

Univerzita Pardubice

Fakulta restaurování

Restaurování betonového náhrobku s reliéfem truchlící ženy z
hřbitova v Parníku, České Třebové, od O. Zoubka. Zkoumání
možností pasivace koroze kovových armatur v uměleckých dílech
zhotovených z železobetonu za využití penetračních inhibitorů koroze

Diplomová práce

2023

BcA. Vít Šaffer

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Vít Šaffer
Osobní číslo:	R20019
Studijní program:	N8206 Výtvarná umění
Studijní obor:	Restaurování a konzervace nástěnné malby, sochařských děl a povrchů architektury: Kámen
Téma práce:	Restaurování betonového náhrobku s reliéfem truchlící ženy z hřbitova v Parníku, České Třebové od O. Zoubka Zkoumání možností pasivace koroze kovových armatur v uměleckých dílech zhotovených z železo-betonu za využití penetračních inhibitorů koroze
Zadávající katedra:	Ateliér restaurování kamene

Zásady pro vypracování

Teoretická část diplomové práce se bude zabývat vyhodnocením experimentální části, tzn. účinností a vedlejšími účinky penetračních inhibitorů koroze na předměty uměleckých hodnot zhotovených z železo-betonu. Dále bude zkoumáno použití a vývoj těchto materiálů, společně s tím bude provedena rešerše odborné literatury zabývající se tímto tématem. Nabyté poznatky budou posléze aplikovány na objekt z praktické části práce, výsledky budou dokumentovány a dále zkoumány.

Experimentální část se bude skládat z vytvoření sady vzorků železo-betonového materiálu, které budou uměle stařeny, aby na nich posléze mohla být testována škála zvolených inhibitorů. Na vzorcích bude sledována účinnost jednotlivých materiálů v čase. Zároveň budou pozorovány možné vedlejší efekty rizikové pro předměty umělecko-řemeslných hodnot. Součástí bude i aplikace inhibitorů na objekt z praktické části a nastavení jeho dlouhodobého sledování v podmínkách exteriéru.

Praktická část bude představovat komplexní restaurátorský zásah provedený na betonovém náhrobku s reliéfem truchlící ženy od Olbrama Zoubka pocházející z areálu obecního hřbitova v Parníku, České Třebové. 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 navozovat na předešlé výsledky zkoušek a vše bude dokumentováno podle standardů stanovených pro restaurátorské dokumentace.

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. Při realizaci diplomové práce bude dodržen následující harmonogram dokončování dílčích úkolů. Dodržování harmonogramu bude součástí závěrečného hodnocení práce.

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

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

Seznam doporučené literatury:

- **Základní:** Viñas S. M. *Contemporary Theory of Conservation*. Oxford, 2005.
- **Základní:** *Didaktické návody (vydáno v rámci projektu DOCEO PRO CULTURA)*.
- Henry, A., ed. *Stone conservation, principles and Practice (vybrané kapitoly přeloženy v rámci projektu DPC)*. Donhead Publishing Ltd. 2006.
- **Základní:** Price C., Doehne E. *Stone conservation (vybrané kapitoly přeloženy v rámci projektu DOCEO PRO CULTURA)*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 2010.
- **Doporučená:** Zelinger J. a kol. *Chemie v práci konzervátora a restaurátora*. Academia Praha, 1987.
- **Doporučená:** Ďoubal, J. *Kamenné památky Kutné Hory: restaurování a péče o sochařské památky (vydáno v rámci projektu DPC)*. Univerzita Pardubice, 2015.
- **Doporučená:** Torraca, G. *Lectures on materials Science For Architectural Conservation*. GCI, Los Angeles, 2009.
- **Doporučená:** Ďoubal J. a kol. *Sádrové odlitky: restaurování a péče o sádrová díla*. Univerzita Pardubice, 2020
- **Doporučená:** Šimůnková E., Bayerová T. *Pigmenty*. STOP Praha, 1999.
- **Doporučená:** Henry A., ed. *Principles and Practice (Polychrome Stone by Christopher Weeks: s. 237-255)*. Donhead Publishing Ltd., 2006.
- **Doporučená:** Koller, M. *Probleme und Methoden der Retusche polychromer Skulptur, in: maltechnik Restauro 85 /1979), s. 14-40 (přeloženo v rámci projektu DPC)*.
- **Doporučená:** Kopecká I., Nejedlý V. *Průzkum hist. materiálů, analytické metody pro rest. a pam. péči*. Grada Pub., 2005.
- **Doporučená:** Knoepfli A., ed. *Reclams Handbuch der Künstlerischen Techniken*. Stuttgart, 1990.
- **Doporučená:** Slánský, B. *Technika malby*. Praha, 2003.
- **Doporučená:** Slánský, B. *Technika v malířské tvorbě (malářský a restaurátorský materiál)*. Praha, 1976.
- **Doporučená:** BRANDI, C. *Teorie restaurování*. Kutná Hora: Tichá Byzanc, 2000.
- **Doporučená:** Kubička R., Zelinger J. *Výkladový slovník malířství, grafiky a restaurátorství*. Grada, 2004. ISBN 0-247-9046-7
- **Doporučená:** BUYS, S a OAKLEY V. *The conservation and restoration of Ceramics*. Oxford 1993

Vedoucí diplomové práce:

MgA. Petr Rejman

Ateliér restaurování kamene

Datum zadání diplomové práce:

15. listopadu 2021

Termín odevzdání diplomové práce:

16. srpna 2023

L.S.

Mgr. BcA. Radomír Slovík
děkan

doc. Jakub Ďoubal, Ph.D.
vedoucí ateliéru

Prohlašuji:

Práci s názvem Restaurování betonového náhrobku s reliéfem truchlící ženy z hřbitova v Parníku, České Třebové, od O. Zoubka. Zkoumaní možností pasivace koroze kovových armatur v uměleckých dílech zhotovených z železobetonu za využití penetračních inhibitorů koroze jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen 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.

V Litomyšli dne

Vít Šaffer

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval celému vedení Ateliéru restaurování kamene a obzvláště pak vedoucímu práce MgA. Petru Rejmanovi za jeho cenné rady a podporu v průběhu celého studia. Velký dík patří Ing. Karolu Bayerovi z Katedry chemicko-technologické, který zaštiťoval technologickou a teoretickou část této práce.

Dále bych pak rád poděkoval všem konzultantům a blízkým, kteří mi byli po dobu práce nápomocni. Zvláštní dík pak patří mojí rodině, za jejich vytrvalou podporu při mém studiu.

Anotace

Praktická část diplomové práce dokumentuje restaurátorský zásah na betonové hřbitovní plastice z obecního hřbitova Parník v České Třebové. Dílo bylo zhotoveno na zakázku pro rodinu Balcarovu sochařem Olbramem Zoubkem okolo roku 1963. Jedná se o komplexní restaurátorský zásah, včetně restaurátorského průzkumu a dokumentace kompletního postupu prací, podle současných standardů pro restaurátorské dokumentace. Teoretická část práce přímo navazuje na problematiku řešenou na restaurovaném díle. Zabývá se korozí kovových ocelových armatur uvnitř objektů z umělého kamene. Konkrétně zkoumáním možností omezení korozních pochodů pomocí inhibitorů koroze a jejich vlivu na památkové hodnoty díla. Vychází z výsledků experimentální části práce, připravené podle kritické rešerše odborné literatury. Evaluuje získaná data a vyvozuje z nich potenciálně vhodné postupy a materiály pro řešení problematiky v praxi. Práce důkladně dokumentuje průběh experimentální části, popisuje získané a interpretuje poznatky při zohlednění současných požadavků památkové péče.

Klíčová slova

Inhibitory koroze, restaurování, konzervace, umělý kámen, železobeton, realkalizace, koroze ocelových výztuží, O. Zoubek, socha.

Title

Restoration of a concrete tombstone with a relief of a mourning woman from the cemetery in Parník, Česká Třebová, by O. Zoubek. Investigation of the possibilities of corrosion passivation of metal fittings in works of art made of reinforced concrete using penetrating corrosion inhibitors

Annotation

The practical part of the thesis documents the restoration intervention on a concrete sculpture from the municipal cemetery Parník in Česká Třebová. The work was commissioned for the Balcar family by sculptor Olbram Zoubek around 1963. It is a complex restoration intervention, including a restoration survey and documentation of the complete progress of the work, according to current standards for restoration documentation. The theoretical part of the work is directly related to the issues addressed in the restored work. It deals with the corrosion of metal steel fittings inside artificial stone objects. Specifically, it examines the possibilities of limiting corrosion processes by using corrosion inhibitors and their influence on the heritage values of the work. It is based on the results of the experimental part of the thesis, prepared according to a critical literature search. It evaluates the data obtained and draws from them potentially suitable procedures and materials for solving the problem in practice. The thesis thoroughly documents the course of the experimental part, describes the obtained and interprets the findings taking into account the current requirements of conservation.

Keywords

Corrosion inhibitors, restoration, conservation, artificial stone, Reinforced Concrete, realcalisation, corrosion of steel reinforcements, O. Zoubek, statue.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Praktická část	12
2.1	Restaurování betonového náhrobku s reliéfem truchlící ženy ze hřbitova v Parníku, České Třebové.....	12
2.1.1	Základní informace o objektu	12
	Lokalizace památky	12
	Údaje o památce	12
	Údaje o akci.....	12
	Údaje o dokumentaci	13
2.2	Průzkum	13
2.2.1	Umělecko-historický průzkum	13
2.2.2	Restaurátorský průzkum	14
2.2.3	Chemicko-technologický průzkum.....	15
2.2.4	Zkoušky materiálů a technologií.....	19
2.3	Vyhodnocení průzkumu.....	24
2.4	Koncepce restaurátorského zásahu	25
2.4.1	Postup prací	26
2.5	Použité materiály a technologie.....	33
2.6	Doporučený režim a další pozorování.....	34
2.7	Fotografická dokumentace.....	36
2.7.1	Stav před restaurováním	36
2.7.2	Stav po očištění	45
2.7.3	Stav po plastické retuši	47
2.7.4	Stav po restaurování	52
2.7.5	Stav po osazení v exteriéru	59

3	Teoretická část	61
3.1	Úvod do problematiky	61
3.1.1	Charakteristika železobetonových materiálů	61
3.1.2	Korozní procesy a pasivace železných výztuží.....	64
4	Experimentální část	66
4.1	Úvod.....	66
4.2	Cíle.....	66
4.3	Příprava zkušebních vzorků.....	66
4.4	Použité inhibiční prostředky a jejich vlastnosti.....	69
4.5	Aplikace vybraných prostředků na zkušební tělíska.....	72
4.6	Použité metody	73
4.6.1	Hodnocení změny alkality vzorků.....	73
4.6.2	Spektrofotometrické posouzení barevných změn	75
4.7	Výsledky	75
4.7.1	Hodnocení změny alkality vzorků.....	75
4.7.2	Vyhodnocení spektrofotometrického posouzení barevných změn 79	
4.8	Shrnutí výsledků re alkalizace a celkové vyhodnocení	83
5	Závěr.....	86
6	Přílohy	88
6.1	Grafická dokumentace	88
6.1.1	Zákresy poškození	88
6.1.2	Zákresy po restaurování.....	90
6.2	Chemicko-technologický průzkum	92
6.2.1	Petrografický průzkum	92
6.2.2	Radiografický průzkum	95
7	Seznam použité literatury a pramenů.....	103

7.1	Seznam použité literatury a pramenů	103
8	Seznam tabulek	107
9	Seznam grafů.....	108
10	Seznam vyobrazení	109
10.1	Seznam obrazových příloh	109

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se sestává ze dvou hlavních částí. Praktické, která dokumentuje postup restaurátorského zásahu na betonovém náhrobku s reliéfem truchlící ženy z hřbitova v Parníku, České Třebové, od O. Zoubka, a části teoretické zabývající se zkoumáním možností pasivace koroze kovových armatur v uměleckých dílech zhotovených z železobetonu za využití penetračních inhibitorů koroze.

První část je dokumentací komplexního restaurátorského zásahu se všemi jejími náležitostmi. Popisuje celkový postup prací od provedení prvotních průzkumů až po realizaci samotného restaurátorského zásahu a zhotovení kopie. Součástí dokumentu je důkladná fotografická a technologická dokumentace. Hlavní řešenou problematikou celého zásahu byla koroze ocelových armatur, která byla identifikována jako hlavní původce poškození objektu.

Teoretická část se zabývá možnostmi využití penetračních inhibitorů koroze na ocelové armatury v betonových artefaktech. Tato problematika spojuje technický výzkum s péčí o kulturní dědictví, a to prostřednictvím zkoumání způsobů ochrany kovových prvků obsažených v historických betonových objektech. Cílem práce je nejenom analyzovat účinnost penetračních inhibitorů koroze při ochraně ocelových výztuží, ale také zhodnotit jejich dlouhodobý vliv na uměleckou a historickou hodnotu těchto objektů.

Závěry teoretické části byly následně využity při formulaci restaurátorského zásahu, který je obsahem praktické části.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Restaurování betonového náhrobku s reliéfem truchlící ženy ze hřbitova v Parníku, České Třebové

2.1.1 Základní informace o objektu

Lokalizace památky

Kraj:	Pardubický
Okres:	Ústí nad Orlicí
Obec:	Česká Třebová
Adresa:	Pod Březinou, Parník, 560 02 Česká Třebová

Údaje o památce

Název památky:	Betonová stéla s figurálním reliéfem truchlící ženy
Klasifikace památky:	nezapsaná památka
Autor:	Olbram Zoubek
Sloh/Datace:	1963
Materiál/technika:	Betonový odlitek
Rozměry:	výška - 156 cm šířka – 64 cm hloubka – 37 cm

Údaje o akci

Vlastník:	Zuzana Zajícová
Investor:	Zuzana Zajícová

Zhotovitel:	Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování, Jiráskova 3, 570 01 Litomyšl
Vypracoval/a:	Vít Šaffer
Pedagogický dohled:	MgA. Petr Rejman

Údaje o dokumentaci

Autor dokumentace:	Vít Šaffer
Autor fotografií:	Vít Šaffer
Použitá snímací technika:	Canon EOS 6D, objektivy 24 –70 mm/16 – 35mm

2.2 Průzkum

Tento dokument se zabývá objektem betonového náhrobku rodiny Balcarovy z městského hřbitova Parník v České Třebové. Náhrobek se v době průzkumu nacházel v prostorách Fakulty restaurování UPce. Zpráva dále popisuje prvotní ohledání objektu a restaurátorský průzkum. Následující text shrnuje provedené průzkumy a jejich vyhodnocení vedoucí ke koncepci restaurátorského zásahu.

2.2.1 Umělecko-historický průzkum

2.2.1.1 Historie díla

Dílo bylo zhotoveno sochařem Olbramem Zoubkem na zakázku pro jeho známého MUDr. Ladislava Loubala. Plastika byla vytvořena někdy okolo roku 1963, od té doby zdobila hrob Marie Balcarové, tchýně výše zmíněného MUDr. Ladislava Loubala. Na díle nebyly v minulosti provedeny žádné restaurátorské zásahy.¹

¹ E-mailová komunikace s majitelkou Zuzanou Zajícovou

Olbram Zoubek (*21.4. 1926 – †15. 6. 2017) byl českým poválečným sochařem, studoval na Vysoké škole uměleckoprůmyslové v ateliéru Josefa Wagnera. Proslavil se především sejmutím posmrtné masky Jana Palacha.

Zkoumané dílo se dá časově zařadit do ranější fáze 60. let, avšak ta je spíše typická pro autora abstrahovanou redukovanou figurou. Tato atypičnost se dá vysvětlit zakázkovou povahou díla, jeho zasazení do pietního celku hřbitova i intervencí do tvůrčího procesu ze strany investora.

2.2.1.2 Technika vzniku díla

Objekt byl s největší pravděpodobností vytvořen dusáním betonové směsi do formy. Dutina uvnitř byla nejspíše vytvořena vdusáním mokrého písku bez pojiva do středu stély, ten byl po vytvrdnutí a vyschnutí objektu vyjmut. Dá se předpokládat, že dutina byla vytvořena za účelem odlehčení konstrukce pro snazší transport na hrobové místo. Forma pak pravděpodobně vznikla na základě namodelovaného výjevu v hlíně. Stéla je dutá a mocnost stěny se pohybuje okolo 7-8 cm. Dílo je armováno ocelovými výztužemi o průměru přibližně 0,6 cm, ty jsou rozesety po celém objektu jak v horizontálním, tak i vertikálním směru. Hloubka uložení armatur se pohybuje okolo 0,2-4 cm od povrchu. Dílo bylo vytvořeno z betonové směsi skládající se z mramorové a vápenné drti pojené struskoportlandským cementem, viz kapitola Chemicko-technologický průzkum.

2.2.2 Restaurátorský průzkum

2.2.2.1 Vizuální průzkum

Na povrchu objektu jsou lokálně přítomná ložiska biologického napadení. Betonový blok objektu se jeví soudržně, avšak jsou na něm patrné strukturální poruchy, jako trhliny a ztráta materiálu kolem armatur. Jedná se především o oblast paty reliéfu a pravou část figurálního výjevu, kde armatury vystupují na povrch díla, a dochází tak k poškození modelace reliéfu. Poškození obdobného charakteru je pak možné pozorovat i na obvodových stranách bloku. Na zadní straně je patrné výrazné vzedmutí povrchu doprovázené prasklinami a lokálně se odlupujícími se fragmenty. Z povahy poškození se dá předpokládat, že jeho příčinou je koroze kovových armatur, jejímž následkem dochází k jejich deformaci a rozpínání, což má za následek trhání materiálu v okolí armatury. Dílo bylo přijato spolu s již dříve odpadlými částmi a úlomky objektu. Mimo to se v současnosti materiál objektu jeví jako pevný a soudržný, nedochází k drobení

betonu. Zároveň se však dá předpokládat, že v budoucnosti bude docházet k dalším strukturálním poruchám, trhaní a ztrátám původního materiálu, pokud nebude eliminován vliv korodujících výztuží. Povrch objektu je ztmavlý vlivem prachových depositů. Zdrsněný povrch objektu pravděpodobně není původní a vznikl až během let vymytím jemnějších částic plniva i pojiva působením povětrnostních vlivů, čímž vynikla hrubší zrna materiálu. Další patrnou alterací povrchu je zašedlý hladký povrch v oblasti pravého ramene pod hlavou, pravděpodobně se jedná o sádrovcovou krustu.

2.2.3 Chemicko-technologický průzkum

2.2.3.1 Cíle a navrhované metody rozšířeného chemicko-technologického průzkumu

Vzhledem k výše zmíněné problematice je důležité provést průzkumy zaměřené na lokalizaci kovových armatur, aby mohl být jejich destruktivní potenciál eliminován. K průzkumu kovových armatur se tedy navrhuje využití detektoru kovu, případně pokročilejších metod umožňujících jejich vizuální pozorování, jako je radiografický průzkum. Zmíněné metody by měly posloužit ke zjištění prostorového rozložení výztuží v objektu, toto poznání je důležité pro volbu možných postupů eliminace rizik s nimi spojenými. Dále se doporučuje ohledání objektu pomocí ultrazvukové transmise ke zjištění případných hloubkových strukturálních poruch. Za účelem bližší identifikace korozních činitelů výztuží budou provedeny analýza vodorozpustných solí a zkoušky alkality betonového materiálu. Zvýšená koncentrace chloridových iontů by mohla být jednou z příčin pokročilé koroze armatur, neboť jejich působením dochází k degradaci pasivačního filmu na povrchu výztuží. Snížená alkalita matérie by pak poukazovala na úplnou absenci ochranného filmu. Důležitou částí zásahu bude vytvoření tmelu o stejných vlastnostech jako jsou ty originálního materiálu, k tomu bude nezbytné provést komplexní materiálový průzkum se zaměřením na specifikaci plniva a pojiva. Tento průzkum zároveň poslouží i hlubšímu poznání a dokumentaci objektu.

