

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA RESTAUROVÁNÍ  
Ateliér restaurování nástěnné malby a sgrafita  
Jiráskova 3, 570 01 Litomyšl

**Vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti;  
restaurování části nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v  
Subenu v Rakousku**

Vypracovala: BcA. Lucie Urbanová  
Vedoucí práce: MgA. Zuzana Wichterlová  
Konzultanti: Ing. Jan Válek, Ph.D., Ing. Renata Tišlová, Ph.D.  
Oponent: Mgr. Radek Ševčík Ph.D.

2023

Univerzita Pardubice  
Fakulta restaurování  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lucie Urbanová**  
Osobní číslo: **R21026**  
Studijní program: **N0222A310001 Restaurování a konzervace děl hmotného kulturního dědictví**  
Specializace: **Nástěnná malba, sgrafito, mozaiky a polychromie omítek a kamene**  
Téma práce: **Vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti; restaurování části nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v Subenu v Rakousku**  
Zadávající katedra: **Ateliér restaurování malby a sgrafita**

## Zásady pro vypracování

Diplomová práce je prací, ve které student/ka dokládá, že je schopen/na samostatně a tvůrčím způsobem provést komplexní restaurátorský zásah a zároveň teoreticky prostudovat, invenčně a samostatně řešit dané teoretické téma. Teoretickou část vypracuje diplomantka na téma "Vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti". Diplomant/ka nejprve shromáždí potřebnou literaturu k tématu, na jejímž základě připraví podrobnou metodiku pokusu. V první fázi se zaměří na stanovení podmínek experimentu – zvolí vhodná klimatická prostředí, podmínky stárnutí i odpovídající časování. Dále ověří funkčnost vybraných metod v přípravném pokusu. Následně provede experiment, u kterého se zaměří na chemické složení různě stárnutého páleného vápna, jeho reaktivitu i na granulometrii výsledné kaše. Výsledné hodnoty u jednotlivých zvolených prostředí přehledně porovná a v rámci diskuse vyhodnotí. Na závěr navrhne další směr bádání. V rámci praktické práce byl diplomantce/ovi přidělen úsek nástěnné malby "Sv. Augustin a (alegorie) personifikace smrtelných hříchů", který je součástí nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v klenbě nad kruchtou klášterního kostela sv. Lamberta v rakouském Subenu. Na tomto úseku diplomant/ka provede restaurátorský průzkum. V jeho závěru vyhodnotí všechna zjištění provedená in situ, uměleckohistorická bádání i laboratorní průzkumy. Po odsouhlasení postupu provede komplexní restaurátorský zásah. Průběh prací bude konzultován s vedoucím praktické práce, s vedoucím diplomové práce, se zástupcem investora i se zástupci BDA. Nedílnou součástí bakalářské práce je vyhotovení restaurátorské dokumentace přiděleného úseku malby. Tato dokumentace musí obsahovat všechny nezbytné údaje a kapitoly. Po formální stránce dodrží diplomant/ka pravidla psaní diplomových prací, stanovená na FR UPa. Textová podoba diplomové práce včetně všech fotografií, grafických zákresů a dalších vyobrazení bude vedoucí/mu práce předložena ke korektuře nejpozději tři týdny před oficiálním odevzdáním diplomové práce.

Diplomantka dohledá a použije i další literaturu potřebnou ke zdárnému dokončení práce. Vedoucí práce: MgA. Zuzana Wichterlová Vedoucí praktické práce: Dipl. Rest. Jörg Riedel Konzultanti teoretické části: Ing. Jan Válek, Ph.D., Ing. Renata Tišlová, Ph.D., Ing. Karol Bayer Oponent: Mgr. Radek Ševčík, Ph.D. Datum zadání práce: 11.11.2022

Rozsah pracovní zprávy:

Rozsah grafických prací:

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

## Seznam doporučené literatury:

- John Ashurst – Richard Ireland – John Steward – Alison Henry ed., Practical building conservation: Mortars, Renders and Plasters. Farnham: Ashgate 2011.
- Iain McCaig ed., Practical building conservation: Conservation Basics. London: English Heritage 2013.
- Barbara Appelbaum, Conservation Treatment Methodology. Britain: Published by Elsevier 2007.
- Oldřich J. Blažíček – Jiří Kropáček, Slovník pojmů z dějin umění: názvosloví a tvarosloví architektury, sochařství, malby a užitého umění. Vyd. 2. Praha 2013.
- James Hall – Jan Royt – Allan Plzák, Slovník námětů a symbolů ve výtvarném umění. Praha 1991.
- Roman Kubička – Jiří Zelinger, Výkladový slovník: malířství, grafika, restaurátorství. Praha 2004.
- Paolo Mora – Laura Mora – Paul Philippot, Conservation of Wall Paintings. London 1984.
- Jan Royt – Hana Šedinová, Slovník symbolů: kosmos, příroda a člověk v křesťanské ikonografii. Praha 1998.
- Hynek Rulišek, Postavy, atributy, symboly: slovník křesťanské ikonografie. 2., upr. vyd. České Budějovice 2006.
- Eva Šimůnková – Tatjana Bayerová. Pigmenty. Praha: STOP 1999.
- Bohuslav Slánský, Technika malby I a II. Praha 2003
- Ivan Vaněček, Nástěnné malby. VŠCHT Praha 1997.
- Jiří Zelinger a kolektiv, Chemie v práci konzervátora a restaurátora. Praha 1987.
- Pavla Rovaníková, Omítky: Chemické a technologické vlastnosti. STOP Praha 2002.
- Jan Válek, Vápenné technologie historických staveb: příprava specializovaných vápenných pojiv pro obnovu historických staveb. Praha Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky 2015.
- Esther Ontiveros-Ortega, Reyes Rodríguez-García, Ana González-Serrano, Lidia Molina, Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime: Construction and Building Materials, Sevilla 2018.

Vedoucí diplomové práce:

**MgA. Zuzana Wichterlová**

Ateliér restaurování malby a sgrafita

Datum zadání diplomové práce:

**11. listopadu 2022**

Termín odevzdání diplomové práce:

**16. srpna 2023**

L.S.

---

**Mgr. BcA. Radomír Slovík**  
děkan

---

**MgA. Zuzana Wichterlová**  
vedoucí ateliéru

V Litomyšli dne 8. srpna 2022

## **Prohlášení**

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

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

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

V Litomyšli dne.....

Lucie Urbanová

## **Poděkování**

*Za velkou vstřícnost při vedení práce děkuji MgA. Zuzaně Wichterlové. Za nenahraditelnou pomoc s experimenty a za důležité konzultace děkuji Ing. Renatě Tišlové, Ph.D a Ing. Janu Válkovi, Ph.D. Za pomoc v laboratoři na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky v Praze děkuji RNDr. Petru Kozlovcevi Ph.D. a na FrUPCE v Litomyšli Ing. Elišce Bečkové. Za restaurátorské vedení v rakouském Subenu děkuji Dipl. rest. Jörgu Riedelovi. Za cenné rady a podporu děkuji Mgr. Petře Hečkové Ph.D. a Mgr. Zdeňce Michalové Ph.D. Za cenné připomínky k ikonografii děkuji Mgr. Michaele Šeferisové Loudové, Ph.D. Velké poděkování patří také MgA. Janu Vojtěchovskému Ph. D. za cenné rady a trpělivost během studia.*

## **Název**

Vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti; restaurování části nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v Subenu v Rakousku

## **Anotace**

*Teoretická část práce se zabývá změnou složení a vlastností páleného vápna v čase, v závislosti na podmínkách skladování. Za účelem zkoumání byl proveden experiment, při kterém byly vzorky kusového páleného vápna umístěny ve čtyřech různých prostředích ke stárnutí. V podmínkách byl průběžně sledován hmotnostní nárůst vzorků, v určených časových intervalech byly vzorky analyzovány. Konkrétně se jednalo o test reaktivity, doplněný o granulometrii nevyhašených zbytků. Ve stejných časových intervalech byla provedena termická analýza (TG–SDT, DSC), mikrostruktura vzorků byla studována ve skenovacím elektronovém mikroskopu (SEM). Při hodnocení výsledků experimentu byly všechny metody testování vzájemně porovnány a diskutovány.*

*Praktická část práce prezentuje komplexní restaurátorský zásah provedený na vymezeném úseku barokní nástěnné malby Johanna Jakoba Zeillera v klášteře v Subenu (Rakousko). Konkrétně na nástěnné malbě s výjevem Obrácení sv. Augustina. Na malbě bylo v minulosti provedeno několik předchozích restaurátorských zásahů, se kterými bylo potřeba se vypořádat. Zásadním krokem při restaurování bylo odstranění předchozí fixáže vodním sklem.*

## **Klíčová slova**

*Pálené vápno, stabilita, reaktivita vápna, hašení, karbonatace, termická analýza, SEM, skladování páleného vápna, restaurování, konzervování, nástěnná malba, freska, obrácení sv. Augustina, Klášter v Subenu, Suben, Johann Jakob Zeiller, barokní nástěnná malba, barokní freska, vodní sklo, čištění párou.*



## **Title**

*The effect of storage of quicklime on its properties; restoration of part of the wall painting of the Conversion of St. Augustine in Suben, Austria*

## **Annotation**

*The theoretical part of the thesis deals with the change of composition and properties of quicklime over time, depending on storage conditions. In order to investigate this, an experiment was conducted in which lump quicklime samples were placed in four different aging environments. The conditions were continuously monitored for weight gain, and the samples were analyzed at specified time intervals. Particularly, this involved a reactivity test, supplemented by granulometry of the unquenched residue. Thermal analysis (TG–SDT, DSC) was performed at the same time intervals, and the microstructure of the samples was studied in a scanning electron microscope (SEM). In evaluating the experimental results, all testing methods were compared and discussed with each other.*

*The practical part of the thesis presents a comprehensive restoration intervention carried out on a defined section of a Baroque wall painting by Johann Jakob Zeiller in the monastery in Suben (Austria). Specifically on the wall painting with the scene of the Conversion of St. Augustine. The painting had been subjected to several previous restoration interventions in the past, which had to be dealt with. A crucial step in the restoration was the removal of the previous water glass fixation.*

## **Keywords:**

*Quicklime, stability, lime reactivity, air slaking, carbonation, thermal analysis, SEM, quicklime storage, restoration, conservation, mural, fresco, conversion of St. Augustine, Suben Monastery, Suben, Johann Jakob Zeiller, baroque mural, baroque fresco, water glass, steam cleaning.*

## Obsah:

<b>I. Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>II. Teoretická část – Vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti.....</b>	<b>11</b>
1. Úvod.....	11
2. Rešerše dostupných informací k tématu.....	12
2.1 Reakce páleného vápna – hydratace a karbonatace.....	12
2.2 Vliv přeměny páleného vápna na reaktivitu.....	14
2.3 Metodické přístupy pro zachycení změn složení a vlastností páleného vápna.....	16
2.4 Změny mikrostruktury páleného vápna.....	18
2.5 Závěry z rešerše.....	22
<b>III. Experimentální část teoretické práce.....</b>	<b>23</b>
1. Úvod.....	23
2. Materiály.....	23
2.1 Příprava páleného vápna.....	23
2.2 Podmínky uložení.....	24
3. Metody zkoumání.....	25
3.1 Změna hmotnosti.....	25
3.2 Test reaktivity.....	25
3.3 Charakterizace nehasitelného podílu.....	27
3.4 Simultánní termická analýza (STA).....	27
Příprava vzorku pro termickou analýzu.....	28
3.5 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM).....	29
Příprava vzorků pro skenovací elektronovou mikroskopii.....	29
4. Výsledky.....	29
4.1 Výsledky měření změny hmotnosti.....	29
4.2 Výsledky testu reaktivity.....	31
4.3 Stanovení nehasitelného podílu.....	33
4.4 Výsledky termické analýzy.....	36
4.5 Výsledky skenovací elektronové mikroskopie.....	40
5. Diskuse a závěr.....	44
<b>IV. Praktická část – Restaurování části nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v Subenu v Rakousku.....</b>	<b>47</b>
1 Úvod.....	47
2 Úvodní údaje.....	48
2.1 Lokalizace památky.....	48
2.2 Údaje o památce.....	49
2.3 Údaje o akci.....	50
2.4 Údaje o dokumentaci.....	51
3 Průzkum díla.....	52
3.1 Metody průzkumu.....	52
3.2 Uměleckohistorický průzkum.....	52
3.2.1 Stručná historie objektu a díla.....	52

3.2.2 Popis klášterního kostela a maleb.....	53
3.2.3 Popis a vymezení části malby určené k provedení komplexního restaurátorského zásahu.....	53
3.2.4 Ikonografie.....	53
3.2.5 Předlohy a analogie díla.....	54
3.2.6 Předchozí restaurátorské zásahy a průzkumy.....	55
3.3 Restaurátorský průzkum.....	56
3.3.1 Vizualní průzkum v rozptýleném denním světle.....	56
3.3.2. Vizualní průzkum v ostrém bočním nasvícení.....	57
3.3.3 Průzkum v UV světle a pomocí technické fotografie.....	57
3.3.4 Perkusní průzkum (poklepem).....	58
3.4 Přírodovědný (chemicko-technologický) průzkum.....	59
3.4.1 Konkrétní cíle průzkumu.....	59
3.4.2 Výsledky chemicko-technologického průzkumu.....	59
3.5 Komplexní vyhodnocení průzkumu.....	60
3.5.1 Popis objektu a díla.....	60
3.5.2 Původní technika.....	60
3.5.3 Předchozí zásahy a stručná historie díla.....	61
3.5.4 Stav díla a jeho příčiny.....	61
4 Zkoušky technologií a materiálů.....	62
4.1 Cíle provedených zkoušek.....	62
4.1.1 Lokalizace provedených zkoušek.....	63
4.1.2 Výsledky zkoušek a vybraný postup.....	63
5 Návrh restaurátorského zákroku.....	63
5.1 Návrh koncepce restaurování.....	63
5.2 Návrh postupu restaurátorských prací.....	64
6 Dokumentace restaurátorského zásahu.....	64
6.1 Postup restaurátorských prací.....	64
6.1.1 Čištění.....	64
6.1.2 Odstranění tmelů.....	64
6.1.3 Injektáž.....	65
6.1.4 Tmelení.....	65
6.1.5 Retuše.....	65
6.2 Použité materiály a přístroje.....	66
6.3 Doporučený režim památky.....	67
7. Závěr.....	68
<b>V. Závěr.....</b>	<b>69</b>
<b>Seznam literatury, pramenů a použitých zkratk.....</b>	<b>70</b>
<b>Seznam obrázků, tabulek a grafů.....</b>	<b>72</b>
<b>Seznam použitých zkratk.....</b>	<b>74</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>75</b>

# I. Úvod

Diplomová práce na téma Vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti; restaurování části nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v Subenu v Rakousku je rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické.

V rámci teoretické části byl proveden experiment. Ten se primárně opíral o rešerši k tématu vlivu podmínek na složení a vlastnosti páleného vápna. V rámci samotného experimentu byly vzorky páleného vápna exponovány ve čtyřech různých prostředích, které se lišily přístupností vzduchu, resp. vlhkostí, která je pro stabilitu páleného vápna zásadní. Zvolena byla expozice ve vakuu, pod sklem, na vzduchu a pod filtračním papírem. Kvůli rychlosti probíhajících reakcí bylo zvoleno prostředí uložení vzorků s nízkou relativní vlhkostí vzduchu okolo 30 %. V průběhu skladování byly změny složení a vlastností páleného vápna popsány díky měření několika vybraných vlastností, jejichž výběr určovala dostupnost metod na FR UPCE. Sledován byl hmotnostní nárůst vzorků v průběhu expozice, ve vybraných časech byl proveden test reaktivity, doplněný o analýzu nehasitelného podílu. Fázová analýza vzorků páleného vápna v různých časech expozice byla zjišťována pomocí simultánní termické analýzy (TG–STD, DSC), mikrostrukturní vlastnosti vzorků byly studovány pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM).

Navazující praktická část představuje restaurátorský průzkum a zásah na nástěnné malbě s výjevem Obrácení sv. Augustina od Johanna Jakoba Zeillera v klášteře v Subenu (Rakousko). Na malbě bylo v minulosti provedeno několik předchozích restaurátorských zásahů, se kterými bylo potřeba se vypořádat. Zásadním krokem při restaurování bylo odstranění starší fixáže malby provedené vodním sklem.

## II. Teoretická část – Vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti

### 1. Úvod

První část diplomové práce je zaměřena na výzkum vlivu podmínek skladování páleného vápna na jeho vlastnosti. Studován byl průběh hydratace a karbonatace v různých podmínkách, rychlost probíhajících dějů a jejich dopad na reaktivitu a mikrostrukturní vlastnosti vzorků páleného vápna.

Téma vychází z reálné situace na stavbách, na kterých je možné skladovat pálené vápno (i ve vzduchotěsných nádobách) jen po omezeně krátkou dobu, neboť se i na vzduchu velmi rychle hasí. Případně na historických stavbách, kde nebyla možnost vzduchotěsného skladování vůbec.<sup>1</sup> Tím se mění reaktivita a další vlastnosti páleného vápna, přičemž rychlost a charakter změn výrazně ovlivňují podmínky, ve kterých je vápno uskladněno. Hlavní roli bezesporu hraje přístup vzduchu, jeho vlhkost, teplota, ale i vlastnosti samotného páleného vápna (složení, velikost částic, porozita, měrný povrch, aj.). Při expozici páleného vápna běžným podmínkám dochází k sekvenci reakcí zahrnující jednak hydrataci (reakcí s vlhkostí přítomnou ve vzduchu), ale i karbonataci, která probíhá reakcí vyhašeného vápna s oxidem uhličitým ze vzduchu.

Charakter reakcí, jejich rychlost v závislosti na okolních podmínkách je, zvláště pro studenta oboru restaurování, složitý problém a nelze ho řešit bez důkladné rešerše a provedení experimentální části. Východiskem pro rešeršní část byl vápenný cyklus, který popisuje zpracování vápna od pálení po karbonataci. Ze všech částí vápenného cyklu se rešerše koncentrovala na fázi hašení a karbonatace páleného vápna. Hlubší rešerše byla provedena k procesům probíhajícím na vzduchu a lépe objasnila, jaké procesy v těchto podmínkách probíhají a jak se liší od klasického zpracování páleného vápna s vodou. Rešerše k tomuto tématu poukázala na složitost a komplexnost reakcí, které, pokud mají být přesně zachyceny, vyžadují vědecký přístup, který nebyl primární ambicí tohoto výzkumu. Ten se spíše orientoval na praktické otázky, z nichž hlavní bylo specifikovat jaké reakce v průběhu skladování v reálných podmínkách probíhají, jaká je jejich rychlost a jak lze rychlost reakcí úpravou podmínek uložení ovlivnit. Poslední otázkou bylo, jak se mění reaktivita vápen v případě, že chceme po delší době uložení vápna hasit, a jak vypadá výsledná kaše.

Na uvedené otázky se odpovídalo v experimentální části. Během této fáze se připravily vzorky páleného vápna, u něž byly specifikovány jeho vlastnosti. Vápno bylo umístěno do čtyř podmínek – *vakua*,<sup>2</sup> *vzduchu*, *pod sklo* a *pod papír*. Změny složení a vlastností byly průběžně sledovány na základě změny hmotnosti vzorků, měřením reaktivity v určených časových intervalech. Ve stejných časech bylo zjišťováno fázové složení pomocí termické analýzy a provedeno studium mikrostruktury vzorků pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM).

---

<sup>1</sup> VÁLEK, J. *Vápenné technologie historických staveb: příprava specializovaných vápenných pojiv pro obnovu historických staveb*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, 2015. (str. 90–91)

<sup>2</sup> Nejednalo se o úplné vakuum, vzorek byl uložen ve vakuové dóze na potraviny. Dóza byla ale 10x krátce otevřena mezi 7. a 28. dnem, kvůli vážení vzorku.

## 2. Rešerše dostupných informací k tématu

Část literární rešerše byla zaměřena na průzkum literatury k tématu páleného vápna, jeho hydrataci a karbonataci při expozici různým atmosférickým podmínkám, rychlost probíhajících dějů a jejich dopad na reaktivitu a další vlastnosti vzorků. Zjištěné informace pomohly při metodickém řešení experimentální části a při interpretaci výsledků experimentu a vyhodnocení výsledků získaných jednotlivými metodami zkoumání.

### 2.1 Reakce páleného vápna – hydratace a karbonatace

Reakce vápna probíhající na vzduchu (hydratace a karbonatace) jsou 2. a 3. reakcí tzv. vápenného cyklu, který je třeba na úvod stručně zmínit. Cyklus začíná vznikem oxidu vápenatého (CaO) pálením vápenců s vysokým obsahem CaCO<sub>3</sub>. Vápenec je vytěžen, rozdrčen a vložen do pece, kde dochází k pálení při teplotách v rozmezí asi 850–1200 °C.<sup>3</sup> V peci probíhá kalcinace, vápenec se rozkládá na oxid vápenatý, tzv. pálené vápno (CaO) a oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>). Původní CaCO<sub>3</sub> ztratí během kalcinace 44 % své hmotnosti.<sup>4</sup> Vlastnosti páleného vápna zásadně určují podmínky výpalu, složení suroviny a její mikrostruktura, která závisí na petrografických vlastnostech horniny.<sup>5</sup> Tyto faktory ovlivňují chování vápna při následném hašení, zejména jeho reaktivitu, vydatnost a plasticitu.<sup>6</sup> Při hašení páleného vápna, tzv. hydrataci, se oxid vápenatý přemění na hydroxid (Ca(OH)<sub>2</sub>).<sup>7</sup> Hydratace je exotermní reakce, doprovázená vznikem trhlin a rozpadem vápenných kousků na prášek. Podle množství vody použité k hašení rozlišujeme hašení na sucho, při kterém vzniká práškový vápenný hydrát, naopak při nadbytku vody vznikne vápenná kaše.<sup>8</sup> Hydratace může probíhat i při kontaktu páleného vápna se vzdušnou vlhkostí, tj. vzdušné hašení.<sup>9</sup> V závěrečné fázi vápenného cyklu dochází ke karbonataci, která probíhá reakcí hašeného vápna s oxidem uhličitým z atmosféry. Při této reakci dochází k přeměně hydroxidu vápenatého na uhličitán vápenatý za současného odpaření vody.<sup>10</sup>

Chemické reakce probíhající při pálení (1), hašení (2) a karbonataci vápna (3):<sup>11</sup>

---

<sup>3</sup> VÁLEK, J. *Vápenné technologie historických staveb: příprava specializovaných vápenných pojiv pro obnovu historických staveb*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, 2015. (str. 10)

<sup>4</sup> GALVÁN-RUIZ, M. et al. *Characterization of Calcium Carbonate, Calcium Oxide, and Calcium Hydroxide as Starting Point to the Improvement of Lime for Their Use in Construction*. In: Researchgate [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/232815496\\_Characterization\\_of\\_Calcium\\_Carbonate\\_Calcium\\_Oxide\\_and\\_Calcium\\_Hydroxide\\_as\\_Starting\\_Point\\_to\\_the\\_Improvement\\_of\\_Lime\\_for\\_Their\\_Use\\_in\\_Construction](https://www.researchgate.net/publication/232815496_Characterization_of_Calcium_Carbonate_Calcium_Oxide_and_Calcium_Hydroxide_as_Starting_Point_to_the_Improvement_of_Lime_for_Their_Use_in_Construction).

<sup>5</sup> ONTIVEROS-ORTEGA, E. et al. *Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime*. In: ScienceDirect, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181832453X>.

<sup>6</sup> ROVNANÍKOVÁ, P. *Omítky: Chemické a technologické vlastnosti*. Praha: STOP, 2002. (str. 3)

<sup>7</sup> BLÁHA, J. et al. *Vápno*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - STOP, 2001. (str. 21)

<sup>8</sup> Alkaline earth metals. In: *Gihe Edu* [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

<https://www.gihe.edu.np/downloads/chem3.pdf>

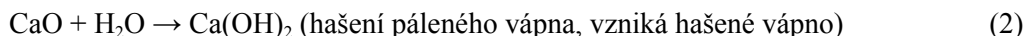
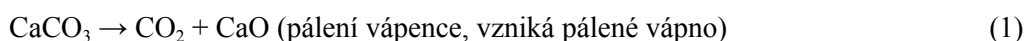
<sup>9</sup> Termín *vzdušné hašení* byl přejat z anglického air slaking, který se v odborné literatuře používá pro hydrataci oxidu vápenatého exponovaného vzdušné vlhkosti (viz. např. HASSIBI, M. *An Overview Of Lime Slaking And Factors That Affect The Process*. In: RDPtech, 1999 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

<https://rdptech.com/wp-content/uploads/2014/06/lime-slaking-process-hassibi-2009.pdf>.

<sup>10</sup> GALVÁN-RUIZ, M. et al. *Characterization of Calcium Carbonate, Calcium Oxide, and Calcium Hydroxide as Starting Point to the Improvement of Lime for Their Use in Construction*. In: Researchgate [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/232815496\\_Characterization\\_of\\_Calcium\\_Carbonate\\_Calcium\\_Oxide\\_and\\_Calcium\\_Hydroxide\\_as\\_Starting\\_Point\\_to\\_the\\_Improvement\\_of\\_Lime\\_for\\_Their\\_Use\\_in\\_Construction](https://www.researchgate.net/publication/232815496_Characterization_of_Calcium_Carbonate_Calcium_Oxide_and_Calcium_Hydroxide_as_Starting_Point_to_the_Improvement_of_Lime_for_Their_Use_in_Construction).

<sup>11</sup> BLÁHA, J. et al. *Vápno*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - STOP, 2001. (str. 7)



O vzdušném hašení M. Hassibi zmiňuje, že pálené vápno vytváří částice  $\text{Ca(OH)}_2$ , jak udává záznam reakce zmíněný výše.  $\text{CaO}$  se při reakci se vzdušnou vlhkostí tolik nezahřívá, jako při reakci, kdy je do vody přímo ponořeno, a reakce probíhá pomaleji.<sup>12</sup>

J. H. Potgieter udává, že pálené vápno podléhá vzdušnému hašení a karbonataci, během delšího skladování, zejména ve vlhkých atmosférických podmínkách. V článku popisuje testy reaktivity provedené na vzorcích uložených v mírných podmínkách během 10 dní. Výsledky srovnává s uměle vytvořenými vzorky s různým podílem  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{CaCO}_3$ . V experimentu používá kousky vápna o velikosti 1–2 mm. Předpokládá, že během těchto procesů se na povrchu částic vápna vytváří tenká "slupka" hydroxidu vápenatého nebo uhličitanu vápenatého, která může snížit reaktivitu vápna.<sup>13</sup> Čím jsou částice  $\text{CaO}$  jemnější, tím jsou náchylnější k hydrataci vzdušnou vlhkostí, protože kontaktu se vzduchem je vystaven větší měrný povrch.<sup>14</sup>

E. Serris poukazuje na zajímavý fenomén zpomalení vzdušné hydratace. K experimentu používá práškové  $\text{CaO}$ , měkce i tvrdě pálené vzorky. Popisuje, že u vzorku tvrdě páleného vápna při 115 °C a tlaku vodní páry 5 hPa (odpovídá  $\text{RV} = 21,4 \%$  při  $T = 20 \text{ °C}$ ), došlo ke zpomalení hmotnostního nárůstu po 24 hodinách, kdy bylo přeměněno 70 % vzorku. Při pozorování mikrostruktury tohoto vzorku se ukázalo, že dochází ke změně – ve struktuře vápna vznikají ploché, hladké útvary s nejasnou morfologií, souvislá vrstva  $\text{Ca(OH)}_2$  bez vytvořených póřů, jen s několika prasklinami. Probíhající difuze přes hydroxidovou vrstvu další reakci extrémně zpomalí, až do té míry, že můžeme hovořit o zablokování reakce. Na ostatních testovaných vzorcích byla mikrostruktura více otevřená a efekt zablokování se neobjevil. Tato skutečnost může souviset se směrem růstu  $\text{Ca(OH)}_2$ , který může probíhat v hexagonální struktuře ve dvou různých směrech – buď kolmo, nebo rovnoběžně s hexagonální rovinou  $\text{Ca(OH)}_2$ .<sup>15</sup>

R. M. Dheilily definuje optimální podmínky pro skladování hašeného vápna, aby se předešlo karbonataci. Zmiňuje, že hašené vápno musí být bezpodmínečně skladováno v suchém prostředí (relativní vlhkost vzduchu < 30 %) a pokud možno při teplotě nad 20–30 °C. Podobně

---

<sup>12</sup> HASSIBI, M. *An Overview Of Lime Slaking And Factors That Affect The Process*. In: RDPtech, 1999 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://rdptech.com/wp-content/uploads/2014/06/lime-slaking-process-hassibi-2009.pdf>.

<sup>13</sup> POTGIETER, J. H. et al. *An empirical study of factors influencing lime slaking. Part I: production and storage conditions*. In: ScienceDirect, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687502000080>.

<sup>14</sup> HASSIBI, M. *An Overview Of Lime Slaking And Factors That Affect The Process*. In: RDPtech, 1999 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://rdptech.com/wp-content/uploads/2014/06/lime-slaking-process-hassibi-2009.pdf>.

