adheziva byl odebrán vzorek V2, který byl podroben zkoumání metodou infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR). Analýza ve složení adheziva prokázala syntetický polymer na bázi polyvinylacetátu PVAC.⁶⁴

⁶³ TIŠLOVÁ, Renata. *Chemicko-technologický průzkum: sádrová socha Apolla*. 22.12.2023. 2023.

⁶⁴ TIŠLOVÁ, Renata. *Chemicko-technologický průzkum: sádrová socha Apolla*. 22.12.2023. 2023.

3.5 Vyhodnocení průzkumů

Sádrový odlitek Apollóna Belvedérského pochází ze sbírky sádrových plastik na zámku v Litomyšli, která byla původně součástí souboru antických odlitků Univerzity Karlovy. V důsledku vyřazování některých exponátů při přesunu sbírky do Muzea města Ústí nad Labem se dílo dnes nachází v soukromém vlastnictví. Přesný původ ani datace samotného odlitku není známa, avšak lze předpokládat, že vznikl pravděpodobně v průběhu 19. století, kdy byla shromážděna většina této sbírky, jejíž součástí byl i tento odlitek.

Dílo je ve špatném stavu, nejzávažnější poškození představuje odlomení levé paže a ramene a nevhodně provedené slepení hlavy se ztmavými skvrnami lepidla v okolí spoje. Adhezivum použité pro lepení tvoří syntetický polymer na bázi polyvinylacetátu.⁶⁵

V minulosti došlo pravděpodobně k přetření většiny povrchu sochy „sjednocujícím nátěrem“, který však časem výrazně ztmavnul. V důsledku toho vznikly na díle barevné kontrasty, které je možné pozorovat na rozhraní přetěru. Ztmavnutím sekundární povrchové úpravy se potlačila plastičnost sochy, celek tak působí nevzhledně a dílo tím devaluje. Chemicko-technologický průzkum potvrdil přítomnost arabské gumy jako pojiva původní, vodou rozpustné barevné vrstvy. Pigmentem byla zjištěna zinková běloba, jejíž výskyt byl potvrzen i pomocí UV fluorescence. Původní domněnka o druhotném charakteru této vrstvy byla vyvrácena — zinková běloba je součástí původní monochromie. Pojivo sekundárního nátěru zůstalo neidentifikováno. Podle zkoušek rozpustnosti ho tvoří neznámá nerozpustná látka.

Materiál samotného díla (sádra) je kompaktní a stabilní, nicméně místy se na povrchu vyskytují větší ztráty hmoty (prsty, drapérie). Na povrchu se rovněž projevují korozní produkty z vnitřních železných armatur. Detekce potvrdila přítomnost kovových výztuží i mimo viditelně poškozené partie.

⁶⁵ TIŠLOVÁ, Renata. *Chemicko-technologický průzkum: sádrová socha Apolla*. 22.12.2023. 2023.

3.6 Zkoušky materiálů a technologií

3.6.1 Zkoušky čištění

Zkoušky čištění prachových depozitů

Metodika:

Bylo provedeno celkem 5 zkoušek čištění prachových depozitů. Z povrchu testovacích ploch byly nejprve odstraněny volné prachové částice pomocí jemného štětce a muzejního vysavače. Poté bylo přistoupeno k samotnému testování metod čištění na zbylé prachové depozity ulpívající na díle.

Všechny testy proběhly metodou suchého čištění, a to tedy různými typy čistících houbiček a gum. Konkrétně se jednalo o nano houbičku, tvrdou pryž, plastickou gumu (Faber-Castell), houbu Wallmaster a Wishab houbu. Při zkouškách se sledovala míra čištění, zachování historické patiny a šetrnost k povrchu. Hodnocení probíhalo pouhým okem a následně bylo fotograficky zdokumentováno viz. níže.

Výsledek:



Obr. PR 13 Zkoušky suchého čištění

Jako nejvhodnější se ukázalo čištění pomocí nano houbičky. Míra čištění byla snadno kontrolovatelná a povrch díla byl po očištění stále celistvý. Obdobný výsledek pak přineslo i čištění pomocí houby Wallmaster, který byl ale na rozdíl od nano houbičky trochu hůře kontrolovatelný.

Ostatní prostředky jako tvrdá pryž, plastická guma a houba Wishab se ukázaly jako nevhodné kvůli špatné kontrolovatelnosti či přečištění povrchu a tvrdá pryž navíc poškozovala povrchovou úpravu díla.

Pro dočištění díla od prachových depozitů byla tedy vybrána nano houbička.

Zkoušky snímání/redukce druhotné vrstvy

Mechanické zkoušky snímání

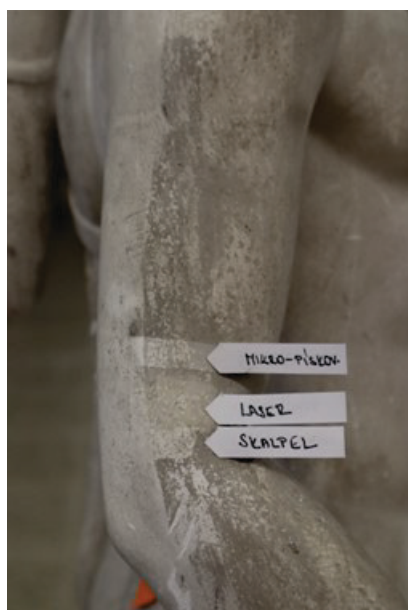
Metodika:

Pro zkoušky redukce druhotného přetěru byly vybrány 3 metody, a to: pomocí laseru EOS 1000 (energie 200 mJ, energická hustota 2,8 J/m²), mikropískování (abrazivo Korund F800 a tlak 3-4 bary) a pomocí skalpelu. Na provedených zkouškách se sledovalo minimalizování barevného kontrastu na rozhraní vrstev, kontrolovatelnost, šetrnost k původní povrchové úpravě a změna barevnosti.

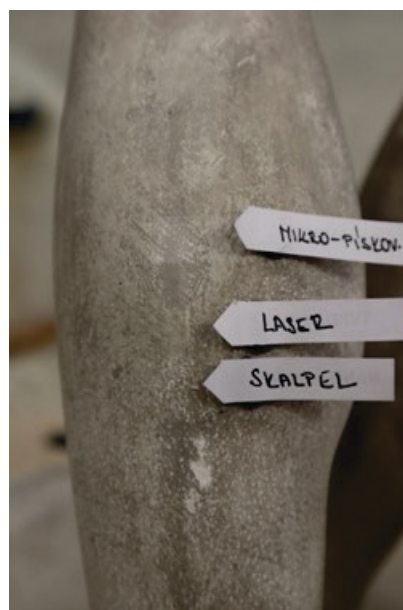
Nejprve byly metody vyzkoušeny na místě s největším barevným kontrastem (pravé paži (viz. Obr. PR 14), a poté byly ozkoušeny ještě na jedné ploše (levé lýtko viz. Obr. PR 15). Dále pak proběhlo testování ještě na dvou různých místech (pravého ramene viz. Obr. PR 16 a pravé hýždě viz. Obr. PR 17), ale již pouze dvěma metodami (laser a skalpel).

Metoda	Redukce vrstvy	Kontrolovatelnost	Šetrnost	Změna barevnosti	Výsledek
Laser EOS 1000	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Dobrá	Do žluta	Nedostatečný
Skalpel	Dobrá	Dostatečná	Nedostatečná	Ne	Nedostatečný
Mikropískování	Nedostatečná	Nedostatečná	Dostatečná	Do bíla	Nedostatečný

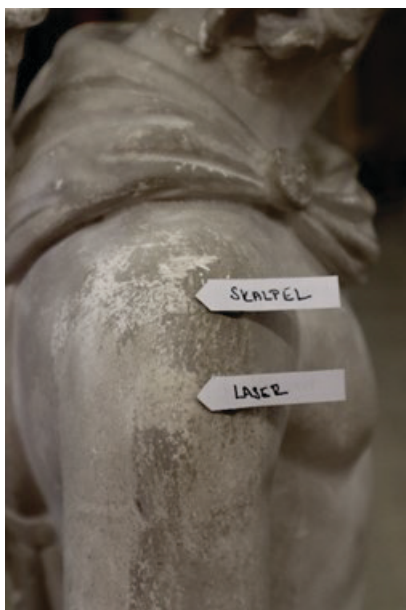
Tab. PR 2 Výsledky zkoušek minimalizování druhotného přetěru



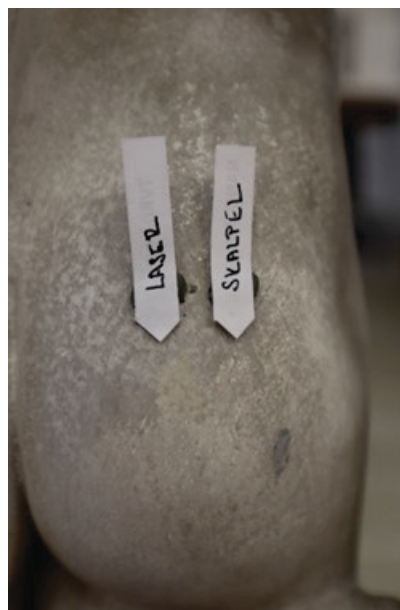
Obr. PR 14 Zkoušky redukce přetěru, plocha 1



Obr. PR 15 Zkoušky redukce přetěru, plocha 2



Obr. PR 16 Zkoušky redukce přetěru,
plocha 3



Obr. PR 17 Zkoušky redukce přetěru,
plocha 4

Výsledek:

Metoda redukce pomocí laseru se ukázala jako nejméně destruktivní pro původní barevnou úpravu. Avšak po použití laseru povrch mírně žloutne až zelená. Metoda je dobře kontrolovatelná a nedochází při ní k poškozování původní patiny.