2.2.3.2 Petrologický průzkum

Z petrologického průzkumu (viz příloha Analýza vzorku betonu z náhrobní desky od Olbrama Zoubka) vyplývá, že pojivem umělého kamene je struskoportlandský cement a plnivo se skládá z kombinace vápencové a mramorové drti. Velikost kameniva

se pohybuje v rozmezí 0,1 až 2 mm. Maximum tvoří zrna velikosti 0,4 -1 mm. Dále se zpráva zběžně věnuje složení depositů na povrchu objektu, to je následující: jemné částice sazí, silikáty a částečně i síran vápenatý. Výsledky průzkumu byly použity při výběru materiálu pro zkoušky tmelů.

2.2.3.3 Zkoušky koncentrace vodorozpustných solí

Na objektu byly taktéž provedeny zkoušky koncentrace vodorozpustných solí za cílem zjištění jejich stavu v objektu a nutnosti provedení případných zajišťujících opatření v návaznosti na ně. Vzorky byly odebrány ze 2 lokalit z hloubek 0–1 cm, 1–2 cm, 2–4 cm. Lokality viz tabulka 1. Výluh byl prováděn z vrtné moučky, průměr vrtáku 8 mm. Koncentrace byly stanoveny pomocí metody UV/VIS spektrofotometrie (přístroj Beckman Coulter DU© 720), bylo tak provedeno z výluhů odebraných vzorků v demineralizované vodě. Výsledky byly hodnoceny dle rakouské normy Önorm B 3355-1, viz tabulka 1. Výsledky analýz neprokázaly zvýšené a pro objekt nikterak rizikové hodnoty vodorozpustných solí. Důležitým poznáním vyplývajícím z průzkumu je, že s výjimkou vzorku SŠ2B nevykazuje objekt rizikové koncentrace chloridových aniontů, které by se mohly bezprostředně podílet na korozi kovových armatur.

1. Podle rakouské normy Önorm B 3355-1

Hodnocení i stupně zasolení	Sírany (%hm.)	Chloridy (%hm.)	Dusičniny (%hm.)
Nejsou nutná žádná opatření	< 0,10	< 0,03	< 0,05
Je nutné zvážit dílčí opatření	0,10 – 0,25	0,03 – 0,10	0,05 – 0,15
Opatření jsou nezbytná	> 0,25	> 0,10	> 0,15



Tab. 1 Rakouská norma Önorm B 3355-1, užívaná k posouzení rizikivosti koncentrací vodorozpustných solí

Vzor ek	m _{vzor ku} (g)	V _{H₂O} (ml)	Abs. _{(SO₄)₂₋}	C _{(SO₄)₂₋} (hm %)	C _{(SO₄)₂₋} (mmol/kg)	Abs. _(Cl⁻)	C _{Cl⁻} (hm. %)	C _{Cl⁻} (mmol/kg)	Abs. _(NO₃⁻)	C _{(NO₃)⁻} (hm. %)	C _{(NO₃)⁻} (mmol/kg)
SŠ 1 A	0,628	26,578	0,009	0,04	4	0,040	0,01	2	0,045	0,00	0
SŠ 1 B	0,790	29,737	0,050	0,19	19	0,095	0,01	3	0,032	0,00	0
SŠ 1 C	1,041	48,358	0,001	0,00	0	0,078	0,01	4	0,019	0,00	0
SŠ 2 A	0,896	34,505	0,014	0,05	6	0,107	0,01	4	0,013	0,00	0
SŠ 2 B	0,488	24,460	0,012	0,06	6	0,188	0,03	8	0,030	0,00	0
SŠ 2 C	1,028	45,537	0,005	0,02	2	0,052	0,01	2	0,016	0,00	0

Tab. 2 Výsledky naměřených koncentrací vodorozpustných solí na zkoumaném objektu

2.2.3.4 Zkoušky alkality

Mezi dalšími bylo provedeno i měření alkality materiálu. Bylo provedeno se záměrem zjištění alkality betonu (umělého kamene), která může mít významný vliv na rychlost koroze armatur. Při pH vyšších než 9-10 dochází dle literatury k omezení koroze ocelových armatur v betonu (nebo jiném materiálu) a bez jiných externích vlivů by tedy měla probíhat jen velice pomalu. Za cílem měření byly odebrány čtyři vzorky vrtné moučky (NAH1a, NAH1b, NAH2a, NAH2b) ze stejných oblastí jako v případě solí z hloubek 0-2 cm a 2-4 cm (viz Tabulka 1). Vrtná moučka bylo po odebrání přesáta (f 0,063 mm), homogenizována a zalita demineralizovanou vodou. Po 24 hodinách bylo přikročeno k měření pomocí přenosného digitálního pH metru HI 991001 od firmy HANNA Instruments. Z výsledku nevyplývá, že by bylo pH substrátu výrazněji sníženo a nedá se tak předpokládat výraznější vliv této skutečnosti na pokročilý stav koroze kovových armatur (viz tabulka 3).

	<p>SŠ 1 a NAH1 – lokalita odběru vrtné moučky</p> <p>VZ 1</p> <p>Spodní hrana v místě s pokročilou korozí kovových armatur</p>
	<p>SŠ 2 a NAH2 – lokalita odběru vrtné moučky</p> <p>VZ2</p> <p>Boční strana: výška cca 80 cm.</p>

Tab. 3 Lokality odběru vzorků pro určení koncentrace vodorozpustných solí a alkality materiálu

Vzorek a hloubka odběru	Naměřená hodnota pH
NAH1a, 0-2 cm	11,02
NAH1b, 2-4 cm	10,26
NAH2a, 0-2 cm	11,6
NAH2b, 2-4 cm	12,46

Tab. 4 Naměřené hodnoty pH, ze vzorků odebraných z objektu

2.2.3.5 Měření ultrazvukové transmise

Od měření pomocí ultrazvukové transmise bylo nakonec vzhledem ke konstrukci objektu upuštěno.

2.2.3.6 Radiografický průzkum






Na objektu bylo proveden radiografický průzkum za cílem zjištění pozice ocelových armatur ve hmotě betonu. Princip a postup digitální radiografie se záznamem na desky lze stručně popsat následujícím způsobem: Rentgenové záření se na rozdíl od viditelného světla vyznačuje značnou dávkou pronikavosti. Míra jeho absorpce je závislá na tloušťce a materiálovém složení objektů (materiály obsahující těžší prvky propouští RTG-záření méně), kterými proniká. Tuto vlastnost lze využít pro zobrazení vnitřní struktury objektů, je-li k dispozici materiál opticky citlivý na intenzitu expozice rentgenového záření. Citlivý materiál je nanesen na ohebnou desku. Deska je vložena do tmavého polymerního obalu, který minimálně tlumí průchod RTG záření, ale zcela blokuje průchod viditelného světla. Objekt, jehož vnitřní struktura je studována, musí být přístupný ze dvou stran tak, aby na jedné straně mohl být umístěn zdroj RTG záření a na druhé straně záznamová deska. RTG pulzy byly generovány pomocí zařízení Inspector XR200. Pro detekci RTG záření slouží opakovaně použitelné desky, ze kterých je vytvořený radiogram vyčítán speciálním skenerem, v němž je deska navinuta na rotující buben. Konkrétně se jedná o systém DIMAP Mk3 (akronym DIMAP je sestaven z částí rozvinutého názvu „Digital IMAge Plate system“).

Výsledné radiografické záznamy nebyly použitelné pro stanovení přesnější, především hloubkové pozice armatur. To je pravděpodobně dáno skladbou materiálů a dutinou uvnitř objektu. Pro celou zprávu radiografického průzkumu viz příloha RTG dokumentace.

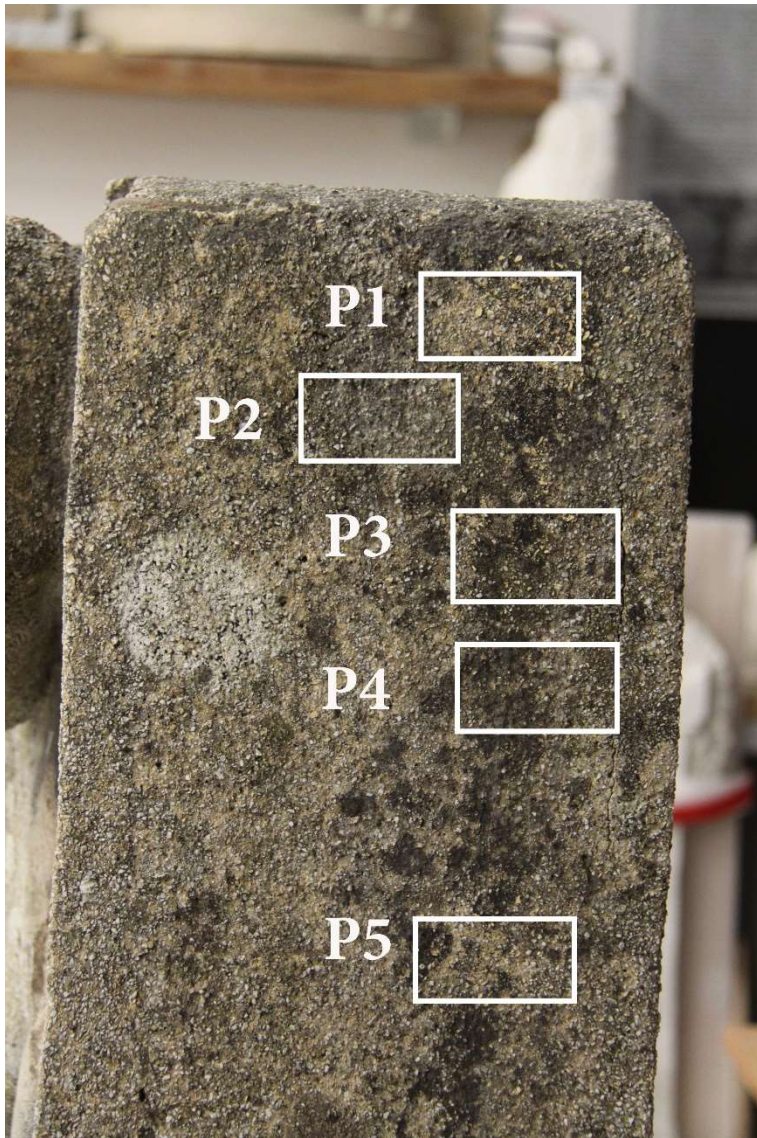
2.2.4 Zkoušky materiálů a technologií

2.2.4.1 Zkoušky možností čištění

Dále byly na objektu provedeny zkoušky možností čištění biologického napadení a ulpělých depositů. Testovány byly celkem 4 metody čištění. Viz tabulka 1. Jako nejúčinnější se jeví metoda za použití čpavkové vody a peroxidu vodíku v poměru 1:1, ostatní testované metody se samy o sobě jeví jako nedostatečné. Vybranou metodu je vhodné doplnit o čištění tlakovou parou k zbavení povrchu od uvolněných depositů a jeho omytí. Pro zákresy jednotlivých lokalit zkoušek čištění viz obr. 2.

	<p><i>Referenční plocha (P2)</i></p>
	<p><i>Zkouška čištění NH₃+H₂O₂ 1:1 (P1)</i></p> <p><i>Vysoká míra účinnosti čištění, problematická toxicita</i></p>
	<p><i>Zkouška čištění: ethanol (P3)</i></p> <p><i>Téměř bez účinku, pravděpodobně kvůli nízké retenci</i></p>
	<p><i>Zkoušky čištění: tlaková pára (P4)</i></p> <p><i>Neuspokojivý výsledek, avšak vhodná jako doplňující metoda k dočištění a omytí objektu.</i></p>
	<p><i>Zkoušky čištění: mikro-abrasivní pískování (P5)</i></p> <p><i>Poměrně účinné, zanechává některé silně ulpělé složky.</i></p>

Tab. 5 Mikro snímky zkoušek čištění na povrchu díla, provedeny pomocí přenosného USB mikroskopu Dino-lite




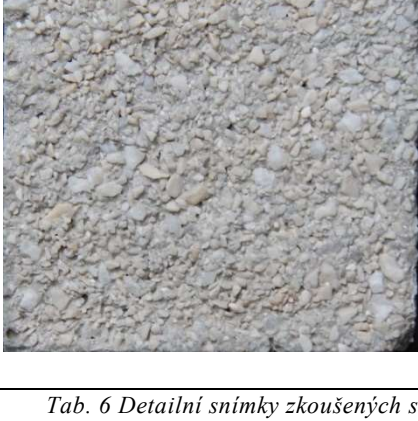


Obr. 1 Vyznačení lokalit zkoušek čištění na objektu

2.2.4.2 Zkoušky tmelů a materiálu ke zhotovení kopie

Tmely pro finální plastickou retuš a pro zhotovení dusané kopie byly voleny na základě petrologického průzkumu. Testovány byly dvě směsi lišící se použitým pojivem, u tmelu A byl použit bílý portlandský cement AALBORG WHITE u vzorku B byl použit portlandský směsný cement UNIVERZAL 32,5 R. Jako pojivo s ideálními vlastnostmi byla zvolena následující směs: vápencová drť z lokality Ernstbrun (0,4-1 mm), vápencová drť z lokality Ernstbrun (1-2 mm), vápencová drť z lokality Ernstbrun (<0,4 mm), vápencová drť Carolith bílý (<2 mm) v poměru 6:1:2:1. Směs s využitím bílého cementu je barevně více podobná originálu, co se zpracovatelských vlastností týče, ty jsou prakticky totožné u obou směsí. K docílení otevřeného vzhledu povrchu je nutné tmely povrchově upravit mikro-abrasivním pískováním.

Mimo zkoušky tmelů byly taktéž otestovány možnosti lepení oddělených fragmentů pomocí románského cementu VICAT. Zkouška byla provedena pomocí dvou betonových destiček, mezi něž byla nanесena řídká směs románského cementu. Ze zkoušky vyplývá, že při dostatečném provlhčení substrátu jsou adhezní vlastnosti románského cementu ideální. Problematická je však poměrně krátká doba tuhnutí, která by značně komplikovala přesné usazení fragmentu na místo. Na základě tohoto zjištění byla jako adhesivum pro zpětné usazení fragmentů zvolena epoxidová pryskyřice Akepox 5010 od společnosti Akemi.

	<p><i>Směs A (bílý cement) bez povrchové úpravy pískováním. Barevně podobnější originálu než směs B</i></p>
	<p><i>Směs A (bílý cement) s povrchovou úpravou pískováním</i></p>
	<p><i>Směs B (šedý směsný cement) bez povrchové úpravy pískováním</i></p>
	<p><i>Směs B (šedý směsný cement) s povrchovou úpravou pískováním</i></p>

Tab. 6 Detailní snímky zkoušených směsí pro plastickou retuš

2.3 Vyhodnocení průzkumu

Díky průzkumům došlo k celkovému rozšíření poznání stavu díla, na jehož základě bylo možné nastavit další kroky v procesu restaurování samotného.

Dílo vzniklo okolo roku 1963, autorem je Olbram Zoubek, objednavatelem Stanislav Loubal, osazeno bylo na hrobě v Parníku České Třebové.

Jedná se o dutou železobetonovou stělu s figurálním reliéfem plačky na čelní straně. Dílo je zhotoveno z umělého kamene s pojivem struskoportlandského cementu, kamenivo se skládá z kombinace vápencové a mramorové drti. Ocelové armatury jsou uloženy v materiálu v hloubce 0,2–4 cm.

Na povrchu se nachází lokální ložiska biologického napadení a ulpělých depositů. Biologické napadení společně s ulpělými deposity nepředstavuje bezprostřední nebezpečí pro objekt, nicméně posouvá jeho vizuální výraz. Hmota objektu je povětšinou intaktní a nedrolí se, netrpí plošnou ztrátou koheze s výjimkou míst narušených deformujícími se armaturami. Jako nejvýraznější destrukční činitel byla identifikována koroze kovových výztuží, projevující se jejich deformací a rozpínáním, vedoucí k trhání a praskání objektu. Dalším logický krokem tedy bylo zaměřit se na možné příčiny pokročilé koroze, za tímto účelem byly provedeny zkoušky alkality a zkoušky koncentrace vodorozpustných solí se zaměřením na obsah chloridových anionů. Snížené pH stejně jako zvýšený obsah chloridů mohou výrazně přispívat k urychlení koroze. Zkoušky však tyto možnosti vyvrátily. Pravděpodobně jsou tedy hlavními příčinami koroze přirozená oxidace materiálu, společně se srážkovými cykly a nízká kvalita použitého železa. Silná lokální koroze výztuží je pravděpodobně způsobena nízkou hloubkou uložení armatur, ty jsou pak mnohem více vystaveny korozním činitelům a dochází k akceleraci koroze. Tomu by odpovídala i lokalizace všech výrazných defektů, v těchto místech není armatura většinou uložena ve větší hloubce než 2 cm, takto tenká vrstva betonu není dostatečná pro plnění ochranné funkce. Z průzkumu koncentrací vodorozpustných solí navíc nevyplývají ani zvýšené hodnoty jiných rizikových solí. Tato zjištění o podstatě korozních procesů výztuží na objektu posloužila k nastavení koncepce protikorozní ochrany objektu, spočívající ve vyjmutí odhalených, nevhodně uložených armatur a následné aplikaci vybraného inhibičního prostředku.

Radiografický průzkum nepřinesl žádná přesvědčivá zjištění, a to především kvůli své neúčinnosti zapříčiněné strukturální povahou díla. Ani s pomocí přenosného detektoru kovů se nepodařilo určit bližší rozmístění ocelových výztuží. Neúspěšnost těchto metod vyloučila některé původně uvažované metody protikorozní ochrany ocelových výztuží, např. elektrochemickou – realkalizací² nebo případnou kompletní extrakci výztuží.

Na objektu jsou lokálně přítomny odtržené fragmenty držící na plastice jen mechanickým zaklíněním. Na dalších místech již došlo k odpadnutí těchto fragmentů, většina odpadlých fragmentů byla dohledána. Příčinou těchto poruch je již výše zmíněný proces lokální koroze armatur.

Na základě zkoušek materiálů bylo formulováno složení materiálu plastických retuší shodné se směsí pro tvorbu kopie, které se svým složením i vzezřením blíží co možná nejvíce originálu.

Po zrestaurování bude originální plastika umístěna v exteriéru litomyšlského městského hřbitova, kde poslouží k dalšímu pozorování účinnosti antikorozních opatření na ní provedených. Zároveň bude zhotovena materiálová kopie, která bude osazena na původní hrobové místo na hřbitově v Parníku. Kopie bude zhotovena bez ocelových výztuží, které jsou hlavním původcem degradace originálního díla. Po bližším ohledání originálu bylo shledáno, že jejich užití v objektu je po stránce strukturální pevnosti zbytné. Jejich vynecháním při tvorbě kopie tak dojde k odstranění nejrizikovějšího elementu a výraznému prodloužení životnosti kopie vůči originálu.