<sup>15</sup> SERRIS, E. et al. *Study of the hydration of CaO powder by gas–solid reaction: Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 2011 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611001888>.

podmínky se vztahují i na skladování.<sup>16</sup> Z výsledků studie vyplývá, že proces karbonatace se zrychluje se snižující se teplotou a zvyšující se vlhkostí (byly testovány teploty 10, 20, 40 °C a vlhkosti vzduchu 30 %, 60 %, 100 %). Vliv teploty lze vysvětlit tím, že rozpustnost CO<sub>2</sub> ve studené vodě (vlhkosti) přes kterou reakce probíhá je větší než v teplé vodě. Proto dochází k reakci CO<sub>2</sub> s Ca(OH)<sub>2</sub> rychleji. Autoři stejné studie popisují, že po pátém dni sledování vzorků (při teplotách T = 10, 20, 40 °C a vlhkostech RV= 60 %, 100 %) došlo k zastavení karbonatace (na křivce váhového nárůstu vzorku). Toto zastavení se blíží teoretickému bodu úplné karbonatace.<sup>17</sup>

## 2.2 Vliv přeměny páleného vápna na reaktivitu

Z článků zmíněných v předchozí kapitole vyplývá, že podmínky skladování páleného vápna mají dopad na probíhající hydrataci a karbonataci a tím i na reaktivitu vápna. H. S. Song a C. H. Kim zkoumali dopad karbonatace na reaktivitu páleného vápna. Použili vzorky práškového CaO, které uměle karbonatovali tak, aby obsahovaly jen CaO a CaCO<sub>3</sub>. U různě karbonatovaných vzorků pak sledovali průběh hašení. Studie ukázala, že vzorek obsahující jen CaO začne hydratovat hned, jakmile se dostane do kontaktu s vodou, hydratace proběhne velmi rychle. Naopak částečně zkarbonatované vzorky se chovají jinak a jejich hydratace probíhá až po určité iniciační době, kterou ovlivňuje přítomnost CaCO<sub>3</sub>. Tloušťka vrstvy CaCO<sub>3</sub> je úměrná druhé odmocnině z iniciační doby reakce.<sup>18</sup>

Publikace prezentuje i idealizovaný model hydratace karbonatovaného CaO (*Obr. 1*). V první fázi probíhá rozpouštění CaCO<sub>3</sub> ve vodě (1). Následuje difuze molekul vody do středu vzorku k CaO přes vrstvu CaCO<sub>3</sub> (2). Probíhající hydratace zapříčiní popraskání filmu CaCO<sub>3</sub>, přičemž dochází k rozpadu vzorku a reakce pokračuje (3, 4).<sup>19</sup>

---

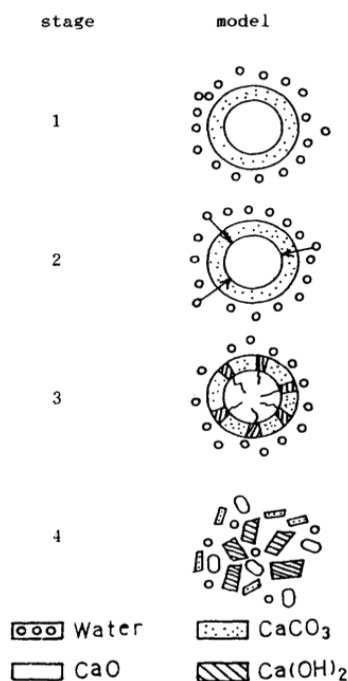
<sup>16</sup> DHEILLY, R. M. et al. *Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca(OH)<sub>2</sub>: Construction and Building Materials*. In: ScienceDirect, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061802000120>.

<sup>17</sup> Ibidem (str. 4).

<sup>18</sup> SONG, H. S.; KIM, C. H. *The effect of surface carbonation on the hydration of CaO, Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 1990 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469090015P>.

<sup>19</sup> Ibidem (str. 7).





Obr. 1: Idealizovaný model hydratace částečně karbonatovaného vzorku CaO.<sup>20</sup>

K měření reaktivity vápna se obvykle používá zkouška reaktivity vápna prováděná v Dewarově nádobě.<sup>21</sup> Jak zmiňuje J. H. Potgieter jako doplňující zkoušku je možné provést stanovení obsahu nehasitelného podílu, který vzniká během procesu hašení například v důsledku již probíhající karbonatace. V jeho studii byla reakční směs vápna a vody po zkoušce reaktivity přenesena do síta o velikosti oka  $D = 0,5$  mm. Síto bylo zvoleno tak aby zachytilo hrubší, karbonatované části a nečistoty. Zbytky zachycené na sítu byly sušeny v sušárně po dobu 3 hodin při teplotě  $100$  °C a poté se nechaly zchladnout. Po ochlazení byl zbytek jemně roztírán štětcem, dokud nebyl odstraněn veškerý jemný prášek a na sítu nezůstaly pouze hrubší pevné částice. Tento konečný zbytek byl zvážen pro výpočet obsahu nehasitelných částic vztažený na původní hmotnost vápna použitého při zkoušce.<sup>22</sup>

Dopad vzdušného hašení a karbonatace na reaktivitu vápna byl zkoumán stejnými autory i v další studii.<sup>23</sup> Vzorky CaO (kousky o velikosti 1–2 mm) byly exponovány na vzduchu po různých časových intervalech v letním období. Během deseti dní byl pozorován pokles reaktivity vápna s následujícími výsledky. Reaktivita nejdříve prudce klesá během prvních 6 hodin, následně klesá pomalejším tempem až do konce testu (10 dní). Potgieter spojuje první náhlý pokles s prudkým postupem vzdušného hašení (přeměna na  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).<sup>24</sup> Následný pomalý pokles reaktivity spojuje s přeměnou vzorku na  $\text{CaCO}_3$ , to může souviset se zpomalením reakce při testu

<sup>20</sup> Ibidem (str. 8).

<sup>21</sup> ČSN EN 459-2. *Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 722201.

<sup>22</sup> POTGIETER, J. H. et al. *The standard reactivity test as a measure of lime's quality*. In: ResearchGate, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/235482891\\_The\\_standard\\_reactivity\\_test\\_as\\_a\\_measure\\_of\\_lime%27s\\_quality](https://www.researchgate.net/publication/235482891_The_standard_reactivity_test_as_a_measure_of_lime%27s_quality).

<sup>23</sup> POTGIETER, J. H. et al. *An empirical study of factors influencing lime slaking*. Part I: production and storage conditions. In: ScienceDirect, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687502000080>.

<sup>24</sup> Ibidem. (str. 3)

reaktivitu vlivem vrstvy  $\text{CaCO}_3$  popsané jako iniciační doba (Song a Kim).<sup>25</sup> Určitým limitem při vyhodnocení tohoto testu však může být to, že při testu reaktivity nebyly sledovány teploty, které reakce dosáhne, ale pouze rychlost, tedy čas, za kterou je daná teplota dosažena.

Dalším překvapivým zjištěním autorů, které není možné zatím zcela dostatečně objasnit je, že i v případě, že zůstává obsah  $\text{CaO}$  téměř nezměněn, rychlost hašení s časem klesá. Tato pozorování upozorňují, že nelze automaticky ztotožňovat rychlost hašení vápna (reaktivitu) s dostupným obsahem vápna nebo jeho kvalitou.<sup>26</sup>

### 2.3 Metodické přístupy pro zachycení změn složení a vlastností páleného vápna

Aby bylo možné zjistit jakou souvislost má změna vlastností skladovaných vzorků s jejich složením a strukturou, jsou zpravidla měření reaktivity doplňována analýzami, které určují fázové složení vzorků, kvantitu fází nebo zachycující mikrostrukturu vzorků. V dohledaných článcích se pro kvantitativní fázovou analýzu často užívá termická analýza (TG), pro studium mikrostruktury vzorků skenovací elektronová mikroskopie (SEM), někdy doplněná transmisní elektronovou mikroskopií (TEM), Ramanovu spektroskopii, RTG práškovou difrakcí (zpravidla doplněnou o Rietveldovu analýzu) nebo infračervenou spektroskopii s Fourierovou transformací (FTIR). Tyto analýzy jsou schopné zjistit informace k fázovému složení vzorku, obsahu jednotlivých fází a mikrostrukturním vlastnostem jednotlivých složek a fází. J. P. Ramos<sup>27</sup> zmiňuje kromě těchto analýz ještě sledování váhy vzorku, pro orientaci v průběhu a rychlosti reakcí vzorku  $\text{CaO}$  na vzduchu. Píše, že na vzduchu (v letním období) byly ponechány tři vzorky práškového páleného vápna. Vzorky byly opakovaně váženy a z hodnot byl sestaven graf, který ukazuje hmotnostní nárůst vzorků za dva dny. Ve výsledcích byla dobře zaznamenána kinetika reakcí, z rychlosti změny hmotnosti – nejdříve byl zaznamenán velmi rychlý hmotnostní nárůst (prvních 5 h), následně hmotnost roste pomaleji až do konce měření.<sup>28</sup> Hodnotu limitu kde dochází ke zpomalení určil Ramos kolem 37 hm.%, tento údaj se blíží hodnotě 100 % hydratace (32 %), pokud bereme v úvahu i fyzikálně vázanou vodu (až 5 %) jak zmiňuje v článku J. H. Park,<sup>29</sup> může tato hodnota dosahovat až 37,3 hm.%, což přesně odpovídá limitu, který popsal Ramos. V našem experimentu bylo chování vzorku na vzduchu podobné, ke zpomalení změny hmotnosti došlo ale až za 5 dní. Rozdíly v čase lze pravděpodobně vysvětlit tím, že Ramos použil práškový vzorek  $\text{CaO}$ , zatímco v našem experimentu byly užívány kusové vzorky páleného vápna s velikostí 10–30 mm. Při experimentu Dalším faktorem mohlo být, že Ramos vzorky exponoval vzduchu s vyšší vzdušnou vlhkostí (vzduch v letním období cca 40–55 % RV), než byl zvolen v našem pokusu (vzduch, RV okolo 30 %).

---

<sup>25</sup> SONG, H. S.; KIM, C. H. *The effect of surface carbonation on the hydration of CaO, Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 1990 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469090015P>.

<sup>26</sup> POTGIETER, J. H. et al. *An empirical study of factors influencing lime slaking. Part I: production and storage conditions*. In: ScienceDirect, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687502000080>.

<sup>27</sup> RAMOS, J. P. *Effect of Calcium Oxide Microstructure on the Diffusion of Isotopes*. In: Researchgate, 2012 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/254469023\\_Effect\\_of\\_Calcium\\_Oxide\\_Microstructure\\_on\\_the\\_Diffusion\\_of\\_Isotopes](https://www.researchgate.net/publication/254469023_Effect_of_Calcium_Oxide_Microstructure_on_the_Diffusion_of_Isotopes). (str 66–68)

<sup>28</sup> Ibidem. (str. 66–68)

<sup>29</sup> PARK, J. H. et al. *Role of intercalated water in calcium hydroxide interlayers for carbonation reaction*. In: ScienceDirect, 2021 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721020088>.

K dalšímu vyhodnocení byla v citované práci použita i termická analýza (TG) práškového vzorku páleného vápna, který byl na vzduchu ponechán a) 5–10 minut, b) po dobu 2 dnů. Přítomnost a obsah fází, které vznikají, lze z této metody velmi dobře identifikovat; přítomnost  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  je možné určit z endotermního efektu s maximem okolo 400 °C (na křivce DTG), při které se fáze rozkládá. Endotermní efekt s maximem kolem 600 °C naopak přísluší rozkladu  $\text{CaCO}_3$ .<sup>30</sup> Obsah fází lze kvantifikovat například z úbytku hmotnosti vzorku na křivce DTG. V citované studii bylo díky této metodě zaznamenáno a) ~20 hm.%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  bez známek  $\text{CaCO}_3$  (po 5–10 minutách), b) ~70 hm.%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a ~30 hm.%  $\text{CaCO}_3$  (po 2 dnech).<sup>31</sup>

Zatímco J. P. Ramos zmiňuje po dvou dnech expozice na vzduchu pouze vznik dvou fází (tj.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $\text{CaCO}_3$ ), jiné studie popisují i další fenomény. C. R. Navarro zmiňuje, že kalorimetrická křivka (TG–DSC) vykazuje exotermní pík při ~330 °C, který bývá charakteristický pro dehydrataci amorfního  $\text{CaCO}_3$  s následnou přeměnou na kalcit.<sup>32</sup> Podobný pík s maximem okolo 320 °C se podařilo zaznamenat i na TG–DSC křivce u několika měření v rámci našeho experimentu. Exotermní píky s maximy při ~390 a ~490 °C (na TG–DSC křivce) byly zaznamenány v následující studii,<sup>33</sup> <sup>34</sup> nejsou doprovázeny úbytkem hmotnosti a byly spojeny s přeměnou vateritu na kalcit.<sup>35</sup> Jiný článek se vyjadřuje k endotermnímu efektu (DTG) při 410–520 °C, teplotu určuje jako interval při kterém se rozkládá aragonit.<sup>36</sup> T. Siva popisuje hmotnostní úbytek vzorku po zahřátí na teplotu ~650–800 °C, který se vztahuje k rozkladu kalcitové fáze.<sup>37</sup> Z provedené rešerše i námi provedených měření vyplývá, že metoda je velice účinná při identifikaci majoritních i minoritních fázových přechodů, ale jejich přesná identifikace je někdy komplikovaná díky možnému překryvu, který znemožňuje rozlišení fází.

---

<sup>30</sup> RAMOS, J. P. *Effect of Calcium Oxide Microstructure on the Diffusion of Isotopes*. In: Researchgate, 2012 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/254469023\\_Effect\\_of\\_Calcium\\_Oxide\\_Microstructure\\_on\\_the\\_Diffusion\\_of\\_Isotopes](https://www.researchgate.net/publication/254469023_Effect_of_Calcium_Oxide_Microstructure_on_the_Diffusion_of_Isotopes). (str 66–68)

<sup>31</sup> Ibidem. (str. 66–68)

<sup>32</sup> NAVARRO, C. R. et al. *Amorphous and crystalline calcium carbonate phases during carbonation of nanolimes: Implications in heritage conservation*. In: ResearchGate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/305312854\\_Amorphous\\_and\\_crystalline\\_calcium\\_carbonate\\_phases\\_during\\_carbonation\\_of\\_nanolimes\\_Implications\\_in\\_heritage\\_conservation](https://www.researchgate.net/publication/305312854_Amorphous_and_crystalline_calcium_carbonate_phases_during_carbonation_of_nanolimes_Implications_in_heritage_conservation).

<sup>33</sup> NASSRALLAH-ABOUKAÏS, N. et al. *Transformation of Vaterite into Calcite in the Absence and the Presence of Copper(II) Species: Thermal analysis, IR and EPR study*. In: Researchgate, 2003 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/262910236\\_Transformation\\_of\\_Vaterite\\_into\\_Calcite\\_in\\_the\\_Absence\\_and\\_the\\_Presence\\_of\\_CopperII\\_Species\\_Thermal\\_analysis\\_IR\\_and\\_EPR\\_study](https://www.researchgate.net/publication/262910236_Transformation_of_Vaterite_into_Calcite_in_the_Absence_and_the_Presence_of_CopperII_Species_Thermal_analysis_IR_and_EPR_study).

<sup>34</sup> CHAKOUMAKOS, B. et al. *Empirically testing vaterite structural models using neutron diffraction and thermal analysis*. In: Researchgate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/310764691\\_Empirically\\_testing\\_vaterite\\_structural\\_models\\_using\\_neutron\\_diffraction\\_and\\_thermal\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/310764691_Empirically_testing_vaterite_structural_models_using_neutron_diffraction_and_thermal_analysis).

<sup>35</sup> NASSRALLAH-ABOUKAÏS, N. et al. *Transformation of Vaterite into Calcite in the Absence and the Presence of Copper(II) Species: Thermal analysis, IR and EPR study*. In: Researchgate, 2003 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/262910236\\_Transformation\\_of\\_Vaterite\\_into\\_Calcite\\_in\\_the\\_Absence\\_and\\_the\\_Presence\\_of\\_CopperII\\_Species\\_Thermal\\_analysis\\_IR\\_and\\_EPR\\_study](https://www.researchgate.net/publication/262910236_Transformation_of_Vaterite_into_Calcite_in_the_Absence_and_the_Presence_of_CopperII_Species_Thermal_analysis_IR_and_EPR_study).

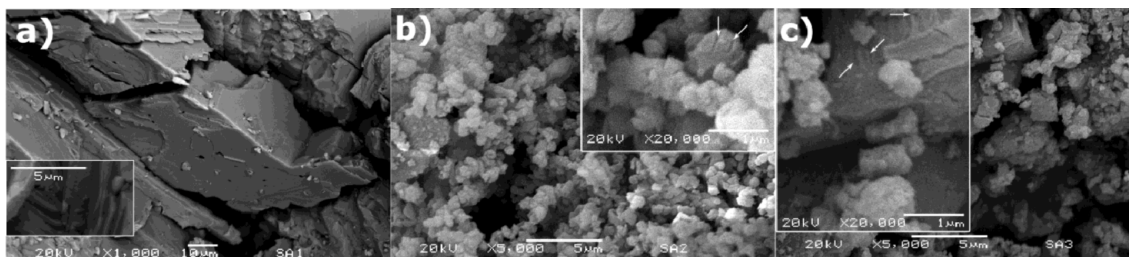
<sup>36</sup> SIVA, T. et al. *Enhanced Polymer Induced Precipitation of Polymorphous in Calcium Carbonate: Calcite Aragonite Vaterite Phases*. In: Researchgate, 2017 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/publication/314112639\\_Enhanced\\_Polymer\\_Induced\\_Precipitation\\_of\\_Polymorphous\\_in\\_Calcium\\_Carbonate\\_Calcite\\_Aragonite\\_Vaterite\\_Phases](https://www.researchgate.net/publication/314112639_Enhanced_Polymer_Induced_Precipitation_of_Polymorphous_in_Calcium_Carbonate_Calcite_Aragonite_Vaterite_Phases).

<sup>37</sup> Ibidem. (str. 3)

## 2.4 Změny mikrostruktury páleného vápna

Dalším faktorem, který lze zkoumat, je kromě složení a reaktivity mikrostruktura a krystalinita vzorků. Mikrostrukturu vzorků, velikost a morfologii krystalů jednotlivých fází lze pozorovat pomocí SEM<sup>38</sup> nebo TEM.<sup>39</sup> Díky těmto metodám lze dobře korelovat změny složení vzorků, které lze analyzovat pomocí termické analýzy, příp. jiných metod fázové analýzy. Například Z. Liu popisuje na následujícím obrázku (Obr: 2) struktury CaO, Ca(OH)<sub>2</sub> a CaCO<sub>3</sub> zachycených na SEM snímcích.<sup>40</sup>



Obr. 2: a) CaCO<sub>3</sub>: bloky kalcitu, b) CaO: pórovitá struktura, c) částečně karbonatový vzorek s obsahem CaCO<sub>3</sub> a Ca(OH)<sub>2</sub>: šipkami jsou znázorněny linie na povrchu Ca(OH)<sub>2</sub>.<sup>41</sup>

Na obrázku a) je možné vidět kosodélníkové bloky s dobře definovanými hranami. Část struktury patrná vpravo nahoře je roztržštěná a odhaluje vrstevnatou strukturu, která ilustruje krystalový růst obvyklý pro CaCO<sub>3</sub>. Značná velikost krystalů a jejich dobře definovaný tvar vznikl díky dostatečné době růstu. Ve struktuře se objevují i póry a praskliny různé délky, které mohou být důsledkem přirozeného pnutí ve struktuře. Na obrázku b) vidíme vzorek CaO, který obsahuje amorfni částice, které nemají dobře definované hrany a jejich tvar je zaoblený. Materiál měl velmi pórovitou strukturu a souvislou matrix, tvořenou spojenými částicemi. Obrázek c) představuje částečně karbonatovaný vzorek s obsahem CaCO<sub>3</sub> a Ca(OH)<sub>2</sub>, při větším zvětšení jsou patrné částice Ca(OH)<sub>2</sub> s liniemi na povrchu (znázorněno šipkami), které vznikly během růstu krystalů, a odhalují tak referenční směr růstu. Mechanické namáhání během procesu hydratace způsobilo v materiálu trhliny.<sup>42</sup>

<sup>38</sup> Ibidem. (str 3)

<sup>39</sup> NAVARRO, C.R. et al. *Amorphous and crystalline calcium carbonate phases during carbonation of nanolimes: Implications in heritage conservation*. In: ResearchGate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/305312854\\_Amorphous\\_and\\_crystalline\\_calcium\\_carbonate\\_phases\\_during\\_carbonation\\_of\\_nanolimes\\_Implications\\_in\\_heritage\\_conservation](https://www.researchgate.net/publication/305312854_Amorphous_and_crystalline_calcium_carbonate_phases_during_carbonation_of_nanolimes_Implications_in_heritage_conservation)

<sup>40</sup> GALVÁN-RUIZ, M. et al. *Characterization of Calcium Carbonate, Calcium Oxide, and Calcium Hydroxide as Starting Point to the Improvement of Lime for Their Use in Construction*. In: Researchgate, 2009 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/232815496\\_Characterization\\_of\\_Calcium\\_Carbonate\\_Calcium\\_Oxide\\_and\\_Calcium\\_Hydroxide\\_as\\_Starting\\_Point\\_to\\_the\\_Improvement\\_of\\_Lime\\_for\\_Their\\_Use\\_in\\_Construction](https://www.researchgate.net/publication/232815496_Characterization_of_Calcium_Carbonate_Calcium_Oxide_and_Calcium_Hydroxide_as_Starting_Point_to_the_Improvement_of_Lime_for_Their_Use_in_Construction).

<sup>41</sup> LIU, Z. et al. *Shape-preserving amorphous-to-crystalline transformation of CaCO<sub>3</sub> revealed by in situ TEM*. In: PNAS, 2020 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1914813117>.

<sup>42</sup> GALVÁN-RUIZ, M. et al. *Characterization of Calcium Carbonate, Calcium Oxide, and Calcium Hydroxide as Starting Point to the Improvement of Lime for Their Use in Construction*. In: Researchgate, 2009 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/232815496\\_Characterization\\_of\\_Calcium\\_Carbonate\\_Calcium\\_Oxide\\_and\\_Calcium\\_Hydroxide\\_as\\_Starting\\_Point\\_to\\_the\\_Improvement\\_of\\_Lime\\_for\\_Their\\_Use\\_in\\_Construction](https://www.researchgate.net/publication/232815496_Characterization_of_Calcium_Carbonate_Calcium_Oxide_and_Calcium_Hydroxide_as_Starting_Point_to_the_Improvement_of_Lime_for_Their_Use_in_Construction).

U páleného vápna závisí stabilita a morfologie krystalů na podmínkách,<sup>43</sup> ve studiích je nejčastěji zmíněn amorfni charakter částic.<sup>44 45 46</sup> Taková struktura byla pozorována např. na snímcích ze skenovacího elektronového mikroskopu v článku E. Serrise (*Obr. 3*).<sup>47</sup> Velikost částic CaO je velmi malá, distribuce velikosti a tvaru částic CaO je homogenní a částice jsou více či méně propojené. Typická je vysoká porozita matrix. Při velkých zvětšeních jsou vidět částice páleného vápna tvořené oválnými útvary amorfniho charakteru. Hrany částic nejsou dobře definované a jeví se kulaté.<sup>48</sup>



*Obr. 3: Mikrostruktura CaO, v levé části je patrná typická porézní mikrostruktura tvořená částicemi amorfniho vzhledu. Napravo tvoří částice páleného vápna větší útvary tj. klastry, které vznikají vrstvením částic na sebe.*<sup>49</sup>

Různě vyvinuté krystaly můžeme pozorovat u hašeného vápna, který tvoří krystaly portlanditu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Dobře vyvinutý portlandit se vyskytuje ve formě velkých hexagonálních krystalů, jeho možnou podobu zachycují obrázky (*Obr. 4–5*).<sup>50</sup>

<sup>43</sup> VALVERDE, J. et al. *Crystallographic transformation of limestone during calcination under CO<sub>2</sub>*. In: ResearchGate, 2015 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/312578501\\_Crystallographic\\_transformation\\_of\\_limestone\\_during\\_calcination\\_under\\_CO2](https://www.researchgate.net/publication/312578501_Crystallographic_transformation_of_limestone_during_calcination_under_CO2).

<sup>44</sup> PESCE, C. et al. *Effects of organic additives on calcium hydroxide crystallisation during lime slaking*. In: ScienceDirect, 2021 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884620311194#f0010>.

<sup>45</sup> HAO, Z. et al. *Novel procedure of CO<sub>2</sub> capture of the CaO sorbent activator on the reaction of one-part alkali-activated slag*. RSC Advances. In: Researchgate, 2021 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-CaO-after-exposure-to-moisture-and-CO-2-for-a-0-h-b-6-h-c-12-h-and\\_fig4\\_350492239](https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-CaO-after-exposure-to-moisture-and-CO-2-for-a-0-h-b-6-h-c-12-h-and_fig4_350492239).

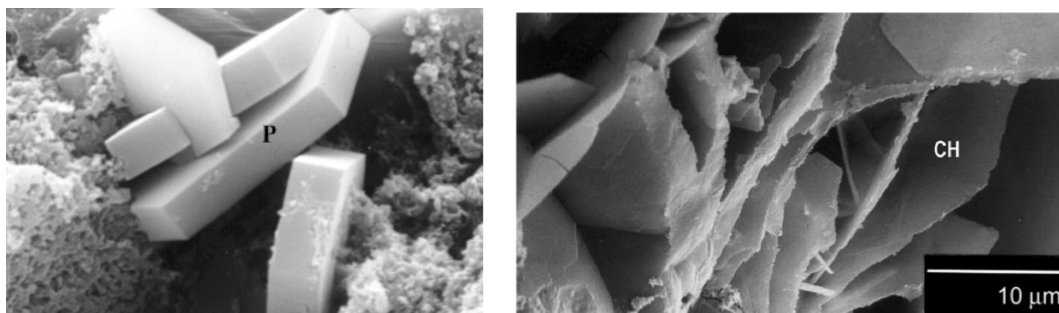
<sup>46</sup> SUBEDI, S. et al. *Production and Characterization of Biodiesel from Hevea Brasiliensis and Diesel like Fuel from Waste Engine Oil*. In: Researchgate, 2020 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-catalyst-The-SEM-result-shows-that-synthesized-CaO-is-crystalline-in-nature\\_fig2\\_344610104](https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-catalyst-The-SEM-result-shows-that-synthesized-CaO-is-crystalline-in-nature_fig2_344610104).

<sup>47</sup> SERRIS, E. et al. *Study of the hydration of CaO powder by gas–solid reaction: Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 2011 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611001888>.

<sup>48</sup> HWIDI, R. et al. *Characterization of quicklime as raw material to hydrated lime: Effect of temperature on its characteristics*. In: Researchgate, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/328893462\\_Characterization\\_of\\_quicklime\\_as\\_raw\\_material\\_to\\_hydrated\\_lime\\_Effect\\_of\\_temperature\\_on\\_its\\_characteristics](https://www.researchgate.net/publication/328893462_Characterization_of_quicklime_as_raw_material_to_hydrated_lime_Effect_of_temperature_on_its_characteristics).

<sup>49</sup> Ibidem. (str. 5)

<sup>50</sup> AÏTCIN, P.-C. 3 - *Portland cement*. In: Researchgate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000035>.



Obr. 4–5: Krystaly portlanditu (označené písmeny P a CH).<sup>51 52</sup>

Uhličitan vápenatý se v přírodě vyskytuje v různých minerálních modifikacích, jejichž vznik ovlivňují podmínky krystalizace. V běžných podmínkách je nejstabilnější fází kalcit, v závislosti na okolních nebo reakčních podmínkách (např. teplotě, pH, tlaku, nasycenosti roztoku, aj.) mohou vznikat další více či méně stabilní polymorfy např. aragonit nebo vaterit (bezvodé krystalické polymorfní formy) nebo ikait (hexahydrát uhličitanu vápenatého) a monohydrát uhličitanu vápenatého (hydratovaná krystalická forma). Popsána byla také amorfnní forma  $\text{CaCO}_3$ . Amorfnní uhličitan vápenatý je však termodynamicky nestabilní a v počátečních fázích procesu karbonatce se mění na vaterit a kalcit. Z krystalických forem uhličitanu vápenatého je nejstabilnější kalcit, naopak nejméně stabilní je vaterit.<sup>53</sup>

Jednotlivé polymorfy  $\text{CaCO}_3$  podrobně zdokumentoval Z. Liu et al.<sup>54</sup> a M. Çağatay.<sup>55</sup> Následující obrázky (Obr. 6–8) ukazují, že amorfnní fáze se jeví hladká a kulovitá bez vyvinuté krystalické struktury (tj. A, E), naopak aragonit tvoří spíše podlouhlé, špičaté struktury sloupců a jehliček (c, F). Vaterit má ploché oválné tvary (b) a kalcit vykazuje strukturu složenou z kosodélníkových hranolů. (a, C, D)

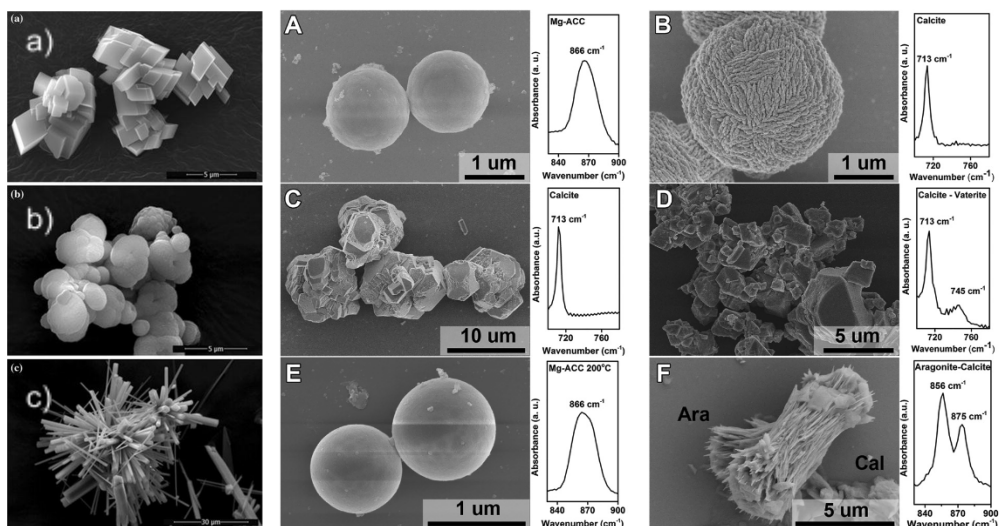
<sup>51</sup> AİTCIN, P.-C. 3 - Portland cement. In: Researchgate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000035>. (str. 41)

<sup>52</sup> Ibidem. (str. 42)

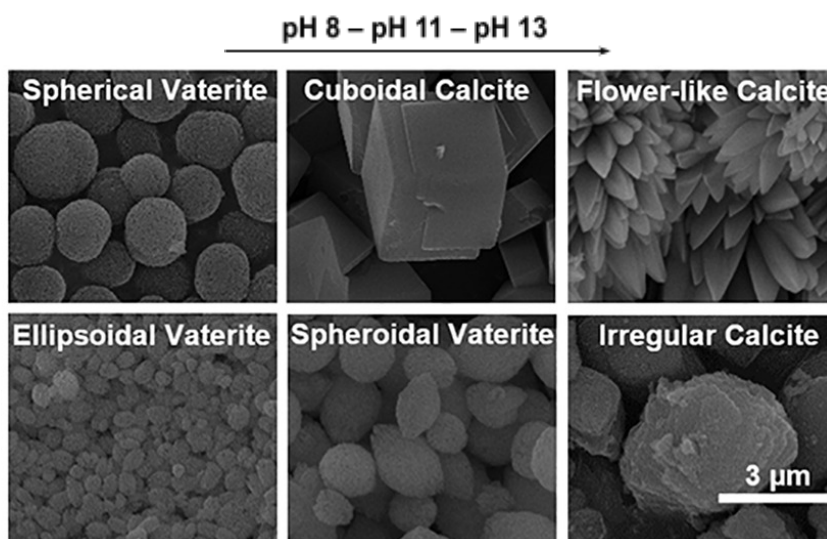
<sup>53</sup> ŠEVČÍK, R. et al. Characterization of vaterite synthesized at various temperatures and stirring velocities without use of additives. In: ScienceDirect, 2015 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591015005239>.