Snímání přetěru pomocí skalpelu je na většině míst hůře kontrolovatelné, na některých místech (hlavně u testovací plochy č. 3 – pravé rameno) dochází k občasnému narušení původní patiny.

Metoda mikropískování se ukázala jako velmi nevhodná, kvůli špatné kontrolovatelnosti, hlavně na rozhraní vrstev, a „bělení“ povrchu.

Možnosti rozpustnosti přetěru

Metodika:

Kvůli žloutnutí povrchu vlivem laseru byly vyzkoušeny ještě další metody čištění, a to rozpouštění vrstvy pomocí rozpouštědel a povrchově aktivních látek. Nejprve byl vatový smotek na špejli lehce smočen v tekutině a poté byla tímto smotkem vrstva lehce třena a byla sledována reakce na povrchu.

Metoda	Účinek na přetěr	Vliv na původní úpravu
Teplá voda	Neúčinný	Narušuje původní úpravu
Ethanol	Neúčinný	Nemá vliv
Isopropanol	Neúčinný	Nemá vliv
aceton	Neúčinný	Nemá vliv
Xylen	Neúčinný	Nemá vliv
White spirit	Neúčinný	Nemá vliv
Toluen	Neúčinný	Nemá vliv
Technický benzín	Neúčinný	Nemá vliv
Ethomeen ve vodě	Neúčinný	Narušuje původní úpravu

Tab. PR 3 Výsledky zkoušek rozpustnosti přetěru

Výsledek:

Žádná z těchto metod se neukázala jako účinná pro redukci druhotného přetěru. Pokud byla použita voda docházelo k narušování původní úpravy. V případě rozpouštědel zase nebyla pozorována jakákoliv reakce přetěru na aplikaci.

Zkoušky snímání přetěru sloupnutím

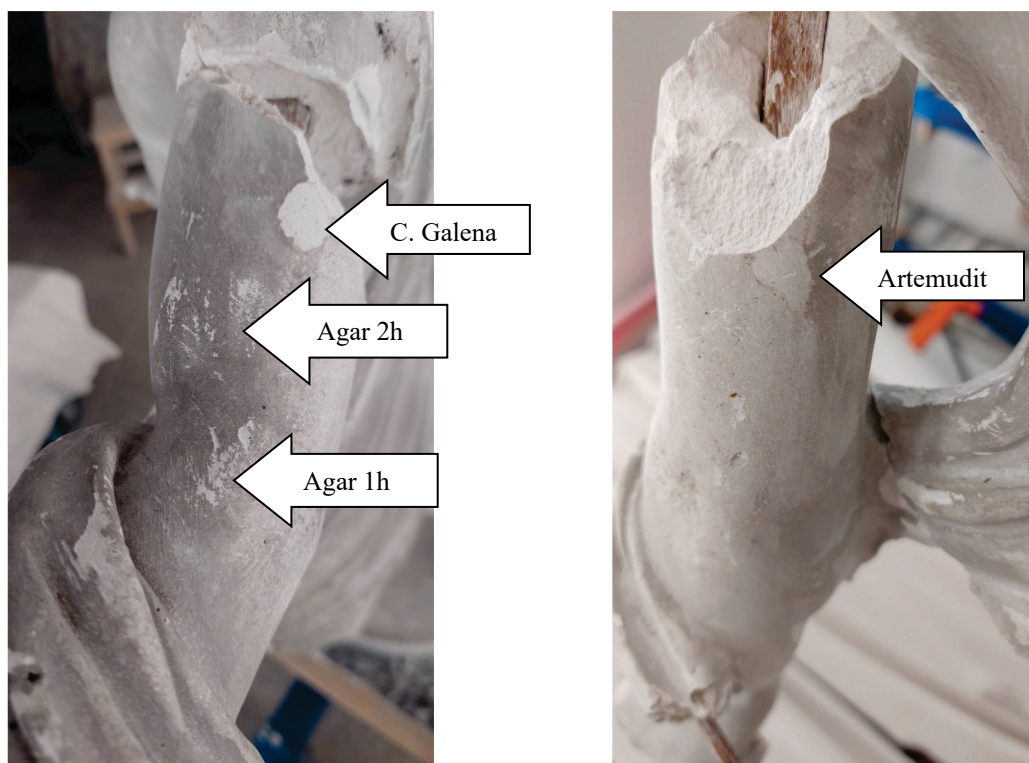
Metodika:

V dalších testech byly zkoušky zaměřeny na metody redukce pomocí gelů. Pro tyto účely byly vybrány 3 varianty „gelů“ a to: Artemundit, Clean Galena a gelové pásky z Agar. Artemundit a Clean Galena byly nanесeny na povrch a po vyschnutí sejmuty. Gelové pásky byly vytvořeny z 2% suspenze Agar ve vodě, který byl opakovaně zahříván v mikrovlnné troubě do rozpuštění a vytvoření gelu. Po zchlazení byl znovu zahříván na 40°C a poté nalit na rovnou plochu. Po vychladnutí byly nařezány 2 gelové pásky, které se aplikovaly na povrch.⁶⁶ První páska byla ponechána na povrchu 1 hodinu a druhá byla ponechána 2 hodiny.

U všech zkoušek se sledovala míra redukce přetěru a narušení původní úpravy.

Metoda	Účinek na přetěr	Vliv na původní úpravu
Artemundit	Dobré sejmutí přetěru	Narušuje původní úpravu
Clean Galena	Sejmutí přetěru	Snímá celou původní úpravu
Gelové pásky z Agar	Narušuje přetěr	Velmi narušuje původní úpravu

Tab. PR 4 Výsledky zkoušek slupovacích metod



Obr. PR 18 Zkoušky snímání přetěru sloupnutím

⁶⁶ MROVĚC, Pavel. *Restaurování sádrového modelu pomníku Jana Husa na Staroměstské náměstí od Stanislava Suchardy: Možnosti využití laseru v kontextu tradičních a současných metod čištění povrchově neupravených sádrových odlitek*. Diplomová práce. Litomyšl: Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice, 2017.

Výsledek:

Ani jedna metoda se neukázala jako vhodná. Všechny gely narušovaly původní úpravu. Gel z Agarů na první pohled nebyl agresivní vůči původní úpravě, ale po bližším prozkoumání plochy se ukázalo, že obsažená voda v páskách narušila původní monochromii a ta je poté velmi citlivá na otěr. Oproti tomu čistící účinek agarových pásek na přetěr nebyl tak dobrý, aby toto riziko bylo podstoupeno.

Celkové výsledky zkoušek:

Po všech zkouškách redukce přetěru nakonec došlo k odstoupení od původního záměru snímání sekundární povrchové úpravy. Dojde k pouhému zjemnění přechodu v místě pravé paže, kde byl kontrast nejvíce rušivý. K tomuto úkonu bude vybrána nejméně destruktivní metoda, a to metoda pomocí pulzního laseru, i přes to že po jeho použití povrch mírně žloutne.

Zkoušky čištění rezavých skvrn

Metodika:

Vzhledem k velikosti postižené plochy rzi byly na zkoušky její redukce vytipovány přípravky Chelaton III o koncentraci 5 % a roztok Komplexonu ve vodě o koncentraci 2 %. Jako nosič byl vybrán Arbocel pro snadnou snímatelnost z povrchu. Doba působení byla zvolena na 10 minut, kvůli lepší kontrolovatelnosti s ohledem na citlivost povrchové vrstvy vůči vodě.

Po první aplikaci obkladu se intenzita rzi snížila v obou případech. Povrch byl po sejmutí opatrně otřen vatovým smotkem smočeným v lihu s vodou o poměru 1:1 (kvůli minimalizaci smáčení povrchu vodou).



Obr. PR 19 Skvrny před 1. aplikací, během aplikace, po 1. aplikaci

Výsledek:

Oba zvolené přípravky měly podobnou úspěšnost při redukci rezavých skvrn. Díky lepší dostupnosti byl nakonec na dočištění zbylé skvrny zvolen 5% roztok Chelatonu III, který bude aplikován ve 3 aplikacích po 10 minutách. Po každé aplikaci bude povrch lehce otřen vatovým smotkem smočeným ve vodě s lihem.

Zkouška odstranění skvrn od lepidla

Metodika:

Dle výsledků chemicko-technologického průzkumu byl jako rozpouštědlo pro odstranění skvrn od lepidla vybrán aceton. Zkouška byla provedena pomocí vatového smotku namočeném v acetonu. Povrch byl pomocí tamponku lehce třen a sledoval se účinek na lepidlo. Tento pokus byl však neúspěšný. Po naměkčení lepidla došlo k úplnému odstranění spolu s oběma povrchovými vrstvami. Tato metoda navíc nefungovala u větších nánosů lepidla.

Dále byla ozkoušena metoda redukce skvrn pomocí pulzního laseru EOS 1000 (energie 200 mJ, energická hustota 2,8 J/m²). Ta se ukázala jako účinná u tmavších skvrn okolo lepeného spoje na krku.

Na větší nánosy adheziva bylo ozkoušeno nahřátí pomocí horkovzdušné pistole, které dokázalo změkčit lepidlo natolik, že bylo možno ho šetrně odstranit pomocí skalpelu. Tato metoda sice narušila druhotný nátěr, avšak původní nátěr zůstal.