2.4 Koncepce restaurátorského zásahu

Na základě konzultací s investorem se nepočítá s návratem originálu na původní místo, namísto toho by měla vzniknout kopie, která nahradí originál na hrobu. Bylo tak rozhodnuto s přihlédnutím k stávajícímu stavu degradace díla a požadavkům investora. Kopie bude věrně napodobovat originál po materiálové stránce, nebude patinována za cílem vytvoření dojmu umělého opotřebení, místo toho bude ponechána stárnout přirozeně. Zároveň bude prezentovat dílo ve své celistvosti, to znamená, že bude sejmuta z plně plasticky doplněného díla. Zhotovená kopie bude po tvarové a celkové

² Norcure® Re-Alkalization – Concrete Corrosion Repair“, [online]. [cit. 2023-060]. Dostupné z: <https://www.vector-corrosion.com/n>

vizuální stránce věrnou kopií originálu, avšak konstrukčně bude koncipována za účelem vyvarování se neduhů sužujících originál. Především tedy vypuštěním ocelového armování z celkové konstrukce, po bližším ohledání se jeho uložení v originálu jeví jako kontraproduktivní. Tím dojde k omezení hlavních degradačních procesů sužujících originální dílo, a bude tak výrazně prodloužena životnost díla.

Originál bude osazen na Městském hřbitově v Litomyšli s možností dlouhodobého pozorování výsledků experimentální části zásahu zabývajících se konsolidací a stabilizací kovových armatur objektu. Zásah na originálu by měl být zaměřen především na eliminaci rizik a destruktivních vlivů spojených s korozí železných armatur. K vytvoření věrné kopie je nutné dílo modelačně doplnit a zajistit. Není však žádoucí úplné očištění díla od ulpěných depositů, jelikož samy o sobě dodávají dílu přidanou estetickou hodnotu a za léta expozice v exteriéru se staly jeho nedílnou součástí. Doplnky na původním díle budou rekonstrukčního charakteru se zaměřením na jejich vizuální začlenění k originálnímu celku. Restaurování

2.4.1 Postup prací

Veškeré práce na díle byly v průběhu restaurování a po jeho ukončení fotograficky, graficky a písemně dokumentovány. Celkový průběh zásahu je podrobně dokumentován v této restaurátorské zprávě.

2.4.1.1 Demontáž a transport objektu do prostor ARK

Před započítím restaurátorského průzkumu a následujících prací bylo dílo společně se všemi nalezenými fragmenty převezeno do prostor Ateliéru restaurování kamene Fakulty restaurování Univerzity Pardubice. Transport byl proveden 27.11. 2019.

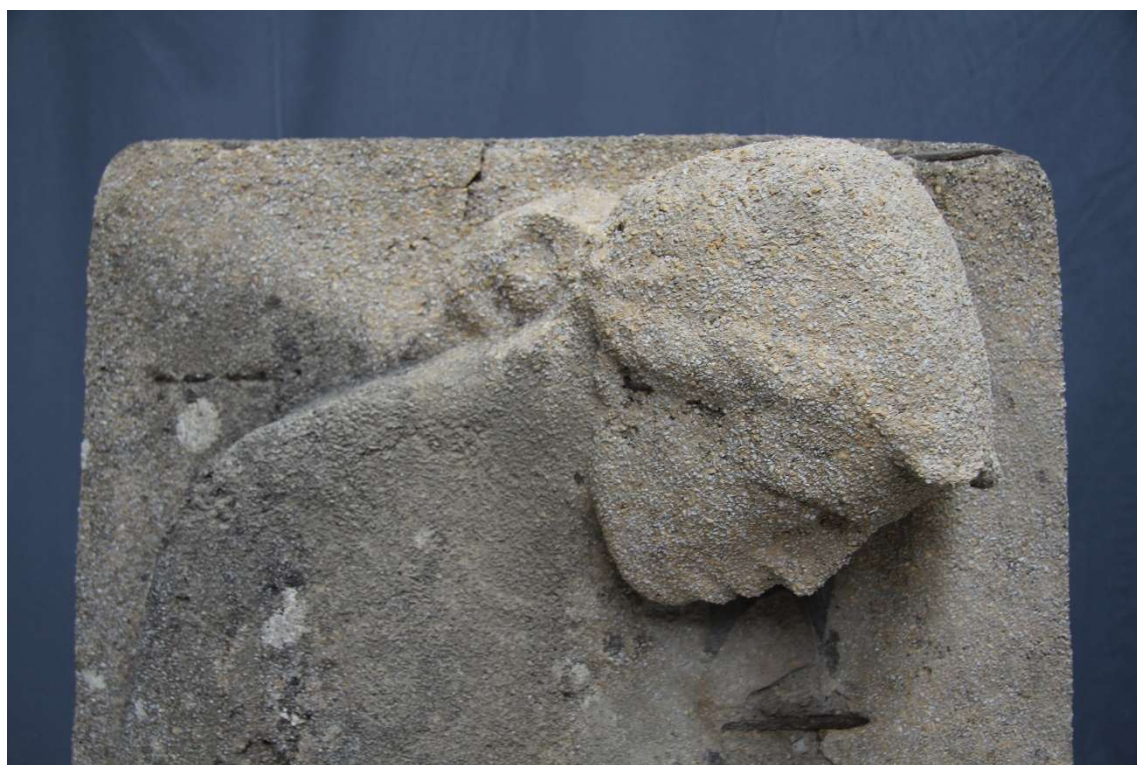
2.4.1.2 Zajištění a transfer uvolněných částí

Před započítím čištění musely být zajištěny uvolněné fragmenty objektu, které na plastice držely jen mechanickým zaklíněním a při manipulaci s dílem tak hrozilo bezprostřední riziko jejich poškození. Za tímto účelem byly použito gázových přelepů s adhezním mediem připraveným ze směsi Tylose HM 6000, dispersion K9 KREMER 5 % v poměru. Směs byla připravena postupným přimícháváním Tylose HM 6000 do vodné směsi 5 % K9 dokud nebylo dosaženo kýžené viskozity. Přelep probíhal přiložením několika gázových čtverců přes sebe na uvolněný fragment a následným

přetřením adhesivem. Po zatuhnutí adhesiva byly fragmenty opatrně sejmuty pomocí kamenického nářadí a následně uskladněny pro další užití.

2.4.1.3 Očištění od biologického napadení a ulpělých depositů

V dalším kroku bylo přikročeno k redukci biologického napadení a odstranění ulpělých depositů. Na základě zkoušek materiálů a technologií byla zvolena dvoufázová metoda čištění spočívající v aplikaci směsi peroxidu vodíku a čpavkové vody v poměru 1:1 a následné kombinaci mechanického dočištění plastovými kartáči s tlakovou párou. Směs peroxidu vodíku a čpavkové vody byla zvolena především díky schopnosti uvolnění nečistot z porézní struktury umělého kamene.



Obr. 2 Průběh čištění, srovnání vrchní plochy již očištěné od biologického napadení a ulpělých depositů se spodní partií bez zásahu

2.4.1.4 Odstranění kovových armatur

Odhalené armatury, které vykazovaly známky pokročilé koroze a byly dobře přístupné bez nutnosti poškození originálního materiálu objektu, byly odřezány pomocí mikro-uhlové brusky a následně vyjmuty. Jednalo se především o armatury v oblasti zad a spodní části figurálního výjevu. Viz grafická příloha Zákresy po restaurování. Po vyjmutí dožilých armatur byly veškeré zbývající přístupné kovové části ošetřeny

nátěrem 10% roztoku Paraloidu B-72 v xylenu, aby bylo zabráněno jejich další potencionální korozi.

2.4.1.5 Zhotovení výdusku

Ke zhotovení výdusku bylo dílo nutno nejdříve modelačně doplnit, ke zhotovení dočasných modelačních doplňků bylo využito směsi kaolínu a vápencové drti z lokality Ernstbrunn (0–1 mm) v poměru 1:3. Tato směs po strukturální stránce působila obdobným charakterem jako povrch objektu. Z tohoto reverzibilního tmelu byly doplněny chybějící části objektu a části, které byly dočasně transferovány. Dohledané fragmenty spodní části figurálního výjevu byly na objekt dočasně přilepeny pomocí směsi kaolínu s vodou. Dočasně modelačně doplněné dílo bylo následně přetřeno kaolínovým nátěrem tak, aby se celkově zjemnil jinak velmi hrubozrný povrch objektu a předešlo se problémům při nanášení silikonu na objekt. Před formováním byl povrch díla ošetřen detergentem. Následovalo nanesení tenké vrstvy silikonu na povrch díla a zhotovení klínové formy. Forma byla zhotovena s otevřenou rubovou stranou, která sloužila jako otvor pro dusání směsi. Do takto připravené formy byl postupně vdusán vybraný materiál (viz kapitola Zkoušky tmelů a materiálu ke zhotovení kopie). Do středu objektu byl zadusán mokřý písek tak, aby vznikla dutina a došlo k celkovému odlehčení kopie. Písek byl následně po vytvrdnutí objektu odstraněn. Po vyjmutí kopie následovalo její očištění a plastická retuš. Osazení kopie na hrobové místě na hřbitově v Parníku proběhlo 23. 10. 2022.



Obr. 3 Průběh formování originálu, silikonová forma společně se sádrovými klíny



Obr. 4 Průběh dusání kopie, jádro z mokrého písku

2.4.1.6 Lepení

Po vyjmutí originálů z formy byl originál očištěn tlakovou vodou a ponechán k vyschnutí. Následovalo zpětné osazení odpadlých a sejmutých fragmentů díla. Lepení probíhalo bodově za užití epoxidové pryskyřice Akepox 5010. Po přilepení a vytvrdnutí epoxidu byly sejmuty gázové přelepy pomocí tlakové páry a špachtlí. Transferované fragmenty byly posléze očištěny od zbytků adhesiva pomocí tlakové páry a plastových kartáčků.



Obr. 5 Detail průběhu lepení fragmentů, noha figurálního výjevu

2.4.1.7 Injektáž

Na objektu bylo nutné provést poměrně rozsáhlou injektáž. Injektáž si vyžádaly mezery a dutiny vzniklé přilepením uvolněných fragmentů a také praskliny na objektu

vzniklé působením armatur. Injektáž byla provedena injektážní směsí Ledan TB1, aplikovanou injekční stříkačkou s jehlou.

2.4.1.8 Plastická retuš

Díky prakticky kompletnímu dochování figurálního výjevu na přední části objektu a dohledání fragmentu jeho spodní části nebyla plastická retuš příliš komplikovaným zásahem. Plastické retuše se díky tomu omezily jen na defekty v ploše a mezery vzniklé zpětným osazením fragmentů. Lokálně bylo nutné provést i drobnější plastickou retuš ve figurálním výjevu, ale jednalo se pouze o zásahy marginální povahy. Tmel retuší byl po vytvrnutí lehce upraven metodou mikro abrazivního tryskání tak, aby se jeho struktura připodobnila originálu. K zhotovení retuší byl použit vybraný minerální tmel (viz kapitola Zkoušky materiálů a technologií).

2.4.1.9 Barevná retuš

Plastické doplňky byly následně barevně zapojeny tak, aby barevně nerušily a nebyly při letmém pozorování snadno rozpoznatelné. Retuš byla provedena světlostálými pigmenty (Deffner & Johann; Kremer Pigmente) pojenými 3 % směsí akrylátové disperze K9.

2.4.1.10 Ošetření inhibitorem koroze

Vzhledem ke konstrukčním vadám objektu spočívajícím ve velmi malé hloubce uložení armatur se nedá s jistotou konstatovat, že ošetření prostým realkalizačním prostředkem výrazně omezí postup koroze armatur. Z tohoto důvodu byl objekt ošetřen prostředkem Sika® FerroGard®-903 Plus, vybraný produkt vykazoval vysoké hodnoty navýšení pH a zároveň přímo potlačuje anodické i katodické korozní procesy. Prostředek byl aplikován nástřikem povrchu díla ve třech po sobě jdoucích cyklech.

2.4.1.11 Transport a osazení kopie

Kopie byla osazena na původním hrobovém místě v Parníku v České Třebové dne 23.10. 2022. Kopie byla osazena na předem připravenou krycí hrobovou desku zhotovenou z leštěné žuly. Příprava hrobového místa nebyla předmětem zásahu této práce, byla zajištěna odděleně přímo investorem. Na připravenou desku bylo dílo umístěno pomocí mobilního jeřábu.



Obr. 6 Průběh osazení kopie na hrobovém místě v Parníku v České Třebové pomocí mobilního jeřábu

2.4.1.12 Transport a osazení originálu

Dílo bylo převezeno na Městský hřbitov v Litomyšli dne 25.7. 2023. Zde bylo osazeno na předem připravený hrubě opracovaný žulový blok zahloubený v zemině. Mezi žulový kámen a dílo byla umístěna stavební asfaltová lepenka, aby se omezil vliv vzlínající vlhkosti. Spodní spára díla byla následně vytmelena.



Obr. 7 Průběh transportu zrestaurovaného originálu z prostor ARK

2.5 Použité materiály a technologie

Zajištění a transfer uvolněných částí – směsi Tylose HM 6000, Dispersion K9 KREMER 5 % v poměru dle potřeby, drobné kamenické nářadí

Očištění od biologického napadení a ulpělých depositů – směs peroxidu vodíku Baltech (10 %) a čpavkové vody Baltech (25 %) v poměru 1:1, tlaková pára

Odstranění kovových armatur – mikro úhlová bruska Dremel, kamenické nářadí

Zhotovení výdusku – zhotovení formy: ACC katalyzátor MM CAT R 5 NT, silikon MM913, sádra Almond LC, zhotovení výdusku: plnivo: vápencová drť z lokality Ernstbrun (0,4-1 mm), vápencová drť z lokality Ernstbrun (1-2 mm), vápencová drť z

lokality Ernstbrun (<0,4 mm), vápencová drť Carolith bílý (<2 mm) v poměru 6:1:2:1 pojivo: AALBORG WHITE, poměr plnivo : pojivo 3 : 1

Lepení – AkepoX 5010 od Akemi

Injektáž – Ledan TB1 Tecno Edile Toscana

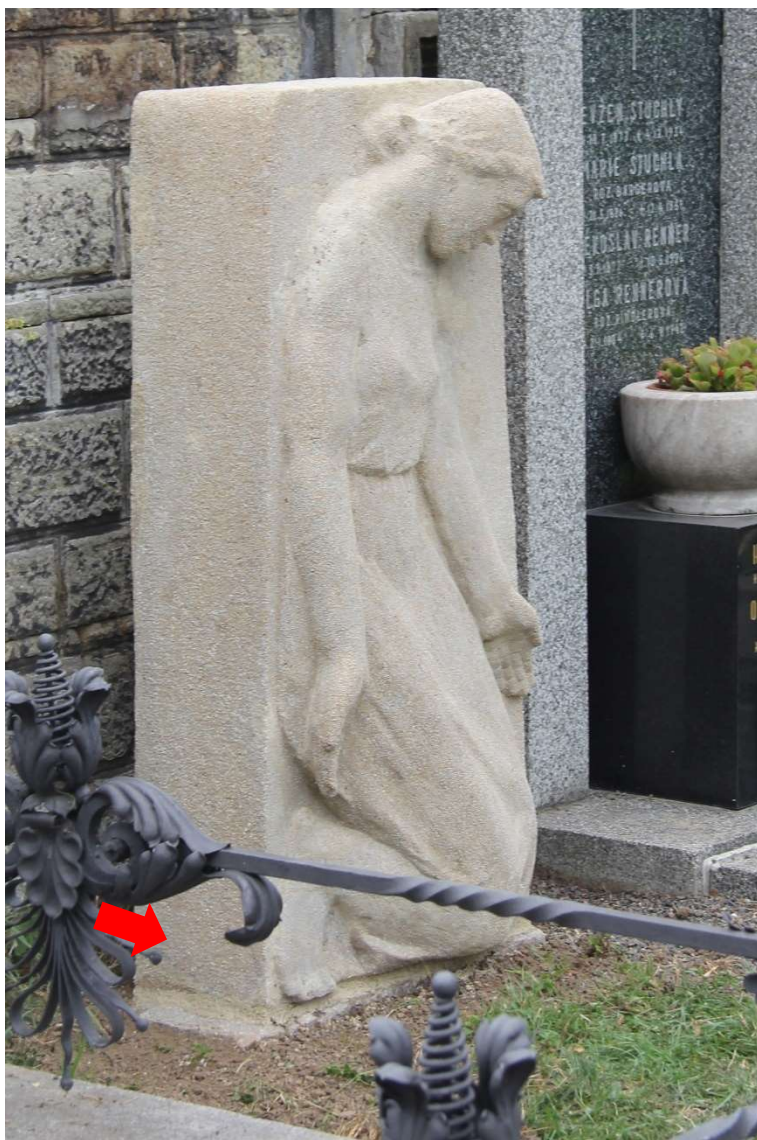
Plastická retuš – plnivo: vápencová drť z lokality Ernstbrun (0,4-1 mm), vápencová drť z lokality Ernstbrun (1-2 mm), vápencová drť z lokality Ernstbrun (<0,4 mm), vápencová drť Carolith bílý (<2 mm) v poměru 6:1:2:1 pojivo: AALBORG WHITE, poměr plnivo : pojivo 3 : 1, jemně mletý Sedlecký kaolín (pojivo pro dočasné plastické doplňky)

Barevná retuš – světlo-stále pigmenty (Deffner & Johann; Kremer Pigmente) pojenými 3 % směsí akrylátové disperze K9 Kremer

Ošetření inhibítorem koroze – Sika® FerroGard®-903 Plus ve třech cyklech, dohromady bylo aplikováno 3,5 litrů zmíněného prostředku.

2.6 Doporučený režim a další pozorování

U originálu osazeného na litomyšlském městském hřbitově se doporučuje pravidelné monitorování a revize plastických doplňků. Během zimy je dílo vystaveno rizikovým faktorům, jako jsou vysoké srážky spojené s mrazovými cykly ve větší míře. Proto je ideální tyto revize provádět v jarním období po zimě. Zvláštní pozornost by měla být věnována případnému vzniku nových prasklin či poškození plastických doplňků, indikujících možnou pokračující korozi výztuží, vedoucí k dalšímu poškození objektu. Vzhledem k experimentální povaze zásahu provedeného na plastice se zároveň navrhuje režim dalšího sledování hladiny alkality materiálu objektu. Sledování vývoje alkality objektu se navrhuje provádět v jednoletém cyklu odběrem vzorku vrtné moučky ze spodních partií díla, viz obr. 8. Odběr se doporučuje provádět vrtákem o průměru 8 mm ve dvou hloubkách a to 0 – 20 mm a 20 – 40 mm. Odebraný vzorek bude posléze analyzován dle postupu v experimentální části této práce, viz Hodnocení změny alkality vzorků. Násbíraná data budou následně zanesena do tabulky společně s již naměřenými daty v této práci, viz tab. 4. Získaná data umožní vyhodnocení účinnosti použitého inhibitoru v delším časovém horizontu, než bylo možno v rámci této práce samotné.