<sup>54</sup> LIU, Z. et al. Shape-preserving amorphous-to-crystalline transformation of  $\text{CaCO}_3$  revealed by in situ TEM. In: PNAS, 2020 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1914813117>.

<sup>55</sup> ÇAĞATAY, M. O. et al. Influence of pH on morphology, size and polymorph of room temperature synthesized calcium carbonate particles. In: ScienceDirect, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018307058>.



Obr. 6–7: Krystalické a amorfni formy  $\text{CaCO}_3$ . Vlevo: (a) Kalcit. (b) Vaterit. (c) Aragonit.<sup>56</sup> Vpravo: (A)(E) Amorfni  $\text{CaCO}_3$  kulovitého tvaru, (B) krystalizující na kalcit. (C) Krystalizace amorfniho  $\text{CaCO}_3$  na kalcit, (D) kalcit a vaterit, (F) aragonit (Ara) a kalcit (Cal).<sup>57</sup>



Obr. 8: Krystalické a amorfni formy  $\text{CaCO}_3$ . Vzhled krystalů se měni v závislosti na pH (seřazeno podle stoupajícího pH z leva do prava).<sup>58</sup>

<sup>56</sup> ŠEVČÍK, R. et al. *Physical and nanomechanical properties of the synthetic anhydrous crystalline  $\text{CaCO}_3$  polymorphs: vaterite, aragonite and calcite*. In: Researchgate, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/321689807\\_Physical\\_and\\_nanomechanical\\_properties\\_of\\_the\\_synthetic\\_anhydrous\\_crystalline\\_CaCO3\\_polymorphs\\_vaterite\\_aragonite\\_and\\_calcite](https://www.researchgate.net/publication/321689807_Physical_and_nanomechanical_properties_of_the_synthetic_anhydrous_crystalline_CaCO3_polymorphs_vaterite_aragonite_and_calcite).

<sup>57</sup> LIU, Z. et al. *Shape-preserving amorphous-to-crystalline transformation of  $\text{CaCO}_3$  revealed by in situ TEM*. In: PNAS, 2020 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1914813117>.

<sup>58</sup> ÇAĞATAY, M. O. et al. *Influence of pH on morphology, size and polymorph of room temperature synthesized calcium carbonate particles*. In: ScienceDirect, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018307058>.

## 2.5 Závěry z rešerše

V rámci rešerše bylo nalezeno několik článků, které se zabývají tématem vlivu podmínek skladování páleného vápna na jeho vlastnosti. Ačkoliv se články tématu dotýkají, nevěnují se mu tak, jak bylo určeno v této práci. Ve většině článků je pro vzorky použito práškové pálené vápno. Pro experiment provedený v rámci této práce bylo zvoleno kusové pálené vápno, proto aby se podmínky experimentu nejvíce přiblížily reálným podmínkám na historických stavbách. Z tohoto hlediska jsou nejbližší experimenty J. H. Potgietera,<sup>59 60 61</sup> který testoval reaktivitu kusového páleného vápna vystaveného vzduchu v průběhu 10 dní. Kromě testu reaktivity provedl i síťovou analýzu nehasitelného podílu, kterou jsme se rozhodli využít a rozšířit i v naší studii. Důležitý byl i článek R. M. Dheilho, který stanovuje ideální podmínky pro skladování práškového  $\text{Ca(OH)}_2$ , který vzniká hydratací páleného vápna. Autor studoval vliv podmínek (teploty a vlhkosti) na rychlost karbonatace. Inspirativní byl také experiment J. P. Ramose, který zmiňuje kromě využití instrumentálních analýz ještě sledování váhy vzorku v průběhu expozice páleného vápna na vzduchu. Vážení vzorků velmi snadno indikuje kinetiku probíhajících reakcí.

Více citovaných článků se věnuje identifikaci fází, které vznikají přeměnou páleného vápna. Vzhledem k metodám použitých v našem experimentu byly zvláště přínosné studie využívající metody termické analýzy nebo SEM. Získané výsledky napomohly při interpretaci provedených měření a diskusi získaných výsledků.

---

<sup>59</sup> Ibidem (str. 2)

<sup>60</sup> POTGIETER, J. H. et al. *The standard reactivity test as a measure of lime's quality*. In: ResearchGate, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/235482891\\_The\\_standard\\_reactivity\\_test\\_as\\_a\\_measure\\_of\\_lime%27s\\_quality](https://www.researchgate.net/publication/235482891_The_standard_reactivity_test_as_a_measure_of_lime%27s_quality).

<sup>61</sup> POTGIETER, J. H. et al. *An empirical study of factors influencing lime slaking Part II*: In: ResearchGate, 2003 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267792251\\_An\\_empirical\\_study\\_of\\_factors\\_influencing\\_lime\\_slaking\\_Part\\_II\\_Lime\\_constituents\\_and\\_water\\_composition](https://www.researchgate.net/publication/267792251_An_empirical_study_of_factors_influencing_lime_slaking_Part_II_Lime_constituents_and_water_composition).



# III. Experimentální část teoretické práce

## 1. Úvod

Experimentální část diplomové práce popisuje použité materiály, přípravu páleného vápna a podmínky uložení vzorků. Metodická část popisuje použité metody analýzy, poslední sekce experimentální části obsahuje výsledky a jejich vyhodnocení.

## 2. Materiály

### 2.1 Příprava páleného vápna

Pálené vápno použité v experimentu bylo připraveno pálením vysokoprocentního koněpruského vápence, jehož složení a vybrané vlastnosti udává *Tab. 1*. Výběr vápence s vysokou čistotou a nízkým obsahem nečistot vyplynul z charakteru studie; díky složení nebude docházet k vedlejším reakcím při hydrataci a karbonataci.

Pálené vápno bylo připraveno v laboratorní elektrické muflové peci (typ LAC LMH04/12) ve spolupráci s Ing. Janem Válkem, Ph.D. z ÚTAM, AV ČR v laboratoři v Praze. Vápenec byl před výpalem rozdrčen a vytříděn na částice o velikosti 10 až 30 mm (kontrolováno sítem). Ze zásadních informací je nutné zmínit maximální teplotu výpalu, která na povrchu částic dosáhla 1050 °C, uvnitř částic byla teplota nižší a výpal měkčí kolem 700 °C. Pro přípravu dostatečného množství materiálu byly provedeny dva výpaly při kterých se pálilo vždy 2000 g vápence. Z každého výpalu vzniklo cca 1100 g páleného vápna. Po vychladnutí bylo vápno z obou výpalů promícháno tak, aby nebyly vlastnosti vzorků ovlivněné pořadím výpalu. Ihned poté, aby se minimalizovala expozice páleného vápna vzduchu, byly vzorky umístěny do vakuových krabiček pro převoz z místa pálení (Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Praha) na místo testování (FR UPCE, Litomyšl). Za začátek experimentu byl považován moment otevření vakuových krabiček.

Surovina	Kalcit	Dolomit	Křemen	Živec	Chlorit/Kaolinit	Chlorit/Kaolinit
Koněpruský v.	98,0	1,9	0,1	–	–	–

*Tab. 1: Fázová analýza Koněpruského vápence použitého pro přípravu páleného vápna stanovená metodou rentgenové práškové difrakce (XRD). Obsah fází je vyjádřen v hm.%.<sup>62</sup>*

<sup>62</sup> ESTÉBANEZ, Pérez Marta. *XRD-Analysis Report. Nepublikovaná analýza*. Telč: Academy Of Sciences, C.R., Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 2014. (viz *Textová příloha č.1*)

## 2.2 Podmínky uložení

Vzorky páleného vápna byly na začátku experimentu rozmístěny do čtyř prostředí. Prostředí byla označena jako *vzduch*, *papír*, *sklo*, *vakuum* (viz Tab. 2). Kousky páleného vápna byly na miskách rozmístěny rovnoměrně v jedné vrstvě tak, aby byl povrch jednotlivých částic exponován podobně. Pro zkoušku reaktivity vzorků skladovaných na *vzduchu*, pod *sklem* a pod *papírem* byly na Petriho misku umístěny větší navážky po 100 g páleného vápna (reaktivita byla stanovována 3x, tj. pro každé prostředí připraveny tři misky s navážkou 100 g), vzorky určené do *vakua* byly uloženy do tří vakuových dóz podobně v množství 100 g.<sup>63</sup> Několik dalších kousků páleného vápna (2 g) bylo umístěno do stejných prostředí na malých Petriho miskách pro průběžné sledování změny hmotnosti (váženo průběžně). Poslední sada misek byla umístěna do stejných prostředí pro analýzy SEM a TG .

K uložení vzorků byly vybrány interiérové podmínky. Cílem bylo, aby zůstala zachována konstantní teplota a aby měl ke vzorkům přístup vzduch s přibližně podobnou vlhkostí, která by v exteriéru mohla kolísat. Relativní vlhkost vzduchu v místnosti, kam se vzorky umísťovaly byla nižší, aby změny neprobíhaly příliš rychle a daly se zachytit. Z těchto důvodů byly vzorky uloženy do klimatizovaného sklepa Fakulty restaurování, kde se hodnoty teploty pohybovaly okolo 18 °C a relativní vzdušná vlhkost kolem 30 %.

Vzorky byly v průběhu expozice z prostředí vybírány a testovány. Tetování probíhalo po 1, 3, 7, 14 a 28 dnech, kdy byl experiment ukončen. U zkoušky reaktivity byl proveden počáteční test společný pro všechny prostředí, před umístěním vzorků ke stárnutí. Následně byly vzorky testovány v časech 3, 7 a 14 dní.

<i>vzduch</i>		Vzorky v podmínkách označených heslem <i>vzduch</i> byly uloženy na otevřených Petriho miskách s volným přístupem vzduchu, teplota 16,8–18,2 °C, RV 19,9–38,8 %.
<i>papír</i>		Vzorky v podmínkách označených heslem <i>papír</i> byly uloženy na Petriho miskách, které byly zaklopeny filtračním papírem, teplota 16,8–18,2 °C, RV okolí 19,9–38,8 %.
<i>sklo</i>		Vzorky v podmínkách označených heslem <i>sklo</i> byly uloženy na Petriho miskách, zaklopených skleněnými víčky, teplota 16,8–18,2 °C, RV okolí 19,9–38,8 %.
<i>vakuum</i>		Vzorky v podmínkách označených heslem <i>vakuum</i> byly uloženy v potravinových vakuových dózách, teplota 16,8–18,2 °C, RV 0 %. (Nejednalo se o úplné vakuum, dóza byla 10x krátce otevřena mezi 7. a 28. dnem, kvůli vážení vzorku.)

Tab. 2: Podmínky uložení pálených vápen. Barevné označení bude použito dále ve výsledkové části.

<sup>63</sup> Princess 492985 ruční vakuovací set se skleněnými nádobami. Tlak vakuování 33 kPa. (<https://www.prozdravi.cz/zdravi/princess-vakuovaci-set-princess-492985.html>)

### 3. Metody zkoumání

U vzorků páleného vápna byly v průběhu expozice různým podmínkám studovány vybrané vlastnosti. Vzorky byly od počátku experimentu kontinuálně váženy po dobu 28 dní. U vápen byla ve vybraných časových okamžicích stanovena jejich reaktivita a granulometrie výsledné kaše. Ve stanovených časových intervalech byla provedena kvantitativní fázová analýza pálených vápen pomocí simultánní termické analýzy (TG–SDT), ve stejných časech byla studována také mikrostruktura vzorků pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM).

#### 3.1 Změna hmotnosti

Zkouška byla provedena vážením vzorků z různých prostředí v průběhu času. Vážily se kousky páleného vápna (asi 2 g) umístěné na Petriho misky. Výpočtem se stanovoval hmotnostní nárůst vzorků vyjádřený v hm.%, který byl zpracován jako graf závislosti na čase. Z grafu lze orientačně vyhodnotit kinetiku probíhajících reakcí, které souvisí s fázovou přeměnou páleného vápna v důsledku hydratace a karbonatace. Pro korelaci změn s fázovým složením vzorků byly výsledky porovnávány s výsledky termické analýzy i SEM. Podobné měření hmotnostní změny, které bylo zmíněno v rešeršní kapitole, provedl i J. P. Ramos.<sup>64</sup>

#### 3.2 Test reaktivity

Test reaktivity pro nehašené vápno byl proveden podle normy ČSN EN 459–2,<sup>65</sup> kde je popsán postup a vyhodnocení testu, aparatura (*Obr. 9*) byla sestavena podle americké normy.<sup>66</sup> Postup a podmínky testu bylo nutné pro účely tohoto experimentu mírně upravit; upravovala se navážka vápna a tím i množství vody použité k hašení. Oproti testu popisovanému v normě se používalo kusové vápno, zatímco norma popisuje užití práškového vápna. Poslední úprava se týkala rychlosti míchání, která musela být při zkoušce zvýšena.

Stanovení reaktivity se provádělo v Dewarově nádobě. Dewarova nádoba se nejprve naplnila destilovanou vodou 500 g ± 1 g o teplotě 20 °C ( $T_0$ ). Do nádoby bylo zavedeno teplotní čidlo a kovové míchadlo. Při zapnutí míchadla se plnicím otvorem vsypal vzorek kusového páleného vápna o hmotnosti 100 g ± 0,5 g. Okamžik vsypání je považován za začátek zkoušky ( $t_0$ ). Směs se v průběhu zkoušky míchala, rychlost míchání byla konstantně 600 ot/min.

---

<sup>64</sup> RAMOS, J. P. *Effect of Calcium Oxide Microstructure on the Diffusion of Isotopes*. In: Researchgate, 2012 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/254469023\\_Effect\\_of\\_Calcium\\_Oxide\\_Microstructure\\_on\\_the\\_Diffusion\\_of\\_Isotopes](https://www.researchgate.net/publication/254469023_Effect_of_Calcium_Oxide_Microstructure_on_the_Diffusion_of_Isotopes).

<sup>65</sup> ČSN EN 459-2. *Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 722201. (str. 40 - 7.6. Reaktivita).

<sup>66</sup> ASTM C110-09a. *Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone*. West Conshohocken: ASCM, 2010. ICS Code: 91.100.10. (str. 40)

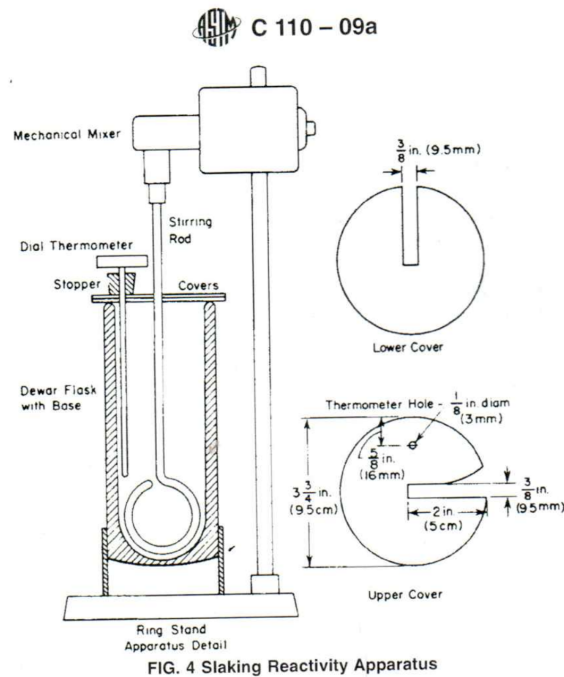


FIG. 4 Slaking Reactivity Apparatus

Obr. 9: Aparatura pro test reaktivity převzatá z americké normy.<sup>67</sup>

Při zkoušce se průběžně měřila teplota v Dewarově nádobě, v případě našeho experimentu byla odečítána každých 5 s po dobu 30 min. Z měření lze zjistit několik údajů. Změřené teploty v (°C) se vynesou do grafu v závislosti na čase (v minutách). Z ní lze zjistit rychlost hašení. Z reakce hašení vápna lze odečíst maximální dosaženou teplotu  $T_{\max}$ . Pro referenční vyhodnocení reaktivity se do grafu značí dosažená teplota 60 °C ( $T_{60}$ ), a odečítá se čas ( $t_{60}$ ), za který bylo teploty dosaženo. Další parametr, který jsme nevyhodnocovali, ale lze jej podle normy také stanovit, je čas ( $t_u$ ). V tomto čase je reakce z 80 % ukončena. Teplota  $T_u$  je definována jako teplota (°C), která udává 80 % maximální teploty, a vypočítá se ze vztahu:  $T_u = (0,8 \times T'_{\max}) + (0,2 \times T_0)$ . Vypočtená hodnota  $T_u$  se zanesou do grafu a odečte se čas  $t_u$ .

Podle normy ČSN EN 459-2<sup>68</sup> se reaktivita pálených vápen kategorií CL 90 (z vysokoprocenních vápenců) hodnotí takto:

- vysoká reaktivita  $t_{60} < 3$  minut (mělo by odpovídat měkce pálenému vápnu)
- střední reaktivita  $t_{60}$  mezi 3 a 6 minutami
- nízká reaktivita  $t_{60} > 6$  minut

<sup>67</sup> ASTM C110-09a. *Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone*. West Conshohocken: ASCM, 2010. ICS Code: 91.100.10. (str. 40)

<sup>68</sup> ČSN EN 459-2. *Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 722201. (Tabulka 4 - Reaktivita (R) nehašeného vápna, uvedeno jako charakteristická hodnota).

### 3.3 Charakterizace nehasitelného podílu

Obsah nehasitelného podílu byl stanoven po zkoušce reaktivity. Vápenná kaše ředěná s vodou v poměru 1:10 obj. se přečerpávala přes sadu sít s různou velikostí oka ( $D = 0,5; 0,25; 0,125$  mm). Částice zachycené na síti se sušily v sušárně ( $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1 h) a po vychladnutí se vážily. Ze záchytu na síti byl stanoven celkový obsah nehasitelného podílu, který byl vyjádřen v hm.% jako záchyt všech částic vztažený na navážku páleného vápna (tj. 100 g). Doplnkovou informací byla distribuce nahasitelného podílu, která se počítá ze záchytu na sítích s různou velikostí. Fázové složení nehasitelného podílu bylo studováno pomocí STA analýzy.

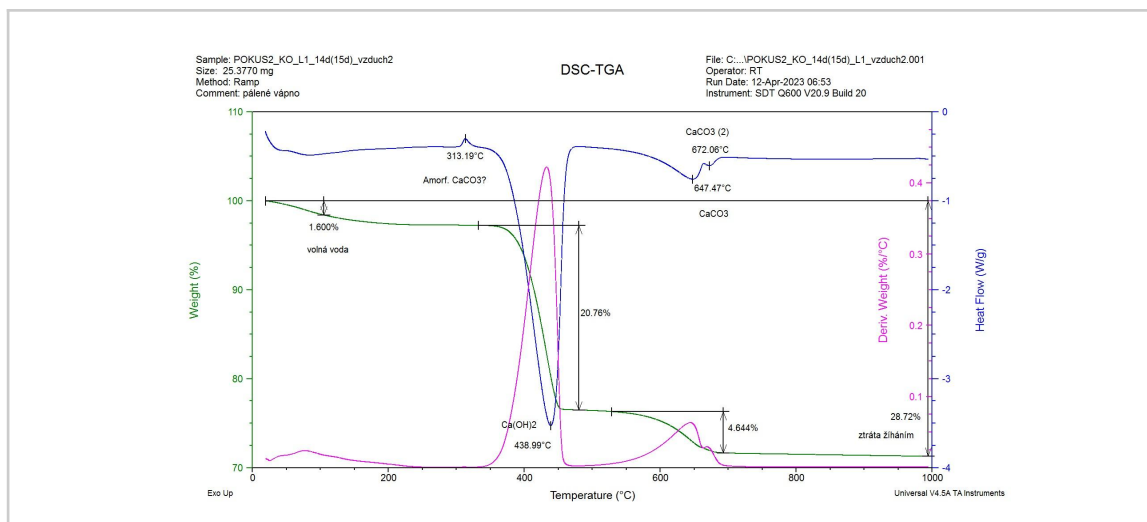
### 3.4 Simultánní termická analýza (STA)

Termická analýza označuje skupinu metod, které slouží pro stanovení několika vlastností vzorku. V případě minerálních pojiv jako je vápno slouží metoda pro identifikaci fází, stanovení jejich kvantity nebo například pro zachycení fázových přechodů. Při analýze se zahřívá malé množství vzorku (v řádu mg) v definované atmosféře a za definovaných podmínek a vlastnosti vzorku se sledují v závislosti na teplotě nebo čase ohřevu.

Pro studium dané problematiky byla použita STA analýza kombinující dvě metody termické analýzy – termogravimetrii (TG) a diferenční kompenzační kalorimetrii (DSC). Měření byla provedena na přístroji SDT Q600 (TA Instruments) za definovaných podmínek – v inertní atmosféře ( $\text{N}_2$ ), v intervalu teplot  $20\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  a rychlostí ohřevu  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Analýzy byly provedeny s kelímky z platiny.

Termogravimetrie (TG) je základní dynamickou metodu termické analýzy, pomocí které byla sledována změna hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě nebo čase. Výsledkem TG měření byla termogravimetrická křivka, která představuje závislost změny hmotnosti vzorku (hm.%) na teplotě (viz *Graf 1, zelená křivka*). Při analýze pálených vápen exponovaných v různých podmínkách nás zajímá zejména obsah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , vznikající v páleném vápně hydratací, a obsah  $\text{CaCO}_3$  vznikající karbonatací. Tyto fáze se při zahřívání při specifické teplotě rozkládají za současného uvolňování plynné fáze ( $\text{H}_2\text{O}$  z  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $\text{CO}_2$  z  $\text{CaCO}_3$ ), rozklad je doprovázen skokovým snížením hmotnosti (znázorněné kótami na zelené křivce, viz *Graf 1*). Změnu hmotnosti související s daným přechodem můžeme vypočítat jako rozdíl hmotnosti před a po tomto rozkladu. K upřesnění přechodů se vynáší první derivace změny hmotnosti ( $\Delta m$ ) podle teploty ( $\Delta T$ ), která je vyjádřena jako tzv. DTG křivka (viz *Graf 1, růžová křivka*).

Diferenciální kompenzační kalorimetrie (DSC) je komplementární analýzou termogravimetrie, která vypovídá o změnách energie. Metoda je založena na měření tepelného příkonu (udávaný v  $\text{mW}/\text{mg}$ ), který je potřebný k udržení konstantní teploty měřeného a srovnávacího vzorku umístěných izolovaně v peci přístroje. Tato hodnota se vynáší opět jako závislost na teplotě ( $T$ ). Metoda slouží pro zkoumání tepelných efektů reakcí, které jednotlivé přechody doprovází – při endotermním jevu je teplo spotřebováváno, naopak při exotermních reakcích se teplo uvolňuje (viz *Graf 1, modrá křivka*).



Graf 1: Příklad záznamu a vyhodnocení STA analýzy, vzorek páleného vápna exponovaného na vzduchu, stáří vzorku 14 dní. Křivky TG, DTG a DSC.

### Příprava vzorku pro termickou analýzu

Pro analýzu se využívá malé množství práškového vzorku o hmotnosti okolo 30 mg. Aby byl vzorek pro analýzu reprezentativní, byly vzorky kusového páleného vápna před analýzou upraveny podle následujícího postupu. Kusový vzorek páleného vápna (vždy byly použity tři kousky pro zajištění reprezentativních vlastností) se před analýzou rozdrtil a rozemlel v Petriho misce v inertní atmosféře argonu (v rukavicovém boxu, ze kterého byl pomocí vývěvy odčerpáván vzduch po dobu 5 minut a následně napouštěn argon opět po dobu 5 minut). Pro zajištění přibližně stejné jemnosti vzorku se po rozemletí prášek přesýval přes síto s nejmenší velikostí ok  $D = 0,063$  mm. K analýze se odebralo vždy 25–30 mg práškového vzorku, stanovení se provádělo 1., 3., 7., 14. a 28. den.<sup>69</sup>



Obr 10–11: Vlevo: Rukavicový box s přívodem inertního plynu pro přípravu práškového vzorku k termické analýze. Vpravo: Přenesení práškového vzorku ze vzorkovnice do přístroje pro termickou analýzu SDT Q600.

<sup>69</sup> U prostředí *papír* byl analyzován vzorek pouze po 14. dnech a v prostředí *vakuu* byly analyzovány vzorky 1., 3., 7., a 28. den (analýza po 14. dnech byla vynechána).

### 3.5 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Vzorky páleného vápna uložené v různých podmínkách byly ve stejných časových intervalech odebírány a studovány pomocí skenovacího elektronového mikroskopu TESCAN MIRA3 LMU v režimu sekundárních elektronů (SE), v podmínkách vysokého vakua (HV), při napětí 20 kV. U vzorků byla studována mikrostruktura a její změna v závislosti na podmínkách a expozičním čase, dalším popisovaným fenoménem byl tvar a velikost krystalů vznikajících fází – portlanditu ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a kalcitu ( $\text{CaCO}_3$ ).

#### Příprava vzorků pro skenovací elektronovou mikroskopii

Z kousku páleného vápna byl pomocí skalpelu oddělován tenký řez (celý průřez částice kusového vápna), který byl přenesen na terčík s nevodivou podložkou. Vzorek se před vložením do mikroskopu pozlacoval pro zvýraznění mikrostruktury. Takto upravený vzorek se ihned po přípravě studoval ve skenovacím elektronovém mikroskopu při různém zvětšení. Tenký řez oddělený z kousku páleného vápna umožnil pozorovat děje na povrchu a uvnitř částice a porovnat stav v obou částech. Změna struktury vzorků (rozpad) byl zachycen i fotografií v makroměřítku.

## 4. Výsledky

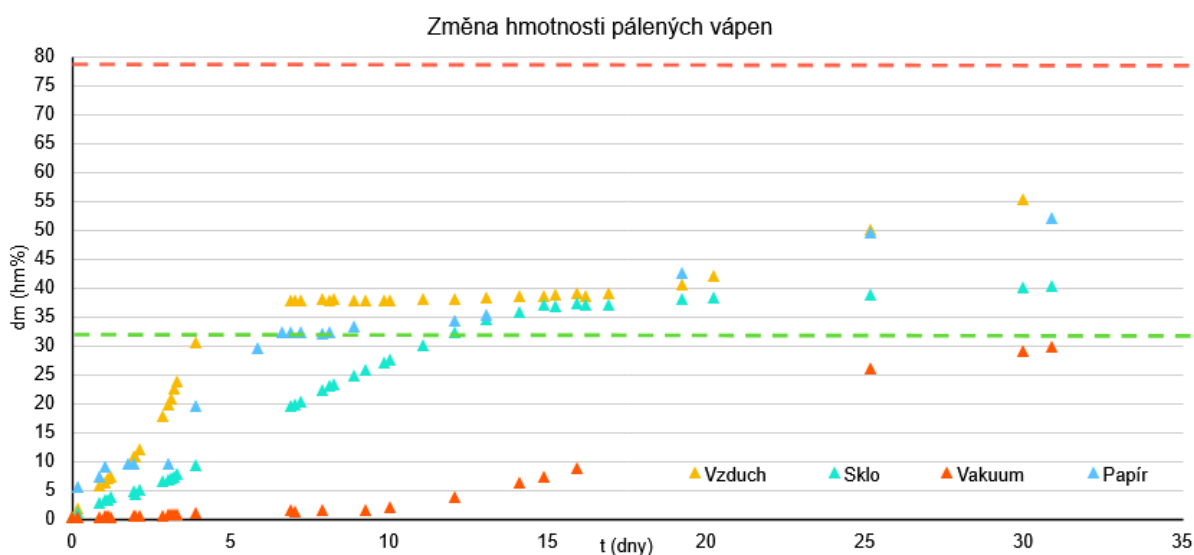
### 4.1 Výsledky měření změny hmotnosti

Sledování změny hmotnosti vzorků pálených vápen je nenáročnou analýzou pomocí které lze studovat změnu složení vzorků v důsledku jejich fázové přeměny a orientačně i kinetiku reakcí.

Z naměřených dat (viz *Graf 2*) vidíme, že nejvíce (o 55 hm.%) a nejrychleji váhu zvyšoval vzorek uložený v prostředí *vzduch*. Nejrychlejší nárůst hmotnosti zaznamenáváme mezi 1. a 5. dnem expozice, kdy hmotnost vzrostla o 37 hm.%. Tento nárůst, jak ukazuje termická analýza, lze zkorelovat s hydratací páleného vápna CaO na  $\text{Ca(OH)}_2$  a jen minimálně s karbonatací (viz. *kapitola 4.4 Výsledky termické analýzy*). Zajímavým fenoménem, který byl pozorován nejen u vzorků uložených na *vzduchu*, ale i v dalších podmínkách kromě *vakua*, je výrazné zpomalení nárůstu hmotnosti ve střední části expozice (u vzorků ze *vzduchu* mezi 5. a 17. dnem). Hmotnost se začala znovu měnit mezi 17. a 28. dnem, už ale pomalejším tempem než v prvních pěti dnech. Změna hmotnosti je v této fázi způsobena jak hydratací, tak karbotací.

Vzorky exponované na *vzduchu* překryté *papírem* vykazovaly podobné chování jako vzorek ze *vzduchu* (celková změna hmotnosti 52 hm.%). Mezi 1. a 6. dnem došlo k prudkému váhovému nárůstu (o 32 hm.%), na který navázala perioda (6. až 12. den), kdy se hmotnost vzorku téměř nemění. V poslední části expozice nárůst hmotnosti pokračuje, ale nižší rychlostí, jak je patrné z nachýlení křivky.