Výsledky:

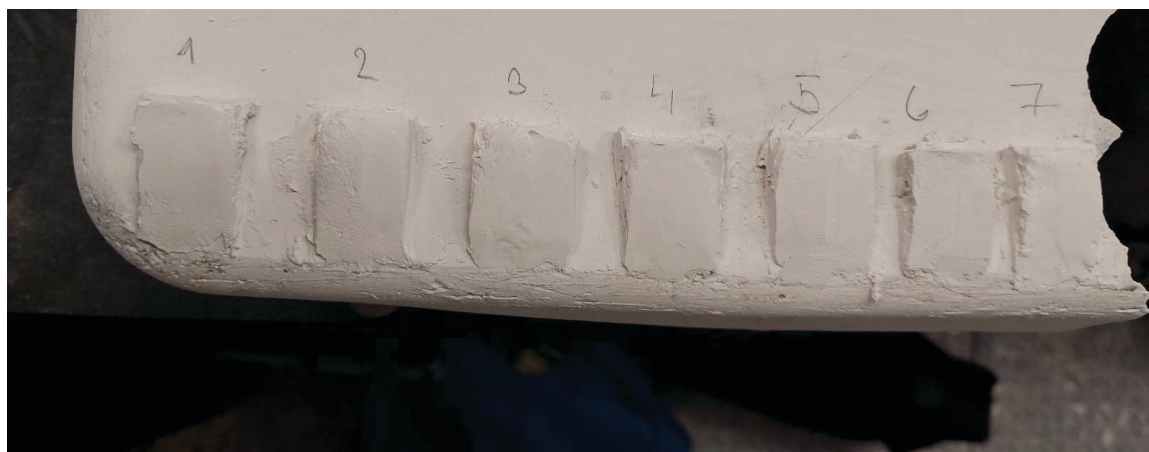
Pro redukci skvrn v místě spoje na krku byl vybrán pulzní laser EOS 1000 (energie 200 mJ, energická hustota 2,8 J/m²). K odstranění větších nánosů pak byla zvolena metoda zahřátím horkovzdušnou pistolí a následným odstraněním pomocí skalpelu.

3.6.2 Zkoušky tmelů

Pro doplnění chybějících částí a drobných poškození bylo důležité vybrat správnou kombinaci a poměr materiálů používaných pro doplnění sádrových odlitků. Výsledný tmel by měl mít podobné vlastnosti jako originální materiál. Důležitý je zejména stejný vzhled a o trochu menší tvrdost (tmel by měl být měkčí, aby při jeho broušení nedocházelo k narušování okolního originálu). Pro tyto účely byla vybrána samotná sádra Almod LC a následně v kombinaci s plavenou křídou a Rokoplastem od firmy ROKOSPOL a.s. Bylo vyzkoušeno několik různých poměrů těchto kombinací. Sledována byla především tvrdost zkoušek oproti originálu, vzhled, a brousitelnost.

Zkouška	Materiál	Poměr materiálů	Poměr vody	Výsledek
1	Sádra	-	50:50	Nevyhovující
2	Sádra + Rokoplast	1:2	50:50	Nevyhovující
3	Sádra + Rokoplast	1:3	50:50	Nevyhovující
4	Sádra + plav. křída	1:1	50:50	Vyhovující
5	Sádra + plav. křída	1:2	50:50	Nevyhovující
6	Sádra + plav. křída	2:1	50:50	Vyhovující
7	Sádra + Rokoplast	2:1	50:50	Nevyhovující

Tab. PR 5 Zkoušky tmelů



Obr. PR 20 Zkoušky tmelů

Výsledek:

Zkoušky tmelících směsí ukázaly, že nejvhodnějšími kombinacemi pro použití jsou tmely č. 4 a 6. Tmel s přídavkem Rokoplastu (2,3,7) měl delší časovou zpracovatelnost než tmely s přídavkem plavené křídou. Avšak celková zpracovatelnost (tvárnost a nanášení špachtlí) byla o trochu horší. Dále pak byly tyto směsi méně kompatibilní s barevnými retušemi než tmely s přídavkem plavené křídou.

U tmelů s přídavkem plavené křídly se ukázal tmel číslo 5 jako hodně měkký kvůli vyššímu obsahu křídly. Tmely č. 4 a 6 byly dobře zpracovatelné a měly dobrou kompatibilitu s barevnými retušemi. Avšak časová zpracovatelnost byla kratší než u směsí s přídavkem Rokoplastu.

Pro účely tmelení sochy Apollóna byl nakonec vybrán tmel č. 4 s poměrem sádry a plavené křídly 1:1.

4 Koncepce restaurátorského zásahu

Restaurovaný objekt sádrové plastiky Apollóna je v současnosti v soukromém vlastnictví a po restaurování je umístěn v interiéru. Na díle byl proveden komplexní restaurátorský zásah, který zajistil havarijní stav díla. Přáním investora bylo doplnit chybějící části modelace, což díky dochovaným analogiím bylo možné provést bez rizika dezinterpretace díla. Součástí zásahu bylo očištění objektu od prachových depozitů, kompletace díla, doplnění chybějících částí na základě analogických předloh za využití 3D tisku a digitálních technologií a následné barevné sjednocení všech doplňků.

Čištění a jeho míra vycházela z předpokladu zachování dochované patiny díla a odstranění nežádoucích vlivů negativně působících na dílo (prachové depozity). Tento úkon byl důležitý i z hlediska celkového vizuálního sjednocení povrchu. Výrazným rušivým momentem byl druhotný přetěr v místě pravé paže. Cílem čištění tak bylo snížit kontrast na rozhraní vrstev, aby více vynikla plasticita díla. Tento úkon byl prováděn s maximální možnou šetrností k původní patině. Odpadnuté části byly slepeny, praskliny vyinjektovány a všechny větší úbytky hmoty doplněny podle dohledaných analogií. Místa s krakeláží barevné vrstvy byla zajištěna. Při závěrečné barevné retuši se celé dílo vizuálně sjednotilo tak, aby všechna retušovaná místa byla při bližším zkoumání rozpoznatelná. Míra retuši vycházela z požadavku investora na barevné sjednocení celého díla. Proto bylo přistoupeno k technice nápodobivé reverzibilní retuše jak tmelů, tak lokálně i originálního povrchu v místech barevných kontrastů, které se nepovedlo dočistit. Zvolený materiál retuši vycházel z faktu, že originální patina je náchylná na vodu, a proto byly na jejich provedení použity reverzibilní restaurátorské barvy na bázi syntetické pryskyřice rozpustné v isopropanolu, aby při jejich případném odstraňování nedošlo k poškození původní patiny díla.

5 Postup prací

5.1 Etapa čištění a lokální fixace barevné vrstvy

Nejprve proběhla lokální fixáž krakeláže barevné vrstvy v místě záhybů drapérie pod krkem. Fixáž byla provedena 10 % akrylátovou disperzí Medium for consolidation od firmy Lascaux a aplikována byla pomocí injekční jehly a stříkačky. Po vstříknutí disperze pod šupinu byl povrch přetupován vatovým smotkem obaleným v igelitu.

Dále byl celý povrch díla šetrně ometen jemným štětcem a prach byl odsát vysavačem muzejního typu. Po odsátí volného prachu se povrch lokálně dočistil melaminovou houbičkou.

Poté byly očištěny všechny skvrny od adheziva. V místě spoje na krku byla provedena redukce pomocí laseru EOS 1000 (energie 200 mJ, energická hustota 2,8 J/m²). Ostatní drobné nánosy lepidla v místě vlasů a drapérie byly nejprve nahřáty horkovzdušnou pistolí a poté odstraněny pomocí skalpelu.

5.2 Redukce přetěru místě pravé paže

V místě rozhraní dvou barevných vrstev na pravé paži byla provedena lokální redukce přetěru za použití pulzního laseru EOS 1000 (energie 200 mJ, energická hustota 2,8 J/m²). Tato redukce proběhla pouze lokálně a s maximální šetrností k povrchu díla.

5.3 Lepení odpadlých částí a injektáž

Lepení fragmentů levé ruky a zlomených prstů pravé ruky probíhalo pomocí akrylového lepidla Restauro Acrykleber 498 HV od firmy Lascaux a sádrových obvazů (levá ruka). Nejprve došlo k separování všech lepených spojů 2 % šelakem v lihu. Poté byla uchycena dřevěná armatura (vycházející z levé paže) pomocí sádrových obvazů na její původní místo uvnitř odlitku. Dále došlo k přilepení fragmentu ramene pomocí akrylového lepidla. První vrstva lepidla byla zředěna vodou v poměru lepidlo:voda 1:2. Následně byla nanesena na spoje druhá vrstva v poměru lepidlo:voda 1:1.

Nakonec byla akrylátovým lepidlem vyinjektována prasklina u levého zápěstí a přilepeny prsty pravé ruky (stejný postup při nanášení lepidla viz. výše). Všechny spoje byly zajištěny pomocí stahovacích popruhů tak, aby nedošlo k poškození díla. Spoje u prstů se při lepení zafixovaly plastových svorek s nejvyšší možnou šetrností vůči dílu.

5.4 Etapa plastických retuší

Tmelení

Před etapou plastických retuší byla demontována armatura po ukazováku pravé ruky z důvodu nevhodného umístění. Armaturu po prsteníčku se nepodařilo odstranit, protože by při její demontáži mohlo dojít k poškození díla. Proto byla armatura prsteníčku pouze zkrácena a použita při následné rekonstrukci.

Poté byly všechny chybějící části doplněny. Plastické retuše byly provedeny předem vybraným tmelem (sádra:křída 1:1). Při doplnění se vycházelo z dohledaných analogií. Dále se také při rekonstrukci pracovalo s dohledaným 3D modelem Apollóna Belvederského.⁶⁷ Tento model byl vytištěn na 3D tiskárně ve velikosti cca 20 cm.



Obr. PR 21 3D tisk modelu Apollóna Belvederského

Model byl využit hlavně při rekonstrukci chybějící draperie. V případě chybějícího „cípu“ pod levou paží sloužil model hlavně pro přesnější napodobení záhybů, které z fotek nebylo zcela patrné. Tato část byla modelována přímo na díle pomocí vybrané tmelící směsi.