Obr. 8 Zakreslení lokality pro budoucí odběr vzorků k posouzení vývoje alkalické rezervy

2.7 Fotografická dokumentace

2.7.1 Stav před restaurováním



Obr. 9 Stav před restaurováním, čelní pohled



Obr. 10 Stav před restaurováním, zadní pohled



Obr. 11 Stav před restaurováním, pravý boční pohled



Obr. 12 Stav před restaurováním, levý boční pohled



Obr. 13 stav před restaurováním, spodní pohled



Obr. 14 Stav před restaurováním, detail obnažené armatury, pohled ze shora



Obr. 15 Stav před restaurováním, odpadlé fragmenty



Obr. 16 Stav před restaurováním, detail figurálního výjevu



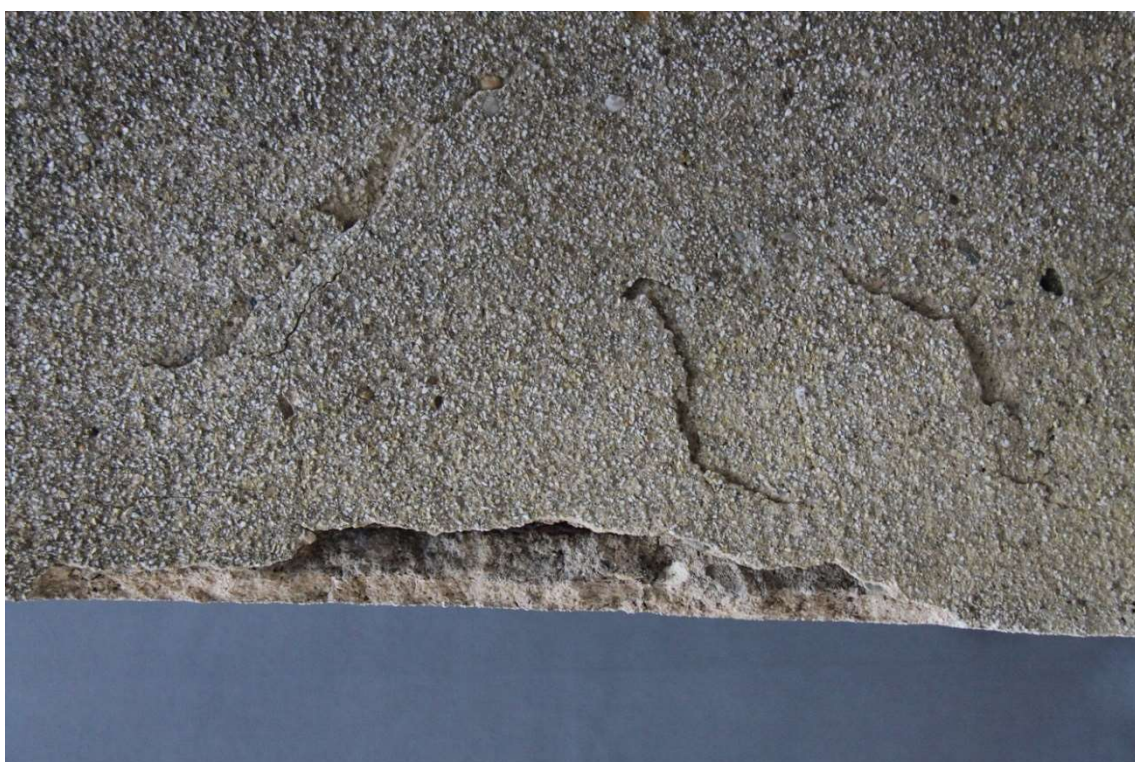
Obr. 17 Stav před restaurováním, detail levé dlaně figurálního výjevu



Obr. 18 Stav před restaurováním, detail pravé dlaně figurálního výjevu



Obr. 19 Stav před restaurováním, detail zkorodované armatury, zadní strana



Obr. 20 Stav před restaurováním, detail zkorodované armatury, zadní strana



Obr. 21 Stav před restaurováním, hlavy figurálního výjevu

2.7.2 Stav po očištění



Obr. 22 Stav po očištění, čelní pohled



Obr. 23 Stav po očištění, zadní pohled



Obr. 24 Stav po očištění, levý boční pohled



Obr. 25 Stav po očištění, pravý boční pohled

2.7.3 Stav po plastické retuši



Obr. 26 Stav po plastické retuši, čelní pohled



Obr. 27 Stav po plastické retuši, zadní pohled



Obr. 28 Stav po plastické retuši, levý boční pohled



Obr. 29 Stav po plastické retuši, pravý boční pohled



Obr. 30 Stav po plastické retuši, detail nohy figurálního výjevu



Obr. 31 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu



Obr. 32 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu



Obr. 33 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu



Obr. 34 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu



Obr. 35 Stav po plastické retuši, spodní pohled

2.7.4 Stav po restaurování



Obr. 36 Stav po restaurování, čelní pohled



Obr. 37 Stav po restaurování, zadní pohled



Obr. 38 Stav po restaurování, pravý boční pohled



Obr. 39 Stav po restaurování, levý boční pohled



Obr. 40 Stav po restaurování, detail plastické retuše zadní část



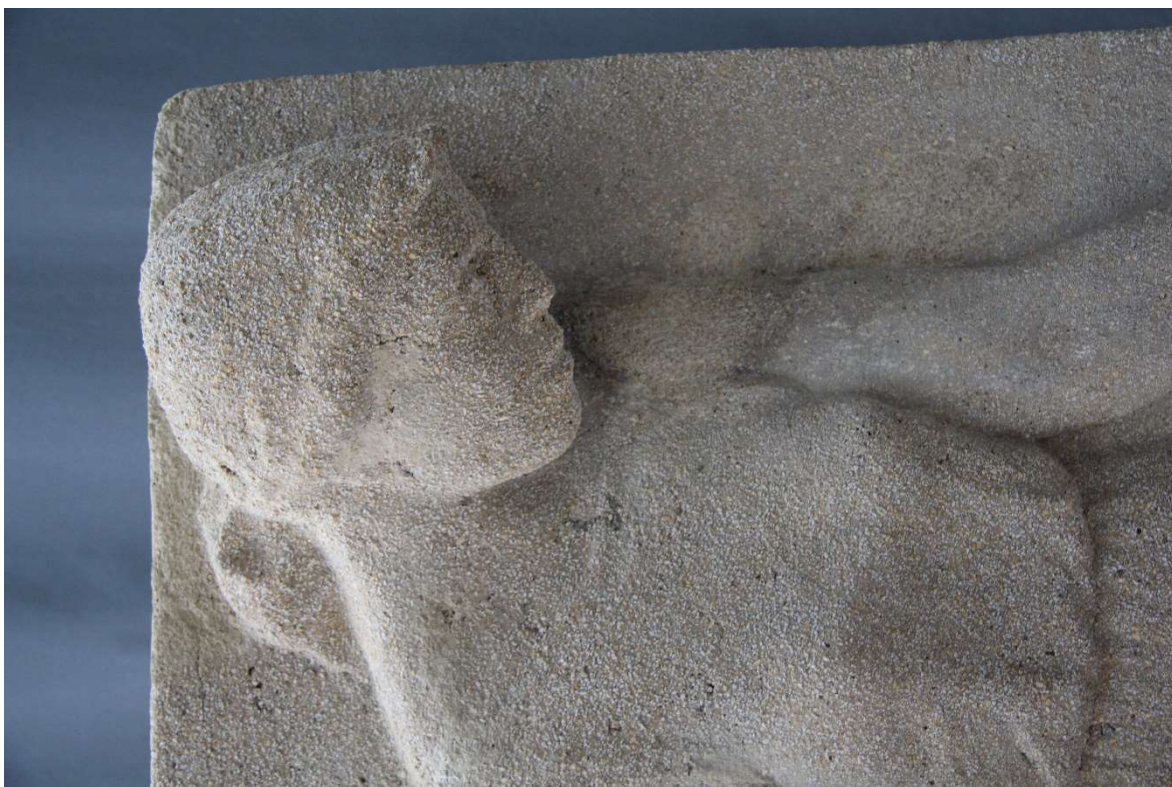
Obr. 41 Stav po restaurování, detail plastické retuše zadní část



Obr. 42 Stav po restaurování, detail plastické retuše spodní část



Obr. 43 Stav po restaurování, detail spodní části figurálního výjevu



Obr. 44 Stav po restaurování, detail vrchní části figurálního výjevu

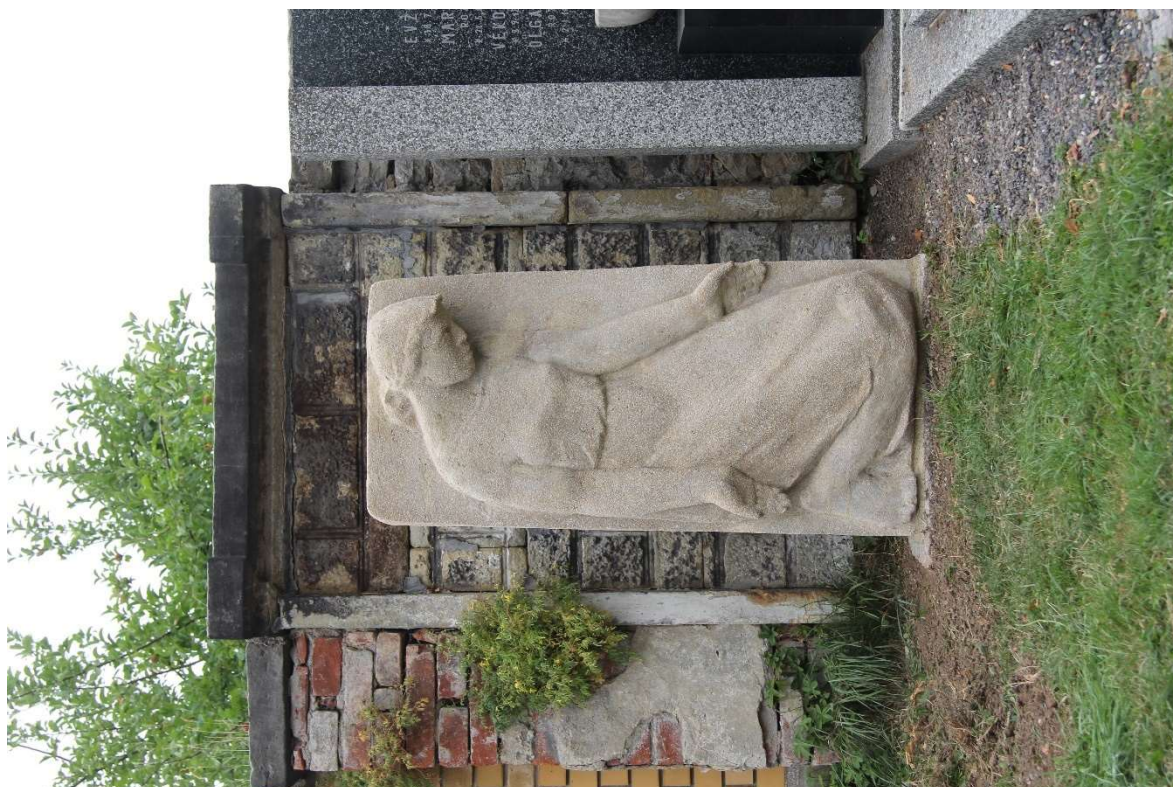


Obr. 45 Stav po restaurování, detail pravé ruky figurálního výjevu

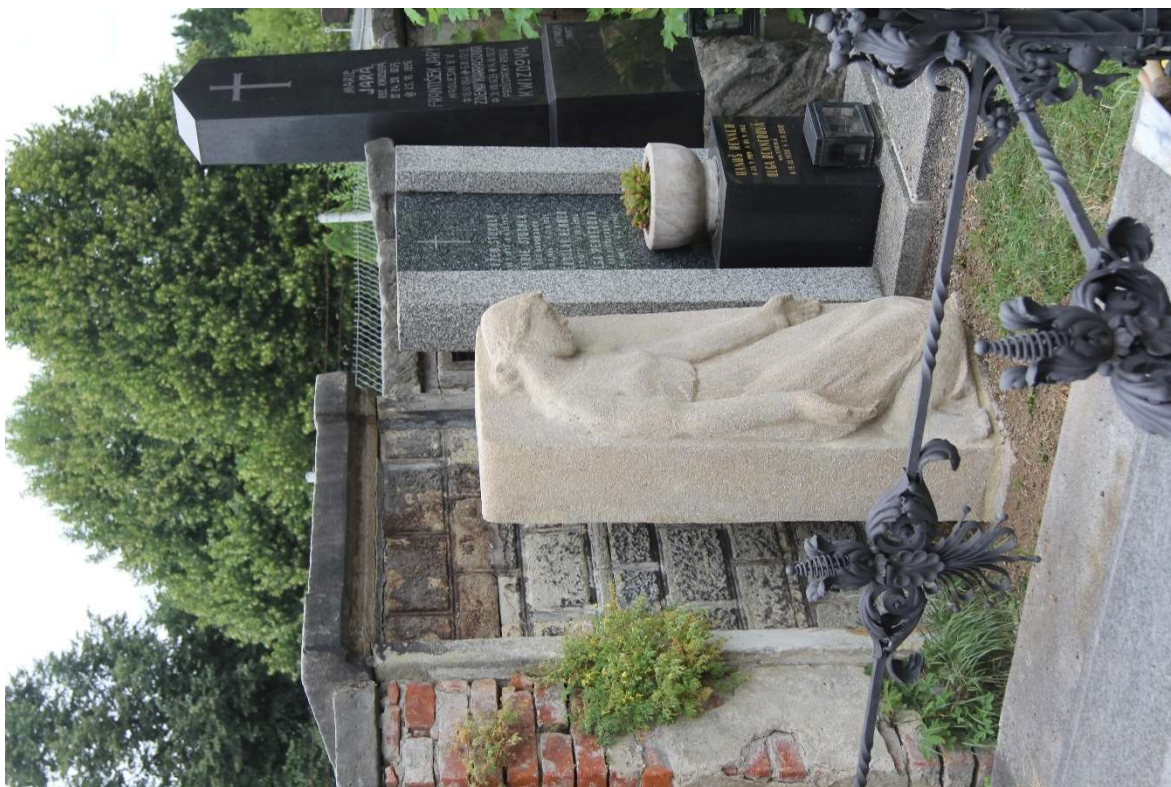


Obr. 46 Stav po restaurování, detail hlavy figurálního výjevu

2.7.5 Stav po osazení v exteriéru



Obr. 47 Stav po osazení v exteriéru, čelní pohled



Obr. 48 Stav po osazení v exteriéru, levý boční pohled



Obr. 49 Stav po osazení v exteriéru, pravý boční pohled

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Úvod do problematiky

Železobetonové objekty jsou dnes již nezanedbatelnou součástí fondu kulturního dědictví, k nárůstu jejich využití dochází v 20. stol. a to nejen u architektonických realizací, ale i volné plastiky. Původně byly betonové směsi využívány především k tvorbě nosných a konstrukčních prvků architektury. Pro tento účel se nadále využívají, ale s jejich rozvojem a rozšířením se stále častěji začaly uplatňovat při tvorbě dekorativních a uměleckých realizací. Ve 20. stol. postupně dochází k masivnímu rozšíření betonu jako stavebního materiálu a taktéž jeho pronikání do umělecké tvorby. Vedle laminátu a přírodního kamene se uplatňuje jako jeden z materiálů také pro plastiku socialistické éry.

Rozšířenou problematikou u daných předmětů je koroze železných armatur v nich uložených a na ni navazující strukturální destrukce matérie. Vkládání ocelových armatur do betonových plastik je stále přetrvávajícím fenoménem, je a bylo tak činěno se snahou o navýšení strukturální pevnosti děl. Bohužel u uměleckých děl je tak činěno často neodborně a bez ohledu na potencionální rizika s tím spojená. Mimo užití nevhodných armovacích materiálů je často problematický i způsob aplikace na objektu, především nedodržení hloubky uložení. Následkem výše zmíněných pochybení pak dochází k urychlené korozi výztuží a vzniku korozních produktů. Korozní produkty oproti neporušené armatuře výrazně nabývají na objemu, čímž vyvolávají pnutí uvnitř materiálu, které může v krajních případech vést až k trhání hmoty objektů. Tyto chemicko-fyzikální pochody však nefungují izolovaně. Výrazný vliv na tento druh poškození mají i další procesy.

3.1.1 Charakteristika železobetonových materiálů

Beton, též označovaný jako umělý kámen, je kompozitním materiálem vzniklým smícháním a vytvrdnutím pojiva, nejčastěji cementu, a kameniva.³ Vlastnosti betonového materiálu jsou dány především typem užitých složek, jejich vzájemným poměrem a poměrem záměsové vody vůči nim. Zmíněné parametry výrazně ovlivňují

³ SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. 3. Praha: JAGA group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.

pevnost, soudržnost a také pórovitost potažmo paropropustnost.⁴ Vlastnosti betonu mohou být dále modifikovány speciálními aditivy. Beton se vyznačuje vysokou pevností v tlaku, avšak zároveň je pro něj typická lomová křehkost. Za účelem snížení křehkosti je možné betonový materiál modifikovat výztužemi. Ve většině případů je tak činěno pomocí ocelových prutů či z nich připravených sítí, vniklý materiál je pak označován jako železobeton nebo přepjatý beton. Ve stavební průmyslu jsou zmíněné parametry upraveny zákonnými normami.⁵ Při vzniku většiny objektů výtvarně-umělecké povahy je však jen zřídka kdy přihlédnuto k těmto normám a často dochází k nedodržení standardních pracovních postupů. Důsledkem toho pak může být snížená kvalita takto připravených děl a jejich předčasné chátrání.

Cementová pojiva

Silikátový cement je hydraulickým minerálním pojivem hojně užívaným ve stavebním průmyslu, vyrábí se pálením vápence s jílovými a dalšími minerálními látkami na vysokou teplotu (1300-1400 °C).⁶ Během výpalu pak dochází k tzv. slinutí, tím se rozumí slinování (spékání, vzájemné splynutí částic) doprovázené chemickou reakcí, při které dochází ke vzniku množství slínekových minerálů, za významné jsou považovány tyto: trikalciumpojiva (křemičitan trojvápenatý), dikalciumsilikát (křemičitan dvojvápenatý), trikalciumaluminát (hlinitan trojvápenatý) a tetrakalciumaluminátferit (hlinitoželezitan čtyřvápenatý)⁷. Každý z nich plní významnou funkci v procesu tvrdnutí a změnami v jejich podílu je možné modifikovat kýžené vlastnosti cementového pojiva.

K tvrdnutí cementové směsi je nutná hydratace slínekových minerálů, po smíchání cementu s vodou dochází k tvorbě hydratovaného gelu složeného z hydrosilikátů, jako vedlejší produkt vzniká hydroxid vápenatý, zároveň dochází i k rekrystalizaci některých pevných složek, těmito souběžnými reakcemi dochází k tvrdnutí cementu. Proces hydratace a tuhnutí se nedá popsat jako jedna jednoduchá chemická reakce, místo toho

⁴ WINSTON, R. *Uhlig's Corossion Handbook*. 3. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011. ISBN 978-0-470-08032-0.

⁵ Např: ČSN EN 13670. *Provádění betonových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 2010.

⁶ SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. 3. Praha: JAGA group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.

⁷ *Ibidem*

se jedná o komplexní soubor chemicko-fyzikálních reakcí, které vedou k vytvrnutí cementu. Ač proces tvrdnutí cementu probíhá ještě roky po prvotním připravení, k největšímu nárůstu pevnosti dochází během prvních 28 dní, po uplynutí této doby je směs považována za vyzrálou.⁸ Hydroxid vápenatý vzniklý při hydrataci jako vedlejší produkt je stěžejní pro zkoumanou problematiku, během reakce je ho totiž uvolněno významné množství, ze 100 kg portlandského cementu může vzniknout až 30 kg hydroxidu vápenatého, zároveň jen malé množství je ho spotřebováno pro tvorbu aluminhydrátu.⁹ Valná většina Ca(OH)_2 tedy setrvává jako volná. Tento volný hydroxid vyplňuje porézní systém maltoviny a výrazně zvyšuje pH okolního substrátu, tím chrání případné ocelové výztuže před korozí. Časem však karbonizuje (proměna hydroxidu vápenatého na uhličitán vápenatý), čímž dochází k poklesu pH.