Přeměnu páleného vápna výrazně ovlivňuje uložení pod *sklem* a ve *vakuu*,<sup>70</sup> které brání přístupu vzduchu, přičemž uložení ve vakuu je v tomto ohledu nejvíce efektivní. U něj se během prvních 10 dní mění hmotnost je nepatrně a k fázovým změnám téměř nedochází. Minimální přeměnu vzorků z *vakua* potvrdila i termická analýza (viz. *Graf. 7*) nebo měření reaktivity (viz. *Graf. 3*), které se v z počátku příliš neliší. Po této době začala váha pomalu stoupat, přičemž na konci testu dosahoval celkový váhový nárůst okolo 30 hm.%. Nárůst je způsoben převážně hydratací vzorku a karbonatací jen minimálně. U vzorků z *vakua* je však nutné upozornit na skutečnost, že prudký nárůst hmotnosti po 10 dnech byl pravděpodobně ovlivněn občasným otevřením vakuové dózy kvůli průběžnému vážení vzorku, čímž se do prostředí mohl dostávat vzduch. (krabíčka byla 10x krátce otevřena mezi 7. a 28. dnem). Jen částečně brání přístupu vzduchu překrytí vzorků páleného vápna sklem. Hmotnost sice roste pomaleji oproti vzorkům exponovaným na vzduchu, ale po 14. dni dosahuje změna hmotnosti podobných hodnot  $\Delta m$  jako na *vzduchu* nebo pod *papírem* (37 hm.%). Také u těchto vzorků se, i když méně výrazně, setkáváme s periodou, kdy je změna hmotnosti minimální (14. až 28. den). Celková změna hmotnosti po 28 dnech dosáhla 40 hm.%.<sup>71</sup>



*Graf 2: Změna hmotnosti pálených vápen uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum). Zelená čárkovaná linie označuje hodnotu teoreticky vypočítané změny hmotnosti CaO v důsledku přeměny na Ca(OH)<sub>2</sub>, červená označuje teoreticky vypočítanou změnu hmotnosti v důsledku přeměny na CaCO<sub>3</sub>. Při výpočtu byly použity rovnice (2) a (3).*

<sup>70</sup> Nejednalo se o úplné vakuum, vzorek byl uložen ve vakuovací dóze na potraviny. Dóza byla ale 10x krátce otevřena mezi 7. a 28. dnem, kvůli vážení vzorku.

<sup>71</sup> Sledování změny hmotnosti v prostředí označeném jako *vakuum* se ukázalo jako problematické. Petriho miska pro vážení byla umístěna ve vakuové dóze, pro dostatečnou přesnost a možnost vážení vzorku na stejné váze jako vzorky z prostředí *vzduch*, *papír* a *sklo* bylo nutné vzorek vážit mimo vakuovací dózu. Aby byl minimalizován vliv vážení na prostředí vakuové dózy, bylo vážení prováděno asi dvakrát méně často než u ostatních vzorků, přesto musíme počítat s postupně vznikající nepřesností.



Do *Grafu 2* byly kromě naměřených hodnot zaznamenány teoreticky vypočtené hodnoty změny hmotnosti CaO na Ca(OH)<sub>2</sub> (zelená čárkovaná linie) a následné hodnoty změny fázové přeměny na CaCO<sub>3</sub> (červená čárkovaná linie). Hodnoty představují limity, ke kterým by se v experimentu zjištěné hodnoty změny hmotnosti měly blížit. Při 100 % hydrataci vzorku CaO by měl váhový nárůst dosahovat 32 hm.%, pokud budeme brát v úvahu i fyzikálně vázanou vodu (výpočet podle článku J. H. Parka)<sup>72</sup> ve vzorku, může tato hodnota dosahovat až 37,3 hm.%. Pokud bychom množství volné vody spočítali podle skutečných hodnot obsahu volné vody, které ukazuje termická analýza, činila by hodnota 34,2 hm.% (termická analýza našich vzorků stanovila maximální obsah volné vody 2,2 hm.%, (viz *Graf 7*). Při 100 % konverzi na CaCO<sub>3</sub> byl vypočítán teoretický hmotnostní nárůst vzorků o 79 hm.%. Ze srovnání skutečných a teoreticky naměřených hodnot a při korelaci s fázovou analýzou lze vysvětlit vznikající indukční periodu. Ta je zřejmě může být způsobena karbonací vzorku.

#### 4.2 Výsledky testu reaktivity

Výsledky reaktivity pálených vápen prezentuje *Graf 3* a *Tab. 3* a *4*. Zatímco *Graf 3* a *Tab. 3* představují hodnoty  $T_{max}$  dosažené při testu reaktivity a jejich změnu v průběhu uložení v různých podmínkách, *Tab. 5* udává hodnoty času  $t_u$ , za který je v Dewarově nádobě dosažena teplota  $T_u$  (viz kapitola 3.2 *Test reaktivity*).

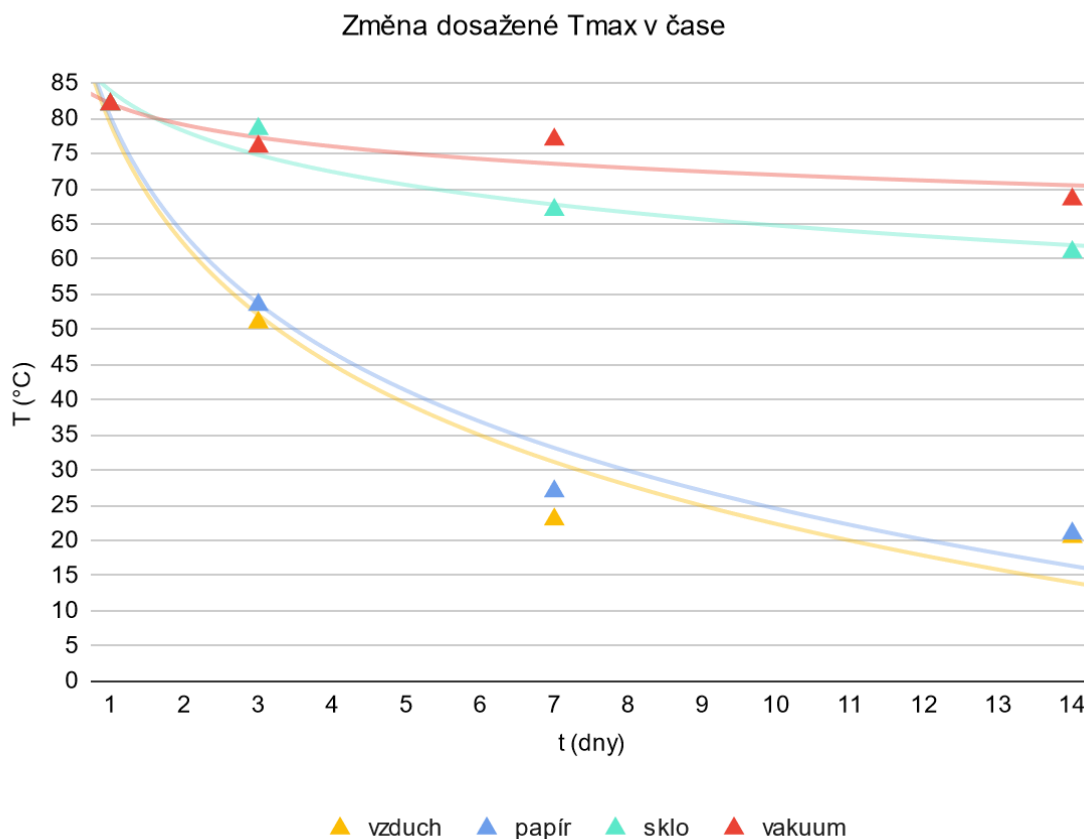
Z naměřených hodnot vyplývá, že nejvyšších hodnot  $T_{max}$  dosahují na začátku testu i v průběhu času uložení vzorky páleného vápna uložené ve *vakuu* a pod *sklem*, které jak ukazují ostatní analýzy, jen minimálně mění složení. U vzorků uložených na *vzduchu* nebo pod *papírem* rychle klesá obsah CaO v důsledku přeměny na Ca(OH)<sub>2</sub> a následně na CaCO<sub>3</sub>. S časem uložení  $T_{max}$  u všech vzorků exponenciálně klesá, přičemž pokles koreluje s postupujícími změnami ve složení i změnou hmotnosti vzorků. Nejvíce tudíž klesá reaktivita u páleného vápna z prostředí *vzduchu* a *papír*, u kterého po 7 dnech klesla hodnota z počáteční  $T_{max}$  85 °C na  $T_{max}$  25 °C. Takto dramatický pokles u vzorků potvrzují i další metody zjištěním, že ve vzorku je po tomto čase téměř minimum obsahu CaO (viz např. kapitola 4.1 *Výsledky měření změny hmotnosti*).

<i>t (dny)</i>	$T_{max}$ (°C)			
	<b>vzduch</b>	<b>papír</b>	<b>sklo</b>	<b>vakuum</b>
1	82	82	82	82
3	51	53,5	78,5	76
7	23	27	67	77
14	20,5	21	61	68,5

*Tab. 3: Hodnoty  $T_{max}$  vzorků uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum), změna hodnot v čase. Reaktivita nebyla z důvodu nedostatku vzorku měřena po 28 dnech.*

<sup>72</sup> PARK, J. H. et al. *Role of intercalated water in calcium hydroxide interlayers for carbonation reaction*. In: ScienceDirect, 2021 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721020088>.

V Tab. 4 jsou uvedeny hodnoty času  $t_{60}$ , který udává čas, za který směs v Dewarově nádobě dosáhne 60 °C ( $T_{60}$ ). Podle normy je pálené vápno vysoce reaktivní, neboť na začátku testu dosahuje čas  $t_{60}$  okolo 0,4 min. S časem expozice, čas za který vzorky dosáhnou teploty 60 °C u všech vzorků roste, neboť klesá obsah CaO. U vzorků uložených na vzduchu a pod papírem dokonce nemohly být hodnoty  $t_{60}$  odečteny, neboť díky rychlému poklesu obsahu CaO nebyla dosažena teplota 60 °C.



Graf 3: Hodnoty  $T_{max}$ : vzorků uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum), změna hodnot v čase. Reaktivita nebyla z důvodu nedostatku vzorku měřena po 28 dnech.

t (dny)	$t_{60}$ (min)			
	vzduch	papír	sklo	vakuum
1	0,42	0,42	0,42	0,42
3	-	-	1,25	0,67
7	-	-	4,75	0,5
14	-	-	14,42	2,33

Tab. 4: Hodnoty  $t_{60}$  v min vzorků uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum), změna hodnot v čase. Reaktivita nebyla z důvodu nedostatku vzorku měřena po 28 dnech. U vzorků uložených na vzduchu a pod papírem hodnoty  $t_{60}$  chybí, neboť pokles teploty reaktivity byl nižší než 60 °C.

Podle rozdělení z normy ČSN EN 459-2<sup>73</sup> (viz kapitola 3.2 Test reaktivity) dosahují vysoké reaktivity vzorky: *vakuum*<sup>74</sup> v časech 1, 3, 7, 14 dní, *sklo* v časech 1 a 3 dny, *papír* a *vzduch* pouze 1. den. Střední reaktivitu prokázal vzorek: *sklo* po 7 dnech a nízkou reaktivitu měl vzorek *sklo* po 14 dnech. Vzorky *vzduch*, *papír* 3.–14. den test nesplnily. Musíme brát v úvahu, že naší úpravou testu reaktivity (použití kusového vápna a většího množství vody viz kapitola 3.2 Test reaktivity) vzniká určitá nesrovnalost, která zkresluje normativní posouzení. Je možné, že některé ze vzorků, které při našem experimentu normu nesplnily, by při přesném dodržení postupu z normy testem prošly, nebo by spadly do jiné kategorie co se týče hodnocení reaktivity.

#### 4.3 Stanovení nehasitelného podílu

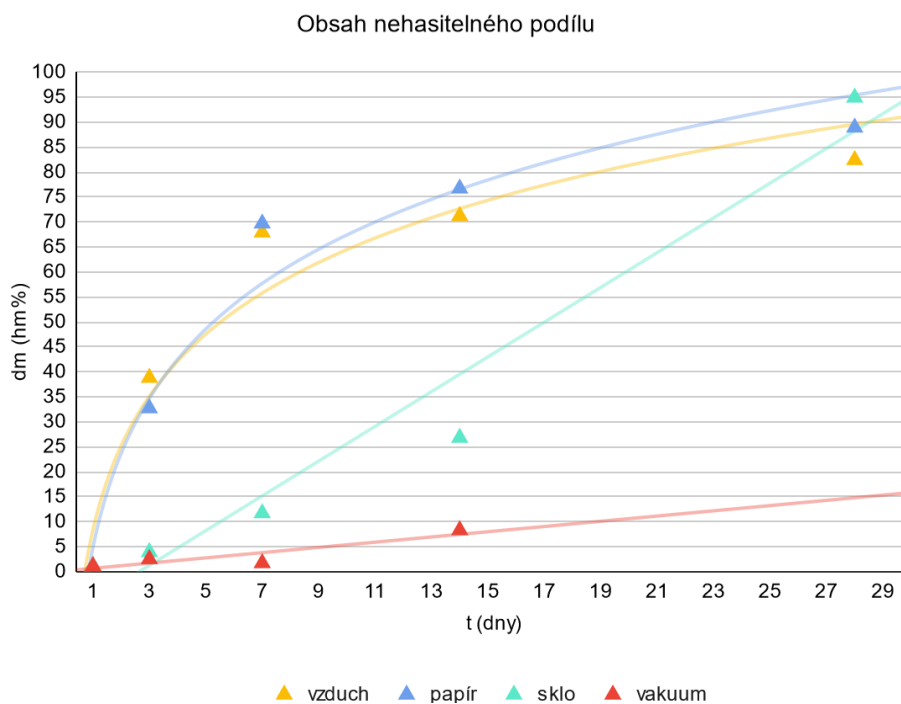
Obsah nehasitelného podílu, který tvoří drobné ztvrdlé částice (Obr. 12), a jeho distribuci udává Graf 4 a 5. Z výsledků vyplývá, že celkový obsah nehasitelného zbytku ve všech vzorcích s časem buď lineárně (*vakuum*, *sklo*) nebo logaritmicky (*vzduch*, *papír*) přibývá. Fázová analýza těchto reziduí ukázala, že nehasitelné částice tvoří směs hydroxidu a uhličitanu vápenatého (viz Příloha č. 2: Výsledky termické analýzy). Proto je logické, že nejvíce nehasitelného podílu a nejrychlejší nárůst obsahu reziduí byl zaznamenán u vzorků *papír* a *vzduch*, které rychle podléhají změně složení (viz kapitola 4.1. Výsledky měření změny hmotnosti a kapitola 4.4. Výsledky termické analýzy). U nich kopíruje změna obsahu nehasitelného podílu průběh změn – obsah nehasitelného podílu se výrazně mění mez 1. a 3. dnem, kdy vzorky podléhají hydrataci, mezi 3. a 7. dnem se nárůst reziduí zpomalil. Další nárůst obsahu reziduí souvisí s nastávající karbonatací. U vzorků *sklo* byl nárůst pozvolný v prvních třech měřeních, ale po 28. dnech se přiblížil na stejnou úroveň jako *vzduch* a *sklo*. U vzorků *papír*, *vzduch*, *sklo* dosahuje na konci testu, tj. po 28 dnech, hmotnost nehasitelných částic okolo 90 hm.% (přičemž 100 %t voří původních 100 g vzorku páleného vápna použitého pro test reaktivity, viz Graf 4). Nejméně nehasitelného podílu obsahovaly vzorky z *vakua*; po 14 dnech jejich obsah dosáhl okolo 10 hm.%.



Obr. 12: Nehasitelný podíl zachycený na sítích s velikostí oka D 0,125, 0,25 a 0,5 mm (7d, prostředí: sklo). Částice jsou bílé a ztvrdlé.

<sup>73</sup> ČSN EN 459-2. *Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 722201. (Tabulka 4 - Reaktivita (R) nehasšeného vápna, uvedeno jako charakteristická hodnota).

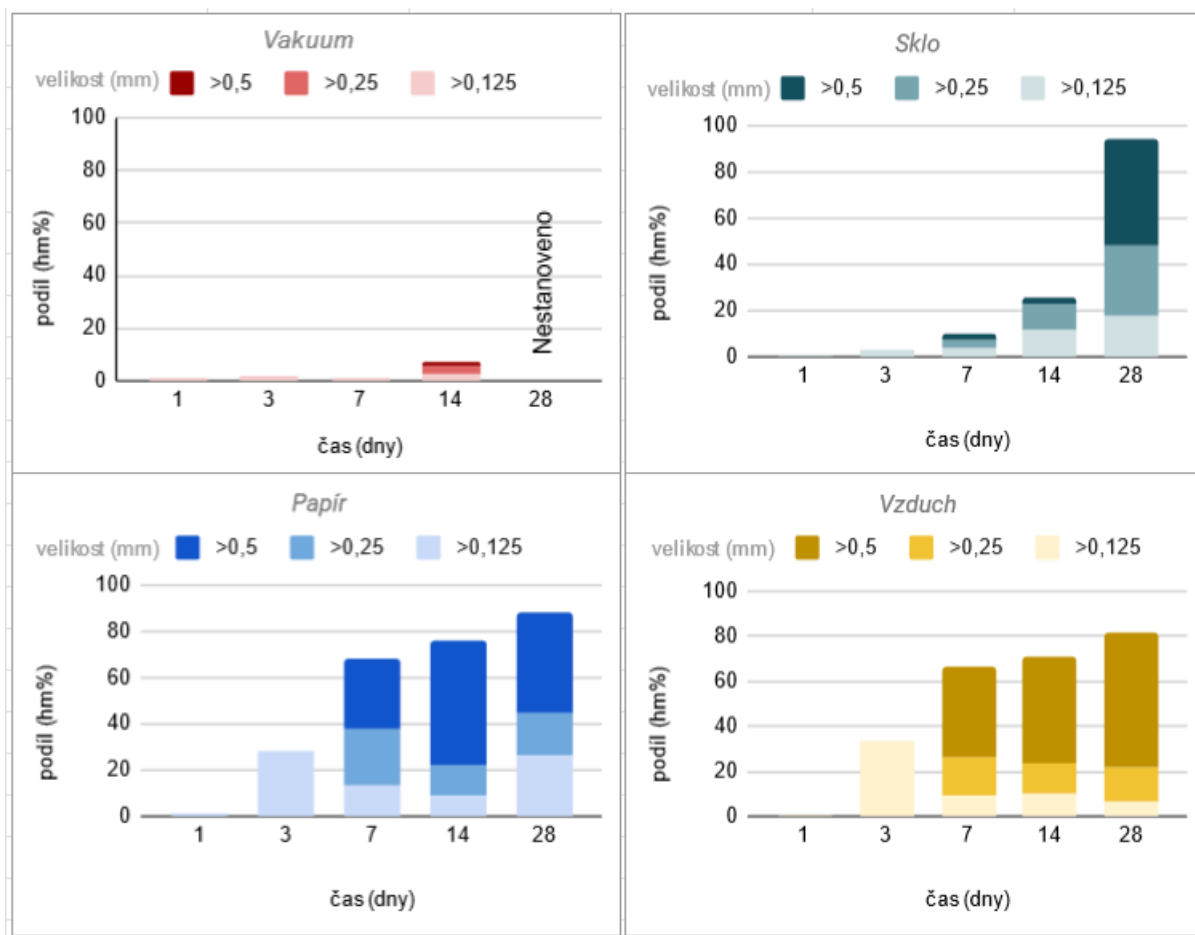
<sup>74</sup> Nejednalo se o úplné vakuum, vzorek byl uložen ve vakuové dóze na potraviny. Dóza byla ale 10x krátce otevřena mezi 7. a 28. dnem, kvůli vážení vzorku.



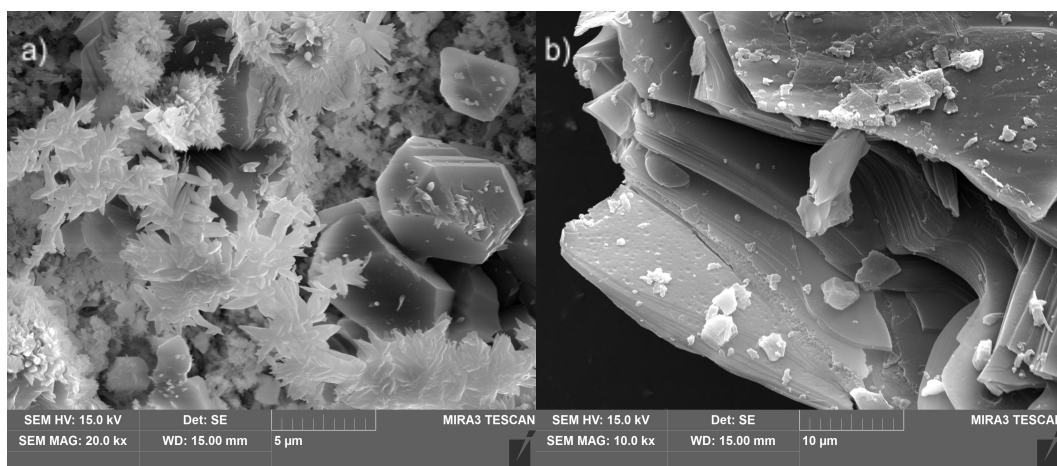
Graf 4: Celkový obsah nehasitelného podílu v různých podmínkách vývoje obsahu částic čase. Obsah nehasitelného podílu byl stanoven v hm.%, hmotnost částic byla vztažena na počáteční 100 g vzorku použitých k testu reaktivity.

Pro další upřesnění byla zjišťována distribuce nehasitelného podílu, která byla vypočítána z hmotnosti nehasitelných částic zachycených na síti s velikostí oka  $D = 0,125$  mm (nejsvětlejší odstín),  $D = 0,25$  mm (střední odstín) a  $D = 0,5$  mm (nejtmavší odstín), zaznamenaná v *Grafu 5*. Jejich obsah byl vyjádřen v hm.% vztažením k hmotnosti výsledné kaše.<sup>75</sup> Výsledky ukazují, že s výjimkou vzorků z vakua, kde nejsou změny v distribuci viditelné z důvodu nízkého obsahu reziduí, roste významně zejména zastoupení větších částic s velikostí 0,5 mm, které mohou vzniknout v důsledku spojování částic a vzniku klastů. Mikrostruktura částic nehasitelného podílu byla pozorována na snímcích SEM (*Obr. 13*).

<sup>75</sup> Dodatečně bylo rozhodnuto hm. % v *Grafu 5* vztáhnout k váze výsledné kaše, tak aby bylo možné jednoduše si představit podíl nehasitelných částic v produktu po testu reaktivity. Přepočítání bylo provedeno za použití dat z termické analýzy.



Graf. 5: Distribuce nehasitelného podílu a její změna s časem expozice. Obsah jednotlivých frakcí byl vypočítán v hm.%, hmotnost je vztažena k hmotnosti výsledné kaše.



Obr. 13: Nehasitelný podíl na snímcích SEM: (a) Aragonit a Kalcit (b) Portlandit. Autor snímků: R. Tišlová.

Obsah nehasitelného podílu a změna jeho obsahu ve vzorcích má důležitý přesah pro praxi. Jejich přítomnost ve vyhašeném vápně může mít vliv na konzistenci a zpracovatelnost, ale patrně i na pojivovou funkci vápna. V případě použití takového vápna k přípravě malty, by pravděpodobně tyto částice plnily funkci plniva a nikoliv pojiva, což by mělo vliv na kvalitu malty a její vlastnosti. Navíc by se malta, vzhledem k velikosti těchto reziduí, vyznačovala charakteristickou mikrostrukturou (makroskopicky viditelné bílé klasty) a zrnitostí, větší, než kterou lze docílit použitím klasického písku. Přijatelný obsah nehasitelného podílu definuje norma ČSN EN 459-1 - Část 1,<sup>76</sup> která udává, že maximum nevyhašených zbytků dosahuje ve vápně 9 hm.%, přičemž 7 hm.% částic nesmí být větších než 0,09 mm a zároveň 2 hm.% částic nesmí být větších než 0,2 mm. Tyto podmínky splňují pouze vzorky z vakua a to do 7. dne, sklo do 3. dne expozice a papír a vzduch pouze zcela na počátku.

#### 4.4 Výsledky termické analýzy

Termická analýza sloužila pro stanovení fázového složení vzorku a kvantifikaci jednotlivých fází. Kvůli složitosti problematiky byly výsledky vyhodnoceny v úzké spolupráci s konzultantem Ing. Renatou Tišlovou, Ph.D., KCHT, FR), která provedla i vlastní měření.

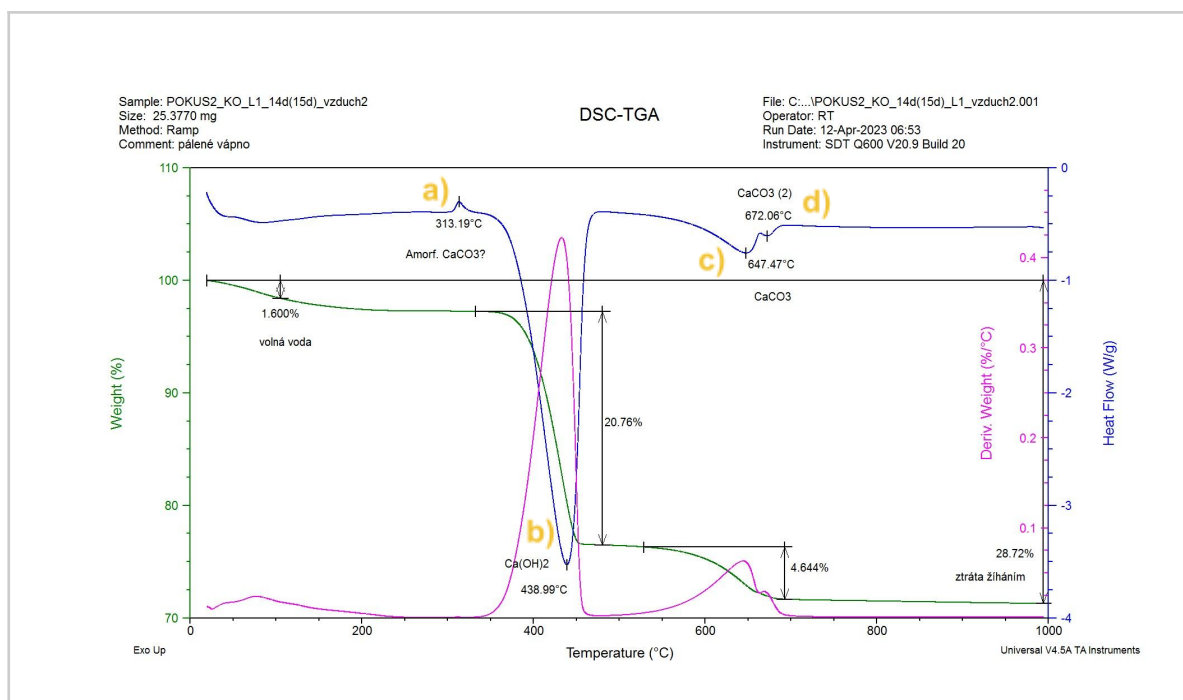
Expozicí páleného vápna vybraným podmínkám vznikají předně dvě fáze, které lze identifikovat z efektů na křivkách DTG a DSC (*Graf. 6; Textové příloha č. 2: Výsledky termické analýzy*). Primární fází, která vzniká u vzorků CaO ve všech vybraných podmínkách, je hydroxid vápenatý ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), který je možné identifikovat na základě endotermního píku na křivce DTG s maximem okolo 400 °C (v *Grafu 6* a *Tab. 5* označen jako: b). Později vznikající uhličitán vápenatý lze určit z přítomnosti endotermního píku s maximem okolo 650 °C až 750 °C (c). Tento efekt je možné jasně ztotožnit s přítomností kalcitu, který je za normálních podmínek nejstabilnějším polymorfem vznikajícího uhličitánu vápenatého. U obou hlavních fázích se v některých záznamech objevují zajímavé výsledky; s časem expozice dochází k přesunu maxim píků k vyšším hodnotám (*Graf 8–11*), dalším fenoménem, který pozorujeme jen u kalcitu je vznik druhého píku v širším intervalu teplot (d), který je patrně důsledkem přítomnosti dvou kalcitových fází s odlišnou velikostí krystalů.<sup>77</sup> U některých vzorků (*vakuum 28 d; sklo 3, 7, 14, 28; papír 14 d; vzduch 1, 3, 7, 14 d*) se dále objevil minoritní exotermní efekt s maximem okolo 320 °C na DSC křivce (a), který s největší pravděpodobností poukazuje na přítomnost jiných polymorfů uhličitánu vápenatého. Podle některých dříve publikovaných studií by se mohlo jednat o amorfní formu  $\text{CaCO}_3$ .<sup>78</sup> Z termogramů lze kromě fázového složení zjišťovat další informace; obsah volné vody nebo naopak celkovou ztrátu žíháním, která představuje celkovou změnu hmotnosti od začátku do konce analýzy (*Tab. 5*).

---

<sup>76</sup> ČSN EN 459-1. *Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 722201.

<sup>77</sup> Jejich vznik není v dostupné literatuře popsán. Velikost krystalů je nejpravděpodobnějším vysvětlením, drobnokrystalické fáze se rozkládají rychleji než fáze s větší velikostí a hrubozrnnou strukturou. Podobným způsobem lze vysvětlit i výše popisovaný posun maxima píku kalcitu k vyšším hodnotám.

<sup>78</sup> NAVARRO, C.R. et al. *Amorphous and crystalline calcium carbonate phases during carbonation of nanolimes: Implications in heritage conservation*. In: ResearchGate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/305312854\\_Amorphous\\_and\\_crystalline\\_calcium\\_carbonate\\_phases\\_during\\_carbonation\\_of\\_nanolimes\\_Implications\\_in\\_heritage\\_conservation](https://www.researchgate.net/publication/305312854_Amorphous_and_crystalline_calcium_carbonate_phases_during_carbonation_of_nanolimes_Implications_in_heritage_conservation).



Graf. 6: Příklad záznamu a vyhodnocení STA analýzy, vzorek páleného vápna exponovaného na vzduchu, stáří vzorku 14 dní. Křivky TG, DTG a DSC.