Tvorba sádrových doplňků

Při rekonstrukci chybějící přehozené draperie přes levou paži bylo také využito dohledaného 3D modelu. Nejprve byla vytištěna malá část chybějící draperie. Tento zkušební tisk ukázal, že dochovaná a vytištěná část na sebe navazují. Potom se přistoupilo k vytištění chybějícího kusu draperie pomocí 3D tisku.⁶⁸ Tisk byl následně zaformován do silikonu a odlit. Po vyschnutí byl odlitek vybroušen tak, aby došlo k vyhlazení viditelných vrstev typických pro 3D tisk, a také aby maximálně pasoval na dochovaný kus na díle. Následně byl tento kus přilepen epoxidovým lepidlem Akepox 5010. Lepený spoj byl izolován 10 % roztokem Paraloidu B72 v toluenu.

⁶⁷ SMK – National Gallery of Denmark. *Apollo Belvedere: 3D model*. Online. In: Sketchfab. 2016. Dostupné z: <https://sketchfab.com/3d-models/apollo-belvedere-fe5c0cffdc2a4f3985872212c692af0c>. [cit. 2024-09-08].

⁶⁸ Tisk a úpravu 3D modelu provedl MgA. Samuel Schreiber



Obr. PR 22 Postup při doplnění cípu drapérie pomocí 3D tisku

Hmoty prstů a šípů v toulci byly nejprve vymodelovány v hlíně, poté zaformovány do silikonu se sádrovým kadlubem a následně odlity. Po vytvrnutí se odlitky vyjmuly z formy a byly ponechány při pokojové teplotě do vyschnutí. Tyto doplňky pak byly osazeny pomocí nerezových armatur. Prsty byly lepeny pomocí akrylátového lepidla Restauro Acrylkleber 498 HV a šípů v toulci byly lepeny na epoxidové lepidlo Akepox 5010. Všechny spoje byly před lepením podetřeny 2% roztokem Paraloidu B72 v toluenu.

Nakonec došlo k tmelení drobných úbytků materiálu a lepených míst. Všechny plastické doplňky byly po vyschnutí zbroušeny do hladka.

5.5 Barevné retuše

Před etapou barevných retuší byly všechny plastické doplňky izolovány 3 % akrylátovou disperzí K9. Po jejím vyschnutí byla tato místa zapojena pomocí pryskyřičných barev Gamblin Conservation Colors. Tyto barvy byly ředěny isopropylalkoholem a na povrch „tupovány“ štětci.

6 Použité materiály a technologie

Etapa čištění

Suché čištění

- Jemné štětce, vysavač muzejního typu, melaminová houbička

Čištění skvrn od adheziva

- Pulzní laser EOS 1000 (energie 200 mJ, energická hustota 2,8 J/m²)
- Horkovzdušná pistole, skalpel

Lokální fixace barevné vrstvy

- 10% akrylátová disperze Medium for consolidation od firmy Lascaux, injekční jehla a injekční stříkačka, vatový smotek v igelitu

Redukce přetěru v místě pravé paže

- Pulzní laser EOS 1000 (energie 200 mJ, energická hustota 0,7 J/m²)

Lepení a injektáž odpadlých částí

- Akrylátové lepidlo Restauro Acrykleber 498 HV od firmy Lascaux s vodou v poměru lepidlo:voda 1:2 a 1:1, 2% šelak v lihu, sádrové obvazy, stahovací popruhy, plastové svorky, štětce, injekční jehly, injekční stříkačky

Lepení plastických doplňků

- Akrylátové lepidlo Restauro Acrykleber 498 HV od firmy Lascaux s vodou v poměru lepidlo:voda 1:2 a 1:1, 2% šelak v lihu (prsty na pravé ruce)
- epoxidové lepidlo AKEPOX 5010, nerezový čep 0,4 mm (šípky v toulci), 10% akrylátová pryskyřice Paraloid B72 v toluenu (drapérie visící přes levou ruku, šípky v toulci)
- popruhy, klíny, molitan, koberce

Plastické retuše

- Sádra (Almod LC (Saint Gobain)) a plavená křída (Kittfort) v poměru 1:1, sochařská hlína, formovací silikon, špachtle, brusné papíry, rašple, skalpel, 3d tisk drapérie přehozené přes levou ruku

Barevné retuše

- Pryskyřičné barvy Gamblin Consevarion Colors, syntetické štětce, Isopropylalkohol

7 Nová zjištění

Původní záměr redukce druhotného přetěru byl po zkouškách čištění pozměněn. Sekundární povrchová úprava se totiž ukázala jako velmi těžko odstranitelná bez narušení původní barevné úpravy pod ní, a proto bylo rozhodnuto přetěr pouze upravit na rozhraních a celé dílo plasticky a barevně sjednotit.

8 Doporučený režim památky

Vzhledem k materiálu díla (sádra), který je citlivý na vlhkost, se doporučuje interiérové uložení ve stabilních suchých, čistých a dobře větraných prostorech (doporučená relativní vzdušná vlhkost 50 % (max. 60 %) a maximální možná teplota 40°C). Dále se doporučuje pravidelné ometání prachových depozitů jemnými štětci či prachovkou a pravidelná kontrola lepených spojů.⁶⁹

⁶⁹ ĎOUBAL, Jakub; ZÍTKOVÁ, Petra; TIŠLOVÁ, Renata; KULHÁNEK, Martin; REJMAN, Petr et al. *Péče o sádrové odlitky*. Online, Průvodní zpráva k metodice. Fakulta restaurování Univerzity Pardubice, 2019. Dostupné z: https://fr.upce.cz/sites/default/files/global/2025-02/6451/Metodika%20-%20pece%20o%20sadrove%20odlitky%20%28FR%202019%29_110601.pdf. [cit. 2025-07-29].

9 Seznam literatury

9.1 Literatura

ĎOUBAL, Jakub; ZÍTKOVÁ, Petra; TIŠLOVÁ, Renata; KULHÁNEK, Martin; REJMAN, Petr et al. *Péče o sádrové odlitky*. Online, Průvodní zpráva k metodice. Fakulta restaurování Univerzity Pardubice, 2019. Dostupné z: https://fr.upce.cz/sites/default/files/global/2025-02/6451/Metodika%20-%20pece%20o%20sadrove%20odlitky%20%28FR%202019%29_110601.pdf. [cit. 2025-07-29].

MROVĚC, Pavel. *Restaurování sádrového modelu pomníku Jana Husa na Staroměstské náměstí od Stanislava Suchardy: Možnosti využití laseru v kontextu tradičních a současných metod čištění povrchově neupravených sádrových odlitků*. Diplomová práce. Litomyšl: Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice, 2017.

TIŠLOVÁ, Renata. *Chemicko-technologický průzkum: sádrová socha Apolla*. 22.12.2023. 2023.

ZAMAROVSKÝ, Vojtěch. *Bohové a hrdinové antických bájí*. 5. uPR vyd. V nakl. Brána 2. Praha: Brána, 2000.

9.2 Internetové zdroje

Apollón. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Apoll%C3%B3n>. [cit. 2024-01-11].

Britannica. Online. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Leochares>. [cit. 2024-06-07].

İskender Savaşır'ın Defteri. Online. Dostupné z: <http://defterisk.blogspot.com/2013/08/apollo-belvedere-cesitli-notlar.html>. [cit. 2024-06-07].

Sbírka antické plastiky. Online. Dostupné z: <https://antika.ff.cuni.cz/cs/sbirka-odlitku/historie-sbirky/>. [cit. 2024-06-07].

SMK – National Gallery of Denmark. *Apollo Belvedere: 3D model*. Online. In: Sketchfab. 2016. Dostupné z: <https://sketchfab.com/3d-models/apollo-belvedere-fe5c0cffdc2a4f3985872212c692af0c>. [cit. 2024-09-08].

The Wilcox Classical Museum. Online. Dostupné z: <https://wilcox.ku.edu/s/wilcox/item/11600>. [cit. 2024-06-07].

Vatican Museums. Online. Dostupné z: <https://www.museivaticani.va/content/museivaticani/en/collezioni/musei/museo-pio-clementino/Cortile-Ottagono/apollo-del-belvedere.html>. [cit. 2024-06-07].

10 Seznam obrázků

Obr. PR 1 Detekce kovových armatur.....	108
Obr. PR. 2 Detekce kovových armatur.....	108
Obr. PR 3 Apollón VIS před rest. pohled zředu.....	109
Obr. PR 4 Apollón UV před rest. pohled zředu.....	109
Obr. PR 5 Apollón VIS před rest. pohled zezadu.....	109
Obr. PR 6 Apollón UV před rest. pohled zezadu	109
Obr. PR 7 Odlomený fragment levé ruky, VIS před rest.	110
Obr. PR 8 Odlomený fragment ruky, UV před rest.....	110
Obr. PR 9 Apollón Belvederský zdroj obrázku: https://www.museivaticani.va/content/museivaticani/en/collezioni/musei/museo-pio-clementino/Cortile-Ottagono/apollo-del-belvedere.html	115
Obr. PR 10 Detail hlavy Apollóna Belvederského, mramor, zdroj obrázku: http://defterisk.blogspot.com/2013/08/apollo-belvedere-cesitli-notlar.html	115
Obr. PR 11 Apollón Belvederský, mramor, zdroj obrázku: https://www.britannica.com/biography/Leochares	115
Obr. PR 12 Apollón Belvederský, sádra, zdroj obrázku: https://wilcox.ku.edu/s/wilcox/item/11600	115
Obr. PR 13 Zkoušky suchého čištění	118
Obr. PR 14 Zkoušky redukce přetěru, plocha 1	119
Obr. PR 15 Zkoušky redukce přetěru, plocha 2	119
Obr. PR 16 Zkoušky redukce přetěru, plocha 3	120
Obr. PR 17 Zkoušky redukce přetěru, plocha 4	120
Obr. PR 18 Zkoušky snímání přetěru sloupnutím	122
Obr. PR 19 Skvrny před 1. aplikací, během aplikace, po 1. aplikaci	124
Obr. PR 20 Zkoušky tmelů.....	126
Obr. PR 21 3D tisk modelu Apollóna Belvederského.....	130
Obr. PR 22 Postup při doplnění cípu drapérie pomocí 3D tisku	131