Mimo portlandského cementu je možné se setkat i s dalšími typy cementu, za zmínku stojí například románský cement, připravovaný z vápence s vysokým podílem hydraulických složek. Vyznačuje se výraznou rychlostí prvotního tuhnutí, k největšímu nárůstu dochází během prvních 20 minut, a vysokou pórovitostí.

Historicky byly využívány i tzv. hlinitanové cementy, od jejich užívání se však časem upustilo, pro jejich nestabilitu.

Ocelové výztuže¹⁰

Jednou z charakteristik betonu je vysoká odolnost v tlaku a lomová křehkost. K vyvážení negativ spojených s lomovou křehkostí se prakticky již od starověku využívaly kovové výztuže. Od 19. stol. se za tímto účelem užívají téměř výlučně železné potažmo ocelové armatury. Při jejich správném rozmístění v objektu přenášejí výztuže tahové napětí a beton tlakové napětí a touto kooperací dochází k výraznému navýšení odolnosti daného objektu vůči fyzikálně-mechanickému namáhání. Navíc jsou tyto dva materiály kompatibilní v mnoha ohledech, za předpokladu jejich správného zpracování. Beton se vyznačuje dobrou přilnavostí k výztužím, hodnoty tepelné roztažnosti jsou si velmi blízké α_t (beton $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ocel $10-12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), tím je vyloučeno mechanické

⁸ ČSN EN 13670. *Provádění betonových konstrukcí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 2010.

⁹ SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. 3. Praha: JAGA group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.

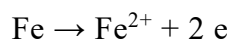
¹⁰ SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. 3. str. 474
. 3. Praha: JAGA group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.

poškození vlivem změny teplot. Vysoká alkalita nově připraveného betonu vede k pasivaci v něm uložených armatur a díky tomu potlačuje korozi výztuží.

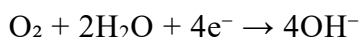
3.1.2 Korozní procesy a pasivace železných výztuží

Koroze železa je sama o sobě složitým elektro-chemickým procesem, při němž dochází k přesunu elektronů z jednoho železného tělesa na druhé, případně se tak může dít v rámci různých částí jednoho tělesa, děje se tak během simultánní oxidačně-redukční reakce probíhající v elektrolytu¹¹, elektrolytem v tomto kontextu rozumíme vodný roztok solí a dalších minerálních látek obsažený v porézním systému.

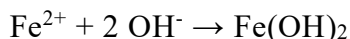
Koroze železných materiálů jinak také označovaná jako reznutí, může být zjednodušeně vysvětlena jako následující. Při vystavení železa koroznímu prostředí, vystavení vodě či vodným roztokům, dochází k formaci anodických a katodických článků, v případě železné konstrukce se jedná o hustou síť mikro-článků. Na takto vzniklých člancích dochází k oxidačně-redukčním reakcím. V případě anody se jedná o oxidaci železa a uvolnění elektronů (e^-):¹²



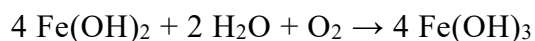
Na katodě pak kyslík společně s vodou reagují a formují hydroxylové ionty během redukční reakce:



Takto vzniklé hydroxylové ionty (OH^-) následně reagují s železnými ionty (Fe^{2+}) vzniklými na anodě a tvoří hydroxid železnatý ($\text{Fe}(\text{OH})_2$).



Hydroxid železnatý pak dále reaguje s vodou a kyslíkem a dochází k jeho přeměně na hydroxid železitý, běžně označovaný jako rez.



Je nutno mít na paměti, že korozní procesy jsou odlišné v případě dalších slitin železa a taktéž jsou výrazně ovlivněny externími podmínkami. V kyselém a neutrálním

¹¹ SELWYN, Lyndsie. *Metals and corrosion: a handbook for the conservation professional*. Ottawa: Canadian Conservation Inst., 2004. ISBN 06-623-7984-5.

¹² SELWYN, Lyndsie. *Metals and corrosion: a handbook for the conservation professional*. 102-108, Ottawa: Canadian Conservation Inst., 2004. ISBN 06-623-7984-5.

prostředí do reakce vstupují i vodíkové kationty, což vede ke vzniku korozních produktů s porézní strukturou, která nijak nebrání postupu koroze. Oproti tomu v alkalickém prostředí utváří korozní produkty kompaktní vrstvu bránící další korozi. Dojde-li k vzniku kompaktního, nepropustného filmu, který brání další korozi, hovoříme o pasivaci.

V počátku existence železobetonových předmětů zajišťuje dostatečnou alkalitu prostředí cement sám o sobě, přesněji řečeno $\text{Ca}(\text{OH})_2$ uvolněný během hydratace slíkových minerálů v pojivu obsažených. S postupující karbonizací a sulfatizací tyto materiály ztrácí i alkalitu a společně s ní i schopnost zvýšené ochrany armatur před korozi. Tato zvýšená ochrana kovových prvků spočívá ve vytvoření kompaktního nepropustného filmu oxidu železitého Fe_2O_3 , který dále nekoroduje.¹³ Ideální podmínky pro vznik takového filmu jsou při $\text{pH} > 10$, avšak v jisté míře dochází k jeho tvorbě i při $\text{pH} > 8,5$ (názory literatury se v tomto směru různí). Při zanesení vyššího podílu chloridů či síranů do systému však dochází k rozkladu této ochranné vrstvy nehledě na zásaditost. V případě zvýšeného výskytu chloridových solí tedy dochází k akceleraci koroze i přes vysoké pH.

U objektů, u kterých již došlo k poklesu alkality, a tudíž i ztrátě výše popsaného ochranné schopnosti, je možné provést umělé navýšení alkality. Tento proces označovaný jako realkalizace spočívá ve vpravení silně alkalických látek, taktéž označovaných jako inhibitory, do substrátu obklopujícího výztuže. V případě úspěšného navýšení pak dochází k tvorbě ochranného filmu. Pro dlouhodobou ochranu je však nutné zajistit přetrvávající zásadité prostředí, jelikož při opětovném snížení alkality dochází znovu k degradaci ochranného filmu.

¹³ WINSTON, R. Uhlig's Corrosion Handbook. 3. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011. ISBN 978-0-470-08032-0.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1 Úvod

Za účelem ověření možností zvýšení alkality substrátu železobetonových objektů výtvarně-kulturní hodnoty, potažmo pasivace železných výztuží v nich obsažených, byla navržena experimentální část, vycházející z teoretické rešerše dostupných materiálů, viz předchozí kapitola. Experiment se zaměřoval jen na vybrané aspekty dané problematiky.

4.2 Cíle

Cílem experimentální části bylo sledovat účinky vybraných inhibitorů koroze na připravených vzorcích. A zároveň zjistit, zda jsou vhodné k péči o předměty kulturního dědictví. Proto pro práci nebyla důležitým parametrem jen samotná účinnost realkalizačních prostředků, ale i jejich dopady na další aspekty nezbytné pro budoucí uplatnění objektů daného typu v kontextu péče o kulturní dědictví.

4.3 Příprava zkušebních vzorků

Na základě teoretického poznání vycházejícího z rešerše odborných publikací a textů byl nastaven postup experimentu. První fáze spočívala v laboratorní přípravě testovacích tělísek, ta byla připravena dusáním betonové směsi společně se stavební ocelovou armaturou. Betonová směs se skládala z písku z lokality Běstovice a portlandského cementu Prachovice Univerzal 32,5 R v poměru 3:1. Následně byla tělíska umístěna do vhodných podmínek ke stárnutí po dobu 3 měsíců k urychlení karbonizace a poklesu pH, tak aby simulovala výrazně karbonizovaný materiál. Po uplynutí expoziční lhůty však nedošlo ke kýženému poklesu pH, a bylo tak nutno přistoupit k chemickým metodám snížení pH. Ty spočívaly v cyklování tělísek v koncentrovaném roztoku uhličitanu amonného (zdroj uhličitánových anionů pro karbonataci hydroxidu vápenatého) ponorem a jejich vysoušení. Ani touto metodou se nepodařilo dosáhnout zamýšlených hodnot pH u vzorků a bylo nutné vybrat jiné řešení jejich přípravy.

Po konzultacích¹⁴ bylo přistoupeno k přípravě vzorků z přirozeně zestárlého a již výrazně karbonizovaného betonu. Byly vybrány celkem tři betonové předměty, ze kterých byla následně připravena laboratorní tělíska. Volba připravit tělíska z již existujících objektů sebou ovšem přinesla úskalí spočívající jednak v přípravě vzorků, jejich velikost musela být uzpůsobena rozměrům a tvaru předmětů, z nichž byla připravena. Druhá výrazná komplikace, která se promítla do výsledků měření, souvisela s „nehomogenitou“ takto připravených vzorků, ta se odvíjí od způsobu výroby a složení takto připravených výrobků a taktéž od nerovnoměrného působení externích vlivů v průběhu jejich existence. Tyto nedostatky se pak promítají do měření jednotlivých veličin a způsobují výkyvy v naměřených hodnotách. Taktéž bylo omezeno množství vzorků, které se daly tímto způsobem připravit.

Rozměr jednotlivých tělísek z různých objektů se lišil, dle možností vybraného předmětu. Dále byly na základě rešerše a konzultací vybrány čtyři inhibiční roztoky, viz tabulka 2. Ty byly následně aplikovány na tělíska ponorem po dobu 24 h, respektive postupným zaléváním vzorků tak, aby došlo k úniku vzduchových bublin z porézního systému. Následovalo jejich vysušení a expozice v exteriéru na připraveném stojanu.

Pro přípravu testovacích tělísek byly vybrány následující objekty:

- Vzorek X: Betonová dlaždice s ornamentálním vlysem, předpokládaná doba vzniku 30. léta 20. stol. Barva světle šedá, jemné kamenivo, svrchní vrstva s vlysem obsahuje jen velmi jemné kamenivo. Z fragmentu dlaždice byly

¹⁴ Ústní konzultace s Ing. Karolem Bayerem a MgA. Petrem Rejmanem z jara 2022

připraveny vzorky o rozměru 45 mm × 45 mm × 25 mm



Obr. 50 Detail, vzorek typu "X"

- Vzorek Y: Torzo betonového koryta pro dobytek, předpokládaná doba vzniku 20. léta 20. stol.¹⁵ Barva matrixu šedá, kamenivo zastoupené od ve velmi jemného až po velmi hrubé, různé barevnosti a složení. Z torza byly připraveny vzorky o rozměrech 80 mm × 30 mm × 30 mm.



Obr. 51 Detail, vzorek typu "Y"

¹⁵ Ústní sdělení Zdeňka Šaffera, který torzo poskytl

- Vzorek Z: Sloupek z viniční trati, přepokládaná doba vzniku 60. léta 20. stol. Barva substrátu světle šedá, pojivo převládá jemné a velmi hrubé šedé až modré barvy. Ze sloupku byly připraveny vzorky o rozměrech 75 mm × 75 mm × 75 mm.



Obr. 52 Detail, vzorek typu "Z"

Celkem bylo tedy připraveno 12 testovacích tělísek, 3 série po čtyřech vzorcích. Relativně nízký počet testovacích těles je ovlivněn podstatou jejich přípravy. Rozměry nashromážděných objektů výrazně limitovaly možné množství z nich připravených vzorků.

4.4 Použité inhibiční prostředky a jejich vlastnosti

U zkoušených inhibitorů bylo sledováno několik vybraných parametrů s ohledem na jejich případné užití v památkové péči. Inhibitory byly vybrány na základě odborné rešerše a praktických zkušeností z předchozích restaurátorských zásahů realizovaných pod záštitou ARK. Rovněž bylo přihlédnuto k požadavkům na restaurování díla z praktické části této diplomové práce. Sledované parametry byly následující:

- **Realkalizační, inhibiční účinek:** jsou stěžejními parametry určujícími účinnost samotného zásahu. Pro dostatečnou pasivaci povrchu ocelových armatur je potřebné navýšení pH okolního substrátu alespoň nad úroveň pH 10, ideálně k hodnotám blízcím se 12. Dosažení těchto hodnot je samozřejmě přímo odvislé od původní alkality substrátu.
- **Stabilita a dlouhodobá účinnost zásahu:** nepřímo vázána na první, neméně důležitá pro vyhodnocení účinnosti testovaných inhibitorů. Z ekonomických důvodů je žádoucí, aby byl zásah, pokud možno, co nejdéle trvající a nebylo ho nutné opakovat v krátkém období. Vzhledem k časovým možnostem této práce však nelze plně ověřit v delším časovém horizontu.
- **Vliv na změnu barevnosti:** je důležitým aspektem vizuální stránky uměleckých předmětů. Zaměření na tento aspekt se práce odlišuje od obdobných prací zaměřených na čistě stavebně-konstrukční sféru. Vizuální alterace, i když třeba jen velmi nepatrné, jsou schopny posunout umělecko-historické vnímání objektu, a jelikož se v tomto případě jedná o látky prostupující celou materii objektů, případná náprava by byla jen velmi komplikovaná nebo prakticky nemožná.
- **Materiálová kompatibilita:** u vybraných materiálů bylo nutno také přihlídnout k materiálové kompatibilitě se železobetonovými strukturami, především pak s ohledem na betonový materiál. Nežádoucí byly látky, které by přímo či nepřímo ohrožovaly materiál do budoucna či významně alterovaly vzhled objektu. S ohledem na tuto problematiku byly vybrány látky nevedoucí, ať už přímo nebo nepřímo, ke tvorbě agresivních solí, které by posléze mohly narušovat substrát objektu.

Na základě výše zmíněných kritérií byly vybrány následující látky:

- **Sika® FerroGard®-903 Plus:** Je impregnačním nátěrem s inhibičním účinkem od společnosti Sika. Jedná se o migrující inhibitor na bázi aminoalkoholů. Vhodný pro ochranu výztuží železobetonových objektů, poskytující anodickou i katodickou ochranu. Výrobce navíc uvádí i zvýšenou

míru ochrany v přítomnosti chloridů, na druhou stranu však doporučuje aplikovat jen v případě koncentrace chloridů do 1% hmotnosti cementu na úrovni výztuží.¹⁶ Dle výrobce nemění barevnost povrchu ošetřeného materiálu. Oproti dalším testovaným látkám nefunguje jen na principu realkalizace materiálu v okolí výztuží, ale přímo potlačuje korozní procesy na anodě a katodě korozních článků.

- **Vodný roztok SiO₂+Li₂O (Lithné vodní sklo):** Křemičitan lithný je vodní roztok oxidu křemičitého (SiO₂) a oxidu lithného (Li₂O). Hlavním důvodem pro jeho zahrnutí a zahrnutí LiOH do experimentální části je jejich vysoká alkalita a nízká nebezpečnost lithných sloučenin, tj. případných vzniklých sekundárních produktů pro materiál. Lithné vodní sklo může zároveň sloužit jako konsolidant, avšak jeho užití může vést ke snížení paropropustnosti.
- **Hydroxid lithný LiOH:** Na základě obdobných parametrů jako lithné vodní sklo, viz výše, byl vybrán i hydroxid lithný, nízká rizikovost lithných solí a vysoká alkalita látky se jeví jako ideální kombinace vlastností realkalizačního média.
- **Vodný roztok KOH+NaOH+Ca(OH)₂¹⁷:** Složení tohoto roztoku je přímo přejato z práce Aleksandry Gralínské-Grubecké.¹⁸ Složením se jedná roztok velmi podobný poréznímu roztoku běžně se vyskytujícímu v betonu, u kterého nedošlo k vyčerpání alkalické rezervy. V experimentální části zastupuje klasické realkalizační roztoky, užívané rovněž při elektrochemické realkalizaci, např. Metoda Norcure.¹⁹ Složení roztoku je následující: 1 díl 0,06 M KOH, 1 díl 0,02 M NaOH, 1 díl 0,001 M Ca(OH)₂

¹⁶ SCHÖNFELDER, D. Účinnost migrujících inhibitorů koroze. Imaterialy.cz [online]. [cit. 2023-060]. Dostupné z: https://www.imaterialy.cz/rubriky/stavebni-chemie/ucinnost-migrujicich-inhibitoru-koroze_41260-html/do

¹⁷ GRALIŇSKA-GRUBECKA, ALEKSANDRA. Appliance of realkalisation in the conservation of monuments made of reinforced cement mortar and concrete. *Acta Universitatis Nicolai Copernici: Zabytkoznawstwo i konserwatorstwo XLIX*. 2018, **2018**, 320-337. ISSN 0208-533X. Dostupné z: [doi:http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ZiK.2018.012](http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ZiK.2018.012)

¹⁸ Ibidem

¹⁹ „Norcure® Re-Alkalization – Concrete Corrosion Repair“, [online]. [cit. 2023-060]. Dostupné z: <https://www.vector-corrosion.com/n>

Základní hodnoty vlastností připravených roztoků jsou uvedeny v tab. 7.

Inhibiční činidlo	pH	Koncentrace %
Sika® FerroGard®-903 Plus	10,03	Neuvedeno, neředí se
Lithné vodní sklo	11,84	50%..?
Hydroxid lithný	12,7	1,5 %
Směs KOH+NaOH+Ca(OH) ₂	12,85	1,14 %

Tab. 7 Základní vlastnosti připravených realkalizačních a inhibičních prostředků

4.5 Aplikace vybraných prostředků na zkušební tělíska

Po vybrání a přípravě vhodných testovacích tělísek a pasivačních prostředků bylo přikročeno k jejich aplikaci. Pro dosažení plného prosycení, a tedy dosažení ideálních vlastností byly vzorky kompletně ponořeny do vybraných realkalizačních roztoků. Aplikace byla prováděna postupně během 4 hodin postupným přiléváním roztoků tak, aby byl umožněn únik vzduchu z porézního systému a ten byl tak kompletně zaplněn roztokem. Testovací tělíska byla v roztoku ponechána po dobu 24 hodin, následně vyjmuta z kádinek, lehce osušena papírovou utěrkou a ponechána na plastovém tácu po dobu 48 hodin, aby mohla plně oschnout. Následoval odběr vrtné moučky pro změření pH bezprostředně po aplikaci a vystavení na předem připraveném stojanu v exteriéru, kde byly vzorky ponechány po celou dobu trvání experimentu.



Obr. 53 Celkový snímek vzorku bezprostředně po aplikaci

4.6 Použité metody

Pro vyhodnocení realkalizačního účinku a vhodnosti tohoto typu zásahu bylo využito následujících metod:

4.6.1 Hodnocení změny alkality vzorků

Měření pH u vzorku se provádí odběrem vrtné moučky z hloubky 20 mm. Odebraný vzorek je následně přesát sítem o velikosti 0,063 mm, homogenizován a kvartací se z něj připraví vzorek o hmotnosti 2 g. Z vzorku je připraven výluh s 10 g demineralizované vody. Po 24 h. je vzorek změřen pomocí přenosného pH metru Hanna HI 991001.²⁰ Toto měření proběhlo před aplikací prostředku, bezprostředně po ní a dále bylo prováděno v intervalech 4 měsíců pod dobu 8 měsíců roku 2022-2023.