Termická analýza pálených vápen – přehled fází v záznamu	Maximum píku (průměr) (°C)	Rozsah maxim píku (°C)	Popis
Volná voda			Volná voda je ve vzorku vázaná fyzikálně a při zahřátí na 105 °C ze vzorku odchází. (odečet 30–105 °C)
Amorfní CaCO <sub>3</sub> ? <sup>79</sup> (a)	316,7	312–322	Pík, který se ukazuje pouze na kalorimetrické (DSC) křivce při přeměně fáze CaCO <sub>3</sub> z amorfni na kalcit.
Ca(OH) <sub>2</sub> (b)	421,6	373–444	Pík, který poukazuje na obsah hydroxidu vápenatého.
CaCO <sub>3</sub> (c) CaCO <sub>3</sub> (2) (d)	610,3 649,1	574–652 601–736	Pík, který poukazuje na obsah uhličitanu vápenatého.
Ztráta žiháním			Celková změna hmotnosti vzorku při zahřívání. (odečet 30–1000 °C)

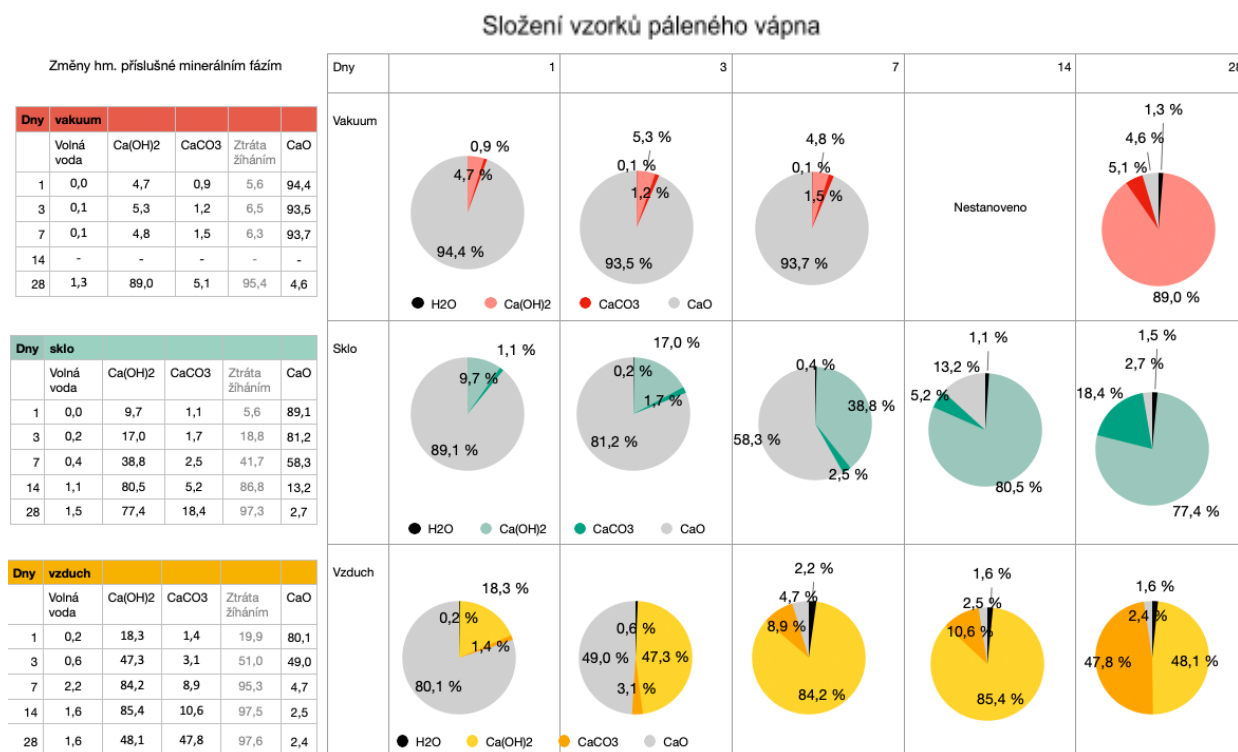
Tab. 5: Termická analýza pálených vápen – analyzované fáze a jejich popis.

Dalším výsledkem, který lze zjistit z TG záznamů (Graf 7), je kvantita jednotlivých fází zpracovaná ze všech měření do tabulky a Grafu 7. V Tab. 5 a Grafu 12–13 jsou prezentovány změny hmotnosti vzorku, které jsou způsobeny jednotlivými fázovými přechody a změnami ve složení. Pro ilustraci, jak byly tyto hodnoty odečítány, je umístěn jeden termogram vzorku umístěných 14 dní na vzduchu (Graf 6). Na něm je první pokles hmotnosti od 30 do 105 °C (hmotnostní úbytek 1,6 hm.%) je spojen s obsahem fyzikálně vázané vody ve vzorku. Druhý úbytek (20,76 %) je spojen s uvolněním vázané vody z Ca(OH)<sub>2</sub>. Třetí pokles hmotnosti (4,64

<sup>79</sup> Uvádíme s otazníkem, nebylo potvrzeno dalšími metodami, pouze výsledky termické analýzy.

%) je spojen s uvolněním CO<sub>2</sub> obsaženým v CaCO<sub>3</sub>. Obsahy uvolněných plynů byly přepočítány na vlastní obsah fází, tj. Ca(OH)<sub>2</sub> v CaCO<sub>3</sub> podle rovnic (2) a (3) uvedených v rešeršní části práce (viz kapitola 2.1 *Reakce páleného vápna – hydratace a karbonatace*). Obsah fází byl graficky zpracován do koláčových grafů (*Grafu 7*) (vedle umístěny tabulka hodnot), obsah oxidu vápenatého CaO byl dopočítán jako chybějící díl do 100 %.

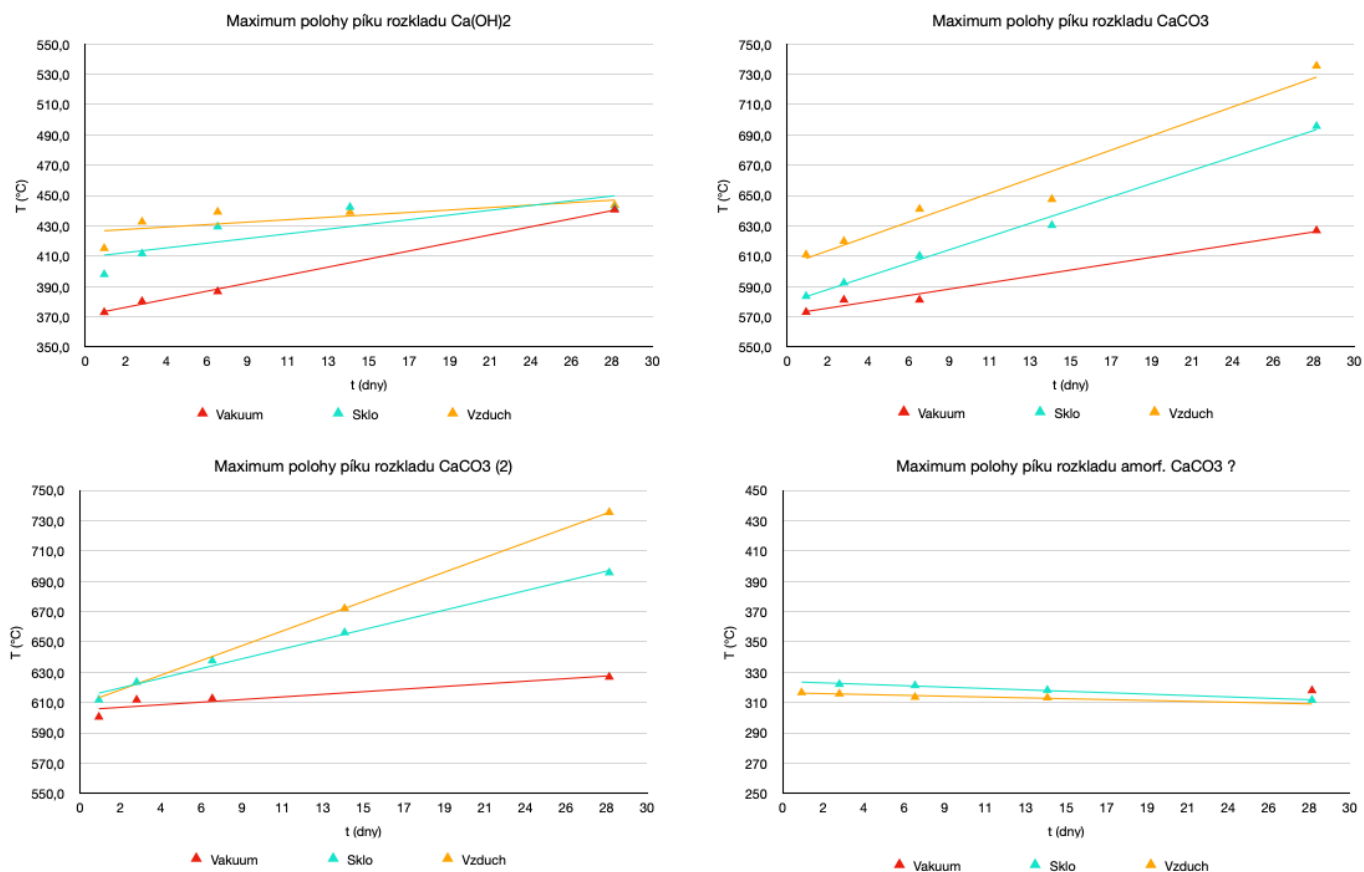
Nejrychlejší změny ve složení byly zaznamenány u vzorku ze *vzduchu*. Po prvním dni obsahoval vzorek 18,3 hm.% Ca(OH)<sub>2</sub>, po 3 dnech již 47,3 % 84,2 % po 7 dnech. Po 7 dnech také začíná ve vzorku ztelná karbonatace (vyjádřená obsahem CaCO<sub>3</sub>), jehož obsah činil 8,9 hm.%. Mezi 7. a 14. dnem se podobně jako na měření změny hmotnosti objevuje indukční perioda, ve které se obsahy jednotlivých fází prakticky nemění. Na konci testu (28. den) vzorek obsahoval 48,1 % Ca(OH)<sub>2</sub> a 47,8 % CaCO<sub>3</sub>, obsah CaO je zanedbatelně nízký kolem 2,4 hm.%. Opačným příkladem jsou vzorky z prostředí *vakua*,<sup>80</sup> u kterých došlo k minimální změně složení (mezi 1. a 7. dnem obsahují vzorky 95 až 93,5 % CaO). Mezi 7. a 28. dnem došlo překvapivě k masivní hydrataci (89 % Ca(OH)<sub>2</sub>), ke které mohlo dojít kvůli otevírání vakuové krabičky v důsledku průběžného vážení vzorku. Změna složení vzorků u *skla* postupuje podobně jako na *vzduchu*, ale pomaleji a více plynule. Kvůli nižší přístupnosti vzduchu dochází výrazně pomaleji ke karbonataci (po 28 dnech obsahuje vzorek 1,5 hm.% CaO, 18,4 % CaCO<sub>3</sub> a 77,4 % Ca(OH)<sub>2</sub>).



*Graf. 7: Složení vzorků páleného vápna vystaveného různým expozičním podmínkám vypočítané z Tg analýzy, změny složení v čase. Stejně výsledky byly zaznamenány i do tabulky vlevo.*

<sup>80</sup> Nejednalo se o úplné vakuum, vzorek byl uložen ve vakuovací dóze na potraviny. Dóza byla ale 10x krátce otevřena mezi 7. a 28. dnem, kvůli vážení vzorku.

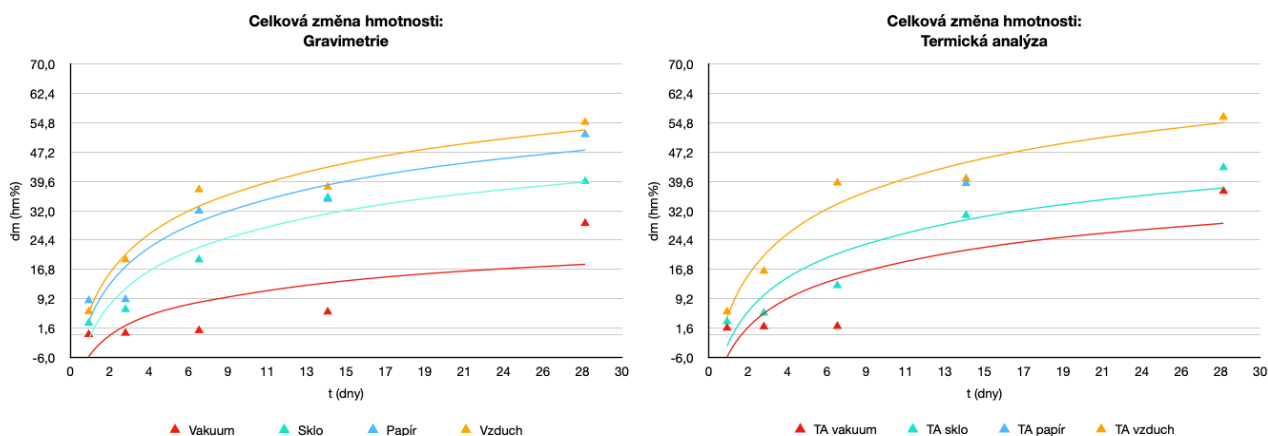




Graf. 8–11: Hodnoty maxima teploty píků  $Ca(OH)_2$ ,  $CaCO_3$ ,  $CaCO_3 (2)$  a amorfního (amorf.)  $CaCO_3$  v různých podmínkách odečtených z DTG křivky, změny hodnoty v čase.

	$\Delta m$ (hm.%)							
$t$ (dny)	vakuum	vakuum (TG)	sklo	sklo (TG)	papír	papír (TG)	vzduch	vzduch (TG)
1	0,0	1,7	2,9	3,3	8,8	-	5,9	5,9
3	0,3	2,0	6,5	5,5	9,0	-	19,3	16,4
7	1,0	2,1	19,3	12,6	31,9	-	37,5	39,2
14	5,8	-	35,4	30,8	35,0	39,1	38,1	40,3
28	28,7	37,1	39,6	43,2	51,7	-	54,9	56,2

Tab 6: Srovnání změny hmotnosti vzorků páleného vápna v různých podmínkách expozice zjištěné vážením a TG analýzou.



Graf. 12–13: Srovnání změny hmotnosti vzorků páleného vápna v různých podmínkách expozice zjištěné vážením a TG analýzou.

#### 4.5 Výsledky skenovací elektronové mikroskopie

Změna složení vzorků pálených vápen umístěných v různých expozičních podmínkách se jen částečně propsala do jejich makro- i mikrostruktury. V makroměřítku dochází vlivem fázové přeměny páleného vápna ke vzniku trhlin (Obr. 10), popraskaný vzorek ztrácí mechanické vlastnosti – soudržnost, pevnost a tvrdost.

Při studiu mikrostruktury pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM) nebyly rozdíly mezi jednotlivými podmínkami a změny vlivem času tak zřetelné, jak bylo prokázáno pomocí jiných analýz. Podobně nebyly zcela jasně prokázány rozdíly v mikrostruktuře při povrchu vzorků páleného vápna více exponovaného vzduchu a středu vzorků.

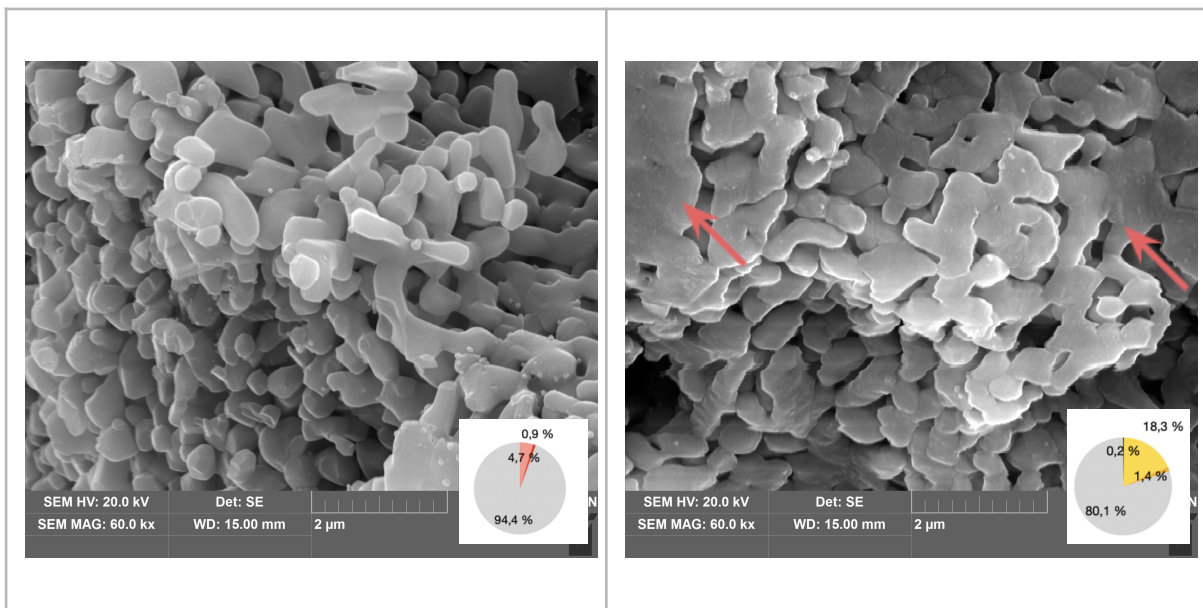
Vzorky ze všech prostředí se vyznačovaly podobným průběhem změn v mikrostruktuře. U všech vzorků byla zvláště v počátečních fázích experimentu pozorována pórovitá, korálovitá struktura téměř amorfních částic CaO (Obr. 11, 15), která se v závislosti na podmínkách expozice a s časem mění. Stejnou strukturu páleného vápna metodou SEM prezentuje například i J. Válek<sup>81</sup> nebo E. Serris.<sup>82</sup> Vzdušným hašením dochází nejdříve k zaoblování tvarů částic pravděpodobně v důsledku vzniku filmu Ca(OH)<sub>2</sub> (Obr. 13), v pozdějších fázích sochází ke slnutí částic a snížení pórovitosti matrice (Obr. 12, 16). Prokazatelně nejrychleji probíhají tyto změny u vzorku vystaveného vzduchu (a papíru), u ostatních prostředí jsou změny přibližně srovnatelné. Ve filmu Ca(OH)<sub>2</sub> se s postupujícím časem expozice objevují trhliny kvůli zvýšení povrchového napětí na povrchu částic (Obr. 14, 17, 18). Větší trhliny probíhající celou maticí vznikají po delších časech expozice (Obr. 19, 20). Zvláštností, kterou nelze prozatím nijak osvětlit je, že ve vzorcích nejsou viditelné fáze s vyvinutou krystalickou strukturou portlanditu Ca(OH)<sub>2</sub> i kalcitu CaCO<sub>3</sub>, jejichž přítomnost byla jasně prokázána termickou analýzou. Matrice všech vzorků i ve všech časech zůstává spíše amorfni.

<sup>81</sup> Jan Válek, *Vápenné technologie historických staveb: příprava specializovaných vápenných pojiv pro obnovu historických staveb*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, 2015, s. 10.

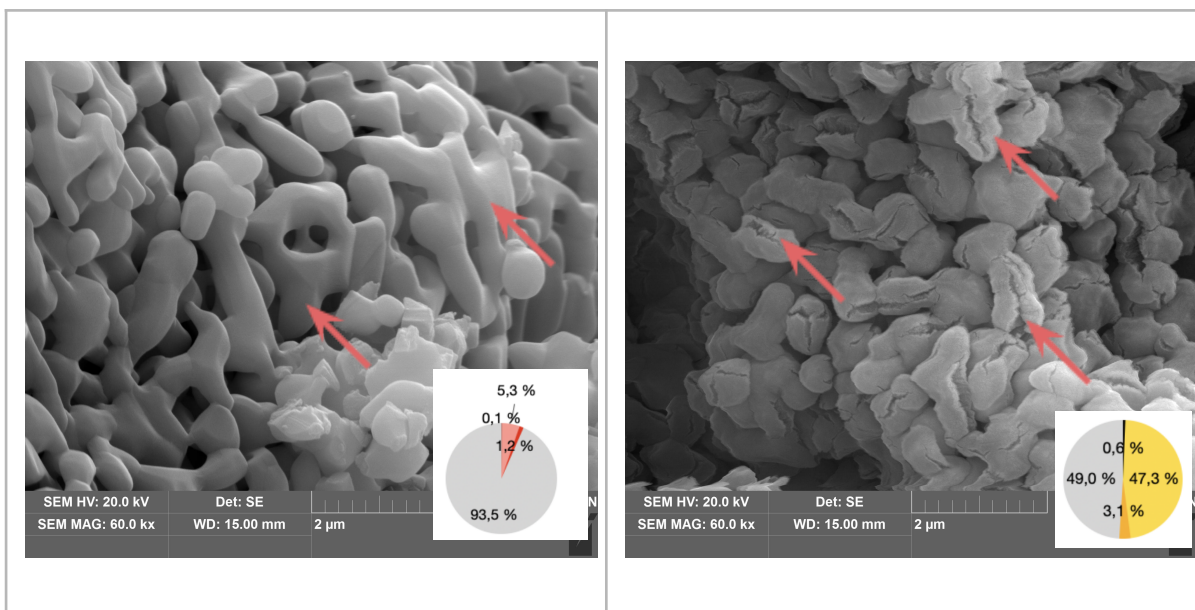
<sup>82</sup> SERRIS, E. et al. *Study of the hydration of CaO powder by gas–solid reaction: Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 2011 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611001888>.



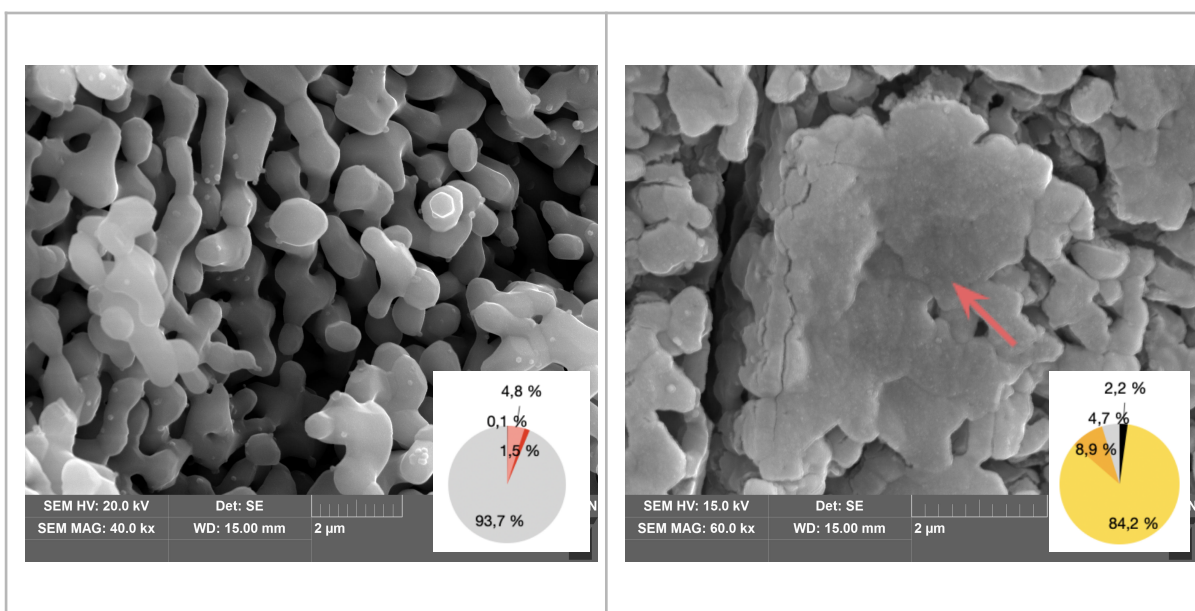
Obr. 14–15: Kusové pálené vápno uložené na vzduchu – srovnání vzhledu kousků vzorku po 1 (vlevo) a 28 dnech (vpravo). Po 28 dnech vznikají makrotrhliny, které způsobují rozpad vzorků a jejich práškovatění.



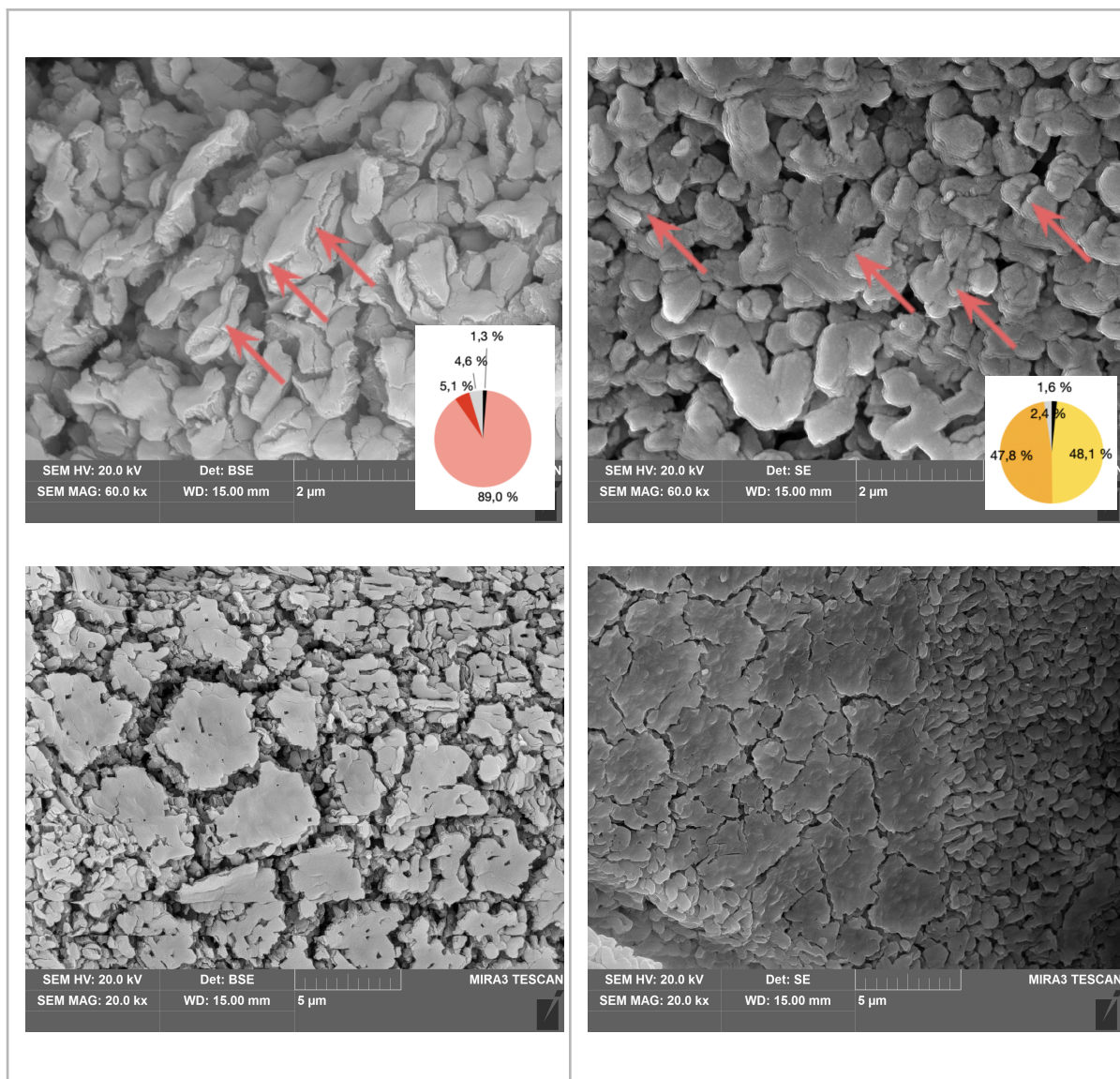
Obr. 16–17: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 1 den. U vzorků z obou prostředí dochází k zaoblování částic CaO, matrice je vysoce porézní. U vzorku ze vzduchu probíhá hydratace rychleji, lokálně vznikají u vzorku vznikají místa slinutých míst. Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)



Obr. 18–19: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 3 dny. Ve vakuu dochází k zaoblování částic  $\text{CaO}$ , které se potahují filmem  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Na vzduchu je matrice více hydratovaná, méně porézní, na povrchu se objevují trhliny ve filmu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Nelze vyloučit, že některé trhliny mohly vzniknout kvůli velkému zvětšení, při kterých je prováděno pozorování. Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)



Obr. 20–21: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 7 dní. Hydratace v prostředí vzduchu probíhají rychleji, na snímku je viditelný slitý film  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)



Obr. 22–26: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 28 dní. U obou vzorků jsou při velkém zvětšení (60.0 kx) patrné mikropraskliny na povrchu částic. V menším zvětšení je na povrchu částic přítomen slinutý povrch s dlouhými trhlinami, které jsou u snímku z vakua širší, než u snímku z prostředí vzduch. Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)

## 5. Diskuse a závěr

V rámci teoretické části diplomové práce byl studován vliv vybraných podmínek skladování na složení a vlastnosti kusového páleného vápna. Pálené vápno bylo připraveno výpalem vysokoprocentního koněpruského vápence, jehož vlastnosti byly po dobu 28 dní studovány vybranými metodami analýz. Vzorky byly uloženy ve čtyřech prostředích interiéru (zajištěna stabilní teplota a RV), které se lišily přístupností vzduchu – na *vzduchu*, pod filtračním *papírem*, pod *sklem* a ve *vakuvé* dóze.

Vzorky pálených vápen umístěných v těchto prostředích se po celou dobu experimentu vážily a v určených časových intervalech (1, 3, 7, 14 a 28 dní) testovaly. Měřila se reaktivita vápna a stanovoval obsah nehasitelného podílu a jeho granulometrie. Změna složení pálených vápen byla studována pomocí termické analýzy, stejnou metodou byl zjišťován obsah jednotlivých fází a změny jejich obsahu v čase. Kromě toho byla studována mikrostruktura vzorků pomocí skenovací elektronové mikroskopie. Provedená měření měla odpovědět na čtyři otázky, které byly formulovány v zadání diplomové práce:

1. *Jaké reakce v průběhu skladování v reálných podmínkách probíhají? Jaká je jejich rychlost a jak lze rychlost reakcí úpravou podmínek uložení ovlivnit?*
2. *Jak vypadá fázové složení páleného vápna, které bylo uloženo ke stárnutí v různých podmínkách?*
3. *Jak se mění reaktivita vápen v důsledku podmínek uložení?*
4. *Jaký je nehasitelný podíl ve výsledné kaši po vyhašení u jednotlivých vzorků a jaká je jeho granulometrie?*

Odpovědi na stanovené otázky lze do bodů shrnout takto:

1. Z výsledků měření váhového nárůstu a termické analýzy vyplývá, že při expozici páleného vápna vzduchu probíhá jak hydratace, tak karbonatace, a to ve všech testovaných prostředích, i když v různé rychlosti a míře. Reakce probíhají pravděpodobně paralelně, přičemž z počátku probíhá dominantně hydratace, následně karbonatace. Z termické analýzy vyplývá, že vápno ponechané volně na *vzduchu* po 28 dnech téměř zcela zhydratuje a dokonce zhruba z poloviny zkarbonatuje. Vzorky s omezeným přístupem vzduchu – pod *sklem* a ve *vakuu*<sup>83</sup> jsou po 28 dnech téměř zcela hydratované, a to dokonce i v prostředí *vakuum*, kde ve vzorku zbývá po 28 dnech jen 4,6 % volného CaO. Hydrataci vzorků bylo možné pozorovat i na snímcích SEM. V souladu s výsledky termické analýzy jsou i výsledky měření hmotnostní změny vzorků, které korespondují s fázovým složením a obsahem fází. V prostředích *vzduch*, *papír* dosáhl váhový nárůst po 28 dnech asi 55 hm.%, u *skla* 40 hm.% a u *vakua* 30 hm.%. Z těchto výsledků vyplývá, že pokud bychom chtěli pálené vápno skladovat 28 dní v mírných podmínkách suchého skladu, a zamezit probíhajícími reakcím, nebude nám stačit ani umístění vzorku do

---

<sup>83</sup> Jak upozorňujeme v experimentální části, nejednalo se o úplné vakuum, dóza byla 10x krátce otevřena mezi 7. a 28. dnem, kvůli vážení vzorku. (viz. kapitola 2.2 *Podmínky uložení*).

uzavřeného prostředí tj. pod *sklo* nebo jiné uzavřené nádoby. Reakce budou v tomto prostředí sice zpomalené, ale probíhají podle stejného mechanismu jako na vzduchu.