11 Seznam tabulek

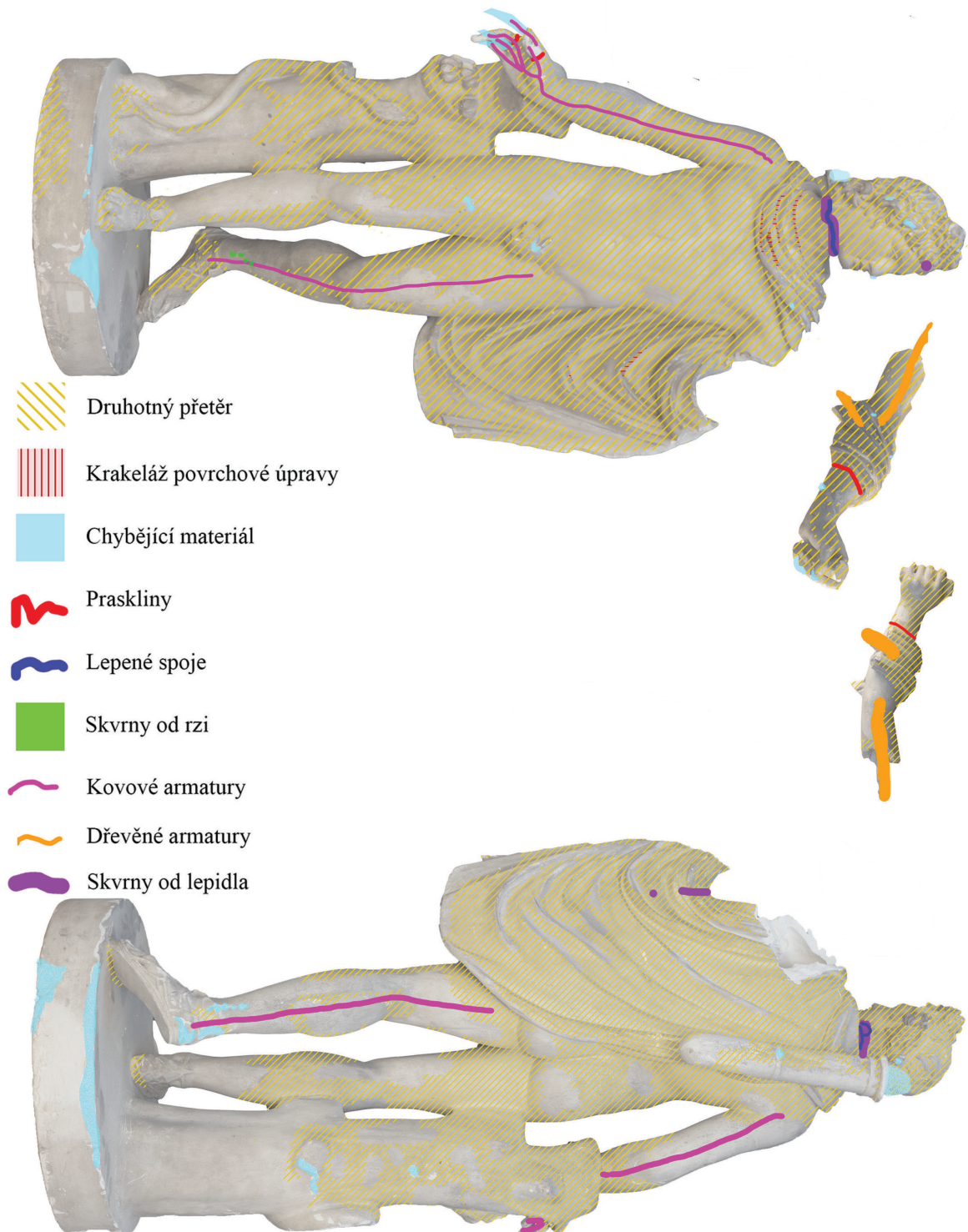
Tab. PR 1 Sumarizace poškození nacházející se na díle	112
Tab. PR 2 Výsledky zkoušek minimalizování druhotného přetěru	119
Tab. PR 3 Výsledky zkoušek rozpustnosti přetěru	121
Tab. PR 4 Výsledky zkoušek slupovacích metod	122
Tab. PR 5 Zkoušky tmelů	126

12 Fotografická dokumentace

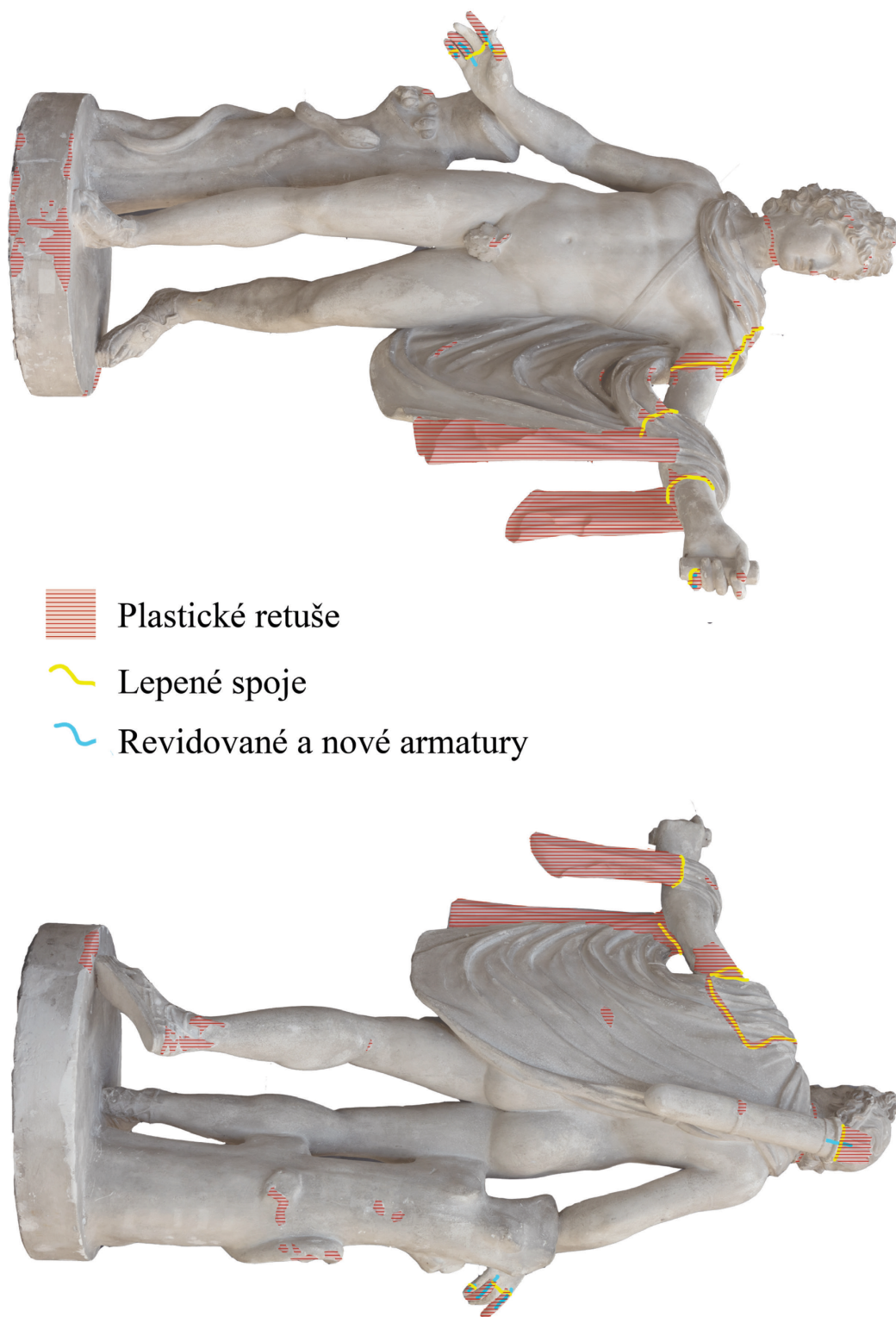
Fotodokumentace 1 Grafické zákresy stavu před restaurováním.....	141
Fotodokumentace 2 Grafické zákresy stavu po restaurování	142
Fotodokumentace 3 Plastika před restaurováním, čelní pohled	143
Fotodokumentace 4 Plastika před restaurováním, zadní pohled	144
Fotodokumentace 5 Plastika před restaurováním, levá strana.....	145
Fotodokumentace 6 Plastika před restaurováním, pravá strana	146
Fotodokumentace 7 Odlomené fragmenty levé ruky zepředu.....	147
Fotodokumentace 8 Odlomené fragmenty levé ruky zezadu	147
Fotodokumentace 9 Stav před restaurováním detail hlavy, čelní pohled	148
Fotodokumentace 10 Stav před restaurováním, detail druhotného přetěru na pravé paži.....	148
Fotodokumentace 11 Stav po očištění a slepení, přední pohled.....	149
Fotodokumentace 12 Stav po očištění a slepení, zadní pohled	150
Fotodokumentace 13 Stav po očištění a slepení, levá strana.....	151
Fotodokumentace 14 Stav po očištění a slepení, pravá strana	152
Fotodokumentace 15 Stav po očištění a slepení, detail očištěného spoje na krku	153
Fotodokumentace 16 Stav po očištění a slepení, detail pravé paže.....	153
Fotodokumentace 17 Stav po očištění a slepení, detail levé paže.....	154
Fotodokumentace 18 Stav po očištění a slepení, detail pravé ruky.....	154
Fotodokumentace 19 Stav po etapě plastických retuší, čelní pohled	155
Fotodokumentace 20 Stav po etapě plastických retuší, zadní pohled	156
Fotodokumentace 21 Stav po etapě plastických retuší, levá strana.....	157
Fotodokumentace 22 Stav po etapě plastických retuší, pravá strana	158
Fotodokumentace 23 Stav po etapě plastických retuší, detail hlavy a šípů.....	159
Fotodokumentace 24 Stav po etapě plastických retuší, detail šípů v toulci	159
Fotodokumentace 25 Stav po etapě plastických retuší, detail drapérie na levé paži.....	160
Fotodokumentace 26 Stav po etapě plastických retuší, detail prstů pravé ruky.....	160
Fotodokumentace 27 Stav po barevné retuši, čelní pohled	161
Fotodokumentace 28 Stav po barevné retuši, zadní pohled	162
Fotodokumentace 29 Stav po barevné retuši, levá strana.....	163
Fotodokumentace 30 Stav po barevné retuši, pravá strana	164
Fotodokumentace 31 Stav po barevné retuši, detail hlavy a šípů.....	165
Fotodokumentace 32 Stav po barevné retuši, detail drapérie na levé paži, přední pohled.....	165