²⁰ Metoda byla zvolena na základě konzultací s Ing. Karolem Bayerem



Obr. 54 Vzorok na stojanu při exteriérové expozici

Uvedená metoda měření pH vzorku je navržena s cílem posoudit alkalitu daného vzorku a sledovat změny pH v průběhu pozorování. Provedené měření pH vzorků s využitím uvedené metody poskytlo data, která byla dále zpracována a prezentována ve formě tabulek a grafů (viz Hodnocení změny alkality vzorků). Tyto tabulky a grafy zobrazují hodnoty pH jednotlivých vzorků, jejich průměr a změny v průběhu času. Vytvořené tabulky obsahují jednotlivé hodnoty pH naměřené pro každý vzorek, který byl analyzován. Pro každý časový bod jsou hodnoty pH zaznamenány v tabulce, což umožňuje přesné sledování a porovnávání pH mezi jednotlivými vzorky a časovými body. Na základě těchto tabulek lze také vypočítat průměrné hodnoty pH pro každý vzorek. To umožňuje získat celkový přehled o průměrné alkalitě vzorků a porovnat je s počátečními hodnotami nebo s hodnotami v jiných časových bodech. Kromě tabulek byly vytvořeny grafy, které vizuálně reprezentují změny hodnot pH v průběhu času. Využitím tabulek a grafů jsou tedy efektivně prezentovány a interpretovány naměřená data, což poskytuje přehledný a srozumitelný obraz o změnách kyselosti vzorků a jejich vývoji v průběhu času. Tím se usnadňuje porovnávání a analýza vlivu různých faktorů na pH vzorků.

4.6.2 Spektrofotometrické posouzení barevných změn

K přesnému a objektivnímu měření barevných změn byl použit mobilní spektrofotometr Minolta CM2600-d. Tento spektrofotometr je vybaven speciálními senzory a optikou, které umožňují přesné a opakované měření barevných změn. Při využití mobilního spektrofotometru pro vyhodnocení změny barevnosti vzorků vlivem aplikovaných inhibitorů bylo provedeno srovnávací měření barevnosti. To posloužilo jako doplnění vizuálního pozorování vzorků a umožnilo objektivní a kvantitativní hodnocení barevných změn. Měření bylo prováděno na vzorcích před aplikací inhibitorů i po ní. K zajištění přesného a opakovatelného umístění měřicího přístroje na vzorku byly zhotoveny kartonové šablony s otvory pro měření, které se na vzorek přikládaly společně se spektrofotometrem. Tím byla minimalizována možnost vzniku chyb měření způsobených nepřesným umístěním spektrofotometru. Během testovacího období byly monitorovány vzorky po jejich expozici vnějším podmínkám – sluneční záření, teplota a vlhkost. Díky tomu bylo možné stanovit, jak aplikace inhibitorů ovlivňuje barevnost vzorků v reálných podmínkách a jak se barevnost mění s časem. Výsledky měření byly využité pro posouzení změny barevnosti vzorků před aplikací inhibitorů i po ní. Získaná kvantitativní data o změně barevnosti byla interpretována na základě hodnocení barvové nebo barevné odchylky ΔE . Srovnání umožnilo poměrně přesně a objektivně určit míru barevných změn na vzorcích, což je důležitou součástí celkového hodnocení testovaných inhibitorů. Výsledky měření jsou udávány pomocí souřadnic L, a, b v barevném prostoru CIELab (La Commission internationale de l'éclairage - CIE). Hodnota ΔE je vypočítána dle následujícího vzorce (L,a,b jsou souřadnice v barevném prostoru CIELab):

$$\Delta E = \sqrt{[(L2 - L1) + (a2 - a1) + (b2 - b1)]^2}$$

4.7 Výsledky

4.7.1 Hodnocení změny alkality vzorků

Naměřené hodnoty pH jsou uvedeny v tabulce tab. 8, společně s rozdíly pH ukazující relativní realkalizační účinek jednotlivých inhibitorů. V některých měřených vzorcích byl ovšem naměřen i pokles v alkalitě materiálu, to ovšem neznamená nutně, že by užití daného inhibitoru způsobilo snížení pH substrátu. Kolísání pH je daleko

pravděpodobněji způsobeno nehomogenitou testovaných vzorků, zapříčiněnou způsobem jejich přípravy. Viz kapitola *Příprava zkušebních vzorků*. Z výsledků vyplývá, že velmi dobrá míra zvýšení alkality se prokázala u všech zkoušených látek, a to i přes lokální odchylky, které vedly k záporným hodnotám navýšení pH. Z průměrných hodnot rozdílů pH pro jednotlivé inhibitory před a po aplikaci, viz tab. 8, vyplývá, že nejvyššího navýšení pH došlo při užití prostředků Sika® FerroGard®-903 Plus a testované směsi hydroxidů. V případě hydroxidu lithného a lithného vodního skla je míra navýšení pH podstatně nižší. Nutno podotknout, že u lithného vodního skla jsou průměrné výsledky výrazně poníženy hodnotami naměřenými u vzorku X2²¹.

Velmi nízké hodnoty navýšení pH vykazovaly vzorky, na které byl aplikován hydroxid lithný, přestože jeho připravený roztok dosahoval téměř nejvyšší zásaditosti z připravených roztoků. U tělísek ošetřených lithným vodním sklem je interpretace dat komplikována velkým rozptylem v naměřených hodnotách, přesto ze získaných hodnot vyplývá, že k jistému navýšení dochází. Proč je navýšení navzdory vysoké alkalitě použitého roztoku hydroxidu lithného poměrně nízké, se nepodařilo uspokojivě vysvětlit. Jedním z důvodů může být i nižší rozpustnost uhličitanu lithného (13,3 g/l při $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) než rozpustnost uhličitanu sodného (217 g/l při $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Roztok $\text{KOH}+\text{NaOH}+\text{Ca}(\text{OH})_2$ dosáhl výrazně nejvyšší míry realkalizace, míra navýšení se v průměru pohybovala okolo 1. Překvapivě vysokých hodnot dosáhly i vzorky ošetřené Sika® FerroGard®-903 Plus, překvapivé zejména proto, že samotný přípravek vykazoval nejnižší alkalitu z vybraných látek a ani výrobce neuvádí tento inhibitor jako realkalizační. Zajímavé je v tomto ohledu i srovnání s prací Aleksandry Gralinské-Grubecké,²² v této práci byl proveden obdobný experiment a samotná práce posloužila jako předloha pro tuto práci. V případě výše zmíněné práce byl experiment proveden pouze se směsí $\text{KOH}+\text{NaOH}+\text{Ca}(\text{OH})_2$, měření vzorků v tomto případě byla prováděna jen před aplikací a bezprostředně po ní, z práce vyplynulo navýšení pH v rozmezí 0,27 až 0,82 pH. V případě našich měření bylo toto rozmezí 0,61 až 0,86. Nižší spodní

²¹ Při měření prvotního stavu pH před aplikací byla pravděpodobně odebrána vrtná moučka z části tělíska, která vykazovala nadprůměrnou alkalitu oproti zbytku tělíska i ostatních vzorků.

²² GRALIŃSKA-GRUBECKA, ALEKSANDRA. Appliance of realkalisation in the conservation of monuments made of reinforced cement mortar and concrete. *Acta Universitatis Nicolai Copernici: Zabytkoznawstwo i konserwatorstwo XLIX*. 2018, **2018**, 320-337. ISSN 0208-533X. Dostupné z: [doi:http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ZiK.2018.012](http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ZiK.2018.012)

hranice navýšení může být zapříčiněna průměrně vyšším počátečním pH testovacích tělísek v polské práci.

Dalším důležitým aspektem pro vyhodnocení účinnosti inhibičních prostředků je trvanlivost daného zásahu. Přestože časový rozsah této práce (10 měsíců) není dostatečný pro plné posouzení tohoto aspektu, k tomu by byly potřebná pozorování v řádu let, vnáší výsledky vzhled alespoň do počátku životního cyklu realkalizačního zásahu. Z dosažených výsledků, viz tab. 8. Z pozorování vyplývá, že po ukončení monitoringu pH v daném období nedošlo u většiny ze vzorků k výraznému poklesu pH, naopak některé vzorky vykazovaly nárůst hodnot pH oproti měření po aplikaci realkalizačního média. Výjimkou v tomto ohledu jsou vzorky, na které byl aplikován hydroxid lithný, u těchto vzorků došlo v průměru téměř ke dvojnásobnému poklesu hodnot pH. Problematické je i v tomto ohledu posouzení účinku lithného vodního skla, velký rozptyl výsledků poukazující na chyby v měření opět znemožňuje konkrétnější interpretaci získaných dat.

vzorek	Před aplikací	Po aplikaci	Rozdíl po aplikaci	Po 4m	Po 8m	Rozdíl po uplynutí
Z1 (ferrogard)	10,32	10,93	0,61	12,09	12,01	1,69
Z2 (SiO₂+Li₂O)	9,95	11,58	1,63	10,75	12,14	2,19
Z3 (LiOH)	9,82	11	1,18	10,12	10,75	0,93
Z4 KOH+NaOH+Ca(OH)₂	9,63	11,98	2,35	10,97	11,98	2,35
X1 (ferrogard)	9,81	10,67	0,86	8,96	10,45	0,64
X2 (SiO₂+Li₂O)	11,07	10,07	-1,00	10,18	10,46	-0,61
X3 (LiOH)	10,89	11,02	0,13	10,32	10,05	-0,84
X4 KOH+NaOH+Ca(OH)₂	9,3	9,84	0,54	8,92	10,15	0,85
Y1 (ferrogard)	8,71	9,47	0,76	8,83	9,15	0,44
Y2 (SiO₂+Li₂O)	8,6	8,68	0,08	9,48	9,53	0,93
Y3 (LiOH)	8,61	8,55	-0,06	9,14	9,3	0,7
Y4 KOH+NaOH+Ca(OH)₂	8,57	8,65	0,08	8,34	8,69	0,12

Tab. 8 Výsledky měření realkalizačního účinku na zkušebních vzorcích

Inhibitor	Průměrné hodnoty navýšení před aplikací a bezprostředně po ní (pH)	Průměrné hodnoty navýšení před aplikací a po ukončení experimentu(pH)
Sika® FerroGard®-903 Plus	0,74	0,92
Lithné vodní sklo	0,24	0,84
Hydroxid lithný	0,42	0,26
KOH+NaOH+Ca(OH) ₂	0,99	1,11

Tab. 9 Průměrné hodnoty navýšení pH pro jednotlivé realkalizační prostředky

4.7.2 Vyhodnocení spektrofotometrického posouzení barevných změn

Získané hodnoty barevného posunu (ΔE) byly zaneseny do tabulek a ze získaných hodnot byl sestaven sloupcový graf (viz graf 1). Delta E (ΔE) je mírou celkového rozdílu v barevnosti mezi srovnávanými povrchy, barvami, nátěry a dalšími materiály. Tato hodnota se využívá ke kvantifikaci a porovnání barevných rozdílů mezi různými vzorky. Pro srovnání rozdílů barevnosti na základě hodnoty ΔE a jeho vnímání lidským zrakem je možné využít následující tabulku:

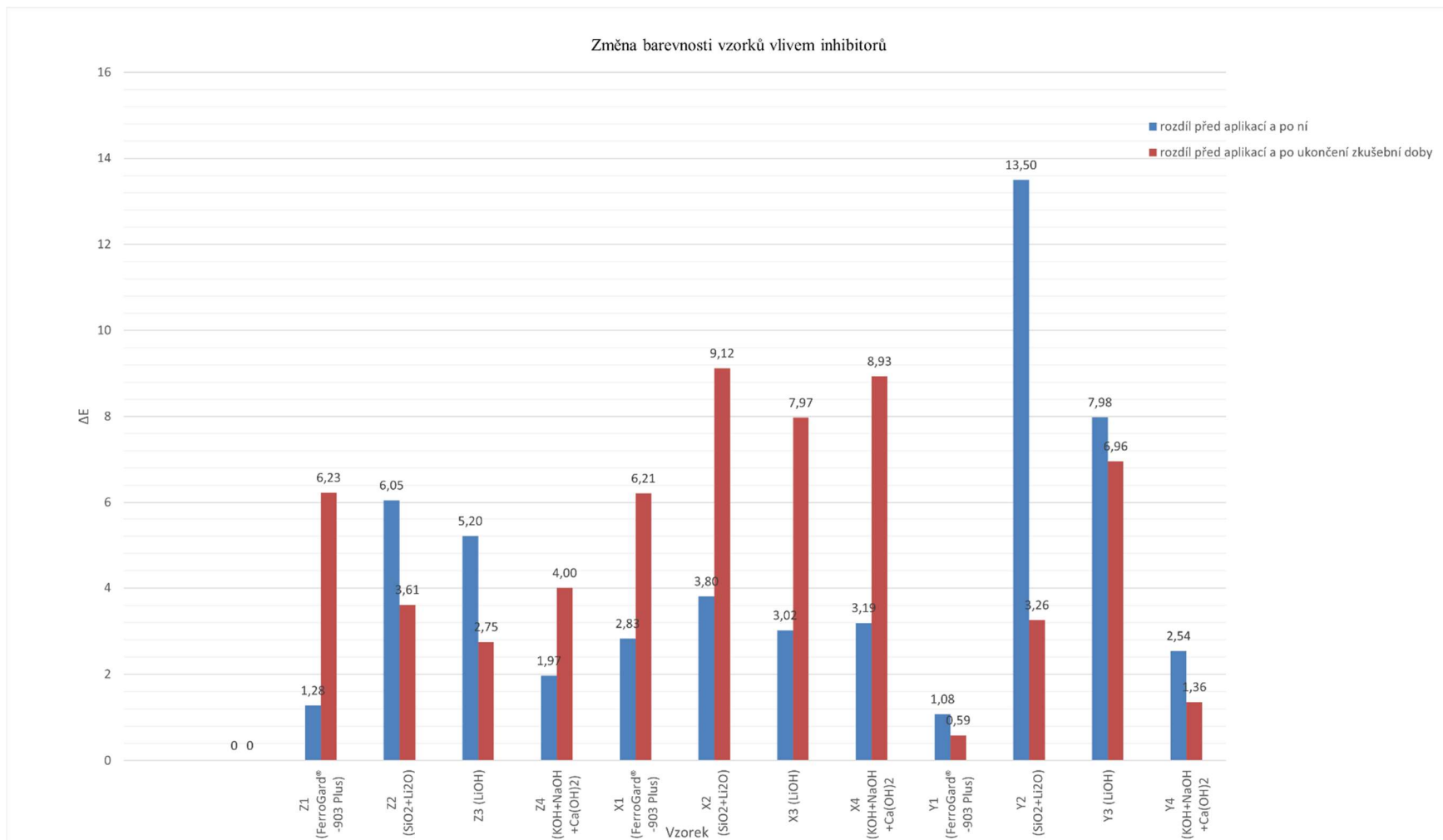
ΔE^*	Vizuální hodnocení rozdílu
0,0 – 0,2	Nepostřehnutelný
0,2 – 0,5	Velmi malý
0,5 – 1,5	Slabý
1,5 – 3,0	Jasně postřehnutelný
3,0 – 6,0	Střední
6,0 – 12	Výrazný
12,0 – 16	Velmi výrazný
Větší než 16	Rušivý

Tab. 10 Vizuální vnímání barevných rozdílů vyjádřených parametrem ΔE^{23}

Ze získaných dat veskrze vyplývá, že by barevné rozdíly měli být výrazně větší, než se zdálo při vizuálním monitoringu, během něj nebyly pozorovány žádné výrazné změny v barevnosti po ošetření testovacích tělísek inhibitory. S výjimkou prostředku Sika® FerroGard®-903 Plus. U tohoto inhibitoru došlo k výraznému zažloutnutí vzorků bezprostředně po aplikaci, toto zažloutnutí se však v průběhu expozice částečně vytratilo a v současnosti je jen těžko pozorovatelné. To je v rozporu s dokumenty výrobce, které produkt prezentují jako barevnost nepozměňující, a tudíž vhodný k užití na historických objektech. Nutno podotknout, že během experimentu byl vzorek v inhibitoru máčen, což vedlo k vpravení výrazně většího množství roztoku do vzorku než v případě dodržení standartního postupu doporučeného výrobce. Výrobce doporučuje prostředek aplikovat nátěrem nebo postříkem ve 2–3 po sobě jdoucích cyklech s rozestupy 1–6 hodin v závislosti na nasákavosti povrchu a povětrnostních podmínkách. Naměřené hodnoty u všech vzorků a obou měřených úseků poukazují na zajímavý trend, tím je vesměs výrazně nižší barevný rozdíl v případě měření před aplikací a bezprostředně po ní, oproti barevnému rozdílu hodnot naměřených po aplikaci a uplynutí expozičního období. Tento trend může poukazovat na to, že výrazně větší

²³ ZMEŠKAL, O., M. ČEPPAN a P. DZIK. Barevné prostory a správa barev. Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, 2002.

vliv na zbarvení vzorků mají povětrnostní podmínky a externí vlivy, oproti tomu aplikace testovaných inhibičních prostředků nevedla k výraznějším barevným změnám.



Graf 1 Hodnoty změny barevnosti vzorků, v závislosti na aplikaci inhibitoru a expozici v exteriéru

4.8 Shrnutí výsledků re alkalizace a celkové vyhodnocení

Experimentální část práce si kladla za cíl otestovat možné metody realkalizace železobetonových objektů umělecko-historické hodnoty za účelem inhibice koroze ocelových armatur v nich obsažených a současně hodnocení možných vizuálních změn povrchu ošetřených děl. Zároveň měla posloužit k nalezení vhodného způsobu ošetření hřbitovního náhrobku od O. Zoubka, jehož restaurování bylo předmětem praktické části této diplomové práce a na němž byla řešena obdobná problematika. Metodika, navržené materiály a průběh experimentu byly nastaveny na základě již existujících publikací, které se zabývaly příbuznou problematikou.

Cílem experimentální části bylo ověření již některých široce užívaných inhibičních látek, zároveň však byly zahrnuty další materiály, s záměrem rozšířit škálu použitelných prostředků. Volba dalších materiálů (LiOH, lithné vodní sklo) vycházela z poznatků z praxe, poznatků získaných v rámci literární rešerše a snahy odzkoušet i prostředky s nižšími vedlejšími negativními účinky. V experimentu byly nakonec užity vzorky připravené z již přirozeně zestárlého betonu, jelikož se laboratorní cestou nepodařilo připravit testovací tělíska, která by vykazovala stejné hodnoty pH, jako se dají předpokládat u železobetonového objektu vyžadujícího realkalizační zásah. To sebou přineslo některá úskalí, především to negativně ovlivnilo počet připravených testovacích tělísek a velikost celé testovací série.

Nízká míra navýšení pH byla zjištěna u vzorků, na které byly aplikovány prostředky LiOH a lithné vodní sklo. U hydroxidu lithného bylo stěžejním poznáním, že již během relativně krátkého testovacího období dochází k výraznému poklesu pH a ani počáteční naměřené hodnoty navýšení nebyly příliš uspokojivé. Na základě těchto zjištění lze předpokládat, že účinnost realkalizace a inhibice koroze ocelové armatury je nižší než u ostatních testovaných prostředků. Naměřené hodnoty vzorků s lithným vodním sklem dosahovaly příliš velkého rozptylu, pravděpodobně zapříčiněného chybami měření, čímž je objektivní vyhodnocení a interpretace výsledků experimentu s lithným vodním sklem velmi obtížné, prakticky nemožné. Ani jeden ze zmíněných prostředků nevykazoval pozorovatelné změny barevnosti testovacího tělíska.