Je otázka, jak se skutečně chovají vzorky ve *vakuu* (např. vakuových nádobách), ve kterém jsou vzorky páleného vápna celkově nejvíce stabilní. V našem experimentu byla vakuovací dóza několikrát otevřena kvůli vážení vzorků. Přístup vzduchu, i když minimální, patrně způsobil, že se i v tomto prostředí hydratace a karbonatace rozběhly a vápno se znehodnotilo. Stabilitu vápna ve vakuových nádobách by bylo bezesporu vhodné ověřit dalším pokusem, při kterém by se dóza neotevírala. Zjištění, která se týká stability páleného vápna, tedy nejsou příliš pozitivní, neboť ukazují, že i při zajištění suchých podmínek skladování, dojde velmi rychle k jeho znehodnocení. Tuto skutečnost je nutné si uvědomit při dalším použití vápna např. při přípravě malt – fázovými přeměnami se mění obsah volného CaO a naopak vznikají fáze, které nemusí mít pojivou funkci (jejich nárůst byl pozorován i při stanovení nehasitelného podílu). To všechno se může projevit na kvalitě malty a jejích mechanických vlastnostech. Na druhou stranu jsou výsledky pozitivní z hlediska zrání vápených omítek, které obsahují Ca(OH)<sub>2</sub>. Jak ukazují fázové přeměny probíhající v páleném vápně, hydroxid vápenatý se poměrně rychle mění na uhličitán a to i v prostředí s relativně malým přístupem vzduchu a nízkou relativní vlhkostí. Pro potvrzení zjištěných výsledků o karbonaci by se opět dalo provést hned několik doplňujících experimentů, které by samostatně ověřily vliv podmínek na průběh karbonatace. Pro potvrzení této hypotézy by bylo možné simulovat zrání vápna v hloubce zdi tak, že by vápno nebylo kryté sklem, či papírem, ale porézním materiálem (např. omítkou). Vzorky by mohly být uloženy v prostředích s různou vlhkostí vzduchu.

2. Fázové složení a změny v důsledku uložení v různých expozičních podmínkách byly studovány pomocí termické analýzy (viz *Graf 7* v kapitole 4.4 *Výsledky termické analýzy*). Nejrychleji probíhaly fázové změny v prostředí *vzduch*, kde došlo k hydrataci vzorku z 50 % již za 3 dny expozice a k celkové hydrataci za 7 dní. Na reakci navazovala karbonatace, která byla na vzorku pozorována po 28 dnech téměř z 50 %. Pomaleji probíhaly změny ve složení v prostředí *sklo*, kde došlo za 7 dní k 30 % konverzi na hydroxid vápenatý, celková hydratace proběhla po 28 dnech, zároveň byla po 28 dnech pozorována karbonatace vzorku z 18 %. V prostředí *vakuu* byly změny minimální až do 7. dne, 28. den byla zaznamenána 90 % hydratace. Zajímavé je, že i ve vysoce zreagovaných vzorcích zůstalo cca 2,5 % CaO, který se nepřeměnil na hydroxid. Příčinou může být to, že částice oxidu vápenatého zůstávající v matici jsou blokovány vznikajícím hydroxidem či uhličitánem tak, že k němu již nemá přístup vzdušná vlhkost a nemůže tak dojít k hydrataci. Vytvoření málo porézní vrstvy uhličitánu na povrchu vzorků potvrzují i autoři H. S. Song a C. H. Kim<sup>84</sup> a R. M. Dheilly.<sup>85</sup> Otázkou k zodpovězení opět je, zda volný CaO zůstává přítomen i později, než byl ukončen tento experiment, tj. po 28 dnech, nebo zda by k hydrataci nakonec došlo a obsah CaO by zcela vymizel.

3. Reaktivita páleného vápna vyjádřená v testu jako teplota hašené směsi ( $T_{\max}$ ) dobře korespondovala s obsahem ve vzorku přítomného oxidu vápenatého, jehož obsah ve vzorcích vápna klesal v závislosti na podmínkách uložení a s časem. Vysokou reaktivitu (hodnocení

---

<sup>84</sup> SONG, H. S.; KIM, C. H. *The effect of surface carbonation on the hydration of CaO, Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 1990 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469090015P>.

<sup>85</sup> DHEILLY, R. M. et al. *Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca(OH)<sub>2</sub>: Construction and Building Materials*. In: ScienceDirect, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061802000120>.

vyplývá z normy ČSN EN 459-2<sup>86</sup>, výsledky viz kapitola 3.2 *Test reaktivity*) vykazovaly vzorky: *vakuum* v časech 1, 3, 7, 14 dní, *sklo* v časech 1 a 3 dny, *papír* a *vzduch* pouze 1. den. Za pozornost stojí extrémní chování vápna skladovaného na *vzduchu*, jehož reaktivita se kvůli výraznému poklesu obsahu CaO nedala již po 3 dnech změřit.

4. Nehasitelný podíl byl stanoven po zkoušce reaktivity a představuje částice, které se při zkoušce nevyhasily. Jak ukazují provedené experimenty jedná se o bílé tvrdé hrubosti střednězrné kousky, které jsou tvořeny klasty hydroxidu a uhličitanu vápenatého. Kromě složení byl studován jejich obsah (množství), granulometrie a změna distribuce velikosti částic, která se v nehasitelném podílu s časem uložení vápen také proměňuje. První zjištěním je, že s časem uložení roste obsah nehasitelného podílu postupně ve všech prostředích uložení. Nejvíce se obsah částic zvyšoval u vzorků uložených na *vzduchu*, u kterých nastávají nejrychlejší přeměny CaO na Ca(OH)<sub>2</sub> a CaCO<sub>3</sub>. Dalším zjištěním je, že v průběhu času roste obsah větších částic s velikostí 0,5 mm, které mohou vznikat v důsledkem spojování částic a vzniku klastů (shrnuť v *Grafu 5*). Prokázání vzniku nehasitelného podílu, popis jeho charakteru a složení má důležitý přesah pro praxi, jak pro samotnou přípravu malt, tak i pro mikroskopickou analýzu historických vzorků malt.<sup>87</sup> Přítomnost nehasitelných částic ve vyhašeném vápně může mít vliv na snížení pojivové schopnosti vápenného pojiva, konzistenci malty, její zpracovatelnost nebo například na mechanické vlastnosti malty v čerstvém i zatvrdlém stavu (soudržnost, pevnost, tvrdost). Vliv obsahu nehasitelného podílu na vlastnosti malt by bylo přínosné ověřit při samostatném experimentu.

Díky provedené práci bylo zjištěno mnoho dalších informací, které jsou s určitostí nad rámec diplomové práce i mimo odborné znalosti studenta FR UPCE. V každém případě jsou získané výsledky výborným námětem mnoha dalších experimentů. Velmi zajímavým zjištěním, jež vyplynulo mimochodem při vyhodnocování výsledků termické analýzy, byl posun maxima píků, které přísluší fázím vznikajícím při skladování CaO (tj. (Ca(OH)<sub>2</sub> i CaCO<sub>3</sub>)). Maxima poloh píků obou fází se v průběhu času posouvaly od nižších teplot k vyšším, což naznačuje možnou změnu krystalinity fází s časem uležení (viz *Graf 8–11*). Této teorii by mohla nasvědčovat i přítomnost exotermního píku (~320 °C) na DSC křivce v grafech termické analýzy. Tento pík souvisí s přítomností amorfního CaCO<sub>3</sub>. Zajímavé je, že u vzorků z prostředí *vzduch* se pík vyskytoval od 1. ke 14. dne expozice, 28. den, kdy došlo k nejvýraznější karbonataci (konverze 50 %), pík zaniká a zůstává jen efekt příslušející vzniku kalcitu. Tato skutečnost by mohla poukazovat na to, že kromě změny obsahu CaCO<sub>3</sub> se mění i jejich krystalická forma (kinetika krystalizace by měla směřovat k nejstabilnější kalcitové fázi). Aby bylo možné tuto teorii potvrdit, vyvrátit, nebo dále rozvinout, musel by být za tímto účelem proveden další experiment využívající pokročilé analytické metody.

---

<sup>86</sup> ČSN EN 459-2. *Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 722201. (Tabulka 4 - Reaktivita (R) nehašeného vápna, uvedeno jako charakteristická hodnota).

<sup>87</sup> WICHTERLOVÁ, Zuzana. *Průzkum techniky renesančního sgrafita*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. (str. 49-50)



# IV. Praktická část – Restaurování části nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v Subenu v Rakousku

## 1 Úvod

Tato práce prezentuje komplexní restaurátorský zásah provedený na vymezeném úseku barokní nástěnné malby Johanna Jakoba Zeillera v klášteře v Subenu (Rakousko).

Konkrétně se jedná o malbu umístěnou na klenbě nad varhany v klášterním kostele, která zobrazuje obrácení sv. Augustina. Na restaurování této klenby se podílela celá skupina studentů FR UPa pod vedením Jörga Riedla.<sup>88</sup> Výmalba byla rozdělena do několika částí podle uskupení figur. Tato práce se zabývá podrobněji částí s postavou alegorie prostopášnosti (Luxuria). Restaurátorské práce byly započaty na základě průzkumu, který probíhal mezi lety 2007-2018. V rámci zásahu byl proveden rozšířený uměleckohistorický, chemicko technologický a restaurátorský průzkum se zaměřením především na definování fixážního prostředku, rozpoznání původní techniky a odlišení zbytků přemaleb od originálu. Byly rozpoznány předchozí restaurátorské zásahy a zvážena možnost jejich odstranění. Nejdůležitější částí restaurátorského zásahu bylo odstranění zbytků přemaleb, zafixovaných vrstvou vodního skla. Restaurátorský zásah je fotograficky a graficky zdokumentován (*viz příloha č. 4:Fotografická dokumentace, 5:Grafická dokumentace*).

---

<sup>88</sup> Univerzita Pardubice Fakulta restaurování, studenti posledního ročníku magisterského studia Ateliéru restaurování nástěnné malby, sgrafita a mozaiky 2022.



Obr. 27: Grafické vymezení úseku určeného k provedení komplexního restaurátorského zásahu.

## 2 Úvodní údaje

### 2.1 Lokalizace památky

- **Spolková země:** Horní Rakousko
- **Okres:** Schärding
- **Adresa:** Suben 1, 4975 Suben, Rakousko
- **GPS souřadnice:** 48°24'45.0"N 13°25'47.0"E
- **Objekt:** Farní kostel sv. Lamberta v Subenu (bývalý augustiniánský klášterní kostel)
- **Bližší určení:** Nástěnné malby na západní klenbě

## 2.2 Údaje o památce

- **Název restaurovaného díla:** nástěnná malba motivem “Obrácení svatého Augustina”
- **Klasifikace památky:** Pod správou Bundesdenkmalamt
- **Rejstříkové číslo akcí Bundesdenkmalamtu:** A227<sup>89</sup>
- **Autor:** Johann Jakob Zeiller
- **Sloh, datace:** baroko, 1768
- **Materiál, technika:** fresco-secco
- **Restaurovaná část:** figurální výjev v levé části západní klenby
- **Rozměry restaurovaného díla:** 11m<sup>2</sup>
- **Předchozí známé zásahy na díle:**
  - V letech 1902-04 byl interiér renovován a fresky byly kompletně přemalovány vídeňským portrétistou Ludwigem Victorem Schmidtem.<sup>90</sup>
  - V letech 1951 až 1953 proběhlo restaurování maleb. Předběžný průzkum provedl Prof. Dr. Franz Walliser.<sup>91</sup> Bylo rozhodnuto o odstranění přemaleb z let 1902-04, přemalby se ale v rámci tohoto restaurátorského zásahu nepodařilo zcela odstranit.<sup>92</sup> Na nejpoškozenější západní klenbě byly v rámci zásahu provedeny nové rozsáhlé rekonstrukce malby a byla provedena celková fixace nátěrem vodního skla.<sup>93</sup>
- **Předchozí známé restaurátorské průzkumy:**
  - 2007 Restaurátorský průzkum Christopa Serentschy: stav fresek, štuků a umělých mramorů.<sup>94</sup>

---

<sup>89</sup> Bundesdenkmalamt: Spendeaktionen [online]. [cit. 26.5.2023] Dostupné z: <https://www.bda.gv.at/service/spenden/spendenaktionen.html>.

<sup>90</sup> RIEDEL, Jörg. *Pfarrkirche (Ehem. Stiftskirche) Suben: Freskenausstattung Johann Jakob Zeiller von 1768 Wolfram Köberl von 1953*. Vídeň, 2022. Uloženo: V archivu autora (joergriedel@gmx.at).

<sup>91</sup> Následné restaurování provedli restaurátoři Alfred Lauer, Anton Deckert a Wilhelmine Lunglmayer (Franz Brunner: nepublikovaný rukopis o historii farního kostela v Subenu).

SERENTSCHY, Christoph. *Suben ehem. Stiftskirche Fresko, Stuck, Stuckmarmor: Untersuchungsbericht, Fotodokumentation*. Neukirchen, 2007. Uloženo: V archivu autora ([christoph@serentschy.com](mailto:christoph@serentschy.com)).

<sup>92</sup> Zejména v oblasti západní klenby, kterou se tato práce zabývá především, nebylo odstranění přemaleb úplné. Konkrétně to dokládají UV fluorescenční fotografie (viz příloha č. 4: *Fotografická dokumentace*), kde jsou patrné menší i větší zbytky přemalby. Lokalizace zbytků přemalby byla zaznamenána i v rámci grafické dokumentace západní klenby. (viz příloha č. 5: *Grafická dokumentace*).

<sup>93</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

<sup>94</sup> SERENTSCHY, Christoph. *Suben ehem. Stiftskirche Fresko, Stuck, Stuckmarmor: Untersuchungsbericht, Fotodokumentation*. Neukirchen, 2007. Uloženo: V archivu autora ([christoph@serentschy.com](mailto:christoph@serentschy.com)).

- 2018 restaurátorský průzkum Christiana Wollera: Rozbor inventáře a stavu farního kostela v Subenu v Horním Rakousku.<sup>95</sup> V rámci průzkumu byly provedeny zkoušky postupu restaurování na fresce v hlavní lodi: příprava na restaurátorské práce (2022).
- 2020 restaurátorský průzkum Mag. Akad. restaurátora Herberta Schwaha: stěny, štuky, malířská výzdoba.<sup>96</sup> Poskytl odborný, avšak stručný průzkum dochovaného stavu výmalby kostela, který obsahuje návrh k restaurování.

### 2.3 Údaje o akci

- **Vlastník památky, objednatel:** Diecéze Horní Rakousko zastupuje: Matthias Senzenberger
- **Zhotovitel:** Dipl. restaurátor Jörg Riedel
- **Památkový dohled:** Petroa Weiss (státní konzervátorka) a Stavební úřad diecéze Linec, zastoupený Mathiasem Senzenbergerem.
- **Odborný pedagogický dozor:** MgA. Zuzana Wichterlová, licence MK ČR c.j. 7031/96, 48427/2015
- **Práci provedla:** Lucie Urbanová
- **Na dalších částech pracovali:** Taisiia Khomenok, Vojtěch Mrovč, Jörg Riedel
- **Chemicko-technologický průzkum:** DI Dr. Robert Linke, Přírodovědná laboratoř ve Vídni: Oddělení pro konzervaci a restaurování <sup>97</sup>
- Odborná konzultace: Mgr. Michaela Šeferisová Loudová, Ph.D., PhDr. Martin Mádl, Ph.D. (ikonografie), Mgr. Petra Hečková, Ph.D. (umělecko-historický průzkum)
- **Termín započetí a ukončení akce:** červenec-prosinec 2022

---

<sup>95</sup> WOLLER, Christian. *Bestandsaufnahme/Zustandsuntersuchung der Pfarrkirche Suben*, OÖ. Wien, 2018. Uloženo: Památkový ústav ve Vídni.

<sup>96</sup> SCHWAHA, Herbert. *Untersuchungsbericht, Ehemalige Stiftskirche Suben: Wände/Stuck/Wandmalerei*. Vorchdorf, 2020. Uloženo: V archivu autora (herbert.schwaha@aon.at).

<sup>97</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

## 2.4 Údaje o dokumentaci

- **Dokumentaci vypracovala:** Lucie Urbanová
- **Fotografie pořídila:** Lucie Urbanová, Jan Vojtěchovský
- **Použitá snímací technika:** Fujifilm X-T3 s objektivem XF 18-55mm f/2.8-4 R LM OIS, *Canon EOS 80D, Canon EOS 50D*
- **Počet stran textu dokumentace:** 38
- **Počet vyobrazení ve fotografické a obrazové dokumentaci:** 85
- **Počet vyobrazení v grafické dokumentaci:** 3
- **Počet obrazových příloh:** 1
- **Počet textových příloh:** 3
- **Místa uložení dokumentace ve fyzické a digitální podobě:**
  - Univerzita Pardubice, archiv Fakulty restaurování, Jiráskova 3, 570 01 Litomyšl
  - Osobní archiv autora

## 3 Průzkum díla

### 3.1 Metody průzkumu

#### ***Uměleckohistorický průzkum:***

- Vyhledání dostupných historických dokumentací, průzkumů a dobových podkladů o historickém vývoji objektu a díle.

#### ***Restaurátorský průzkum:***

- vizuální průzkum v rozptýleném denním světle;
- vizuální průzkum v ostrém bočním nasvícení;
- průzkum pomocí technické fotografie;
- perkusní průzkum (poklepem).

#### ***Přírodovědný (chemickotechnologický) průzkum:***

- Průzkum omítek, barevných vrstev a druhotných fixází (analýza pigmentů, analýza pojiv, popis stratigrafie barevných vrstev).

### 3.2 Uměleckohistorický průzkum

Cílem uměleckohistorického průzkumu bylo shrnout informace o historii objektu, jeho interiérové výmalbě a předchozích restaurátorských zásazích na ní provedených. Diskutován byl ikonografický význam malby s důrazem na rozeznání jednotlivých alegorických postav. V rámci uměleckohistorického průzkumu bylo dohledáno i několik analogických grafik a nástěnných maleb na podobné téma pro srovnání a lepší porozumění restaurovanému dílu.

#### 3.2.1 Stručná historie objektu a díla

Bývalý klášter augustiniánských kanovníků v Subenu byl založen již ve středověku. Komplex byl do dnešní podoby postaven v roce 1698, kdy byly starší již zchátralé klášterní budovy zbořeny; stavební práce pokračovaly až do 18. století.<sup>98</sup>

Klášterní kostel byl postaven v letech 1766-1770, stavitelem Simonem Freyem z Mnichova, a je dobrým příkladem bavorsko-rakouských staveb pozdního baroka. Freskovou výmalbu kostela vytvořil v roce 1768 tyrolský malíř Johann Jakob Zeiller (1708-1783) jak říká signatura “J. Jakob Zeiller / S.C.M / Acad. pict. / inven. et fecit 1768”, která se nachází přímo na malbě, na jižní straně klenby nad varhaní kruchtou (*Obr. 8 - odkazy na obrázky v rámci praktické části diplomové práce se odkazují na přílohu č. 4: Fotografická dokumentace*).

Po roce 1784, za vlády císaře Josefa II, byl klášter zrušen a komplex budov se stal majetkem státu. V roce 1809 byly budovy využívány jako vojenská nemocnice pro francouzské vojáky. O

---

<sup>98</sup> Kloster und Pfarrkirche Suben [online]. [cit. 23.1.2023] Dostupné z: [https://www.suben.at/Kloster\\_und\\_Pfarrkirche\\_Suben](https://www.suben.at/Kloster_und_Pfarrkirche_Suben).

rok později spadlo panství Suben do vlastnictví maršálu Carlu Philippu von Wredeovi, jako dar od císaře Napoleona. Od roku 1865 slouží bývalý klášter jako vězení.<sup>99</sup>

### 3.2.2 Popis klášterního kostela a maleb

Archeologický průzkum v letech 1969/70 prokázal,<sup>100</sup> že kostel nebyl postaven přesně na základech původního románského kostela, ale volně, s mnohem větším půdorysem. Interiér kostela je jednoduší, podélný sál s chórem kaplí a galerií. Kostel je barokní s bohatou štukovou a malířskou výzdobou.

Na stropě hlavní lodi najdeme směrem od západu k východu výjevy: *Obrácení svatého Augustina* (malba na západní klenbě nad varhany), *Glorifikace svatého Augustina* (malba ve středu hlavní lodi) a *Svatba beránkova*<sup>101</sup> (malba v presbytáři). Malba v presbytáři je výjimkou, jejím autorem není J. J. Zeiller, jak je tomu u zbylé výmalby kostela, ale malíř z Innsbrucku, Wolfram Köberl (1927-2020). Podle nalezené signatury pochází malba z roku 1953. Další malby se nachází na menších klenbách níž v kostele, blíže k pohledu diváka. Například freska pod varhanní kruchtou, která zobrazuje výjev z Nového zákona: *Vyhánění penězoměnců z chrámu*. Klenby bočních kaplí jsou zdobeny menšími freskami, které zobrazují anděly.<sup>102</sup>

### 3.2.3 Popis a vymezení části malby určené k provedení komplexního restaurátorského zásahu

Část vymezená pro komplexní restaurátorský zásah popsany v rámci této práce se nachází na západní klenbě s výjevem *Obrácení sv. Augustina*. Konkrétně v jihozápadní části klenby, kde je vyobrazena postava Augustina a alegorických postav neřestí od kterých se Augustin odvrací.

### 3.2.4 Ikonografie

Na západní klenbě se nachází výjev *Obrácení sv. Augustina*, jehož ústřední postavou je právě sv. Augustin, který sedí na skále pod fíkovníkem, u nohou mu leží rozečtená bible a jeho pohled směřuje k nebesům. Na nebesích nad sv. Augustinem se zjevuje Boží Moudrost (*Hagia Sofia*),<sup>103</sup> v ruce drží znak Boží Prozřetelnosti.<sup>104</sup> Postava je v obklopení andílků,<sup>105</sup> jeden z nich drží knihu, kde se píše *Tolle, lege* - “Vezmi a čti”.<sup>106</sup>

Nalevo, za sv. Augustinem je skupina postav, od které se Augustin odvrací. Jedná se o skupinu alegorických postav smrtelných hříchů. Těch bylo celkem sedm: Pýcha (*Superbia*), Obžerství (*Gula*), Smilstvo/Prostopášnost (*Luxuria*), Hněv (*Ira*), Závist (*Invidia*), Lakomství (*Avaritia*), Lenost (*Acedia*). V Augustinianových Vyznáních se konkrétně zmiňuje Hodování, Opilství,

---

<sup>99</sup> Kloster und Pfarrkirche Suben [online]. [cit. 23.1.2023] Dostupné z: [https://www.suben.at/Kloster\\_und\\_Pfarrkirche\\_Suben](https://www.suben.at/Kloster_und_Pfarrkirche_Suben).

<sup>100</sup> Kloster und Pfarrkirche Suben [online]. [cit. 23.1.2023] Dostupné z: [https://www.suben.at/Kloster\\_und\\_Pfarrkirche\\_Suben](https://www.suben.at/Kloster_und_Pfarrkirche_Suben).

<sup>101</sup> Zjevení Janovo 19 B21

<sup>102</sup> RIEDEL, Jörg. *Pfarrkirche (Ehem. Stiftskirche) Suben: Freskenausstattung Johann Jakob Zeiller von 1768 Wolfram Köberl von 1953*. Vídeň, 2022. Uloženo: V archivu autora (joergriedel@gmx.at).

<sup>103</sup> RIPA, Cesare, BUSCAROLI, Piero, ed. *Ikonologie*. Praha: Argo, 2019.

<sup>104</sup> MÁDL, Martin. *Sdělení o ikonografii postav výjevu Obrácení sv. Augustina na Západní klenbě kláštera v Subenu*. E-mailem 30.7. 2022.

<sup>105</sup> V ikonografii výjevu Obrácení sv. Augustina se často objevují andělci, kteří Augustina oslovují, v Augustinově Vyznání se ale píše, že uslyšel hlas hoča nebo dívky (kniha VIII, kap. 12).

<sup>106</sup> Tato známá scéna “Tolle, lege” je popsána v Augustinových Vyznáních (kniha VIII, kap. 12).

Smilstvo, Nestydatost, Svár a Závist.<sup>107</sup> Na popisovaném výjevu jsou zobrazeny tři z hříchů. Směrem zleva je to: Závist, Pýcha a Prostopášnost.

Postava nejvíce vlevo, alegorie Závisti, má hady místo vlasů, kouše do jazyka. Dalším jejím atributem na malbě je hořící pochodeň. Atributem alegorické postavy Závisti je i pes, který je bílý a nachází se na malbě vlevo.<sup>108</sup> Pes může symbolizovat i víru, ale protože na naší malbě se nachází v blízkosti postavy Závisti, je možné se klonit spíše k interpretaci běžné ve středověkém umění, kde je pes i symbolem závisti.<sup>109</sup>

Amor, pod postavou Závisti, s lukem a šípy v toulci odkazuje patrně k lásce, a to pozemské, neřestné. Má zavázané oči, to je také atributem Závisti, která je slepá, má zakalený úsudek, podobně jako pozemská láska.

Pýcha byla považovaná za pramen smrtelných hříchů, jejím atributem je páv. Na malbě se jedná o ženskou postavu uprostřed, objímající páva a padající hlavou dolů.

Ženská postava nejvíce vpravo má perly ve vlasech a na rukou. Jedná se pravděpodobně o alegorii Prostopášnosti. Atributem této neřesti je nahota, Na malbě je zobrazena s odhaleným ňadrem, jako krásná žena se šperky. Vedle ní leží koruna a žezlo, insignie světské moci

Výjev části restaurovaného úseku tedy můžeme chápat jako okamžik, kdy se Augustin obrací na víru a distancuje se (zleva) od Závisti, Pýchy a Prostopášnosti, zřídá se také pozemské lásky a světských statků (moci).<sup>110</sup>

### 3.2.5 Předlohy a analogie díla

Podobné nástěnné malby s motivy sv. Augustina se nachází i v dalších klášterních kostelech Augustiniánských kanovníků. Například ve Weyarnu v Horním Bavorsku, kde je bývalý klášterní kostel augustiniánů kanovníků, známý také jako kostel sv Petra a Pavla. V hlavní lodi se zde nachází nástropní malby Johanna Baptisty Zimmermanna z roku 1729. Konkrétně jde o vyobrazení tří stěžejních výjevů ze života svatého Augustina: Obrácení sv. Augustina, Založení řádu Augustiniánů a Sv. Augustin jako teolog.<sup>111</sup> Malba Obrácení sv. Augustina je podobná té na klenbě v Subenu, Augustin má červený plášť, sedí pod stromem, u nohou má rozečtenou bibli. Obrací pohled k nebesům, kde je nápis "Tolle Lege".<sup>112</sup> (*Obr.* 8)

---

<sup>107</sup> MÁDL, Martin. *Sdělení o ikonografii postav výjevu Obrácení sv. Augustina na Západní klenbě kláštera v Subenu*. E-mailem 30.7. 2022.

<sup>108</sup> HALL, James. *Slovník námětů a symbolů ve výtvarném umění*. Praha: Mladá fronta, 1991.

<sup>109</sup> HALL, James. *Slovník námětů a symbolů ve výtvarném umění*. Praha: Mladá fronta, 1991.

<sup>110</sup> ŠEFERISOVÁ LOUDOVÁ, Michaela. *Sdělení o ikonografii postav výjevu Obrácení sv. Augustina na Západní klenbě kláštera v Subenu*. E-mailem 7.11. 2022.

<sup>111</sup> Discover baroque art [online]. [cit. 23.1.2023] Dostupné z:

[https://baroqueart.museumwnf.org/database\\_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20](https://baroqueart.museumwnf.org/database_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20).

<sup>112</sup> Obrázek: Life and Work of St. Augustine and the Founding of the Monastery Weyarn: Vault of the Nave [online]. [cit. 30.1.2023] Dostupné z:

[https://baroqueart.museumwnf.org/database\\_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20](https://baroqueart.museumwnf.org/database_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20).



Analogickým výjevem k postavě Boží Moudrosti může být například vyobrazení v římském Palazzo Barberini od Andrea Sacchi.<sup>113</sup> Další vyobrazení Boží Moudrosti můžeme najít na rytině v knize *Historico-Topographica Descriptio*<sup>114</sup>

Bílého psa ve spojení se svatým Augustinem najdeme na obraze "Sv. Augustin ve své pracovně" jak jej namaloval Vittore Carpaccio.<sup>115</sup> Pes v tomto případě symbolizuje Augustinovu víru.<sup>116</sup> Podařilo se najít také analogickou rytinu René Boyvina z roku 1603 k postavě s pávem.<sup>117</sup> Rytina nese název "Volba mezi nebem a peklem", vlevo se na ní nachází alegorická postava Neřestí, jako žena zdobená šperky, sedící na pávu.

### 3.2.6 Předchozí restaurátorské zásahy a průzkumy

V letech 1902-04 byl interiér kostela renovován a fresky byly kompletně přemalovány vídeňským portrétistou Ludwigem Victorem Schmidtem, jak je vidět z černobílých fotografií z 50. let 20. století (*Obr. 4-5*). Kvalita přemalby neodpovídala Zeillerově freskové malbě, ačkoli náměty byly změněny jen minimálně. Při srovnávání historických fotografií před odstraněním přemalby se současným stavem si můžeme všimnout, že jak na dochovaných freskách nad varhany, tak na centrální fresce nedošlo k výrazným změnám kompozice, pouze na západní fresce byl ke stávajícímu vyobrazení přidán pes. Lze tedy předpokládat, že Zeillerův motiv a kompozice byly převzaty i do přemalby na nedochované fresce v presbytáři.