Fotodokumentace 33 Stav po barevné retuši, detail drapérie na levé paži zadní pohled	166
Fotodokumentace 34 Stav po barevné retuši, detail prstů pravé ruky.....	166
Fotodokumentace 35 Detail drapérie u levé paže před restaurováním.....	167
Fotodokumentace 36 Detail drapérie u levé paže po slepení a očištění	167
Fotodokumentace 37 Detail drapérie u levé paže po plastické retuši.....	167
Fotodokumentace 38 Detail drapérie u levé paže po barevné retuši	167
Fotodokumentace 39 Detail pravé ruky před restaurováním.....	168
Fotodokumentace 40 Detail pravé ruky po slepení a očištění, modelace prstů v soch. hlíně	168
Fotodokumentace 41 Detail pravé ruky po plastické retuši	168
Fotodokumentace 42 Detail pravé ruky po barevné retuši	168
Fotodokumentace 43 Čištění povrchu od prachových depozitů vysavačem muzejního typu	169
Fotodokumentace 44 Detail lepeného spoje levé paže pomocí sádrových obvazů.....	169
Fotodokumentace 45 Proces lepení levé paže	169
Fotodokumentace 46 Injektáž lepených spojů.....	169
Fotodokumentace 47 Formování 3D výtisku cípu drapérie	170
Fotodokumentace 48 Lepení odlitého cípu drapérie	170
Fotodokumentace 49 Broušení plastických doplňků.....	170
Fotodokumentace 50 Barevná retuš	170

12.1 Grafická fotodokumentace



Fotodokumentace 1 Grafické zákresy stavu před restaurováním



Fotodokumentace 2 Grafické záznamy stavu po restaurování

12.2 Dílo před restaurováním



Fotodokumentace 3 Plastika před restaurováním, čelní pohled



Fotodokumentace 4 Plastika před restaurováním, zadní pohled



Fotodokumentace 5 Plastika před restaurováním, levá strana



Fotodokumentace 6 Plastika před restaurováním, pravá strana



Fotodokumentace 7 Odlomené fragmenty levé ruky zepředu



Fotodokumentace 8 Odlomené fragmenty levé ruky zezadu



Fotodokumentace 9 Stav před restaurováním detail hlavy, čelní pohled



Fotodokumentace 10 Stav před restaurováním, detail druhotného přetěru na pravé paži

12.3 Stav po očištění a slepení



Fotodokumentace 11 Stav po očištění a slepení, přední pohled



Fotodokumentace 12 Stav po očištění a slepení, zadní pohled



Fotodokumentace 13 Stav po očištění a slepení, levá strana



Fotodokumentace 14 Stav po očištění a slepení, pravá strana



Fotodokumentace 15 Stav po očištění a slepení, detail očištěného spoje na krku



Fotodokumentace 16 Stav po očištění a slepení, detail pravé paže



Fotodokumentace 17 Stav po očištění a slepení, detail levé paže



Fotodokumentace 18 Stav po očištění a slepení, detail pravé ruky

12.4 Dílo po etapě plastických retuší



Fotodokumentace 19 Stav po etapě plastických retuší, čelní pohled



Fotodokumentace 20 Stav po etapě plastických retuší, zadní pohled



Fotodokumentace 21 Stav po etapě plastických retuší, levá strana



Fotodokumentace 22 Stav po etapě plastických retuší, pravá strana



Fotodokumentace 23 Stav po etapě plastických retuší, detail hlavy a šípů



Fotodokumentace 24 Stav po etapě plastických retuší, detail šípů v toulci



Fotodokumentace 25 Stav po etapě plastických retuší, detail drapérie na levé paži



Fotodokumentace 26 Stav po etapě plastických retuší, detail prstů pravé ruky

12.5 Dílo po barevné retuši



Fotodokumentace 27 Stav po barevné retuši, čelní pohled



Fotodokumentace 28 Stav po barevné retuši, zadní pohled



Fotodokumentace 29 Stav po barevné retuši, levá strana



Fotodokumentace 30 Stav po barevné retuši, pravá strana



Fotodokumentace 31 Stav po barevné retuši, detail hlavy a šípů



Fotodokumentace 32 Stav po barevné retuši, detail drapérie na levé paži, přední pohled



Fotodokumentace 33 Stav po barevné retuši, detail drapérie na levé paži zadní pohled



Fotodokumentace 34 Stav po barevné retuši, detail prstů pravé ruky

12.6 Proces restaurování



Fotodokumentace 35 Detail drapérie u levé paže před restaurováním



Fotodokumentace 36 Detail drapérie u levé paže po slepení a očištění



Fotodokumentace 37 Detail drapérie u levé paže po plastické retuši



Fotodokumentace 38 Detail drapérie u levé paže po barevné retuši



Fotodokumentace 39 Detail pravé ruky před restaurováním



*Fotodokumentace 40 Detail pravé ruky po slepení a
očistění, modelace prstů v soch. hlině*



Fotodokumentace 41 Detail pravé ruky po plastické retuši



Fotodokumentace 42 Detail pravé ruky po barevné retuši



Fotodokumentace 43 Čištění povrchu od prachových depozitů vysavačem muzejního typu



Fotodokumentace 44 Detail lepeného spoje levé paže pomocí sádrových obvazů



Fotodokumentace 45 Proces lepení levé paže



Fotodokumentace 46 Injektáž lepených spojů



Fotodokumentace 47 Formování 3D výtisku cípu drapérie



Fotodokumentace 48 Lepení odlitého cípu drapérie



Fotodokumentace 49 Broušení plastických doplňků



Fotodokumentace 50 Barevná retuš

13 Příloha: Chemicko-technologický průzkum: sádrový odlitek Apollona



sádrový odlitek Apollona
Chemicko-technologický průzkum
I. OBECNÉ ÚDAJE

sádrový odlitek Apollona CHEMICKO-TECHNOLOGICKÝ PRŮZKUM



Obr. 1: sádrový odlitek Apollona, stav před restaurováním (říjen 2023), foto: Kristýna Bittnerová.

Akce: základní chemicko-technologický průzkum v rámci restaurování díla

Objekt/technika: sádrový odlitek s povrchovou vrstvou?

Sloh, datace: secese, ?

Autor:

Lokalizace památky: soukromé vlastnictví

Vlastník objektu: soukromý vlastník

Restaurátorský průzkum, restaurování: Kristýna Bittnerová, student 5. ročníku Ateliéru restaurování kamene a souvisejících materiálů, Univerzita Pardubice (dále jen FR, UPCE), odborné vedení: MgA. Jakub Ďoubal, vedoucí AK, FR, UPCE

Chemicko-technologický průzkum: Ing. Renata Tišlová, Ph.D., Katedra chemické technologie, Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice, Jiráskova 3, Litomyšl, 570 01

Realizace chemicko-technologického průzkumu: listopad-prosinec 2023

Jiráskova 3, 570 01 Litomyšl, telefon/fax 461 612 565, e-mail dekanat.FR@upce.cz,



II. ZADÁNÍ PRŮZKUMU

Ad 1) Průzkum stratigrafie povrchových/barevných vrstev - v rámci průzkumu bude zjištěno složení povrchové vrstvy a její stratigrafie.

Ad 2) Složení adheziva - průzkum je zaměřen na zjištění složení adheziva, které bylo v minulosti použito pro lepení odlomených částí odlitku.

III. METODIKA PRŮZKUMU, INSTRUMENTACE

a) Optická mikroskopie (OM) nábrusů v odraženém bílém světle a fluorescenci (UV a modrém světle)

Popis analýzy: metoda slouží pro dokumentaci a charakterizaci barevných úprav (stratigrafii), podkladu a jiných povrchových vrstev, např. depozitů, lakových vrstev, aj.

Instrumentace a podmínky měření: stereomikroskop SMZ 800 (Nikon) při zvětšení 10x, 20x a 30x v bílém odraženém světle - na úlocích vzorků. Optická mikroskopie příčných řezů vzorky byla provedena na optickém mikroskopu ECLIPSE LV100 (Nikon, Japan) při zvětšení 50x, 100x, 200x a 500x v odraženém bílém světle, procházejícím bílém světle, UV fluorescenci a modrém světle. Vlnová délka emitovaného UV záření je 330-380 nm a modrého světla je 450 – 490 nm.

b) Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) s mikrosondou (EDX) - prvková analýza povrchových/barevných vrstev

Popis analýzy: při analýze se zjišťuje stratigrafie a prvkové složení vybraných vrstev, na základě níž lze určit složení vrstvy (pigmenty, plniva, příp. pojiva).