Vysoká míra navýšení pH se prokázala u vzorků, na kterých byly aplikovány inhibitory Sika® FerroGard®-903 Plus a roztok KOH+NaOH+Ca(OH)₂, průměrná hodnota navýšení pH na vzorcích po aplikaci těchto inhibitorů se blížila pH 1. U testovacích tělísek s KOH+NaOH+Ca(OH)₂ se podařilo dosáhnout výsledky na úrovni práce Aleksandry Gralinské-Grubecké.²⁴ V případě této experimentální části byly dosažené hodnoty navýšení alkality vzorků dokonce vyšší než ve výše zmíněné práci. To je pravděpodobně způsobeno celkově nižším původním pH testovacích tělísek užitých v rámci tohoto experimentu. Roztok KOH+NaOH+Ca(OH)₂ nevykazoval při pozorováních žádné významné změny barevnosti. Dalším positivem tohoto inhibičního prostředku je vysoká míra kompatibility s cementovým systémem, jeho složení totiž přímo vychází ze složení roztoků v pórech cementových malt / betonů. Sika® FerroGard®-903 rovněž vykazoval velmi příznivé hodnoty navýšení pH, nutno podotknout, že v rámci experimentu jím byly vzorky plně saturovány, to je v rozporu s doporučením výrobce. Dá se tedy předpokládat, že při aplikaci formou nátěru, dle pokynů výrobce, by bylo navýšení pH nižší. Sika® FerroGard®-903 však nefunguje jako inhibitor primárně realkalizační, jeho hlavní funkční princip spočívá v omezení jak anodické, tak katodické koroze výztuží. Sika® FerroGard®-903 vykazoval při vizuálním pozorování lehké zažloutnutí testovacích tělísek, které v čase sláblo. Experimentem byla potvrzená vysoká míra účinnosti tohoto inhibičního prostředku, hodnoty navýšení pH, kterých jeho pomocí bylo dosaženo, byly překvapující, protože se nejedná o primární způsob působení tohoto inhibitoru.

Na základě těchto poznatků byl jako nejvhodnější inhibiční prostředek pro ošetření objektu náhrobku od O. Zoubka vybrán prostředek Sika® FerroGard®-903, bylo tak učiněno především vzhledem ke konstrukci díla, kdy armatury nejsou chráněny dostatečně silnou vrstvou umělého kamene a realkalizace materiálu sama o sobě by pravděpodobně neměla dostatečně dlouhodobý účinek. Sika® FerroGard®-903 totiž poskytuje i zvýšenou ochranu před anodickou a katodickou korozí bez ohledu na alkalitu substrátu.

²⁴ GRALIŃSKA-GRUBECKA, ALEKSANDRA. Appliance of realkalisation in the conservation of monuments made of reinforced cement mortar and concrete. *Acta Universitatis Nicolai Copernici: Zabytkoznawstwo i konserwatorstwo XLIX*. 2018, **2018**, 320-337. ISSN 0208-533X. Dostupné z: doi:http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ZiK.2018.012

Problematika koroze ocelových výztuží v betonových konstrukcích je dobře prozkoumanou v oborech stavebně-inženýrských a z těch tato práce také do značné míry čerpala. Z restaurátorsko-památkového pohledu se jedná o poznání méně prozkoumané, které není tak často skloňováno, přitom se dá předpokládat, že se bude jednat stále častěji o aktuální téma vzhledem k tomu, že velké množství objektů umělecko-památkové povahy ze železobetonu vzniklé v minulém století bude v následujících letech dožívat.

Důležitým předmětem zkoumání realkalizačních prostředků pro budoucí práce je nejen jejich případný vliv na vzhled povrchu po provedení realkalizace, ale také hodnocení možného negativního vlivu vodorozpustných solí, které z realkalizačních prostředků vznikají.

5 ZÁVĚR

Tato práce si neklade za cíl poskytnout detailní popis chemicko-fyzikálních procesů, které vedou k degradaci a korozi železobetonových objektů, ani těch, které tyto děje potlačují. Místo toho se zaměřuje na poskytnutí základního vhledu do této problematiky v kontextu oboru restaurování a péče o kulturní dědictví. Během praktické, experimentální i teoretické části této práce byly získány důležité dílčí poznatky o těchto procesech, umožňující hlubší porozumění problematice a formulaci možných řešení a opatření pro restaurátorskou praxi.

Praktické poznatky se dají shrnout jako následující:

- Dostatečně tlustá krycí vrstva betonu představuje klíčový prvek pro ochranu ocelových armatur před korozi. Silná krycí vrstva betonu slouží jako bariéra, která omezuje kontakt ocelových armatur s prostředím, a tím zabraňuje pronikání vlhkosti a agresivních látek k oceli.
- Zvýšené pH materiálu obklopujícího ocelové armatury vede k tvorbě kompaktního ochranného filmu na jejich povrchu. Vzniklý film brání dalšímu postupu koroze výztuží. Ideální podmínky pro vznik filmu nastávají při $\text{pH} > 12$, ale jistá filmotvorná schopnost je zachována i pro hodnoty $\text{pH} > 10$.
- Zvýšený výskyt chloridových a síranových aniontů vede k nabourávání ochranného filmu nehlédě na hladinu pH. Při zásahu, který si klade za cíl potlačení korozních vlivů armatur, je nutné provést analýzy vodorozpustných solí a případně přikročit k jejich redukci odsolováním.
- Čistě realkalizační inhibitory koroze nemusí vždy představovat optimální řešení pro zachování ocelových armatur v železobetonu. V případech, kdy krycí vrstva betonu není dostatečně tlustá, dochází poměrně rychle k vyčerpání alkalické rezervy a znovuoobnovení korozních procesů. To je často i případ železobetonových plastik. V těchto případech se jeví jako vhodnější zvolit inhibitory přímo potlačující chemické korozní procesy, často dostupné jako komerční produkty fungující na rozličných chemicko-fyzikálních principech.
- Částečná nebo úplná extrakce kovových výztuží je možná za předpokladu, že nedojde ke snížení mechanické odolnosti plastiky. Jedná se však o nesnadný proces, ve většině případů jen těžko uskutečnitelný. Vyjmuté dožilé armatury

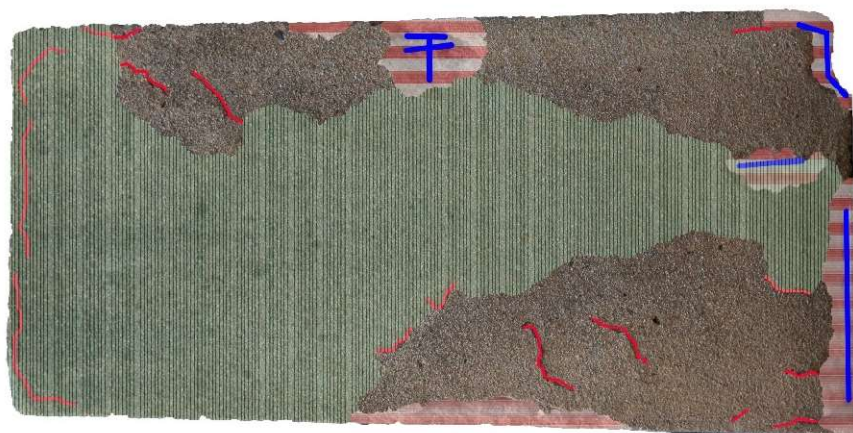
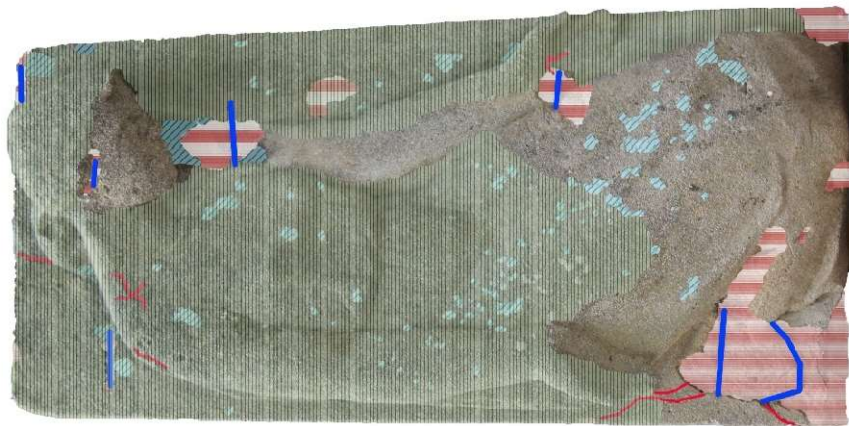
je možné nahradit novými zhotovenými z nekorodujících materiálu. Nový materiál výztuží je nutné volit s velkou opatrností. V případě výběru nevhodné kovové výztuže vyvstává riziko bimetalické koroze.

- Doplnění realkalizačního zákroku o další zásahy, které omezují vliv povětrnostních podmínek, je zásadní pro udržení a dlouhodobou ochranu železobetonových plastik. Srážková a vzlínající voda, spolu s dalšími povětrnostními vlivy, představují významné činitele korozních procesů ocelových výztuží. Důsledná ochrana před těmito nepříznivými vlivy zahrnuje vhodné hydroizolační opatření, které minimalizuje pronikání vlhkosti do konstrukce.

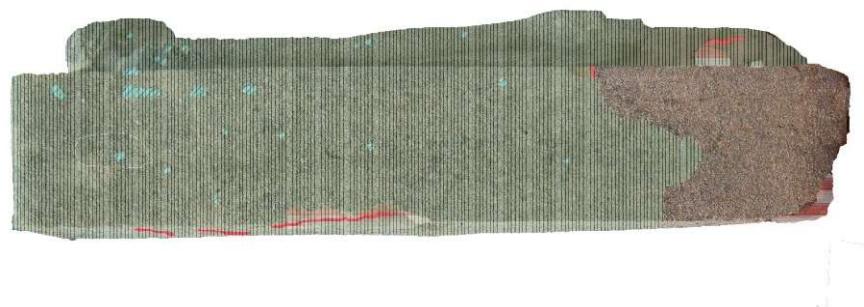
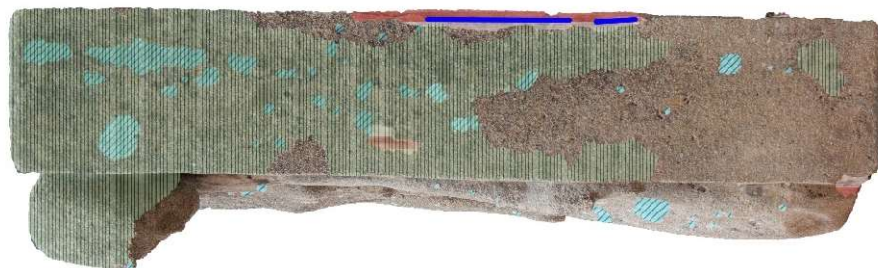
6 PŘÍLOHY

6.1 Grafická dokumentace

6.1.1 Zákresy poškození



-  lišejníky
-  materiálová ztráta
-  obnažené armatury
-  praskliny
-  řasy



-  lišejníky
-  materiálová ztráta
-  obnažené armatury
-  praskliny
-  řasy

6.1.2 Zákresy po restaurování



-  plastická retuš
-  přilepené fragmenty
-  vyjmuté armatury



-  plastická retuš
-  přilepené fragmenty
-  vyjmuté armatury

6.2 Chemicko-technologický průzkum

6.2.1 Petrografický průzkum



Analýza vzorku betonu z náhrobní desky od Olbrama Zoubka

Objekt: betonová náhrobní deska, Olbram Zoubek, Česká Třebová

Zadání průzkumu:

- Složení betonu (granulometrie, analýza typu plniva a pojiva)
- Složení krust a povrchových nečistot

Datum odběru vzorků: 14/12/2020

Vzorky odebral: Vít Šaffer

Místa odběru vzorků:

Vzorek	Popis / detailní zadání	Foto místa odběru
Vz. 1	Fragment originálního materiálu odlomený pravděpodobně z levé hrany rubu, ve střední výšce Určení typu pojiva a plniva; granulometrie plniva	


Metody průzkumu:

- optická mikroskopie v dopadajícím světle (mikroskop OPTIPHOT2-POL (Nikon, Japan))
- rastrovací elektronová mikroskopie s energo-disperzní analýzou (elektronový mikroskop Tescan MIRA 3 s energo-disperzním analyzátozem Bruker)

Popis metodiky analýzy:

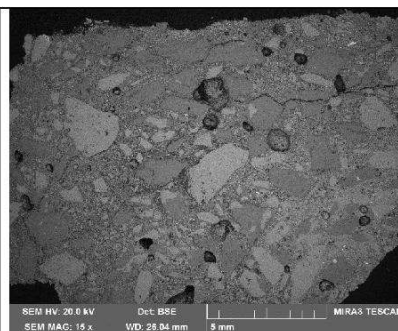
Vzorek byl zalitý do akrylátové bezbarvé pryskyřice Spofacryl a následně připraven příčný řez (nábrus) broušením a leštěním. Nábrus byl zkoumán optickým mikroskopem v dopadajícím viditelném, modrém a UV světle a následně rastrovacím elektronovým mikroskopem.

Výsledky analýzy:

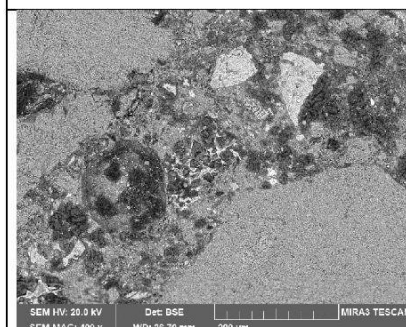
Vz. 1 10422	Fragment originálního materiálu odlomený pravděpodobně z levé strany rubu, ve střední výšce Určení typu pojiva a plniva; granulometrie plniva	
----------------	--	---



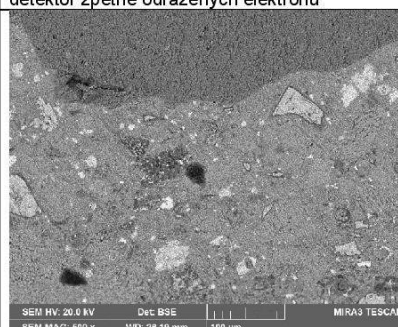
Bílé dopadající světlo, fotografováno při zvětšení mikroskopu 20x



REM-BSE, rastrovací elektronový mikroskop, detektor zpětně odražených elektronů



REM-BSE, rastrovací elektronový mikroskop, detektor zpětně odražených elektronů, detail s fragmenty slinkových částic a strusky



REM-BSE, rastrovací elektronový mikroskop, detektor zpětně odražených elektronů, detail s fragmenty slinkových částic a strusky

Tab.1. Základní vlastnosti vzorku betonu

Vzorek	Nasákavost	Objemová hmotnost	Otevřená pórovitost
	[% hm.]	[g/cm ³]	[% obj.]
Geo 1	4,1	2,24	8,5

Beton má světlé okrovou až okrově hnědou barvu. Základní vlastnosti betonu jsou uvedeny v tabulce 1. Matrix je kompaktní, málo pórovitá. Je tvořená hlavně sloučeninami Ca, Si a Al (pravděpodobně tzv. CSH a CSAH fáze; hydratované křemičitany a hlinitokřemičitany vápníku). V matrix jsou početné fragmenty slínkových částic a také částic vysokopecní strusky. Složení slínkových částic odpovídá portlandskému cementu. Pojivem betonu je strusko-portlandský cement. Jako kamenivo byla použita směs mramorové a vápencové moučky (drcený bílý mramor a drcený vápenec okrové barvy). Velikost zrn obou součástí kameniva se pohybuje v rozmezí 0,1 až 2 mm. Maximum tvoří zrna velikostí 0,4 - 1mm. Nečistoty na povrchu obsahují hlavně částice prachu (silikáty, velmi jemné částice sazí, částečně i síran vápenatý).

Ing. Karol Bayer
Katedra chemické technologie
Fakulta restaurování
Univerzita Pardubice

6.2.2 Radiografický průzkum

Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i.
Prosecká 809/76, Praha 9, 190 00



Výzkumná zpráva

-

SHRNUTÍ RADIOGRAFICKÉ DOKUMENTACE VYBRANÝCH OBJEKTŮ V ATELIÉRU RESTAURÁTORSKÉ FAKULTY V LITOMYŠLI

-

Vypracoval:

Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.
Marek Eisler

Schválil:

doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D.
ředitel

ÚNOR 2021

Obsah

Úvod.....	1
Digitální radiografie.....	1
Použité zařízení pro zdroj RTG záření.....	2
Použité zařízení pro detekci RTG záření.....	2
Zpracování dat.....	3
Radiografická a fotografická část.....	4
Závěr.....	22

Úvod

Práce restaurátora plastických, zejména sochařských děl je podmíněna znalostí vnitřní struktury restaurovaných objektů. Tato znalost umožňuje poučený přístup, který cíleně mířený na příčinu poškození, zastaví další degradaci a vrátí objektu maximum z jeho původního vzhledu. Mezi diagnostickými metodami mají výlučné postavení ty, které jsou založené na nedestruktivních a neinvazivních přístupech. Mezi těmito metodami má výlučné místo rentgenová radiografie. Radiografický průzkum a dokumentace nabízí možnost pohledu do materiálu a jeho poruch. Hloubka pronikání paprsků do prozařované látky je závislá jak na energii a intenzitě záření, tak na atomárním složení, hustotě a tloušťce zkoumaného materiálu. Mobilní radiografické pracoviště, které je k dispozici v ÚTAM, vykazuje schopnosti pronikat stavebními materiály do tloušťky 20 cm, u dřeva cca 30 cm a u kovů do 0.5 cm. Použitím zařízení nad tyto limity vystupuje do popředí náhodný šum, který zabraňuje interpretovat radiogram, zejména rozpoznat vnitřní stavbu zkoumaného objektu.

Digitální radiografie

Princip a postup digitální radiografie se záznamem na desku lze stručně popsat následujícím způsobem: Rentgenovo záření se na rozdíl od viditelného světla vyznačuje značnou dávkou pronikavosti. Míra jeho absorpce je závislá na tloušťce a materiálovém složení objektů, kterými proniká. Tuto vlastnost lze využít pro zobrazení vnitřní struktury objektů, je-li k dispozici materiál opticky citlivý na intenzitu expozice rentgenovu záření. Citlivý materiál je nanesen na ohebnou desku. Deska je vložena do tmavého polymerního obalu, který minimálně tlumí průchod RTG záření, ale zcela blokuje průchod viditelného světla. Objekt, jehož vnitřní struktura je studována, musí být přístupný ze dvou stran tak, aby na jedné straně mohl být umístěn zdroj RTG záření a na druhé straně záznamová deska.



Oproti tradičním filmům pro záznam obrazů mají desky výhodu suchého procesu, výrazně kratšího čekání na získání radiogramu, velkého dynamického rozpětí zaznamenaných intenzit záření oproti klasickému filmu a v neposlední řadě možnosti opakovatelného použití desky.

Použité zařízení pro zdroj RTG záření

RTG pulzy byly generovány pomocí zařízení Inspector XR200. Jedná se o zdroj neobsahující trvale ionizující zdroj záření, kterým obvykle bývá směs radioisotopů. XR200 používá princip vytváření RTG záření dopadem urychlených elektronů na kovový terčik, a proto v čase mimo použití nepředstavuje žádné bezpečnostní riziko.