K další rozsáhlé rekonstrukci kostela došlo v letech 1951 až 1953. Tehdy byly kromě stavebních úprav restaurovány i nástěnné malby. Předběžné šetření provedl profesor Franz Walliser, který zjistil, že přemalby z let 1902-04 lze poměrně snadno odstranit, proto bylo rozhodnuto o celkovém odstranění přemalby.

Odstranění přemalby mezi lety 1951 a 1953 ale nebylo úplné, zejména v oblasti západní klenby.<sup>118</sup> Mnohem lepšího výsledku bylo dosaženo na prostřední fresce v hlavní lodi. Na menších freskách pod varhany a v bočních kaplích při současném zásahu nebyly žádné přemalby identifikovány. Vzhledem k tomu že neexistuje fotodokumentace před zásahem, není možné ověřit zda došlo k úplnému odstranění přemalby, nebo přemalované nebyly.

Freska v presbytáři byla také silně přemalovaná v mezi lety 1902-0194. Při odstraňování přemalby v letech 1951-1953 byl patrně zjištěn velmi špatná stav malby a omítky, proto bylo rozhodnuto malbu i s omítkou odstranit a nahradit kompozičně obdobnou malbou. Jejím autorem je innsbrucký malíř Wolfram Köberl, který fresku navrhl podle vlastních skic a

---

<sup>113</sup> SACCHI, Andrea [online]. [cit. 30.1.2023] Dostupné z:

<https://www.wga.hu/frames-e.html?/html/s/sacchi/barberin.html>.

<sup>114</sup> Bavarikon: objekte [online]. [cit. 5.6.2023] Dostupné z:

[https://www.bavarikon.de/object/bav:BSB-HSS-00000BSB00063023?fbclid=IwAR0GL0qxa\\_qf1dDj5Mk1H1N9c8F1JplHbwKjOrWpdyZd2sO5Z76GKS2RkU0](https://www.bavarikon.de/object/bav:BSB-HSS-00000BSB00063023?fbclid=IwAR0GL0qxa_qf1dDj5Mk1H1N9c8F1JplHbwKjOrWpdyZd2sO5Z76GKS2RkU0). (str. 7)

<sup>115</sup> St. Augustine in His Study (Carpaccio)[online]. [cit. 30.1.2023] Dostupné z:

[https://en.wikipedia.org/wiki/St.\\_Augustine\\_in\\_His\\_Study\\_\(Carpaccio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/St._Augustine_in_His_Study_(Carpaccio)).

<sup>116</sup> HALL, James. *Slovník námětů a symbolů ve výtvarném umění*. Praha: Mladá fronta, 1991.

<sup>117</sup> Bavarikon: objekte [online]. [cit. 5.6.2023] Dostupné z:

<https://www.bavarikon.de/object/bav:KVC-LUT-0000000000035320?lang=de>.

<sup>118</sup> Konkrétně to dokládají UV fluorescenční fotografie (viz příloha č. 4: *Fotografická dokumentace*), kde jsou patrně menší i větší zbytky přemalby. Lokalizace zbytků přemalby byla zaznamenána i v rámci grafické dokumentace západní klenby. (viz příloha č. 5: *Grafická dokumentace*).

zakomponoval do ní motivy ze staršího malířského fondu, jak ukazuje srovnání malby s dochovanou černobílou fotografií staršího originálu (ve stavu přemalby). Autorství dokládá Köberlova signatura v jihovýchodním cípu klenby “WOLFRAM KÖBERL / INV & PINX: AO: 1953”.

### 3.3 Restaurátorský průzkum

Tato kapitola shrnuje informace získané z průzkumů a analýz. Restaurátorské průzkumy z let 2007-2020 od autorů Christiana Wollera<sup>119</sup>, Christoha Serentschy<sup>120</sup> a Herberta Schwaha<sup>121</sup>, byly doplněny o chemicko-technologický průzkum Roberta Linke.<sup>122</sup> Cílem průzkumu bylo nejen zkoumání stavu barokní malby a její originální malířské techniky. Průzkum byl zaměřen i na odlišení přemalby z jednotlivých druhotných zásahů, poškození malby a jejich příčiny. Především šlo ale o analýzu vrstvy fixáže a nalezení metod k jejímu odstranění.

Malby byly zkoumány v rozptýleném denním světle, v ostrém bočním nasvícení a v UV záření. Byl proveden perkusní průzkum a odběr vzorku pro chemickotechnologickou analýzu,<sup>123</sup> která je popsána v kapitole 3.4 *Přírodovědný (chemicko-technologický) průzkum*.

#### 3.3.1 Vizuelní průzkum v rozptýleném denním světle

V rámci vizuelního průzkumu byla zkoumána restaurovaná vrstva malby a její technika. Byly pozorovány druhotné zásahy v podobě tmelů a retuší. Prozkoumána byla také poškození patrná v rozptýleném denním světle.

Malby byly provedeny technikou fresky, nasvědčuje tomu přítomnost denních dílů. Denní díly byly rozvrženy pomocí sinopie na podkladové omítce (arriccio), kousek sinopie byl odhalen v defektu omítky na jižním okraji centrální fresky (*Obr. 11*). Povrch omítky je poměrně zrnitý, zrna písků byla pravděpodobně vytažena filcováním po nanesení omítky.<sup>124</sup> Jednotlivé denní díly byly mezi sebou většinou dobře napojeny, takže hranice omítek nejsou lehce viditelné, někdy nejsou zřetelné ani v bočním nasvícení. Rozeznatelné denní díly jsou zaznamenány v *příloze č. 5: Grafická dokumentace*. Odhadujeme, že jednotlivé denní díly dosahovaly velikosti až 10 m<sup>2</sup>, což není ve freskové malbě konce 18. století nic neobvyklého,<sup>125</sup> zvláště když příslušné malířské úseky tvoří plochy s malým počtem figur, jako jsou zobrazení částí oblohy nebo krajiny. Průzkum v rozptýleném světle pomohl odhalit i některé matné, druhotné retuše provedené ve formě nepravidelných teček v oblasti spodní části zeleně.

---

<sup>119</sup> WOLLER, Christian. *Bestandsaufnahme/Zustandsuntersuchung der Pfarrkirche Suben, OÖ*. Wien, 2018. Uloženo: Památkový ústav ve Vídni.

<sup>120</sup> SERENTSCHY, Christoph. *Suben ehem. Stiftskirche Fresko, Stuck, Stuckmarmor: Untersuchungsbericht, Fotodokumentation*. Neukirchen, 2007. Uloženo: V archivu autora ([christoph@serentschy.com](mailto:christoph@serentschy.com)).

<sup>121</sup> SCHWAHA, Herbert. *Untersuchungsbericht, Ehemalige Stiftskirche Suben: Wände/Stuck/Wandmalerei*. Vorchdorf, 2020. Uloženo: V archivu autora ([herbert.schwaha@aon.at](mailto:herbert.schwaha@aon.at)).

<sup>122</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

<sup>123</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

<sup>124</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

<sup>125</sup> MÁDL, M. et al. *Benediktini: barokní nástěnná malba v českých zemích*. Praha: Academia, 2016.

Právě spodní část zeleně vykazovala nejhorší stav, co se týče povrchu malby, který byl značně degradovaný. V oblasti zeleně se nacházela i větší trhlina a nevyhovující tmel. Po celé ploše malby byly zřetelné i primární vlasové praskliny zvýrazněné tmavými depozity. Přesná lokalizace stavu poškození je vyznačena v grafickém zákresu (viz příloha č. 5: *Grafická dokumentace*).

### 3.3.2. Vizuální průzkum v ostrém bočním nasvícení

Při vizuálním průzkumu v ostrém bočním nasvícení byla dobře rozeznatelná Zeillerova malířská technika, která je většinou velmi pastózní a dala by se označit za vápennou fresku. Zdá se, že s výjimkou tmavých, čistých tónů, byly všechny odstíny míchány s vápnem. Silně *impastový* nános barvy občas vedl i ke krakelování malířské vrstvy (*Obr. 12*).

Dobře viditelné byly také praskliny na rukou a v obličeji alegorie Prostopášnosti, menší defekty a trhliny v pravé části malby. Zvýrazněna byla i struktura a nedokonalosti druhotných tmelů.

V ostrém bočním nasvícení povrchu maleb došlo ke zčítelnění ryté rozkresby provedené do čerstvé omítky. Přenesení návrhu bylo pravděpodobně provedeno pomocí kartonů do čerstvé omítky. Domníváme se tak z důvodu, že některé části ryté kresby jsou velmi detailně a precizně provedené, navíc se hranice rytých linií zdají oblé a linie jemné, to by odpovídalo protlačování přímo přes karton (*Obr. 9*). Naopak u některých geometrických prvků malby byla rytá kresba nejspíše provedena přímo na omítku pravítkem nebo kružítkem, tyto části ryté kresby mají značně ostřejší okraje, to by odpovídalo použití rydla a pravítka přímo na omítce.

### 3.3.3 Průzkum v UV světle a pomocí technické fotografie

Průzkum maleb neinvazivní metodou pomocí UV fluorescenčních fotografií, na kterých je zachyceno emitování UV záření do oblasti viditelného světla, umožňuje v porovnání s denním světlem přesnější identifikaci sekundárních zásahů (přemaleb), specificky luminujících pigmentů, pojiv, či dalších vlivů (např. mikrobiologického napadení). Průzkum byl proveden pomocí dvou UV lamp *UVA SPOT 400T* značky *Hönle UV Technology*, jež produkuje záření o vlnové délce mezi 315–400 nm. Technické fotografie pořídil Jan Vojtěchovský.

V UV záření bylo možné pozorovat nafialovělou fluorescenci celé plochy malby, pravděpodobně způsobenou obsahem vápenných složek (*Obr. 24*). Intenzita nafialovělé fluorescence se lišila podle odstínů malby. Světlé úseky luminovaly světle fialově s nádechem do zelena, zatímco u tmavších částí malby byla luminiscence tmavě fialová.

Nejvýraznější žlutozelenou fluorescencí zářily zbytky přemaleb ze zásahu v letech 1902-04 (*Obr. 25*). Intenzita luminiscence se i tady liší podle barevného tónu konkrétního místa, pohybuje se od šedozelených tónů (draperie vlevo na hrudi alegorie Prostopášnosti), až po bíložlutou (v oblasti perel v jejích vlasech). Nejvíce přemaleb bylo rozpoznáno v oblastech draperie, menší plochy pak na inkarnátech rukou, hrudi i obličeje, malé tečky přemaleb se objevily i na perlovém náramku, perlách, ozdobách vlasů a broži pláště. Přemalba byla pravděpodobně provedena za použití zinkové běloby, která je známá právě svou zelenožlutou luminiscencí.

Další žlutozelená luminiscence se objevila i na balvanu v úseku zeleně pod hlavou postavy Prostopášnosti. Domníváme se, že se jedná o retuš provedenou při zásahu z let 1951-53, která

se v rozptýleném denním světle jeví více matná než originál a je nanášena v nepravidelných tečkách. I tato retuš byla pravděpodobně provedena za použití zinkové běloby, která vykazuje stejnou zelenožlutou luminiscenci (*Obr. 26*). Tato retuš je na rozdíl od starších přemalbě snadněji rozeznatelná a vyskytuje se především ve spodních částech zeleně, které byly poškozené v důsledku zatékání, ještě předtím, než došlo k jejich přemalbě, částečně pravděpodobně k poškození znovu přispělo i snímání přemalbě během zásahu v letech 1951-53 proto byla místa následně v rámci stejného zásahu znovu vyretušována.<sup>126</sup>

Malby byly zkoumány i pomocí technické fotografie, k záznamu byl použit modifikovaný DSLR fotoaparát Canon EOS 80D s objektivem EF 40 mm f/2.8 STM, který je schopen zaznamenat záření přibližně v rozmezí 360–1100 nm. Fotografie ve viditelném spektru (VIS) a (UVF) byly snímány s filtry MaxMax XNite CC1 + Astronomik L3 UV-IR block s přibližným rozsahem propustnosti vlnových délek záření 420–680 nm. Ultrafialová reflektografie (UVR) byla snímána za použití filtru Baader U Filter 80%T 350 nm a infračervená reflektografie (IRR) s filtrem MaxMax XNite 1000  $\geq$  90%T 1 300 nm. Snímky v běžném viditelném světle a infračervené reflektografie byly nasvíceny pomocí dvou halogenových světel o výkonu 300 W. Ultrafialové techniky byly pořízeny za pomoci dvou UV lamp UVA SPOT 400T značky Hönle UV Technology se zářením o vlnové délce 315–400 nm. Snímky ve viditelném spektru a reflektografie byly normalizovány podle kalibračního cíle X-Rite ColorChecker. U UV fluorescenčních snímků byla následně softwarově vyvážena bílá na 10 000 K s odstínem 40. Tzv. falešné barvy reflektografických snímků (IRRFC a UVRFC) byly softwarově zpracovány smícháním RGB kanálů z viditelných snímků a reflektografií. Podobně byla softwarově upravena do falešných barev ultrafialová fluorescence (UVFFC), kdy modrý kanál v RGB nahradila ultrafialová reflektografie (UVR).

Srovnávání všech typů technické fotografie nám umožňuje ještě detailněji určit části přemalbě od originálu. V UVF se přemalby jeví zelenožlutě, ale v UVFFC vidíme ty stejné přemalby červeně, naopak žlutě a žlutozeleně se projevuje další část přemalbě, která v UVF nebyla patrná. Stejný, větší rozsah přemalbě potvrzuje i fotografie v UVR. (*Obr.24-26*)

### 3.3.4 Perkusní průzkum (poklepem)

Pomocí poklepu bylo zjištěno několik dutin, které se nacházejí pod povrchem malby. Hlavní oblast dutin byla objevena podél praskliny v pravé části malby (*viz příloha č. 5: Grafická dokumentace*).

---

<sup>126</sup> SCHWAHA, Herbert. Untersuchungsbericht, Ehemalige Stiftskirche Suben: Wände/Stuck/Wandmalerei. Vorchdorf, 2020. Uloženo: V archivu autora ([herbert.schwaha@aon.at](mailto:herbert.schwaha@aon.at)).

### 3.4 Přírodovědný (chemicko-technologický) průzkum

V roce 2022 proběhl chemicko-technologický průzkum. Vyhodnocení provedl Dr. R. Linke.<sup>127</sup> (viz Příloha č.1)

#### 3.4.1 Konkrétní cíle průzkumu

Chemicko-technologický průzkum byl proveden s cílem prozkoumat složení souvrství barevných vrstev a především k identifikaci vrstvy fixáže na povrchu malby. Ze západní klenby byl odebrán 1 vzorek (viz Příloha č.6).

- Vzorek 463/22 byl odebrán ze západní klenby: oblast nebe.

#### 3.4.2 Výsledky chemicko-technologického průzkumu

V rámci chemicko-technologického průzkumu bylo k analýze vzorku použito několik metod: optická mikroskopie nábrusů v dopadajícím viditelném modrém, v UV světle, SEM mikroskopie a analýza průhledné svrchní vrstvy s hlavní složkou Si v rentgenovém spektru. Vzorek 463/22 byl odebrán z nástropní malby nad varhany (západní klenba), z oblasti nebe.

Z výsledků chemicko-technologického průzkumu vyplývá, že:

- Ve spodní vrstvě vzorku se nachází světlá vápenná omítka se zrny písku o velikosti cca do 300  $\mu\text{m}$ . Jsou zde patrné malé trhliny, které snad mohly vzniknout při smrštění během vysychání omítky, způsobené nedostatkem částic plniva.<sup>128</sup>
- V následující vrstvě je poměrně silně nanesená (tloušťka asi 100  $\mu\text{m}$ ), světle červená vápenná malba s červeným okrem vázaným vápnem (vápenné fresco). Na rozhraní s předchozí vrstvou dochází k prolnutí vrstev do sebe, do hloubky přibližně 50  $\mu\text{m}$ , což je typické pro techniku fresco.
- Na povrchu je asi 5  $\mu\text{m}$  tlustá sklovitá průhledná svrchní vrstva, která obsahuje především křemík (Si) a stopové prvky draslík a vápník (K, Ca). Analýza potvrzuje, že se jedná o nátěr vodního skla, který byl pravděpodobně nanesen v rámci předchozího restaurátorského zásahu jako konsolidace barevné vrstvy. Průhledná vrstva je velmi tvrdá a křehká.
- Na několika místech vzorku se objevila ještě jedna vrstva nanesená na nátěru vodního skla, pravděpodobně jde o formu dodatečné retuše.
- Pigmenty odpovídají těm, které se běžně používaly v barokní freskové malbě: smaltová modř, umbra, siena, žlutý a červený okr, rumělka, caput mortuum, zelená hlinka, vápno (použité jako běloba).

---

<sup>127</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

<sup>128</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

## 3.5 Komplexní vyhodnocení průzkumu

### 3.5.1 Popis objektu a díla

Předmětem komplexního restaurátorského průzkumu v této práci je Farní kostel sv. Lamberta v Subenu (bývalý augustiniánský klášterní kostel), konkrétně nástěnná malba na západní klenbě s motivem "Obrácení svatého Augustina". V minulosti bylo na v kostele sv. Lamberta provedeno už několik restaurátorských průzkumů, v rámci této dokumentace byl proveden další rozšiřující průzkum.<sup>129</sup>

Klášterní kostel byl postaven v letech 1766-1770, stavitelem Simonem Freyem z Mnichova. Freskovou výmalbu kostela vytvořil v roce 1768 tyrolský malíř Johann Jakob Zeiller (1708-1783).<sup>130</sup> Interiér kostela má jednodlnou podobu podélného sálu s chórem kaplí a galerií.

Na západní klenbě se nachází výjev *Obrácení sv. Augustina*. Úsek malby, kterému se tato dokumentace věnuje především zahrnuje právě postavu sv. Augustina a skupinu alegorických postav, od kterých se Augustin odvrací. Jedná se o tři z neřestí. Směrem zleva je to: Závist, Pýcha a Prostopášnost.

### 3.5.2 Původní technika

Jádrová omítka (*arriccio*) byla nanášena na cihlové zdivo, v místě defektu byla na této vrstvě omítky pozorována rozkresba *sinopie*. Svrchní omítka (*intonaco*) má tloušťku jen několik milimetrů a byla nanášena postupně v denních dílech, které jsou patrné při bočním nasvícení, stejně jako rytá kresba. (viz příloha č. 5: *Grafická dokumentace*). Grafický zákres denních dílů vypovídá o malířových schopnostech pojednat za den plochu až 10 m<sup>2</sup>. Pomocí ryté kresby bylo rozvrženo celé dílo, a to za použití kartonů o velikosti jedna ku jedné. Povrch omítky je poměrně zrnitý, pravděpodobně filcovaný.<sup>131</sup> Chemicko-technologický průzkum potvrdil, že malba byla započata do vlhké omítky *al fresco*, ale zároveň indikoval, že by se mohlo jednat o vápenné *fresco*, nebo *fresco-secco*. Na vzorku byla na několika místech vidět tenká hranice mezi omítkou a barevnou vrstvou, to pravděpodobně znamená, že malíř v těchto místech nepracoval *al fresco*, ale barvy pojil pomocí vápenné kaše. Tomu odpovídá i pastózní charakter malby, který je patrný v oblasti figur kde tlustá vrstva barvy až zastírá viditelnost denních dílů a ryté kresby. Pigmenty odpovídají těm, které se běžně používaly v barokní freskové malbě: smaltová modř, umbra, siena, žlutý a červený okr, rumělka, caput mortuum, zelená hlinka, vápno (použité jako běloba).

---

<sup>129</sup> 2007 Restaurátorský průzkum Christopa Serentschy, 2018 restaurátorský průzkum Christiana Wollera, 2020 restaurátorský průzkum Mag. Akad. restaurátora Herberta Schwaha. Konkrétněji jsou zmíněny v kapitole *Úvodní údaje*.

<sup>130</sup> Kloster und Pfarrkirche Suben [online]. [cit. 23.1.2023] Dostupné z: [https://www.suben.at/Kloster\\_und\\_Pfarrkirche\\_Suben](https://www.suben.at/Kloster_und_Pfarrkirche_Suben).

<sup>131</sup> LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.

### 3.5.3 Předchozí zásahy a stručná historie díla

V letech 1902-04 byl interiér kostela renovován a fresky byly kompletně přemalovány vídeňským portrétistou Ludwigem Victorem Schmidtem, jak je vidět z černobílých fotografií z 50. let 20. století. Kvalita přemalby neodpovídala Zeillerově freskové malbě, ačkoli náměty byly změněny jen minimálně. Na západní fresce byl ke stávajícímu vyobrazení přidán pes. (Obr. 4)

K další rozsáhlé rekonstrukci kostela došlo v letech 1951 až 1953. Tehdy byly kromě stavebních úprav restaurovány i nástěnné malby. Bylo zjištěno, že přemalby z let 1902-04 jsou vodorozpustné, lehko odstranitelné, a bylo rozhodnuto o jejich odstranění a nahrazení nejvíce zničené malby na východní klenbě novou freskou. V letech 2007, 2018 a 2020 byla provedena řada průzkumů, jako příprava na restaurování v roce 2022. Z průzkumu v rámci našeho restaurátorského zásahu vyplynulo, že odstranění přemalby mezi lety 1951 a 1953 nebylo úplné, zejména v oblasti západní klenby. Konkrétně to dokládají UV fluorescenční fotografie (viz příloha č. 4: *Fotografická dokumentace*). Snímky technické fotografie od sebe dokázaly vzájemně odlišit přemalby a retuše z předchozích zásahů a odhalily jejich rozsah. Retuše provedené v 50. letech měly spíše vápenný charakter na rozdíl od přemalby z první etapy, kdy autor pracoval nejspíše s organickými pojivy (klij). Lokalizace zbytků přemalby byla zaznamenána i v rámci grafické dokumentace západní klenby (viz příloha č. 5: *Grafická dokumentace*). Malba na západní klenbě včetně neodstraněných zbytků přemalby byla během zásahu v 50. letech zafixována vrstvou draselného vodního skla (prokázáno analýzou vzorku viz kapitola 3.4.2 *Výsledky chemicko-technologického průzkumu*). Právě vrstva fixáže představovala největší výzvu pro náš restaurátorský zásah.

### 3.5.4 Stav díla a jeho příčiny

Na základě vizuálního průzkumu byla odhalena výrazná trhlina v pravé části restaurovaného úseku, kde perkusní průzkum odhalil i dutinu. Po celé ploše omítky se nacházely i menší primární praskliny, které vznikly už při vysychání originální omítky. U tohoto typu prasklin je otázkou, zda se jedná o poškození, nebo zda je řadit k původní technice. V tomto případě je ale jejich vzhled rušivý, protože praskliny působí jako velmi tmavé v důsledku usazených nečistot. V pravé části výjevu bylo nalezeno několik tmelů s nevyhovující strukturou a na stejném místě podél trhliny byly při perkusním průzkumu odhaleny malé dutiny. Průzkum v rozptýleném světle pomohl odhalit i některé matné, druhotné retuše provedené ve formě nepravidelných teček v oblasti spodní části zeleně. Na povrchu malby byl zřetelný nepravidelný lesk, způsobený fixáží draselným vodním sklem. UV fluorescenční fotografie dokázaly (viz příloha 4: *Fotografická dokumentace*), že v oblasti celé této klenby nebyly úplně odstraněny přemalby, které se nacházejí pod vrstvou fixáže. Lokalizace zbytků přemalby byla zaznamenána i v rámci grafické dokumentace západní klenby (viz příloha č. 5: *Grafická dokumentace*).

## 4 Zkoušky technologií a materiálu

### 4.1 Cíle provedených zkoušek

Zkoušky čištění měly tři cíle. Suché čištění bylo testováno za úkolem odstranění prachového depozitu a tmavých usazenin ve vlasových trhlinách. Mokrý čištění bylo testováno za účelem odstranění druhotných retuší v oblasti zeleně. Nejrozsáhlejší zkoušky byly provedeny za účelem odstranění fixáže a přemalby pod ní. Bylo zapotřebí najít metodu, která nijak nepoškodí původní malbu, ale sejme vrstvu vodního skla i nevyhovující přemalby. Na malbě bylo vymezeno několik okrajových míst pro zkoušky, kde bylo testováno několik metod čištění pomocí vody a chemických rozpouštědel různé polarity: voda, ethanol, isopropanol, aceton, methylethylen, ethylacetát, methoxypropanol, xylol a Abbeizer Extrem v carbopolovém gelu.

Zkoušky byly provedeny předtím, než byla vydána finální zpráva o analýze průhledné vrstvy pomocí odebraného vzorku. Měly proto sloužit k zevrubnému určení druhu fixáže, potvrzení či vyvrácení, zda se jedná o vodní sklo.

#### **Zkoušky čištění**

- Suché čištění
  - Houba Akapad
  - Skelné vlákno
- Mokrý čištění
  - Voda
- Odstranění fixážní/lakové vrstvy
  - Uhličitan amonný (Nasycený roztok ve vodě 13,1 mol/l)
  - Čištění pomocí parního generátoru VP MAXI
  - Čistící štětce
  - Ethanol
  - Isopropanol
  - Aceton
  - Methylethylketon
  - Ethylacetát (Ester ethanolu kyseliny octové)
  - Methoxypropanol (DOWANOL)
  - Xylol (Xylen)
  - Abbeizer Extrem (Carbopolový gel)



#### 4.1.1 Lokalizace provedených zkoušek

Zkoušky byly provedeny na různých místech nástěnné malby, nejdříve v oblasti oblohy na východní části západní klenby, která vykazovala vysoký lesk, pravděpodobně kvůli výrazné vrstvě vodního skla (*Obr: 32*). Pro srovnání byly vybrané zkoušky zopakovány v severní části klenby, v oblasti s nižším leskem a pravděpodobně i tenčí vrstvou fixace.

#### 4.1.2 Výsledky zkoušek a vybraný postup

Pomocí suchého čištění houbou Akapad bylo možné odstranit prachový depozit. Vlasové trhliny byly od tmavých usazenin čištěny skelným vláknem.

Druhotné retuše v oblasti zeleně se ukázaly jako vodorozpustné a bylo je možné redukovat vodou navlhčenou houbičkou.

Nejrozsáhlejší byly zkoušky odstranění fixáže. Vzorky rozpouštědel byly nanášeny na předem určené oblasti malby vatovými tampony za různé míry mechanického namáhání povrchu. Částečný účinek mělo použití nasyceného roztoku uhličitanu amonného v kombinaci s mechanickým namáháním povrchu štětcem. Jako nejefektivnější řešení k čištění vrstvy fixáže se ukázalo čištění pomocí parního čističe. Proto byl zvolen následující postup s několika kroky pro dosažení nejlepší účinnosti. Nejprve bylo provedeno naměkčení povrchu fixáže pomocí buničinového zábalu s uhličitanem amonným. Následně bylo čištěno precizně pomocí parního čističe. U části s nejsilnější vrstvou vodního skla bylo parní čištění střídáno s čištěním štětcem s roztokem uhličitanu amonného ve více krocích. Odstranění znečištěného nátěru vodního skla mělo za následek rozjasnění barev. Přemalby pod vrstvou fixáže byly vodorozpustné a podařilo se je také odstranit pomocí parního čističe. Tím se podařilo odhalit původní modelaci draperií, svalů a dalších detailů originální malby.

## 5 Návrh restaurátorského zákroku

### 5.1 Návrh koncepce restaurování

Koncepce restaurování byla navržena na základě poznatků zjištěných při restaurátorském průzkýmých průzkumech z let 2007, 2018 a 2020, byla konzultována s vlastníkem objektu a se zástupci složek památkové péče. Po konzultaci byla navržena koncepce restaurování maleb. Zásadní rozhodnutí týkající se míry čištění bylo provedeno na základě čistících sond, které odhalily, že pod zafixovanou druhotnou přemalbou je velmi dobře dochován Zeilerův originál. Proto bylo odsouhlaseno provedení rozsáhlého čištění přemaleb v oblasti figur. Bylo rozhodnuto o odstranění esteticky nevyhovujících tmelů a lokálním odstranění příliš výrazných retuší předchozího restaurátorského zásahu. Dále bylo určeno, že po odstranění tmelů a retuší proběhne na degradované původní omítce konsolidace a defekty budou vytmeleny tak aby strukturou odpovídaly původní omítce. Bylo odsouhlaseno, že plochy vytmelených defektů budou sjednoceny nápodobivou retuší bez zásahu do originální malby.

## 5.2 Návrh postupu restaurátorských prací

Postup restaurátorských prací na úseku malby, který byl vymezen k restaurování, vytvořený na základě poznatků z provedeného průzkumu a zkoušek.

- Suché čištění pomocí čistící houby Akapad.
- Mokrý čištění nasyceným roztokem uhličitanu amonného. (v oblasti figur)
- Čištění parním čističem.
- Odstranění a nahrazení druhotných tmelů, které nevyhovují esteticky nebo nejsou stabilní (skalpel).
- Hloubková konsolidace dutin a trhlin (injektační směsí na bázi hydraulického vápna).
- Tmelení defektů a prasklin v omítkové vrstvě.
- Retuš provedená akvarelovými barvami.
- Dokumentace restaurátorského zásahu.

## 6 Dokumentace restaurátorského zásahu

### 6.1 Postup restaurátorských prací

#### 6.1.1 Čištění

Suché čištění proběhlo na celé klenbě v oblasti zeleně, pomocí tvrdé čistící houby Akapad. Touto metodou byla malba očištěna od prachu a volných depozitů (zpráškovatělá retuš). Tmavé primární praskliny v omítce, byly kromě čištění houbou Akapad čištěny také pomocí skelného vlákna, jen do takové míry, aby byla narušena výrazná kontinuální tmavá linka prasklin. Mokrý čištění bylo provedeno pomocí čistících štětců a nasyceného roztoku uhličitanu amonného v oblasti oblohy a figur. Tímto způsobem bylo možné odstranit další nečistoty propojené s vrstvou fixáže vodním sklem. Čištění parním čističem proběhlo ve dvou krocích. Nejprve bylo provedeno naměkčení povrchu s vodním sklem pomocí buničínového zábalu s uhličitanem amonným. Následně bylo čištěno precizně pomocí parního čističe. Čištěno bylo v oblastech figur, v místech kde byly při průzkumu v UV světle na draperiích a inkarnátu figur objeveny přemalby, tak aby byla narušena vrstva fixáže a sejmuty nevyhovující přemalby.