Instrumentace a podmínky měření: skenovací elektronový mikroskop MIRA3-LMU (TESCAN) s EDX analyzátořem v režimu zpětně odražených elektronů (BSE). Vzorky byly analyzovány ve vysokém napětí 20kV, před analýzou pouhličeny. Vzorky byly analyzovány ve formě nábrusů. Analýza byla provedena kombinací několika metod: plošné, bodové i mapovací analýzy.

c) Infračervená spektrometrie (FTIR) - identifikace organických složek pojiva vybraných vrstev

Popis analýzy: při analýze se zjišťuje složení organického pojiva

Instrumentace a podmínky měření: spektrofotometr Nicolet 380 s diamantovým ATR krystalem. Vyhodnocení spekter bylo provedeno pomocí programu OMNIC 7.3 srovnávací metodou se spektry standardu knihovny FR UPa a Polymers Miracle UP a databáze IRUG (<http://www.irug.org/search-spectral-database>) a pomocí literatury: Infrared Spectroscopy in Conservation Science, M. R. Derrick, D. Stulik, J. M. Landery, ISBN 0-89236-469-6, Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies, ISBN 0-471-85298-8. Pro měření byly použity úlomky vzorků nebo izolovaných vrstev.

III. VZORKY K ANALÝZE

Popis vzorků a míst odběru sumarizuje Tab. I, místa odběru vzorků jsou zdokumentována v kapitole IV. Výsledky.

Odběr vzorků a fotodokumentace: student, pod odborným vedením technologa

Označení: VI (I 1362), označení čísla vyplývá ze vzorkového systému KCHT, FR, UPa, kde jsou vzorky archivovány.

Popis vzorků: Vzorek VI byl odebrán jako fragment souvrství podkladu a povrchové/barevné vrstvy.

Datum odběru vzorků: říjen 2023

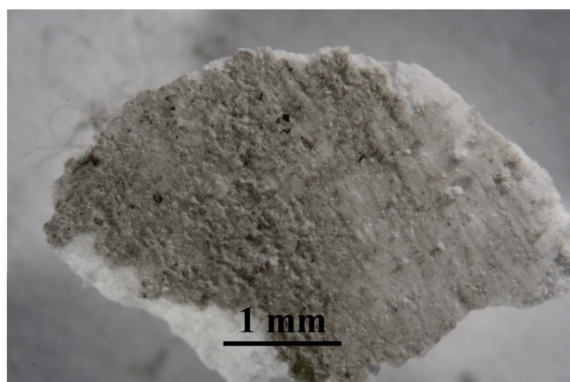
vzorek	popis vzorku	místo odběru	požadovaný průzkum	metody analýzy
VI/I 1362	bílá až naředlá povrchová úprava, druhotná	pohledově levá dlaň Apollóna	stratigrafie, určení složení povrchových vrstev	optická mikroskopie (OM) skenovací elektronová mikroskopie s EDX mikrosondou (SEM-EDX) infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR)
V2/I 1363	adhezivum	pohledově levá strana krku Apollóna, okolo lepeného spoje	složení	infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR)

Tab. I: Vzorky k chemicko-technologickému průzkumu. Základní popis vzorku, místa odběru a požadovaný průzkum.



Obr. 2: Sádrový odlitek Apollona, lokalizace míst odběru vzorků, foto a grafická úprava: Kristýna Bittnerová.

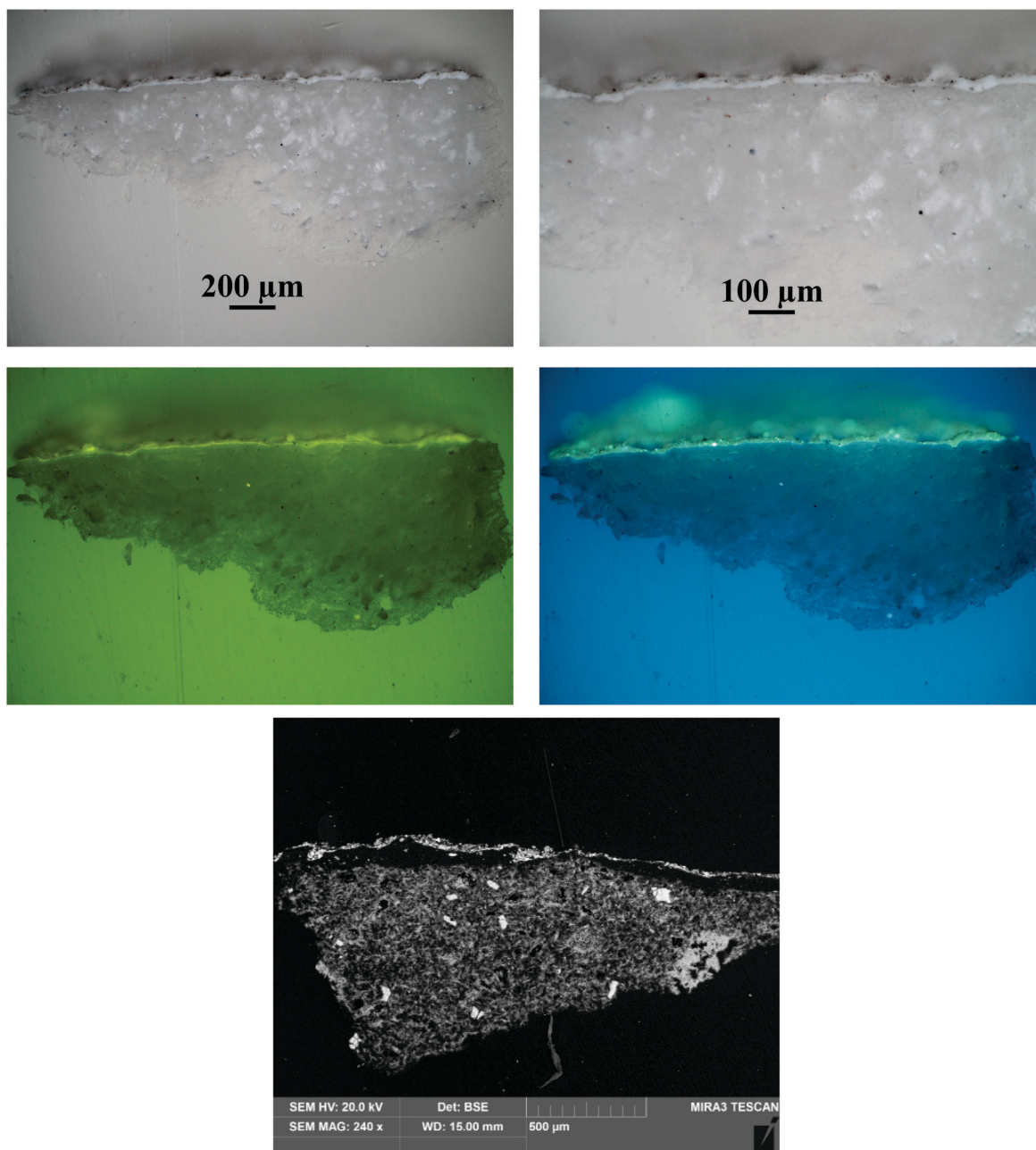
VI/II 362: bílá až naředlá povrchová úprava, druhotná
Místo odběru vzorku: pohledově levá dlaň Apollóna



Obr. 3 a-c: a) Místo odběru vzorku VI. b-c) Makrosnímky lícové a rubové strany vzorku. Snímky v odraženém světle stereomikroskopu SMZ 800 (Nikon).

Makroskopický popis: Bází vzorku tvoří sádrový podklad (materiál odlitku). Na jeho povrchu se nachází sv. šedá úprava - nátěr. Vrstva sv. šedé se mírně sprašuje.

VI/II 362: bílá až naředlá povrchová úprava, druhotná
Místo odběru vzorku: pohledově levá dlaň Apollóna



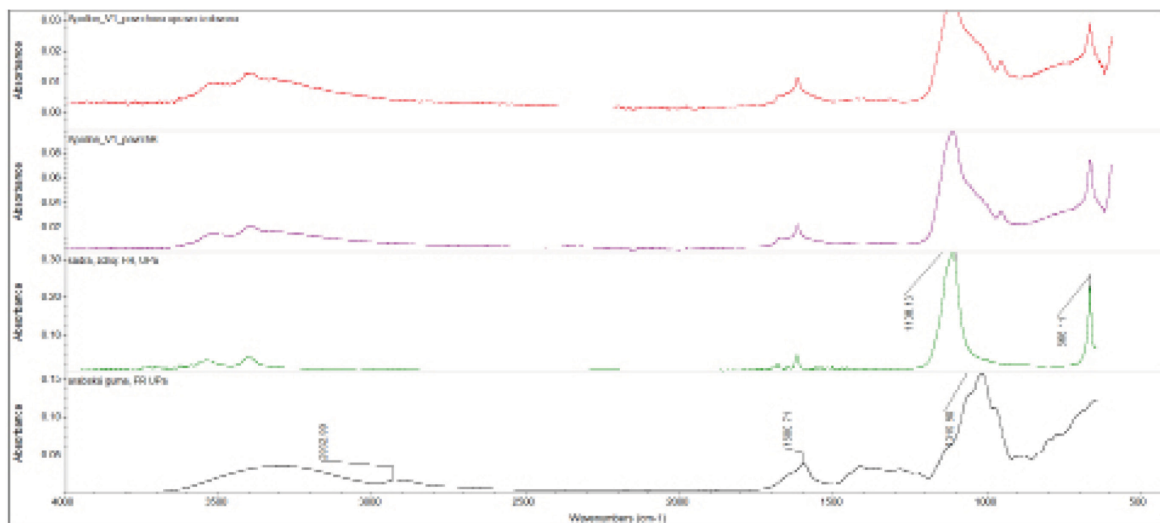
Obr. 4 a-e): Stratigrafie povrchových úprav vzorku VI/ II 362. Popis: a, b) snímky v odraženém světle z optického mikroskopu Nikon LV100 při zvětšení na mikroskopu 100x (vlevo), 200x (vpravo). c, d) snímky v UV a modrém světle. e) Snímek nábrusu ve skenovacím elektronovém mikroskopu MIRA3 Tescan v režimu zpětně odražených elektronů (BSE).