X-Ray Generator, INSPECTOR Model XR200

Art.-No.: 150150

Cert.-No.: BfS 070/09 R R6V



Použité zařízení pro detekci RTG záření

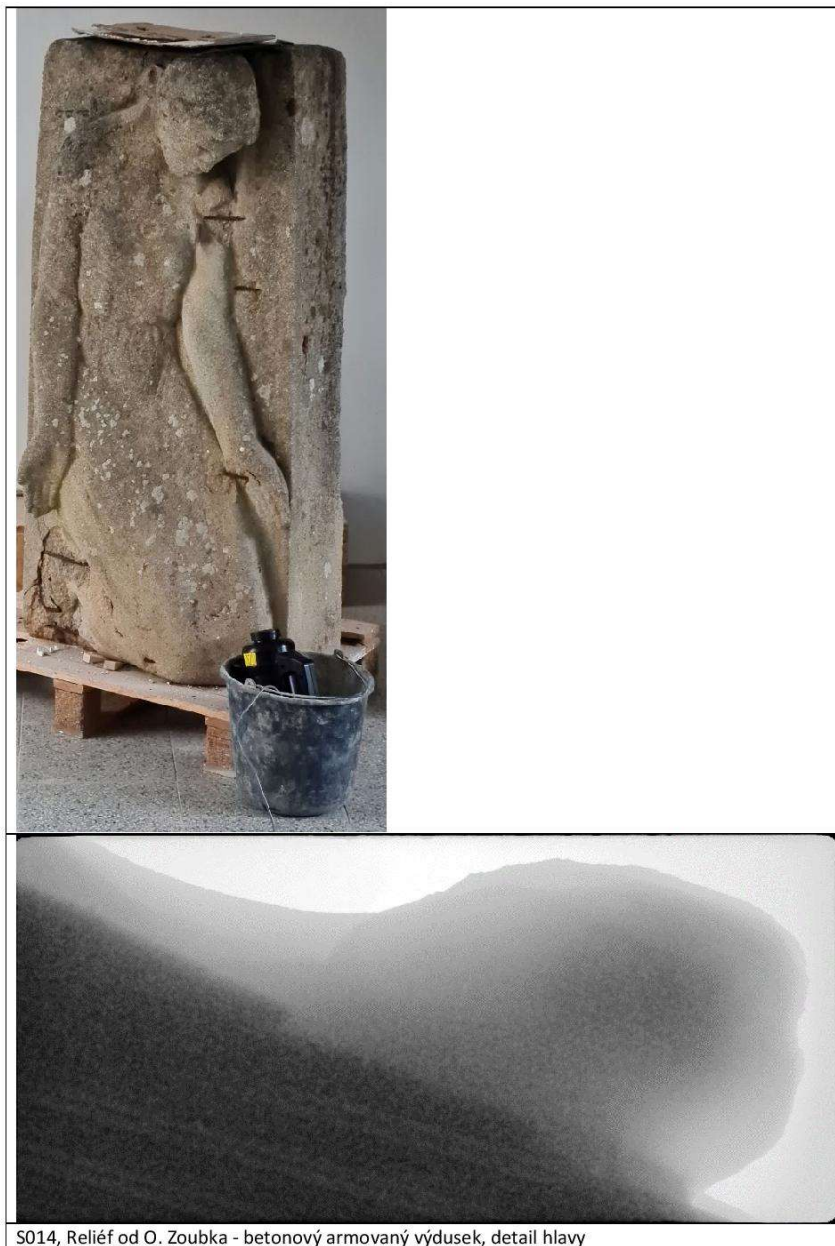
Pro detekci RTG záření slouží opakovaně použitelné desky, ze kterých je vytvořený radiogram vyčítán speciálním skenerem, v němž je deska navinuta na rotující buben. Konkrétně se jedná o systém DIMAP Mk3 (akronym DIMAP je sestaven z částí rozvinutého názvu „Digital IMAge Plate system“).

Po nastavení příslušného počtu impulzů na RTG zdroji (v závislosti na tloušťce a atomovém složení zkoumaného materiálu) se deska exponuje, přičemž formování obrazu ve výsledkem různého útlumu generovaného záření průchodem zkoumaným objektem. Vystavením citlivé vrstvy desky RTG záření nastane v jejím materiálu trvale excitovaný stav, který se projevuje změnou odstínu na povrchu desky, ale v infračervené oblasti spektra. Oku je tedy vzniklá změna neviditelná a musí být použitý skener, který sekvenciálně vyčte hodnoty ztmavnutí (míra ztmavnutí v daném bodu desky je dána jako převrácená hodnota poměru mezi známou intenzitou dopadajícího světla z IR laseru a intenzitou odraženého IR záření zaznamenanou infračerveným detektorem skeneru) a sestaví je podle polohy na desce do matice, v níž se formuje obraz. Tento obraz je postupně přenášen do řídicího počítače (notebook), ve kterém probíhá jeho zobrazení i případně další zpracování. Podle volby rozlišení, je možné dosáhnout různé úrovně detailu ve snímku – 150, 300 a 600 dpi. Nárůst rozlišení s sebou přináší další dva

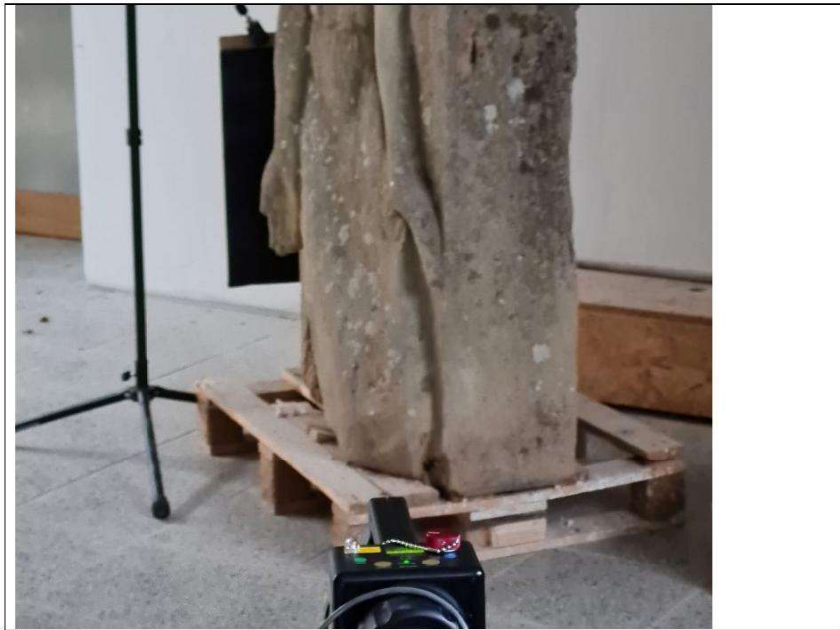
2



S012, (S013 – stejný pohled, jiná dávka záření) Reliéf od O. Zoubka - betonový armovaný výdusek, detail vnitřní struktury, **tloušťka objektu je na hranici použitelnosti zařízení**. Ve spodní třetině horizontálně prochází výztuž (diagonální pásy jsou artefakt metody a nesouvisí s objektem)



S014, Reliéf od O. Zoubka - betonový armovaný výdusek, detail hlavy



S015, Reliéf od O. Zoubka - betonový armovaný výdusek, detail vystupující ruky provedené bez výztuže

Závěr

Radiografická dokumentace ukázala vnitřní stavbu a výztužné prvky zkoumaných objektů pokud nebyla překročena mezní tloušťka materiálu. V takových případech byla kontrastnost a čitelnost radiogramů snížena vlivem šumu, který převážil signal nesoucí informaci o objektu.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A PRAMENŮ

7.1 Seznam použité literatury a pramenů

BAN, Matea. *Wotruba Church a Cologne Opera: aspects of concrete aging. In: Proceedings PRO 89. Zagreb, Croatia: RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability, 2014, s. 7*

BERTOLINI, LUCA, CARSANA a REDAELLI. “Conservation of Historical Reinforced Concrete Structures Damaged by Carbonation Induced Corrosion by Means of Electrochemical Realkalisation. *Journal of Cultural Heritage*. 2008, 9(4), 376-385. Dostupné z: doi: 10.1016/j.culher.2008.01.006.

ČERVINKA, J. a V. ŘÍHOVÁ. *Památkový postup, Restaurování Betonové sochy. NAKI, České umění 50. – 80. let ve veřejném prostoru: evidence, průzkumy, restaurování. Litomyšl, 2019.*

ČSN EN 12390. *Zkoušení ztvrdlého betonu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

ČSN EN 12504. *Zkoušení betonu v konstrukcích*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009”

ČSN EN 206+A1. *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

ČSN EN 9223. *Koroze kovů a slitin – Korozní agresivita atmosfér – Klasifikace, stanovení a odhad*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví 2012.

ČSN EN 998–1 ED. 3. *Specifikace malt pro zdivo – Část 1: Malta pro vnitřní a vnější omítky*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017

ČSN EN 998–2 ED. 3. *Specifikace malt pro zdivo – Část 2: Malta pro zdění*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

DROCHYTKA, Rostislav, Jiří DOHNÁLEK, Jiří BYDŽOVSKÝ a Václav PUMPR. *Technické podmínky pro sanace betonových konstrukcí – TP SSBK II*. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí, 2003. ISBN 80-239-0516-3.

FOUCALT, Michel. *La corrosion des metaux dans le platre. Dans le platre* (Secrétaire á la Comission Technique RILEM 23 GP), 1977, s. 489–505.

HAVLÍK, Luboš. *Koroze slitin železa a způsoby jejich vyhodnocování*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Bohumil Pacal.

GONZÁLEZ, F., G. FAJARDO, G. ARLIGUIE, C.A. JUÁREZ a G. ESCADEILLAS. *Electrochemical Realkalisation of Carbonated Concrete: an Alternative Approach to Prevention of Reinforcing Steel Corrosion*. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2011, **2011**(6), 6332–6349.

GRALIŃSKA-GRUBECKA, ALEKSANDRA. *Appliance of realkalisation in the conservation of monuments made of reinforced cement mortar and concrete*. *Acta Universitatis Nicolai Copernici: Zabytkoznawstwo i konserwatorstwo XLIX*. 2018, **2018**, 320-337. ISSN 0208-533X. Dostupné z: doi: http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ZiK.2018.012

GRALIŃSKA-GRUBECKA, A., J. W. ŁUKASZEWICZ a WITOLD. *A Comparative Study of Anti-Corrosion Products for the Protection of Reinforcement in Monuments.* " *In Concrete Solutions*. 2011.

HEINEMANN, Herdis Andrea. *Impact of repairs on historic concrete and heritage values*. *Historic Concrete: From Concrete Repair to Concrete Restoration*. Dortmund: Universität Dortmund, 2013, s. 333–380. ISBN 9789052694115

JANKOVIČOVÁ, Sabina, KAROUS, Pavel, ed. *Vetřelci a volavky: atlas výtvarného umění ve veřejném prostoru v Československu v období normalizace (1968-1989) = Aliens and herons: a guide to fine art in the public space in the era of normalisation in Czechoslovakia (1968-1989)*. V Řevnicích: Arbor vitae, 2013. ISBN 978-80-86863-73-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. *Durability of Impressed Current Realkalization Treatment Applied on Reinforced Concrete Slabs after 5 years*. In: *XII. DBMC*. Porto, Portugal, 2011.

KOLEKTIV AUTORŮ. *Konzervování a restaurování kovů: ochrana předmětů kulturního dědictví z kovů a jejich slitin*. Vyd. 1. Brno: Technické muzeum v Brně – Metodické centrum konzervace, ©2011. 648 s. ISBN 978-80-86611-38-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. *Metodika uchování předmětů kulturní povahy*. Brno: Technické muzeum v Brně, [2018]. ISBN 978-80-87896-40-2.

KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. ISBN 80-7080-347-9. s. 20–23.

KŘENKOVÁ, Z. a V. ŘÍHOVÁ. *Sochy a města – Morava: Výtvarné umění ve veřejném prostoru 1945–1989*. 1. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování, 2020. ISBN 978-80-7560-279-4.

MEIER, S. J., and F. H. WITTMANN. 2011. *Recommendations for water repellent surface impregnation of concrete. Restoration of Buildings and Monuments: An International Journal = Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege: Eine internationale Zeitschrift* 17 (6): 347–356.

Norcure® Re-Alkalization – Concrete Corrosion Repair“, dostupné z:<https://www.vector-corrosion.com/n>

PILLARD, Violaine. *La corrosion des armatures de fer dans le plâtre*. Paris, France: Créaphis, 2001, s. 279-289. ISBN 9782913610194.

SCOTT, David A. a David A. SCOTT. *Iron and steel in art: corrosion, colorants, conservation*. 1. London: Archetype, 2009. ISBN 978-1-904982-05-0.

SELWYN, Lyndsie. *Metals and corrosion: a handbook for the conservation professional*. Ottawa: Canadian Conservation Inst., 2004. ISBN 06-623-7984-5.

SIMPSON, Lorne, Paul GAUDETTE a Deborah SLATON. *Centre Street Bridge Lions: Rehabilitation and Replication of Historic Concrete Sculpture*. ATP Bulletin: The Journal of Preservation Technology. Association for Preservation Technology International, 2001, 32 (2/3), 13–20.

SÖYLEV, T. A. a M.G. RICHARDSON. *Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report. Construction and Building Materials*. 2008, **2008**(4), 609-622. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.10.013>.

STUDENÍK, Bronislav. *Restaurování polychromované štukové plastiky Adama z kaple sv. Isidora v obci Křenov. Možnost stabilizace korozních produktů. Diplomová práce*. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování, Litomyšl 2014. Vedoucí práce: Jiří Novotný.

STAVINOHA, Jakub. *Koroze oceli a hliníku ve vybraných prostředích*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Eva Novotná.

SVOBODA, Luboš a kolektiv. *Stavební hmoty*. 3. Praha: JAGA group, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.

ŠIBRAVOVÁ, K. *Restaurování části renesančního štukového epitafu rodiny Hodějovských z Hodějova v kostele Narození sv. Jana Křtitele v Českém Rudolci*. Možnosti čištění korozních produktů slitin železa z povrchu sádrových odlitků. Litomyšl, 2021. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Fakulta Restaurování. Vedoucí práce Renata Tišlová.

WINSTON, R. *Uhlig's Corossion Handbook*. 3. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2011. ISBN 978-0-470-08032-0.

ZMEŠKAL, O., M. ČEPPAN a P. DZIK. *Barevné prostory a správa barev*. Fakulta chemická, Vysoké učení technické v Brně, 2002.

8 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rakouská norma Önorm B 3355-1, užívaná k posouzení rizikivosti koncentrací vodorozpustných solí	16
Tab. 2 Výsledky naměřených koncentrací vodorozpustných solí na zkoumaném objektu	17
Tab. 3 Lokality odběru vzorků pro určení koncentrace vodorozpustných solí a alkality materiálu	18
Tab. 4 Naměřené hodnoty pH, ze vzorků odebraných z objektu	18
Tab. 5 Mikro snímky zkoušek čištění na povrchu díla, provedeny pomocí přenosného USB mikroskopu Dino-lite	20
Tab. 6 Detailní snímky zkoušených směsí pro plastickou retuš	23
Tab. 7 Základní vlastnosti připravených realkalizačních a inhibičních prostředků	72
Tab. 8 Výsledky měření realkalizačního účinku na zkušebních vzorcích	78
Tab. 9 Průměrné hodnoty navýšení pH pro jednotlivé realkalizační prostředky ..	79
Tab. 10 Vizuelní vnímání barevných rozdílů vyjádřených parametrem ΔE	80

9 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Hodnoty změny barevnosti vzorků, v závislosti na aplikaci inhibitoru a expozici v exteriéru.....	82
---	----

10 SEZNAM VYOBRAZENÍ

10.1 Seznam obrazových příloh

Obr. 1 Vyznačení lokalit zkoušek čištění na objektu	21
Obr. 2 Průběh čištění, srovnání vrchní plochy již očištěné od biologického napadení a ulpělých depositů se spodní partií bez zásahu	27
Obr. 3 Průběh formování originálu, silikonová forma společně se sádrovými klíny	29
Obr. 4 Průběh dusání kopie, jádro z mokrého písku	29
Obr. 5 Detail průběhu lepení fragmentů, noha figurálního výjevu	30
Obr. 6 Průběh osazení kopie na hrobovém místě v Parníku v České Třebové pomocí mobilního jeřábu	32
Obr. 7 Průběh transportu zrestaurovaného originálu z prostor ARK	33
Obr. 8 Zakreslení lokality pro budoucí odběr vzorků k posouzení vývoje alkalické rezervy	35
Obr. 9 Stav před restaurováním, čelní pohled	36
Obr. 10 Stav před restaurováním, zadní pohled	37
Obr. 11 Stav před restaurováním, pravý boční pohled	38
Obr. 12 Stav před restaurováním, levý boční pohled	39
Obr. 13 stav před restaurováním, spodní pohled	40
Obr. 14 Stav před restaurováním, detail obnažené armatury, pohled ze shora	40
Obr. 15 Stav před restaurováním, odpadlé fragmenty	41
Obr. 16 Stav před restaurováním, detail figurálního výjevu	41
Obr. 17 Stav před restaurováním, detail levé dlaně figurálního výjevu	42
Obr. 18 Stav před restaurováním, detail pravé dlaně figurálního výjevu	42
Obr. 19 Stav před restaurováním, detail zkorodované armatury, zadní strana	43
Obr. 20 Stav před restaurováním, detail zkorodované armatury, zadní strana	43
Obr. 21 Stav před restaurováním, hlavy figurálního výjevu	44
Obr. 22 Stav po očištění, čelní pohled	45
Obr. 23 Stav po očištění, zadní pohled	45
Obr. 24 Stav po očištění, levý boční pohled	46
Obr. 25 Stav po očištění, pravý boční pohled	46
Obr. 26 Stav po plastické retuši, čelní pohled	47

Obr. 27 Stav po plastické retuši, zadní pohled.....	47
Obr. 28 Stav po plastické retuši, levý boční pohled.....	48
Obr. 29 Stav po plastické retuši, pravý boční pohled.....	48
Obr. 30 Stav po plastické retuši, detail nohy figurálního výjevu	49
Obr. 31 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu.....	49
Obr. 32 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu.....	50
Obr. 33 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu.....	50
Obr. 34 Stav po plastické retuši, detail hlavy figurálního výjevu.....	51
Obr. 35 Stav po plastické retuši, spodní pohled.....	51
Obr. 36 Stav po restaurování, čelní pohled	52
Obr. 37 Stav po restaurování, zadní pohled	53
Obr. 38 Stav po restaurování, pravý boční pohled	54
Obr. 39 Stav po restaurování, levý boční pohled	55
Obr.40 Stav po restaurování, detail plastické retuše zadní část.....	56
Obr. 41 Stav po restaurování, detail plastické retuše zadní část.....	56
Obr. 42 Stav po restaurování, detail plastické retuše spodní část.....	57
Obr. 43 Stav po restaurování, detail spodní části figurálního výjevu	57
Obr. 44 Stav po restaurování, detail vrchní části figurálního výjevu	58
Obr. 45 Stav po restaurování, detail pravé ruky figurálního výjevu.....	58
Obr. 46 Stav po restaurování, detail hlavy figurálního výjevu.....	59
Obr. 47 Stav po osazení v exteriéru, čelní pohled.....	59
Obr. 48 Stav po osazení v exteriéru, levý boční pohled.....	60
Obr. 49 Stav po osazení v exteriéru, pravý boční pohled.....	60
Obr. 50 Detail, vzorek typu "X"	68
Obr. 51 Detail, vzorek typu "Y"	68
Obr. 52 Detail, vzorek typu "Z"	69
Obr. 53 Celkový snímek vzorku bezprostředně po aplikaci	73
Obr. 54 Vzorky na stojanu při exteriérové expozici	74