#### 6.1.2 Odstranění tmelů

Nevyhovující tmely v defektech původní historické omítky byly odstraněny mechanicky skalpelem. V průběhu odstraňování tmelů bylo rozhodnuto, že tmely které měly vyhovující povrch (nepřesahovaly přes úroveň okolní omítky a měly odpovídající strukturu) mohou být zanechány jako vzorek předchozího restaurátorského zásahu.

### 6.1.3 Injektáž

Hloubková konsolidace tj, zpevnění dutin a trhlin v omítce a mezi omítkou a zdivem. Dutiny byly vyčištěny od uvolněných částic proudem vzduchu, poté byly propláchnuty vodou. Samotné vyplnění dutin bylo provedeno komerční injektážní směsí na bázi hydraulického vápna *Ledan DI*. Injektážní směs byla aplikována do dutin pomocí injekční stříkačky. Dutiny a trhliny ve struktuře omítky se vyskytovaly jen podél praskliny v pravé části (*viz příloha č. 5: Grafická dokumentace*).

### 6.1.4 Tmelení

Defekty byly navlhčeny vodou a předzpevněny vápenným mlékem naneseným štětcem, na povrch byl nanesen tmel. Podle toho, do jaké hloubky poškození zasahovalo, bylo při nanášení tmelu použito jedné až dvou vrstev malty. Po zavadnutí byl povrch tmelu upraven houbičkou, byly očištěny okraje a jemně zvýrazněna zrnitost tmelu, tak aby co nejvíce odpovídal originální omítce. Drobné vlasové trhliny byly tmeleny pomocí jemného pačoku, kde byla jako plnivo použita mramorová moučka.

#### **Receptura malty**

- 2 dílu (obj.) přesátého písku ( $\varnothing$  zrn 0-2 mm)
- 1 dílu (obj.) vápenné kaše (bílé vzdušné vápno)

#### **Receptura pačoku**

- 1 dílu (obj.) mramorové moučky
- 1 dílu (obj.) vápenné kaše (bílé vzdušné vápno)

### 6.1.5 Retuše

Míra retuší byla předem konzultována s vlastníkem a složkami památkové péče. Bylo rozhodnuto, že se bude postupovat tak, aby retuše znamenaly co nejmenší zásah do originální malby, zároveň tak, aby byla zajištěna snadná reverzibilita retuší. Proto byly plochy pro retuš vymezeny pouze na nepůvodních podkladech nových tmelů. Cílem retuší bylo zcelit plochu malby lokální retuší. Malé tmely defektů a prasklin byly vyretušovány do stejného barevného tónu jako okolí tmelu, ale zároveň s mírně světlejší barevnou intenzitou.

Retuš byla provedena akvarelovými barvami v tubách. Tyto barvy jsou reverzibilní s nízkou pravděpodobností biologického napadení. Dokumentace výsledné retuše se nachází v kapitole 9 (*viz kapitola 9 Fotodokumentace*).

## 6.2 Použité materiály a přístroje

### **Zkoušky čištění**

- Ethanol
- Isopropanol
- Aceton
- Methylethylketon
- Ethylacetát (Ester ethanolu kyseliny octové)
- Methoxypropanol (DOWANOL)
- Xylol (Xylen)
- Abbeizer Extrem (Carbopolový gel)

### **Čištění, odstranění druhotných tmelů**

- Skalpel čepelkový, skalpel pevný
- Restaurátorské kladívko
- Čistící polyuretanová houba Akapad (distributor: Deffner&Johann)
- Čistící houba Blitz-Fix z vulkanizovaného latexu (výrobce: Aachemie Albert Kauderer GmbH)
- Uhlíčitan amonný: nasycený roztok ve vodě (výrobce: W. Neuber's Enkel GmbH. GROSS DROGERIE)
- Parní generátor VP MAXI (výrobce: LARIDENT srl )
- Čistící štětce
- Skelná vlákna
- Arbocel BC 200 (buničina)

### **Strukturální konsolidace - Injektáž**

- Ledan D1 – injektážní prostředek na bázi hydraulického vápna (výrobce: Tecno Edile Toscana)
- Konopná koudel
- Silikonové hadičky

### **Tmelení a podkladový nátěr**

- Kopaný křemičitý písek
- Bílé vzdušné vápno – vápenný hydrát naložený ve vodě na vápennou kaši

### **Retuše**

- Akvarelové barvy v tubách (výrobce: H. Schmincke & Co. GmbH & Co.KG)

## **6.3 Doporučený režim památky**

Aby bylo možné udržet dobrý stav místnosti, maleb a retuší, byla doporučena následující opatření. Monitorovat stav trhlin na klenbě. Udržovat co nejvíce stálou teplotu a vlhkost v kostele, tak aby nedocházelo ke kondenzaci vody na malbách. Důležité je preventivně chránit malby před zatékáním pravidelnými kontrolami střechy. Doporučujeme provést revizi pod odborným dohledem restaurátora, každých pět let. Zvažované změny, které se jakkoli dotýkají restaurovaného díla je nutné konzultovat s odborníky památkové péče.

## 7. Závěr

Tato dokumentace popisuje umělecko-historický a restaurátorský průzkum, také komplexní zákrok provedený na úseku figurální malby na západní klenbě Farního kostela sv. Lamberta v Subenu. Na klenbě je vyobrazen výjev Obrácení Sv. Augustina, který namaloval Johann Jakob Zeiller roku 1768.

Tato práce se zabývá částí malby s alegorií Prostopášnosti. Umělecko-historickému průzkumu předcházelo nashromáždění a rešerše písemných a obrazových podkladů k tématu. Restaurátorský průzkum hodnotí stav předchozích restaurátorských zásahů a celkového stavu malby. Na základě průzkumu byla stanovena míra dochování originálu, míra přemaleb a byla určena původní technika malby.

V rámci samotného restaurátorského zásahu bylo provedeno rozsáhlé čištění přemaleb.. Odstranění znečištěného nátěru vodního skla mělo za následek rozjasnění barev a odstranění zbytků přemaleb odhalilo původní modelaci draperií, svalů a dalších detailů originální malby. Nevhodné druhotné tmely byly nahrazeny, praskliny byly vytmeleny, proběhlo hloubkové zpevnění omítky. Byla provedena retuš v oblasti tmelů, tak aby nijak nezasáhla do originální malby a byla jednoduše reverzibilní. Restaurátorský průzkum a zásah je zdokumentován v obrazové a grafické příloze (*viz příloha č. 4:Fotografická dokumentace, 5:Grafická dokumentace*).

## V. Závěr

V rámci diplomové práce na téma *vliv skladování páleného vápna na jeho vlastnosti; restaurování části nástěnné malby Obrácení sv. Augustina v Subenu v Rakousku* byla vypracována teoretická a praktická část. V rámci teoretické části byl proveden experiment, který se opíral o rešerši k tématu vlivu podmínek na složení a vlastnosti páleného vápna. V rámci experimentu byly vzorky páleného vápna exponovány ve čtyřech různých prostředích, které se lišily přístupností vzduchu. V průběhu skladování byly změny složení a vlastností páleného vápna popsány díky měření několika vybraných vlastností. Sledován byl hmotnostní nárůst vzorků v průběhu expozice, ve vybraných časech byl proveden test reaktivity, doplněný o analýzu nehasitelného podílu. Fázová analýza vzorků páleného vápna v různých časech expozice byla zjišťována pomocí simultánní termické analýzy (TG-STD, DSC), mikrostrukturní vlastnosti vzorků byly studovány pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM). *Při hodnocení výsledků experimentu byly všechny metody testování vzájemně porovnány a diskutovány.* V závěru práce byly zodpovězeny otázky položené v zadání práce a diskutovány možnosti dalšího směru bádání. Navazující praktická část popsala restaurátorský průzkum a zásah na nástěnné malbě s výjevem Obrácení sv. Augustina od Johanna Jakoba Zeillera v klášteře v Subenu (Rakousko). Popisovaný průzkum byl zaměřen na v minulosti provedené restaurátorské zásahy, se kterými bylo potřeba se v rámci restaurování vypořádat. Zásadním krokem našeho restaurátorského zásahu bylo odstranění starší fixáže malby provedené vodním sklem. V rámci praktické části diplomové práce byla provedena i rozsáhlá fotografická a grafická dokumentace (*viz příloha č. 4:Fotografická dokumentace, 5:Grafická dokumentace*).

# Seznam literatury, pramenů a použitých zkratk

- AÍTČIN, P.-C. 3 - *Portland cement*. In: Researchgate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000035>.
- Alkaline earth metals. In: *Gihe Edu* [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.gihe.edu.np/downloads/chem3.pdf>.
- ASTM C110-09a. Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone. West Conshohocken: ASCM, 2010. ICS Code: 91.100.10. (str. 40)
- BAYEROVÁ, Tatjana; ŠIMŮNKOVÁ, Eva. *Pigmenty*. Praha: STOP, 1999. ISBN 80-902668-1-9
- BLÁHA, J. et al.. *Vápno*. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - STOP, 2001. (str. 21)
- ÇAĞATAY, M. O. et al. Influence of pH on morphology, size and polymorph of room temperature synthesized calcium carbonate particles. In: ScienceDirect, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591018307058>.
- CHAKOUMAKOS, B. et al. *Empirically testing vaterite structural models using neutron diffraction and thermal analysis*. In: Researchgate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/310764691\\_Empirically\\_testing\\_vaterite\\_structural\\_models\\_using\\_neutron\\_diffraction\\_and\\_thermal\\_analysis](https://www.researchgate.net/publication/310764691_Empirically_testing_vaterite_structural_models_using_neutron_diffraction_and_thermal_analysis).
- ČSN EN 459-2. *Stavební vápno - Část 2: Zkušební metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 722201.
- DHEILLY, R. M. et al. Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca(OH)<sub>2</sub>: Construction and Building Materials. In: ScienceDirect, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061802000120>.
- Discover baroque art [online]. [cit. 23.1.2023] Dostupné z: [https://baroqueart.museumwnf.org/database\\_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20](https://baroqueart.museumwnf.org/database_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20).
- ESTÉBANEZ, Pérez Marta. XRD-Analysis Report. Nepublikovaná analýza. Telč: Academy Of Sciences, C.R., Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 2014. (viz *Textová příloha č.1*)
- FRIEDMAN, Laramie Hickey. *A review of ultra-violet light and examination techniques*. The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works. Objects Specialty Group Postprints, Volume Nine, 2002, p. 161-168.
- GALVÁN-RUIZ, M. et al. Characterization of Calcium Carbonate, Calcium Oxide, and Calcium Hydroxide as Starting Point to the Improvement of Lime for Their Use in Construction. In: Researchgate [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/232815496\\_Characterization\\_of\\_Calcium\\_Carbonate\\_Calcium\\_Oxide\\_and\\_Calcium\\_Hydroxide\\_as\\_Starting\\_Point\\_to\\_the\\_Improvement\\_of\\_Lime\\_for\\_Their\\_Use\\_in\\_Construction](https://www.researchgate.net/publication/232815496_Characterization_of_Calcium_Carbonate_Calcium_Oxide_and_Calcium_Hydroxide_as_Starting_Point_to_the_Improvement_of_Lime_for_Their_Use_in_Construction).
- HALL, James. *Slovník námětů a symbolů ve výtvarném umění*. Praha: Mladá fronta, 1991.
- HAO, Z. et al. *Novel procedure of CO<sub>2</sub> capture of the CaO sorbent activator on the reaction of one-part alkali-activated slag*. *RSC Advances*. In: Researchgate, 2021 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-CaO-after-exposure-to-moisture-and-CO-2-for-a-0-h-b-6-h-c-12-h-and\\_fig4\\_350492239](https://www.researchgate.net/figure/SEM-images-of-CaO-after-exposure-to-moisture-and-CO-2-for-a-0-h-b-6-h-c-12-h-and_fig4_350492239).
- HASSIBI, M. An Overview Of Lime Slaking And Factors That Affect The Process. In: RDPtech, 1999 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://rdptech.com/wp-content/uploads/2014/06/lime-slaking-process-hassibi-2009.pdf>.
- HEROUT, Jaroslav. *Staletí kolem nás: Přehled stavebních slohů*. Praha-Litomyšl: Paseka, 2002. ISBN 80 - 7185 - 389 - 5.
- HWIDI, R. et al. *Characterization of quicklime as raw material to hydrated lime: Effect of temperature on its characteristics*. In: Researchgate, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/328893462\\_Characterization\\_of\\_quicklime\\_as\\_raw\\_material\\_to\\_hydrated\\_lime\\_Effect\\_of\\_temperature\\_on\\_its\\_characteristics](https://www.researchgate.net/publication/328893462_Characterization_of_quicklime_as_raw_material_to_hydrated_lime_Effect_of_temperature_on_its_characteristics).
- Kloster und Pfarrkirche Suben [online]. [cit. 23.1.2023] Dostupné z: [https://www.suben.at/Kloster\\_und\\_Pfarrkirche\\_Suben..](https://www.suben.at/Kloster_und_Pfarrkirche_Suben..)
- Life and Work of St. Augustine and the Founding of the Monastery Weyarn: Vault of the Nave [online]. [cit. 30.1.2023] Dostupné z: [https://baroqueart.museumwnf.org/database\\_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20](https://baroqueart.museumwnf.org/database_item.php?id=monument:BAR:de:Mon12:20).
- LINKE, Robert. *Laborbericht*. Nepublikovaný chemickotechnologický průzkum. Vídeň: Oddělení pro konzervaci a restaurování, přírodovědná laboratoř, 2022.



- LIU, Z. et al. *Shape-preserving amorphous-to-crystalline transformation of CaCO<sub>3</sub> revealed by in situ TEM*. In: PNAS, 2020 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1914813117>.
- MÁDL, Martin. *Sdělení o ikonografii postav výjevu Obrácení sv. Augustina na Západní klenbě kláštera v Subenu*. E-mailem 30.7. 2022.
- NASSRALLAH-ABOUKAÏS, N. et al. Transformation of Vaterite into Calcite in the Absence and the Presence of Copper(II) Species: Thermal analysis, IR and EPR study. In: Researchgate, 2003 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/262910236\\_Transformation\\_of\\_Vaterite\\_into\\_Calcite\\_in\\_the\\_Absence\\_and\\_the\\_Presence\\_of\\_CopperII\\_Species\\_Thermal\\_analysis\\_IR\\_and\\_EPR\\_study](https://www.researchgate.net/publication/262910236_Transformation_of_Vaterite_into_Calcite_in_the_Absence_and_the_Presence_of_CopperII_Species_Thermal_analysis_IR_and_EPR_study).
- NAVARRO, C. R. et al. *Amorphous and crystalline calcium carbonate phases during carbonation of nanolimes: Implications in heritage conservation*. In: ResearchGate, 2016 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/305312854\\_Amorphous\\_and\\_crystalline\\_calcium\\_carbonate\\_phases\\_during\\_carbonation\\_of\\_nanolimes\\_Implications\\_in\\_heritage\\_conservation](https://www.researchgate.net/publication/305312854_Amorphous_and_crystalline_calcium_carbonate_phases_during_carbonation_of_nanolimes_Implications_in_heritage_conservation)
- *Nový zákon s výkladovými poznámkami: čes. ekumen*. Praha: Evangelické nakladatelství, 1991.
- ONTIVEROS-ORTEGA, E. et al. *Evolution of mechanical properties in aerial lime mortars of traditional manufacturing, the relationship between putty and powder lime*. In: ScienceDirect, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181832453X>.
- PARK, J. H. et al. *Role of intercalated water in calcium hydroxide interlayers for carbonation reaction*. In: ScienceDirect, 2021 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721020088>.
- PESCE, C. et al. *Effects of organic additives on calcium hydroxide crystallisation during lime slaking*. In: ScienceDirect, 2021 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884620311194#f0010>.
- POTGIETER, J. H. et al. *An empirical study of factors influencing lime slaking. Part I: production and storage conditions*. In: ScienceDirect, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687502000080>.
- POTGIETER, J. H. et al. *An empirical study of factors influencing lime slaking Part II*. In: ResearchGate, 2003 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/267792251\\_An\\_empirical\\_study\\_of\\_factors\\_influencing\\_lime\\_slaking\\_Part\\_II\\_Lime\\_constituents\\_and\\_water\\_composition](https://www.researchgate.net/publication/267792251_An_empirical_study_of_factors_influencing_lime_slaking_Part_II_Lime_constituents_and_water_composition).
- POTGIETER, J. H. et al. *The standard reactivity test as a measure of lime's quality*. In: ResearchGate, 2002 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/235482891\\_The\\_standard\\_reactivity\\_test\\_as\\_a\\_measure\\_of\\_lime%27s\\_quality](https://www.researchgate.net/publication/235482891_The_standard_reactivity_test_as_a_measure_of_lime%27s_quality).
- RAMOS, J. P. *Effect of Calcium Oxide Microstructure on the Diffusion of Isotopes*. In: Researchgate, 2012 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/254469023\\_Effect\\_of\\_Calcium\\_Oxide\\_Microstructure\\_on\\_the\\_Diffusion\\_of\\_Isotopes](https://www.researchgate.net/publication/254469023_Effect_of_Calcium_Oxide_Microstructure_on_the_Diffusion_of_Isotopes). (str 66–68)
- RIEDEL, Jörg. *Pfarrkirche (Ehem. Stiftskirche) Suben: Freskenausstattung Johann Jakob Zeiller von 1768 Wolfram Köberl von 1953*. Vídeň, 2022. Uloženo: V archivu autora ([joergriedel@gmx.at](mailto:joergriedel@gmx.at)).
- RIPA, Cesare, BUSCAROLI, Piero, ed. *Ikonologie*. Praha: Argo, 2019.
- ROVNANÍKOVÁ, P. Omítky: *Chemické a technologické vlastnosti*. Praha: STOP, 2002. (str. 3)
- ROŽAN, Josef; VANÍČEK, Otakar. *Pigmenty: Práškové barvy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959.
- SACCHI, Andrea [online]. [cit. 30.1.2023] Dostupné z: <https://www.wga.hu/frames-e.html?html/s/sacchi/barberin.html>.
- SCHWAHA, Herbert. *Untersuchungsbericht, Ehemalige Stiftskirche Suben: Wände/Stuck/Wandmalerei*. Vorchdorf, 2020. Uloženo: V archivu autora ([herbert.schwaha@aon.at](mailto:herbert.schwaha@aon.at)).
- ŠEFERISOVÁ LOUDOVÁ, Michaela. *Sdělení o ikonografii postav výjevu Obrácení sv. Augustina na Západní klenbě kláštera v Subenu*. E-mailem 7.11. 2022.
- SERENTSCHY, Christoph. *Suben ehem. Stiftskirche Fresko, Stuck, Stuckmarmor: Untersuchungsbericht, Fotodokumentation*. Neukirchen, 2007. Uloženo: V archivu autora ([christoph@serentschy.com](mailto:christoph@serentschy.com)).

- SERRIS, E. et al. *Study of the hydration of CaO powder by gas–solid reaction: Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 2011 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884611001888>.
- ŠEVČÍK, R. et al. *Characterization of vaterite synthesized at various temperatures and stirring velocities without use of additives*. In: ScienceDirect, 2015 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591015005239>.
- ŠEVČÍK, R. et al. *Physical and nanomechanical properties of the synthetic anhydrous crystalline CaCO<sub>3</sub> polymorphs: vaterite, aragonite and calcite*. In: Researchgate, 2018 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/321689807\\_Physical\\_and\\_nanomechanical\\_properties\\_of\\_the\\_synthetic\\_anhydrous\\_crystalline\\_CaCO3\\_polymorphs\\_vaterite\\_aragonite\\_and\\_calcite](https://www.researchgate.net/publication/321689807_Physical_and_nanomechanical_properties_of_the_synthetic_anhydrous_crystalline_CaCO3_polymorphs_vaterite_aragonite_and_calcite).
- SIVA, T. et al. *Enhanced Polymer Induced Precipitation of Polymorphous in Calcium Carbonate: Calcite Aragonite Vaterite Phases*. In: Researchgate, 2017 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/314112639\\_Enhanced\\_Polymer\\_Induced\\_Precipitation\\_of\\_Polymorphous\\_in\\_Calcium\\_Carbonate\\_Calcite\\_Aragonite\\_Vaterite\\_Phases](https://www.researchgate.net/publication/314112639_Enhanced_Polymer_Induced_Precipitation_of_Polymorphous_in_Calcium_Carbonate_Calcite_Aragonite_Vaterite_Phases).
- SLÁNSKÝ, Bohuslav. *Technika malby. Díl 1, Malířský a konzervační materiál*. 2. vyd. Praha: Paseka, 2003. ISBN 80-7185-610-X.
- SLÁNSKÝ, Bohuslav. *Technika malby. Díl 2, Průzkum a restaurování obrazů*. 2. vyd. Praha: Paseka, 2003. ISBN 80-7185-623-1.
- SONG, H. S.; KIM, C. H. *The effect of surface carbonation on the hydration of CaO, Cement and Concrete Research*. In: ScienceDirect, 1990 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000888469090015P>.
- St. Augustine in His Study (Carpaccio)[online]. [cit. 30.1.2023] Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/St.\\_Augustine\\_in\\_His\\_Study\\_\(Carpaccio\)](https://en.wikipedia.org/wiki/St._Augustine_in_His_Study_(Carpaccio)).
- SUBEDI, S. et al. *Production and Characterization of Biodiesel from Hevea Brasiliensis and Diesel like Fuel from Waste Engine Oil*. In: Researchgate, 2020 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-catalyst-The-SEM-result-shows-that-synthesized-CaO-is-crystalline-in-nature\\_fig2\\_344610104](https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-catalyst-The-SEM-result-shows-that-synthesized-CaO-is-crystalline-in-nature_fig2_344610104).
- VÁLEK, J. *Vápenné technologie historických staveb: příprava specializovaných vápenných pojiv pro obnovu historických staveb*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky, 2015. (str. 90–91)
- VALVERDE, J. et al. *Crystallographic transformation of limestone during calcination under CO<sub>2</sub>*. In: ResearchGate, 2015 [online]. [cit. 16. 7. 2023]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/312578501\\_Crystallographic\\_transformation\\_of\\_limestone\\_during\\_calcination\\_under\\_CO2](https://www.researchgate.net/publication/312578501_Crystallographic_transformation_of_limestone_during_calcination_under_CO2).
- WICHTERLOVÁ, Zuzana. *Průzkum techniky renesančního sgrafita*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. (str. 49-50)
- WOLLER, Christian. *Bestandsaufnahme/Zustandsuntersuchung der Pfarrkirche Suben, OÖ*. Wien, 2018. Uloženo: Památkový ústav ve Vidni.

## Seznam obrázků, tabulek a grafů

- *Obr. 1: Idealizovaný model hydratace částečně karbonatovaného vzorku CaO.*
- *Obr. 2: Mikrostruktura CaO, v levé části je patrná typická porézní mikrostruktura tvořená částicemi amorfního vzhledu. Napravo tvoří částice páleného vápna větší útvary tj. klastry, které vznikají vrstvením částic na sebe.*
- *Obr. 3–4: Krystaly portlanditu (označené písmeny P a CH).*
- *Obr. 5–6: Krystalické a amorfní formy CaCO<sub>3</sub>. Vlevo: (a) Kalcit. (b) Vaterit. (c) Aragonit. Vpravo: (A)(E) Amorfni CaCO<sub>3</sub> kulovitého tvaru, (B) krystalizující na kalcit. (C) Krystalizace amorfniho CaCO<sub>3</sub> na kalcit, (D) kalcit a vaterit, (F) aragonit (Ara) a kalcit (Cal).*
- *Obr. 7: Krystalické a amorfní formy CaCO<sub>3</sub>. Vzhled krystalů se mění v závislosti na pH (seřazeno podle stoupajícího pH z leva do prava).*

- Obr. 8: a)  $\text{CaCO}_3$ : bloky kalcitu, b)  $\text{CaO}$ : pórovitá struktura, c) částečně karbonatový vzorek s obsahem  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{Ca(OH)}_2$ : šipkami jsou znázorněné linie na povrchu  $\text{Ca(OH)}_2$ .
  - Obr. 9: Aparatura pro test reaktivity převzatá z americké normy.
  - Obr. 10–11: Vlevo: Rukavicový box s přívodem inertního plynu pro přípravu práškového vzorku k termické analýze. Vpravo: Přenesení práškového vzorku ze vzorkovnice do přístroje pro termickou analýzu SDT Q600.
  - Obr. 12: Nehasitelný podíl zachycený na sítích s velikostí oka  $D$  0,125, 0,25 a 0,5 mm (7d, prostředí: sklo). Částice jsou bílé a ztvrdlé.
  - Obr. 13: Nehasitelný podíl na snímcích SEM: (a) Aragonit a Kalcit (b) Portlandit. Autor snímků: R. Tišlová.
  - Obr. 14–15: Kusové pálené vápno uložené na vzduchu – srovnání vzhledu kousků vzorku po 1 (vlevo) a 28 dnech (vpravo). Po 28 dnech vznikají makrotrhliny, které způsobují rozpad vzorků a jejich práškovatění.
  - Obr. 16–17: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 1 den. U vzorků z obou prostředí dochází k zaoblování částic  $\text{CaO}$ , matrice je vysoce porézní. U vzorku ze vzduchu probíhá hydratace rychleji, lokálně vznikají u vzorku vznikají místa slinutých míst. Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)
  - Obr. 18–19: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 3 dny. Ve vakuu dochází k zaoblování částic  $\text{CaO}$ , které se potahují filmem  $\text{Ca(OH)}_2$ . Na vzduchu je matrice více hydratovaná, méně porézní, na povrchu se objevují trhliny ve filmu  $\text{Ca(OH)}_2$ . Nelze vyloučit, že některé trhliny mohly vzniknout kvůli velkému zvětšení, při kterých je prováděno pozorování. Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)
  - Obr. 20–21: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 7 dní. Hydratace v prostředí vzduchu probíhá rychleji, na snímku je viditelný slinutý film  $\text{Ca(OH)}_2$ . Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)
  - Obr. 22–26: Snímek matrice částic páleného vápna z vakua (vlevo) a ze vzduchu (vpravo), 28 dní. U obou vzorků jsou při velkém zvětšení (60.0 kx) patrné mikropraskliny na povrchu částic. V menším zvětšení je na povrchu částic přítomen slinutý povrch s dlouhými trhlínami, které jsou u snímku z vakua širší, než u snímku z prostředí vzduch. Autor snímků: R. Tišlová. (Pro srovnání jsou v pravo dole k snímkům připojeny miniatury z Grafu 7 určující složení vzorku.)
  - Obr. 27: Grafické vymezení úseku určeného k provedení komplexního restaurátorského zásahu.
- 
- Tab. 1: Fázová analýza Koněpruského vápence použitého pro přípravu páleného vápna stanovená metodou rentgenové práškové difrakce (XRD). Obsah fází je vyjádřen v hm. %.
  - Tab. 2: Podmínky uložení pálených vápen. Barevné označení bude použito dále ve výsledkové části.
  - Tab. 3: Hodnoty  $T_{\max}$  vzorků uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum), změna hodnot v čase. Reaktivita nebyla z důvodu nedostatku vzorku měřena po 28 dnech.
  - Tab. 4: Hodnoty  $t_{60}$  v min vzorků uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum), změna hodnot v čase. Reaktivita nebyla z důvodu nedostatku vzorku měřena po 28 dnech. U vzorků uložených na vzduchu a pod papírem hodnoty  $t_{60}$  chybí, neboť pokles teploty reaktivity byl nižší než  $60^\circ\text{C}$ .
  - Tab. 6: Srovnání změny hmotnosti vzorků páleného vápna v různých podmínkách expozice zjištěné vážením a TG analýzou.
- 
- Graf 1: Příklad záznamu a vyhodnocení STA analýzy, vzorek páleného vápna exponovaného

na vzduchu, stáří vzorku 14 dní. Křivky TG, DTG a DSC.

- Graf 2: Změna hmotnosti pálených vápen uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum). Zelená čárkovaná linie označuje hodnotu teoreticky vypočítané změny hmotnosti CaO v důsledku přeměny na Ca(OH)<sub>2</sub>, červená označuje teoreticky vypočítanou změnu hmotnosti v důsledku přeměny na CaCO<sub>3</sub>. Při výpočtu byly použity rovnice (2) a (3)
- Graf 3: Hodnoty T<sub>max</sub>: vzorků uložených v různých prostředích (vzduch, papír, sklo, vakuum), změna hodnot v čase. Reaktivita nebyla z důvodu nedostatku vzorku měřena po 28 dnech.
- Graf 4: Celkový obsah nehasitelného podílu v různých podmínkách, vývoj obsahu částic v čase. Obsah nehasitelného podílu byl stanoven v hm.%, hmotnost částic byla vztažena na počátečních 100 g vzorku použitých k testu reaktivity.
- Graf. 5: Distribuce nehasitelného podílu a její změna s časem expozice. Obsah jednotlivých frakcí byl vypočítán v hm.%, hmotnost je vztažena k hmotnosti výsledné kaše.
- Graf. 6: Příklad záznamu a vyhodnocení STA analýzy, vzorek páleného vápna exponovaného na vzduchu, stáří vzorku 14 dní. Křivky TG, DTG a DSC.
- Tab. 5: Termická analýza pálených vápen – analyzované fáze a jejich popis.
- Graf. 7: Složení vzorků páleného vápna vystaveného různým expozičním podmínkám vypočítané z Tg analýzy, změny složení v čase. Stejně výsledky byly zaznamenány i do tabulky vlevo.
- Graf. 8–11: Hodnoty maxima teploty píků Ca(OH)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub> (2) a amorfního (amorfní) CaCO<sub>3</sub> v různých podmínkách odečtených z DTG křivky, změny hodnoty v čase.
- Graf. 12–13: Srovnání změny hmotnosti vzorků páleného vápna v různých podmínkách expozice zjištěné vážením a TG analýzou.

## Seznam použitých zkratek

- % (obj.) – objemová procenta
- % – procento
- °C – stupně Celsia
- ARNMS – Ateliér restaurování nástěnné malby a sgrafita
- ARNMS – Ateliér restaurování nástěnné malby a sgrafita
- č. – číslo
- ČR – Česká republika
- Fr – Fakulta restaurování
- FR – Fakulta restaurování
- hm. % – hmotnostní procenta
- min – minuta
- Obr. – obrázek
- s – sekunda
- str. – strana
- Tab. – tabulka
- UPa – Univerzita Pardubice
- UPCE - Univerzita Pardubice
- UV – ultraviolet

# Seznam příloh

Příloha č. 1: Složení koněpruského vápence

Příloha č. 2: Přehled výsledných grafů termické analýzy

Příloha č. 3: Přehled snímků ze skenovacího elektronového mikroskopu

Příloha č. 4: Fotografická dokumentace

Příloha č. 5: Grafická dokumentace

Příloha č. 6: Chemickotechnologický průzkum