VI/II 362: bílá až naředlá povrchová úprava, druhotná
Místo odběru vzorku: pohledově levá dlaň Apollóna

VI/II 362	Popis	složení dle FTIR a SEM-EDX	Popis
0	bílá - materiál odlitku	celkové spektrum: <u>Ca</u> , <u>S</u> , (stopy Si, Al, Mg, Sr), ojedíněle nehydratovaná zrna síranu vápenatého (Ca, S), na snímku SEM zářívá zrnka plniva - dolomit: Ca, Mg (1:1) a magnesit (Mg)	podklad - sádrový odlitek s nahnědlou fluorescence; sádrový odlitek s ojedinelými zrny nehydratovaného sádrovce (kulovité částice v matrici) a nízkým obsahem znečišťujících příměsí s obsahem křemíku (Si), hliníku (Al) a železa (Fe). Ve vrstvě se nachází drobná zrnka plniva tvořeného dolomitem $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ nebo magnesitem (MgCO_3). Povrch odlitku je hladký, s tenkou vrstvičkou nečistot.
1	bílá	celkové spektrum: <u>Zn</u> , S, Ca	povrchová úprava tl. 75-140 μm, s výraznou nazelenalou fluorescence; obsahuje zinkovou bělobu, sloučeniny síry a vápníku pochází nejspíš z podkladu. Pojivem je arabská guma (viz Obr. 5).
2	černá	celkové spektrum: <u>org.</u> , Si, Al, Fe, (K)	vrstva nečistot, bez viditelné fluorescence; pravděpodobně vrstva prachových depositů složená z černého uhlíkatého pigmentu a hlinitokřemičitanů, které jsou běžnou součástí vrstev nečistot.

* Podtržené prvky jsou majoritně zastoupené a prvky v závorce jsou zastoupeny v zanedbatelné koncentraci.

FTIR analýza pojiva:



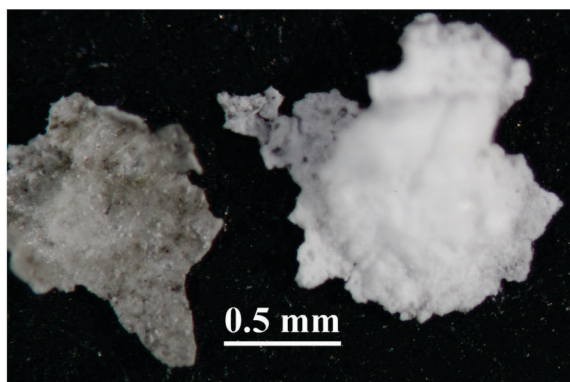
Obr. 5: FTIR spektrum vzorku VI/II 362 (měření bylo provedeno na povrchu vzorku) a srovnávací spektra vybraných látek. Ve vzorku byla identifikována sádra (z podkladu) a arabská guma. Přítomnost dalších látek nelze vyloučit.

Vyhodnocení FTIR analýzy:

U vzorku VI bylo prezentované spektrum získáno měřením z povrchu odebraného vzorku. Ve spektru jsou přítomné pásy síranu vápenatého (majoritní středně ostrý pík s maximem 1110 cm^{-1} , minoritní ostré píky s maximem 1621 a 676 cm^{-1}), který pochází z podkladu. Druhou identifikovanou složkou je nejspíše arabská guma, pro kterou je charakteristický zejména pás příslušející vibraci O-H vazeb (široký pás v intervalu 3600-3200 a dále středně široký pás s maximem okolo 1650 cm^{-1}). Vibracím C-H uhlovodíkového řetězce přísluší široký nevýrazný pík s maximem 3000-2800 cm^{-1} a menší pásy v oblasti 1480-1300 cm^{-1} .

V2/II 363: adhezivum

Místo odběru vzorku: pohledově levá strana krku Apollóna, okolo lepeného spoje

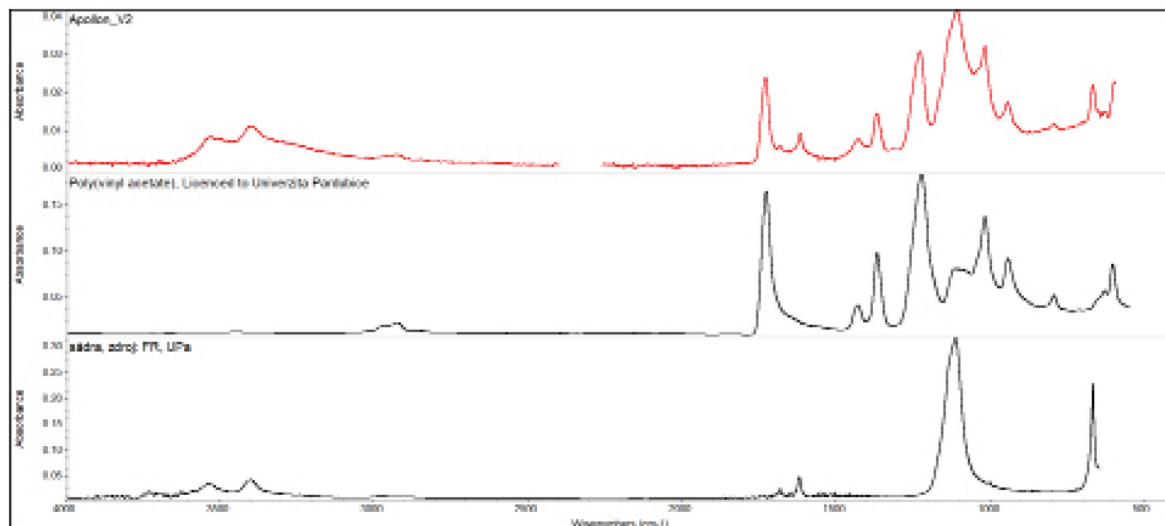


$\frac{a}{b|c}$ **Obr. 6** a-b a) Místo odběru vzorku V2. b) Makrosnímky líčové a rubové strany vzorku. Snímky v odraženém světle stereomikroskopu SMZ 800 (Nikon).

Makroskopický popis: Bázi vzorku tvoří sádrový podklad (materiál odlitku). Svrchní vrstvu tvoří šedo-okrový transparentní film adheziva. Vrstva je tvrdá a křehká.

V2/11 363: adhezivum

Místo odběru vzorku: pohledově levá strana krku Apollóna, okolo lepeného spoje



Obr. 7: FTIR spektrum vzorku V2/11 363 (měření bylo provedeno na odebraném vzorku) a srovnávací spektra vybraných látek. Z organických látek byly identifikovány látky na bázi polyvinylacetátu. Sádra pochází z podkladu. Přítomnost dalších látek nelze vyloučit.

Vyhodnocení FTIR analýzy:

U vzorku V2 bylo prezentované spektrum získáno měřením z izolovaného vzorku. Ve spektru jsou přítomné pásy síranu vápenatého (majoritní středně ostrý pík s maximem 1110 cm^{-1} , minoritní ostré píky s maximem 1621 a 676 cm^{-1}), který pochází z podkladu. Druhou identifikovanou složkou je polyvinylacetát (PVAC). Jeho přítomnost lze usuzovat zejména z oblasti silných pásů v oblasti mezi 1800-1700 cm^{-1} a 1300-1000 cm^{-1} , které přísluší vibraci karbonylových vazeb v acetátu (-C=O). Zcela typickými pásy polyvinyl acetátů jsou zejména ostrý pás s maximem okolo 1736 cm^{-1} příslušející vibraci vazby C=O a dále 1239 cm^{-1} , který přísluší vibraci vazby C-O-C v acetátu.



V. SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ, ZÁVĚR

Předmětem chemicko-technologického průzkumu je sádrový odlitek Apollona od neznámého autora. Jeho průzkum se uskutečnil v rámci restaurování objektu, které provádí Fakulta restaurování Univerzity Pardubice (Ateliér restaurování kamene a souvisejících materiálů) v roce 2023. Předmětem vlastního chemicko-technologického průzkumu je průzkum nesouvislé sv. šedé povrchové vrstvy a rozbor adheziva, se kterým byly lepeny odlomené části odlitku

Konkrétní cíle průzkumu:

Ad 1) Průzkum stratigrafie a složení povrchových/barevných úprav - v rámci průzkumu bude zjištěno složení povrchové vrstvy a její stratigrafie.

Ad 2) Složení adheziva - průzkum je zaměřen na zjištění složení adheziva, které bylo v minulosti použito pro lepení odlomených částí odlitku.

K chemicko-technologickému průzkumu byly odebrány dva vzorky označené V1 (I I 362) a V2 (I I 363). Pro analýzu vzorku byly použity mikroskopické techniky - optická a skenovací elektronová mikroskopie s mikrosondou (SEM-EDX). Složení adheziva bylo zjištěno pomocí infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR).

Výsledky průzkumu:

ad 1) Průzkum stratigrafie a složení povrchových/barevných úprav

Podklad vzorku V1 (I I 362) tvoří sádra. Na odlitku se nachází nesouvislá vrstva sv. šedé s obsahem zinkové běloby. Pojivem povrchové vrstvy je nejspíše aarbská guma. Na povrchu vrstvy byly identifikovány prachové depozity.

ad 2) Složení adheziva

Adhezivum, které bylo v minulosti použito pro lepení, tvoří syntetický polymer na bázi polyvinylacetátu.

Litomyšl, 22.12.2023

Ing. Renata Tišlová, Ph.D.

Počet stran ve zprávě: 9

Katedra chemické technologie
Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice