

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



Jamova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA  
PROMETNA SMER

Kandidatka:

**NUŠA ČERNE**

**IN-SITU IN LABORATORIJSKE PREISKAVE  
HISTORIČNIH MALT**

Diplomska naloga št.: 3222/PS

**IN-SITU AND LABORATORY ANALYSIS OF  
HISTORICAL MORTARS**

Graduation thesis No.: 3222/PS

**Mentorica:**

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Janko Logar

**Somentorica:**

asist. Petra Štukovnik

Ljubljana, 28. 5. 2012

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

---

**IZJAVE**

Podpisana Nuša Černe izjavljam, da sem avtorica diplomskega dela z naslovom »In-situ in laboratorijske preiskave historičnih malt«.

Izjavljam, da je elektronska različica v sem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 4.5.2012

Nuša Černe

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

<b>UDK:</b>	<b>69.059.4:691.53:726.54(043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Nuša Černe</b>
<b>Mentor:</b>	<b>izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad.</b>
<b>Somentor:</b>	<b>asist. Petra Štukovnik, univ. dipl. inž. geolog.</b>
<b>Naslov:</b>	<b>In-situ in laboratorijske preiskave historičnih malt</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>diplomska naloga</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>87 str., 5 pregl., 60 sl., 3 diag., 5 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>historične malte, karakterizacija, kulturna dediščina, 3D optična mikroskopija, neporušna metoda, kristalizacija soli, biodegradacija</b>

### Izvleček

V okviru diplomske naloge sem se ukvarjala s pravilnim in celovitim pristopom k objektom kulturne dediščine v primeru obnovitvenih in/ali restavratorskih posegov. Pri tem smo se osredotočili na historične malte in omete. Kot primer historičnega objekta sem si izbrala cerkev sv. Treh kraljev. Najprej smo objekt preučili na terenu z in-situ neporušnimi metodami (vizualni pregled, analiza poškodb z optičnim mikroskopom), ki so pri zaščitenih in zgodovinsko ter kulturno vrednotenih objektih velikokrat edini možen način proučevanja gradbenih materialov. V naslednjem koraku smo na mestih večjih poškodb ometov ter iz okolice objekta odvzeli vzorce materialov, za katere smo predvidevali, da predstavljajo primarne gradbene materiale na objektu. Le-te se kasneje preoblikuje v primerne vzorce – zbruske ali praškovne vzorce. Na zbruskih smo z uporabo instrumentalnih tehnik in analitičnih orodij, kot je optična mikroskopija natančno v laboratoriju določili mineralno sestavo in mikrostrukturo posameznih komponent malte. Poleg tega smo tudi opredelili posamezne komponente in odkrili stranske faze, ki lahko vplivajo na propadanje ometa. Na podlagi ugotovljene mineralne sestave komponent preiskanih malt in njihove mikrostrukture bi lahko v nadaljevanju določili tehnologijo izdelave nadomestnih materialov za sanacijska in restavratorska dela ometov ali malt. Poleg cerkve sv. Treh kraljev pa sem obravnavala tudi Kolizej v Ljubljani. Pri tem objektu je bil namen analiz vzorcev drugačen, saj je bil objekt že porušen. Analize so bile opravljene z namenom celovitih preiskav kot so karakterizacija malte, opeke ter ometa, določanje njihovih mehanskih in fizikalnih lastnosti ter lastnosti stičnega območja med malto in opeko. S takimi preiskavami dobimo jasen vpogled v način gradnje tedanjega časa, vrsto materialov, ki so se takrat uporabljali ter postopek propadanja le-tega kar lahko uporabimo pri sanaciji podobnih objektov.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDC:</b>	<b>69.059.4:691.53:726.54(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Nuša Černe</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.</b>
<b>Cosupervisor:</b>	<b>Assist. Petra Štukovnik, B.Sc.</b>
<b>Title:</b>	<b>In-situ and laboratory analysis of historical mortars</b>
<b>Document type:</b>	<b>Graduation Thesis</b>
<b>Scope and tools</b>	<b>87 p., 5 tab., 60 fig., 3 sch., 5 eq.</b>
<b>Key words:</b>	<b>historical mortars, characterization, cultural heritage, 3D optical microscopy, non-destructive method, salt crystallisation, biodegradation</b>

**Abstract**

In my diploma work I studied adequate approach to cultural heritage buildings in the case of reconstruction and/or restoration works. The focus was on historical mortars and renders and plasters. I chose the Church of St. Three Kings as an example of historical building. First on-site investigation was carried out with the help of in-situ non-destructive techniques (visual examination, damage analysis with optical microscopy) which are in case of protected and valued historic and cultural buildings often the only possible way of studying building materials. In the next step we took samples from already heavily damaged areas of renders and plasters and from the building surroundings for which we assumed that they represent the primary building materials of the church. They were later transformed into laboratory samples – thin sections or powder samples. On the thin sections the mineral composition and microstructure of the individual mortar components were determined using optical microscopy. In addition, we also identified the individual components and detected secondary phases, which may affect the degradation of the mortar or plaster or render. From the identified mineral composition and microstructure of the components the technology of the repair mortars can be determined. In addition to the Church of St. Three Kings I also dealt with Kolizej in Ljubljana. At this building the purpose of sample analysis was different because the building was already demolished. Analyses were carried out in order to complete the investigation about the characterization of mortar, brick and plaster and render, the determination of their physical and mechanical properties and properties of interface between mortar and brick. Such investigations provide important and helpful information about the historical building technology, the type of applied materials and the processes of material degradation. The obtained results can be used for repair of similar buildings.

## **ZAHVALA**

*Kdor ve, da nič ne ve, je moder.*

*Kdor ve, česa ne ve, lahko vpraša.*

*In kdor ve, kje bo dobil odgovor, ga lahko najde.*

*Albert Einstein*

Rada bi se zahvalila svoji mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov in somentorici Petri Štukovnik za strokovno svetovanje, potrpežljivost in spodbudo pri nastajanju diplomskega dela.

Hvala Alenki, Tomažu, Mihi, Andreju, Janji, Tini, Anji, Tadeji, Ajdi, Maji in vsem ostalim, da ste mi pomagali iskati odgovore. V vseh mojih vzponih in padcih ste verjeli vame, me optimistično spodbujali ter mi nesebično pomagali.

**KAZALO VSEBINE**

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	IV
<b>1 UVOD</b>	<b>1</b>
1.1 Predstavitev problema	1
1.2 Namen diplomske naloge	1
<b>2 MALTE IN OMETI</b>	<b>3</b>
2.1 Definicije in osnovne funkcije gradiv	3
2.2 Zgodovinski pregled uporabe apna in apnene malte	4
2.3 Sestava apnene malte	4
2.4 Klasifikacija malt in ometov	5
2.5 Lastnosti apnene malte in ometa	6
2.5.1 Poroznost	7
2.5.2 Podajnost	7
2.5.3 Trdnost	7
<b>3 APNO KOT VEZIVO</b>	<b>10</b>
3.1 Proces pridobivanja apna	10
3.1.1 Kalcinacija	10
3.1.2 Hidratizacija	11
3.1.3 Karbonatizacija	11
3.1.4 Apneni krog	12
3.1.5 Način proizvodnje	12
3.2 Vrste apna	13
<b>4 AGREGAT</b>	<b>15</b>
<b>5 VODA IN DODATKI</b>	<b>17</b>
<b>6 ANALIZE HISTORIČNIH MALT</b>	<b>18</b>
6.1 In-situ vizualna analiza	20
6.2 Vzorčenje	21

6.3	Kemijska in sejalna analiza	23
6.4	Fizikalno in mehansko testiranje	23
6.4.1	Testiranje sveže malte	24
<b>7</b>	<b>METODE ZA KARAKTERIZACIJO MATERIALA</b>	<b>26</b>
7.1	Optični mikroskop	26
7.2	Rentgenska praškovna difrakcijska analiza – XRD	27
7.3	Infrardeča in Ramanska spektroskopija	30
7.4	Termične analize – DTA in TG	33
7.5	Vrstični elektronski mikroskop – SEM	34
7.6	Analiza mikrožarka elektronov	37
<b>8</b>	<b>PROPADANJE HISTORIČNIH MALT IN OMETOV</b>	<b>38</b>
8.1	Faktorji, ki vplivajo na proces propadanja	38
8.2	Procesi propadanja in poškodbe	40
<b>9</b>	<b>MALTE ZA SANACIJO</b>	<b>42</b>
<b>10</b>	<b>UVOD V EKSPERIMENTALNI DEL DIPLOMSKE NALOGE</b>	<b>44</b>
<b>11</b>	<b>OBJEKT 1: CERKEV SV. TREH KRALJEV</b>	<b>47</b>
11.1	Značilnosti lokacije	47
11.1.1	Položaj in lega	47
11.1.2	Geologija	47
11.1.3	Podnebje	48
11.1.4	Tla	48
11.2	Opis objekta	49
11.2.1	Zgodovina objekta	49
11.2.2	Opis trenutnega stanja	50
11.3	Preiskave s 3D optičnim mikroskopom	50
11.3.1	Prvo merilno mesto	51
11.3.1.1	Pozicija 1	52
11.3.1.2	Pozicija 2	52
11.3.2	Drugo merilno mesto	53
11.3.3	Tretje merilno mesto	57
11.3.3.1	Pozicija 1	57
11.3.3.2	Pozicija 2	58



---

11.4	Vzorčenje materialov	59
11.5	Mikroskopiranje na vzorcih 1V in VZ4	60
11.6	Vrednotenje rezultatov	62
<b>12</b>	<b>OBJEKT 2: PALAČA KOLIZEJ</b>	<b>63</b>
12.1	Značilnosti lokacije	63
12.1.1	Položaj in lega	63
12.1.2	Geologija	63
12.1.3	Podnebje	63
12.1.4	Tla	64
12.2	Opis objekta	64
12.2.1	Zgodovina objekta	64
12.2.2	Opis trenutnega stanja	65
12.3	Vizualne analize objekta	66
12.4	Vzorčenje materialov	69
12.5	Laboratorijske preiskave mehanskih lastnosti malte in opeke	70
12.6	Mikroskopiranje na vzorcih	70
12.7	Vrednotenje rezultatov	80
<b>13</b>	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>81</b>
<b>VIRI</b>		<b>83</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Relacija med cilji preiskav in zahtevanimi informacijami (Hughes in Callebaut, 2002: str. 71)	22
Preglednica 2:	Primerjava IR in ramanske spektroskopije	33
Preglednica 3:	Pomembni faktorji, ki vplivajo na procese degradacije (van Hees et al., 2004: str. 645)	39
Preglednica 4:	Procesi propadanja in z njimi povezane poškodbe (Arıoğlu in Acun, 2006: str. 1225)	40
Preglednica 5:	Procesi propadanja malt in njihove poškodbe	41

**KAZALO SLIK**

Slika 1:	Napetosti v primeru natezne sile (Torraca, 2009: str. 73)	8
Slika 2:	Delovanje tlačnih sil na material (Torraca, 2009: str. 73)	8
Slika 3:	Apneni krog (Štukovnik, 2011: str. 4; Young, 2008: str. 58; Žarnić, 2003: str. 82)	12
Slika 4:	Optični mikroskop v laboratoriju in na terenu	26
Slika 5:	Praškovni difraktometer	27
Slika 6:	Sollerjeve reže (Zabukovec Logar, 2008)	28
Slika 7:	Ponazoritev uklona RTG žarkov na kristalnih ravninah (wikipedia, 2011)	29
Slika 8:	FTIR spektrometer (Arsov, 2011)	31
Slika 9:	Shema disperzijskega ramanskega mikroskopa (Arsov, 2011)	32
Slika 10:	SEM (levo) in vakuumsko jedro (desno) (Biotehniška fakulteta, 2010; wikipedia, 2011)	35
Slika 11:	Princip delovanja SEM (Biotehniška fakulteta, 2010)	36
Slika 12:	Terilnica in pripravljene praškovni vzorci za XRD	45
Slika 13:	Prikaz priprave zbruska za mikroskopiranje	45
Slika 14:	Lokacija objekta Cerkev sv. Treh kraljev ( <a href="http://zemljevid.najdi.si/">http://zemljevid.najdi.si/</a> , 2012)	47
Slika 15:	Pohorski granodiorit	48
Slika 16:	Cerkev sv. Treh kraljev	49
Slika 17:	Vidna freska pod sedanjim beležem	50
Slika 18:	Merilna mesta z mikroskopskim sistemom HIROX	51
Slika 19:	Poziciji mikroskopiranja na prvem merilnem mestu ter prikaz optičnega mikroskopiranja	51
Slika 20:	Slika biodegradacije pri 200x povečavi	52
Slika 21:	Multi-fokus slika pr povečavi 100x (levo zgoraj), pripadajoča 3D slika (desno zgoraj) in topografija prereza vzdolž izbrane linije (spodaj)	53
Slika 22:	Opazene soli na steni na drugem merilnem mestu (levo) in multi-fokus slika le-teh pri 100x povečavi (desno)	53
Slika 23:	Faze kristalizacije na površini poroznega medija. Skica razvoja kristalov od mokre do suhe površine (Zehnder in Arnold, 1989: str. 515)	56
Slika 24:	Položaj akumulacije soli (Zahnder, 2007: str. 357)	56
Slika 25:	Tretje merilno mesto	57
Slika 26:	Ostanki finalnega sloja (označeni rdeče)	57
Slika 27:	Multi fokus slika pri 50x povečavi (levo zgoraj), pripadajoča 3D slika (desno zgoraj) in topografija prereza vzdolž izbrane linije (spodaj) na poziciji 1 na tretjem merilnem mestu	58
Slika 28:	Živalski organizem (označen rdeče)	58

Slika 29:	Mesta vzorčenja	59
Slika 30:	Splošna mikroskopska slika vzorca VZ4 z analizatorjem (desno) in brez analizatorja (levo)	60
Slika 31:	Heterogenost agregata po mineralni sestavi	61
Slika 32:	Kalcitno vezivo reagira z lazerin rdeče	61
Slika 33:	Viden prehod iz por v razpoke, pod razpoko je vidna rogovača	62
Slika 34:	Lokacija palače Kolizej, označena z rdečo piko ( <a href="http://zemljevid.najdi.si/">http://zemljevid.najdi.si/</a> , 2012)	63
Slika 35:	Kolizej po 1847 (Dešman, 2008: str. 13)	65
Slika 36:	Stanje objekta pred porušitvijo ( <a href="http://m.delo.si/clanek/167200">http://m.delo.si/clanek/167200</a> )	66
Slika 37:	Uporaba različnih vrst opeke (levo) in uporaba različnih vrst malt (desno) (Kržan, 2008: str. 20)	67
Slika 38:	Razpoke na loku zaradi preobremenitev (Kržan, 2008: str. 14)	68
Slika 39:	Opazne poškodbe na Kolizeju (Kržan, 2008: str. 12,13)	68
Slika 40:	Tloris kleti, stanje pred porušitvijo in območje vzorčenja	69
Slika 41:	Tloris pritličja, stanje pred porušitvijo in območje vzorčenja	69
Slika 42:	Tloris nadstropja, stanje pred porušitvijo in območje vzorčenja	70
Slika 43:	Košček opeke vzorca V1	71
Slika 44:	Splošna slika vzorca V1 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)	71
Slika 45:	Prehod med svetlim in temnim, najverjetneje zadimljenim delom Splošna slika vzorca V2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)	72
Slika 46:	Splošna slika vzorca V2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)	72
Slika 47:	Splošna slika malte vzorca P2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)	74
Slika 48:	Sprememba na robu agregatnega zrna pri 5x povečavi (zgoraj) in 10x povečavi (spodaj)	74
Slika 49:	Razpoka, zapolnjena s sadro pri 10x povečavi	75
Slika 50:	Zapolnjena razpoka ter sprememba na robu agregata pri 10x povečavi (zgoraj) in 20x povečavi (spodaj)	75
Slika 51:	Razpoka v vzorcu opeke P2 pri 5x povečavi (zgoraj) in 20x povečavi (spodaj)	76
Slika 52:	Splošna slika opeke pri vzorcu P2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)	76
Slika 53:	Redukcijsko jedro in večje zrno kremenca	77
Slika 54:	Splošna slika malte vzorca KZ1	77
Slika 55:	Obarvan rob agregata v malti vzorca KZ1	78
Slika 56:	Splošna slika opeke vzorca KZ1	78
Slika 57:	Redukcijsko jedro v vzorcu KZ1	78

---

Slika 58:	Večje agregatno zrno z zapolnjenimi razpokami pri 5x povečavi (zgoraj) in 10x povečavi (spodaj)	79
Slika 59:	Splošna slika opeke vzorca N2	79
Slika 60:	Splošna slika malte vzorca N2	80

## KAZALO DIAGRAMOV

Diagram 1:	Postopek identifikacije tipa malte (Palomo et al. 2002: str. 6)	19
Diagram 2:	Shema mineraloško in pretrografsko karakterizacijo historičnih malt (Middendorf et al., 2005: str. 769; Štukovnik, 2011: str. 5)	20
Diagram 3:	Proces oblikovanja malte za obnovo (Arıoglu in Acun, 2006: str. 1226; Štukovnik, 2011: str. 3)	46

**KRATICE**

RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages (mednarodno združenje laboratorijev in strokovnjakov za gradbene materiale, sisteme in konstrukcije)
XRD	X-Ray Diffraction (rentgenska difrakcija)
SEM	Scanning Electron Microscope (vrstični elektronski mikroskop)
DTA	Differential Thermal Analysis (diferenčna termična analiza)
DSC	Differential Scanning Calorimetry (diferenčna dinamična kalorimetrija)
TG	Thermogravimetry (termogravimetrija)
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrometry (infrardeča spektroskopija s fourierjevo transformacijo)
IR	Infrardeča svetloba
EDX	Energy Dispersive X-ray analysis (energijska disperzijska spektroskopija rentgenskih žarkov)
RTG	Rentgen
BSE	Back-scattered Electron Detector (detektor povratno sipanih elektronov)
ZVKDS	Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije

## **1 UVOD**

### **1.1 Predstavitev problema**

Kulturna dediščina predstavlja pomemben vir za dokaz zgodovine ter razvoja kulture na nekem območju. Zavzema široko področje, vse od umetnostne dediščine, premične in nepremične dediščine, stavbne dediščine do dediščine kulturnih krajin. Sestavni del te dediščine so tudi materiali, kot so historične malte, ometi ter stenske poslikave (Štukovnik, 2011). Na stavbni dediščini, ki predstavlja pomemben segment nepremične dediščine, lahko opazimo propadanje materiala in poškodbe na konstrukcijskih in nekonstrukcijskih elementih (Štukovnik et al., 2011).

Na objektih kulturne dediščine pogosto zasledimo poškodbe, ki se pojavijo na mestih, ki so bila v preteklosti že sanirana, ker velikokrat sanacijska in restavratorska dela potekajo brez predhodnih analiz (Bokan Bosiljkov, 2011). Kratkoročno taki posegi pomenijo hitrejšo in denarno bolj ugodno sanacijo. Dolgoročno gledano pa so analize tako primarnega materiala kot tudi materiala za sanacijo nujne. S tem zmanjšamo celotne stroške vzdrževanja objekta, saj so posegi trajnejši in dela brez kakršnih koli preiskav pomenijo izgubo časa in denarja. Same preiskave na historičnih maltah in ometih naj bi bile osnovane na povezovanju med strokami in sodelovanju umetnostnih zgodovinarjev, restavratorjev, fizikov, kemikov, biologov, mineralogov, inženirjev in arhitektov, saj so le-te kompleksne in zapletene (Arıoğlu in Acun, 2006).

Pri preiskovanju umetnostne dediščine smo velikokrat omejeni na neporušne preiskave in preiskave, ki zahtevajo majhno število in količino vzorcev. Zato sta in-situ vizualna analiza in pravilno vzorčenje ključna dela praktičnega in analitičnega postopka pri preiskovanju historičnih objektov. Poleg količine vzorca pa na izbiro metode vpliva predvsem vrsta informacije, ki jo želimo pridobiti.

Analize zaobjemajo celovito karakterizacijo historičnih malt, saj so rezultati, ki jih dobimo s temi preiskavami, ključnega pomena pri odločanju za najprimernejši konservatorsko-restavratorski poseg na določenem objektu. Pridobljeni podatki imajo tudi veliko dokumentacijsko vrednost, ker dajejo pregled informacij o sestavi različnih malt iz različnih obdobj na območju Slovenije. Ti podatki nam omogočajo med drugim ločiti originalni omet od kasnejših preslikav ali sekundarnih slojev ter morebitno rekonstrukcijo originalne sestave malte. Pomembna je tudi identifikacija procesov oz. produktov degradacije (Kramar in Mirtič, 2009).

### **1.2 Namen diplomske naloge**

Namen diplomske naloge je spoznavanje pravilnega in celovitega pristopa do objektov kulturne dediščine v primeru kakršnih koli posegov. Cilj tega pristopa pa je ugotavljanje bistvenih lastnosti



historične malte z namenom oblikovanja ustrezne sestave nadomestne malte za popravilo ter identifikacija poškodb ter vzrokov za njihov nastanek.

Namen analiz historičnih malt ni kontrola kakovosti uporabljenih materialov, temveč določevanje fizikalnih, kemijskih in mehanskih lastnosti (Arioglu in Acun, 2006). Le z dobrim poznavanjem lastnosti materiala lahko trajnostno in kvalitetno obnovimo in restavriramo ter saniramo našo stavbno dediščino.

V teoretičnem delu diplomske naloge najprej predstavim posamezne komponente in lastnosti malte ter nato preidem na analize malt in njihove poškodbe.

V eksperimentalnem delu obravnavam dva objekta, cerkev sv. Treh kraljev ter palačo Kolizej.

## 2 MALTE IN OMETI

### 2.1 Definicije in osnovne funkcije gradiv

Tako malta kot omet sta v osnovi (sestavi) podobna materiala. Razlikujeta se predvsem po namenu in uporabi. Kljub enakim vhodnim materialom pa imata različne lastnosti kot so elastični modul in tlačna trdnost (Arioglu in Acun, 2006).

Omet je vrsta gradiva, ki ga naneseemo na nosilno konstrukcijo (stene, strop), da jo zaščitimo in povečamo njeno uporabno vrednost (Kramar in Mirtič, 2009). Ima torej trojno funkcijo – ščiti in izravna zid ter služi kot podlaga stenski poslikavi (Križnar, 2006). Poznamo notranje in zunanje omete.

Malta je kompozit, sestavljen iz zrn peska, mineralnega veziva in vode (Palomo et al., 2002). Dolgo časa so imele malte, kot konstruktiven element, dvojno vlogo: povezujejo druge materiale (kamne ali opeko), kar omogoča stabilnost stene (Arioglu in Acun, 2006), ter krijejo in ščitijo površine stebrov, sten, fasad itd. (Palomo et al., 2002).

Pojem historične malte zajema vse materiale, ki so se uporabljali za izdelavo notranjih in zunanjih ometov, spojníc, štukatur in ostalih arhitekturnih elementov, ki so izdelani kot mešanica agregata, anorganskega veziva (večinoma apna), vode in mogoče kakšnih dodatkov (Blauer Bohm, 2005; Ortega et al., 2008).

V diplomski nalogi bom uporabljala skupni izraz malte za vsa gradiva, tako malte za spojnice, malte za lepljenje kamnitih delov, podložne malte pri mozaikih, stenskih poslikavah ter za zunanje (fasade) in notranje omete.

Za vse so značilne naslednje sestavine: agregat, vezivo, voda in dodatki.

Agregat je skelet malte in vpliva na njeno trdnost in togost, poleg tega določa njen barvni ton. Njegova poroznost pa vpliva na način in hitrost karbonatizacije (Kramar in Mirtič, 2009).

Vezivo poveže zrna agregata v kompozitni material. Kompozitu daje ustrezno konsistenco v svežem stanju ter s tem omogoča njegov nanos na nosilec – zid ali na drug konstrukcijski element, ali povezavo zidakov (kamnitih, opečnih,...) v zid, obok, lok ali drug konstrukcijski element. Vezivo je najpogostejše apneno ali hidravlično, poznamo pa tudi druge vrste veziv, kot so npr. sadra, ilovica ali razna organska veziva (Kramar in Mirtič, 2009).

V predstavljenih primerih je pri preiskovanih vzorcih historičnih malt vezivo iz gašenega apna, zato sem se osredotočila na apneno vezivo in ga podrobneje opisala v poglavju 3.

Glede na lastnosti, ki so jih želeli pridobiti pri maltah, so dodajali v vezivo razne dodatke (Žarnić, 2003).

## 2.2 Zgodovinski pregled uporabe apna in apnene malte

Apno spada med najpogosteje uporabljene produkte človeštva (Young, 2008). Prvi podatki izhajajo iz časa neolitika, ko so odkrili ogenj in spoznali, da kamni lahko kalcinirajo, vidnejšo vlogo pa je uporaba dobila v bronasti dobi (Urošević, 2005). Prve apnene malte zgodovina omenja nekje od 6000 do 5000 let pred našim štetjem.

V obdobju Egipčanov so apnene omete redko uporabljali. Poleg apnenih malt so uporabljali mavec. Kljub temu obstajajo podatki o uporabi apnenih ometov pri gradnji piramid pred 2000 leti pred našim štetjem. Egipčani so bili prvi, ki so za vezivo uporabljali mavec in tako izpodrinili uporabo apna, čeprav drži, da se v nekaterih mavčnih ometih pojavi tudi apno (Kramar in Mirtič, 2009).

V času Grkov se je uporaba apna v gradbeništvu zelo razširila (Kramar in Mirtič, 2009). V 6. stol. pr. n. št. so uporabljali apneno malto, ki je vsebovala delež silike (kremenovega stekla), kamene moke, marmorja, glineno ali vulkansko zemljo in kose opeke, ki so bili uporabljeni kot pucolanski material ali kot agregat. Sestava malte iz obdobja Rimljanov se precej razlikuje od malte grške dobe. V rimski dobi so se izboljšale metode (Križnar, 2006), ki so jih uporabljali Grki, in sicer za proizvodnjo apna, tehnike nanašanja ometa, njegovo glajenje/poliranje, nanašanje v več plasteh ter tudi dodajanje različnih dodatkov osnovni masi (Kramar in Mirtič, 2009). Vendar pa je pri obeh kulturah, tako pri Grkih kot pri Rimljanih, proizvodnja apna temeljila na žganju apnenca.

V obdobju srednjega veka ni bilo velikega razvoja in napredka na področju tehnologije apnenih malt.

Tekom naslednjih stoletij tehnika žganja napreduje zahvaljujoč uporabi peči za žganje apna. V 18. stoletju se je poleg apnenega veziva začel razvoj hidravličnih veziv, ki so vsaj delno nadomestila apneno vezivo oziroma apnene malte (Kramar in Mirtič, 2009).

Obdobje 19. in 20. stoletja zaznamuje industrijska revolucija, predvsem pa izdelava in sama proizvodnja portlandskega cementnega klinkerja. Z razvojem omenjenega portlandskega cementa hidravlična malta skoraj povsem izpodrine apnene malte (Kramar in Mirtič, 2009).

Danes apno ponovno pridobiva na pomenu, saj je nenadomestljivo pri prenovi historičnih objektov in nam daje nov pogled na kulturno dediščino.

## 2.3 Sestava apnene malte

Razmerje sestavin v apneni malti mora biti natančno določeno. Če razmerje ni pravo ali če pogoji okolja glede strjevanja niso ustrezni, pride do pretiranega krčenja in do razpokanja malte. Vzrokov je

lahko več: če je pesek slabo granuliran ali ima preveč finih delcev, če je malta pregosta, če je podlaga preveč vodovpojna, če je sveža malta izpostavljena previsokim temperaturam ali neposredni sončni svetlobi, ki malto preveč izsuši, če je previsoka vsebnost vode v mešanici apnene malte in če je slaba kakovost apnenega veziva (wikipedia, 2012a).

Za pripravo malte je treba pesek in apno dobro zmešati v enotno maso. Pesek mora biti popolnoma suh, saj je z mokrim težko zamešati dovolj gosto maso. Voda okrog zrn oblikuje film, ki onemogoča, da bi apno prišlo čisto do njihove površine, preprečuje dobro vezavo zrn med sabo. Vlaga upočasni tudi čas strjevanja, suh pesek proces pospeši (Križnar, 2006).

Razmerje med apnom in peskom je odvisno od plasti ometa, ki jo delamo, oziroma od namena uporabe narejene malte. Prve plasti ometa, ki so bližje steni, imajo navadno več peska in manj apna za boljši oprijem nosilca. Višje ležeče plasti pa vsebujejo več apna in manj peska, ki hkrati s vsako plastjo postaja vse finejši (Križnar, 2006).

Tipična sestava malte je določena s prostorninskim razmerjem dve do štiri prostorninske enote peska in ena prostorninska enota apna (Žarnić, 2003). Višje ležeči ometi (fini ometi) imajo lahko celo prostorninsko razmerje 1:1. Če za izdelavo malte uporabimo apneno testo, pogosto ni treba dodati nič vode, saj jo apneno testo največkrat vsebuje dovolj. Vodo pa je treba dodati, če uporabimo hidratizirano apno v prahu, vendar naj njena prostornina ne preseže volumna apna (Torraca, 2009).

Malta se pripravlja ročno ali strojno. Pomembno je zaporedje mešanja posameznih komponent, ki pa ni enako pri vseh vrstah malt (Žarnić, 2003).

Apneno malto, pripravljeno iz gašenega apna, je treba vgraditi najkasneje v 12 urah po pripravi (Žarnić, 2005).

V maltah, ki so bile vgrajene v zadnjih sto letih, je pogosto cementni klinker. Lahko gre za t.i. podaljšano malto (kot vezivo sta v ustreznem razmerju uporabljena apno in cement) ali pa za čisto cementno malto. Slednja je dokaz za poseg na historičnem objektu, ki je bil izveden v zadnjem času (Kramar in Mirtič, 2009).

## **2.4 Klasifikacija malt in ometov**

Malte delimo glede na:

- mineralno in petrološko sestavo agregata in veziva,
- porazdelitev velikosti delcev agregata,
- razmerje agregat/vezivo,
- vrsto in količino dodatkov.

Malte lahko glede na način vezanja razdelimo na zračne malte in na hidravlične malte (Žarnić, 2003).

Vrste zračnih malt so:

- apnena,
- mavčna,
- magnezitna,
- glinena in
- šamotna (Žarnić, 2003).

Pod hidravlične malte štejemo:

- hidravlična apnena,
- cementna,
- podaljšana cementna in
- polimerna (Žarnić, 2003).

Po RILEM-klasifikaciji pa malte delimo glede na njihovo tehnično uporabo:

- malte za štukature;
- malte za omete stropov, sten in ostalih arhitekturnih elementov;
- malte za dekorativne elemente – gladke ali reliefne;
- malte kot vezivo (spojnice) pri zidanih konstrukcijah (Palomo et al., 2002).

## 2.5 Lastnosti apnene malte in ometa

Glavne značilnosti in karakteristike apnenih malt :

- Nizka mehanska trdnost zaradi šibke povezave med delci kalcita (Palomo et al., 2002). Zgodovinske stavbe so pogosto zgrajene z zidaki (npr. opeko in več vrst kamna) in manjši premiki teh stavb so precej pogosti zaradi narave temeljev. Ti premiki poškodujejo najšibkejši del stene. Ker je pri uporabi apnene malte le-ta šibkejši člen kot zidak, malta praviloma razpoka pred zidaki. To ima za posledico veliko manj škode in popravilo je dokaj preprosto (wikipedia, 2012a).
- Enostavna uporaba zaradi počasnega procesa strjevanja, ki pa je odvisen od pogojev okolja (Palomo et al., 2002).
- Visok nivo deformacij (nizek modul elastičnosti) dopušča materialu, da absorbira majhne pomike sosednjih materialov (Palomo et al., 2002). Poleg tega ima pri majhnem razpokanju učinkovit sistem samozdravljenja, saj s prodorom zraka ostanki nekarbonatiziranega apna začnejo karbonatizirati (wikipedia, 2012a).

- Visoka prepustnost za vodo in vodno paro (Palomo et al., 2002). Apnena malta je bolj porozna kot cementna malta in odvaža vso vlago v zidu na površje kjer izhlapi. Tako sol raztopljena v vodi kristalizira na površini in s tem ohrani zidake. Pri cementni malti pa voda hlapi pretežno prek opeke. To povzroči nastanek kristalizacije soli na ali pod površino opeke in posledično razpad opeke (wikipedia, 2012a).
- Nizka odpornost na cikle zmrzovanje/tajanje (Palomo et al., 2002).

Sveža malta mora biti dovolj plastična, lepljiva in se mora dobro prilegati na površino. Strjena malta mora imeti zadostno trdnost, stalno prostornino, obstojnost na zunanje vplive itd. (Žarnić, 2003).

Glavne lastnosti apnene malte so torej poroznost, podajnost (togost) in trdnost (nosilnost), saj pomembno vplivajo na historični objekt.

### **2.5.1 Poroznost**

Poroznost je definirana kot razmerje med volumnom, ki ga zavzamejo pore, in celovitim volumnom materiala, vključno s porami, izražena v procentih (Popovics, 1992).

Poroznost pomembno vpliva na sposobnost vpijanja vode ter vlažnost. Vlaga (zračna vlaga, dež) lahko zelo hitro prodre v objekt. Pri historičnih objektih pa poleg vlage iz zraka v objekt lahko prodre tudi dvigajoča se vlaga iz tal. Vlaga se skozi porozni material giblje v notranjost zidu (Young, 2008).

### **2.5.2 Podajnost**

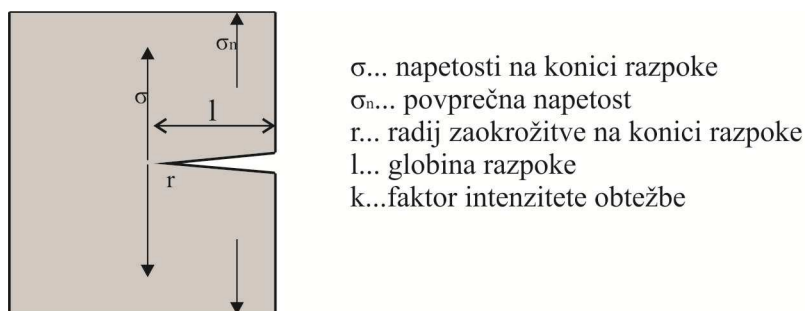
Večina objektov stavbne dediščine nima monolitnih temeljev, zato je pomembno, da je malta, ki veže posamezne elemente, podajna in dovoljuje relativne premike. Poleg tega mora dopuščati premike, ki nastanejo pri raztezanju in krčenju materiala zaradi temperaturnih sprememb (Young, 2008).

### **2.5.3 Trdnost**

Trdnost materiala je definirana kot odpornost materiala proti spremembi oblike. Natezna trdnost krhkih materialov je veliko nižja od njihove tlačne trdnosti (Torraca, 2009).

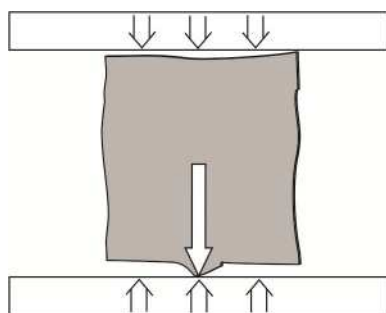
Pri natezni sili se pojavijo koncentracije napetosti v območju konice razpoke na površini materiala, kot je prikazano na sliki 1. Enačba (1), ki omogoča izračun faktorja intenzitete obtežbe  $k$ , je točna v primeru stekla, za druge krhke materiale (npr. malte) je samo približna. Iz enačbe (1) je razvidno, da se faktor intenzitete obtežbe povečuje z dolžino razpoke  $l$ . Torej ko začne razpoka napredovati, se ne bo ustavila. Prav tako pa velja, da se obtežba povečuje z manjšanjem radija na konici razpoke  $r$ , tako da najmanjše razpoke so najbolj aktivne (Torraca, 2009).

$$\sigma = \left( 1 + 2\sqrt{\frac{l}{r}} \right) \sigma_n = k\sigma_n \quad (1)$$



**Slika 1: Napetosti v primeru natezne sile** (Torraca, 2009: str. 73)

Na sliki 2 vidimo, da pri tlačni obtežbi območja koncentracije napetosti niso razpoke ali votline, temveč nepravilnosti, ki štrlijo iz površine (Torraca, 2009).



**Slika 2: Delovanje tlačnih sil na material** (Torraca, 2009: str. 73)

Na tlačno trdnost vpliva predvsem starost vzorcev, poroznost ter sama sestava apnene malte (Young, 2008). Apena malta ne prenese tako visokih tlačnih napetosti kot cementna malta (wikipedia, 2012a). Nizka tlačna trdnost apnene malte je posledica počasne karbonatizacije jedra, velike poroznosti in vrste produktov vezanja. Pri standardnem preizkušancu iz apnene malte (prizma 40×40×160 mm) kalcijev hidroksid v jedru ni reagiral celo po šestdesetih dneh, kar je več kot dvakrat toliko kot je standardna starost, pri kateri običajno določamo trdnost malt (28 dni) (Torraca, 2009).

Če apneno malto vgradimo v dokaj tanko plast, na primer plast, ki ni debelejša kot 10 mm, in če je plast v suhem okolju, lahko dosežemo precej višje vrednosti, vendar jih ni mogoče meriti glede na obstoječe standarde (Torraca, 2009).

Naj povzamem: glede na splošne značilnosti apnene malte so ugotovili, da je najbolj ustrezna uporaba apnene malte na površini zidane stene in ne v njenem jedru glede na podnebne razmere, ki omogočajo pravilno strjevanje. Apnene malte so najbolj primeren material za omete, kjer poroznost strjene malte omogoča preprosto izhlapevanje vlage, ki lahko vpliva na jedro stene (Torraca, 2009).



### 3 APNO KOT VEZIVO

#### 3.1 Proces pridobivanja apna

##### 3.1.1 Kalcinacija

Apno pridobivamo iz karbonatnih kamnin s procesom kalcinacije. Pod vplivom toplote trdna snov razpade do določene stopnje. Kot osnovna surovina se uporablja predvsem apnenec, lahko pa na enak način apno pridobivamo tudi iz marmorja ali dolomita (Križnar, 2006). Nečistoče v apnencu, bogate s kremenom, povzročijo "pusto" apneno testo in zmanjšujejo plastičnost, zato tako apneno testo ni primerno za izdelavo fine malte (na primer, za omete in štukature) (Torraca, 2009).

Kamnino žgemo pri temperaturi nad 800°C (Križnar, 2006). Optimalna temperatura je okoli 900°C (Young, 2008). Kot vidimo v kemijski enačbi (2) ostane od kalcijevega karbonata porozen kamen (kalcijev oksid), ki dobi ime žgano apno (Schofield, 1995). Pri procesu žganja se izloči ogljikov dioksid, ki izhlapi. Izločitev CO<sub>2</sub> povzroči okrog 44% izgube mase (Križnar, 2006).



Na stopnjo kalcinacije vplivajo različni dejavniki: temperatura žganja, kristaliničnost surovine, velikost delcev in čas žganja (Kosovel, 2000).

Temperatura žganja je povezana z disociacijsko temperaturo surovine. Disociacijska temperatura apnenca CaCO<sub>3</sub> je pri tlaku 1 atm in 100% CO<sub>2</sub> v atmosferi 898°C. To pomeni, da pride do popolne kalcinacije kamna pri temperaturah nad 900°C (Kosovel, 2000). Pri temperaturi okoli 980°C pride do disociacije ogljikovega dioksida iz minerala kalcita (Hughes in Valek, 2003). Dolomit razpada pri nižjih temperaturah (500 do 750°C) (Kosovel, 2000).

Kristaliničnost surovine je lahko drobnozrnata ali debeložrnata. Toplota povzroči raztezanje kristalov, ki pri debeložrnatih kristalih lahko povzroči take medsebojne pritiske, da se že pri temperaturi 800°C zlomijo in se surovina zdrobi v prah. Kalcinacija take surovine je večja od drobnozrnate, vendar z njo ne dosežemo apnenih grud (Kosovel, 2000).

Čim večji je premer delcev surovine, tem večjo temperaturo potrebujemo, da prežgemo delec do jedra. To vodi do naraščanja deleža sproščenega CO<sub>2</sub> in povečanja pritiska, ki pri ravnotežju s temperaturo ustavi kalcinacijo. Plin je zato treba odvajati, da ne prihaja zaradi povečanega tlaka tega plina pri temperaturi (300 do 800°C) do rekarbonatizacije, ki se ji tudi pri ohlajevanju ne izognemo povsem (Kosovel, 2000).

Trajanje žganja ima velik vpliv na kvaliteto apna. Priporočeno je postopno segrevanje – naraščanje temperature do točke razpada materiala in zadrževanje časa kalcinacije. Pri nižji temperaturi in krajšem procesu žganja je produkt mehko žgano apno z visoko reaktivnostjo, manjšim skrčkom, večjo gostoto in manjšo poroznostjo. V primeru visokih žgalnih temperatur in daljšemu procesu žganja je produkt nizko žgano apno z nizko reaktivnostjo, večjim krčenjem, manjšo gostoto in večjo poroznostjo (Kosovel, 2000).

### 3.1.2 Hidratizacija

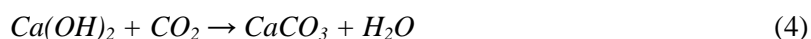
Kalcijev oksid je zelo nestabilen v atmosferskih pogojih in delikaten za shranjevanje, zato živo apno gasijo z vodo. Reakcija je prikazana v enačbi (3). To je proces hidratizacije apna, na novo nastala tvorba pa je kalcijev hidroksid ali gašeno apno (Young, 2008). Minimalna količina vode za gašenje apna je 32,1%. Dejansko se potrebuje več vode, saj se v burni reakciji pri gašenju sprošča veliko toplote in voda izpareva. Zato se potrebuje od 2 do 2,5 krat več vode od teoretične količine (Žarnić, 2003). Živo apno je zelo higroskopičen material. Njegova reakcija z vodo je zelo burna. Pri tem se sproščajo velike količine energije. Posledica tega je segretje vode, ki lahko preseže temperaturo vrelišča. Zaradi burne reakcije se v zrak sprošča apnen prah in razni strupeni plini (Torraca, 2009).



Gašenje apna je bilo v preteklosti izvedeno v jami, ki so jo izkopali v zemljo, da je delavce ohranila na varni razdalji. Danes se gašenje izvaja večinoma z vpihavanjem pare v apno. Rezultat je manj nasilna reakcija, katere končni izdelek je "hidratizirano apno v prahu", vrsta apna, ki je bolj široko dostopna (Torraca, 2009).

### 3.1.3 Karbonatizacija

Apno je zračno vezivo kar pomeni, da veže izključno na zraku. Tako v stiku z zrakom teži k vrnitvi v svoje prvotno stanje, v kalcijev karbonat. Kot je razvidno iz enačbe (4) iz zraka veže ogljikov dioksid, vanj pa oddaja vodo ter se tako ponovno pretvori v kalcijev karbonat. Temu procesu pravimo karbonatizacija (Križnar, 2006).



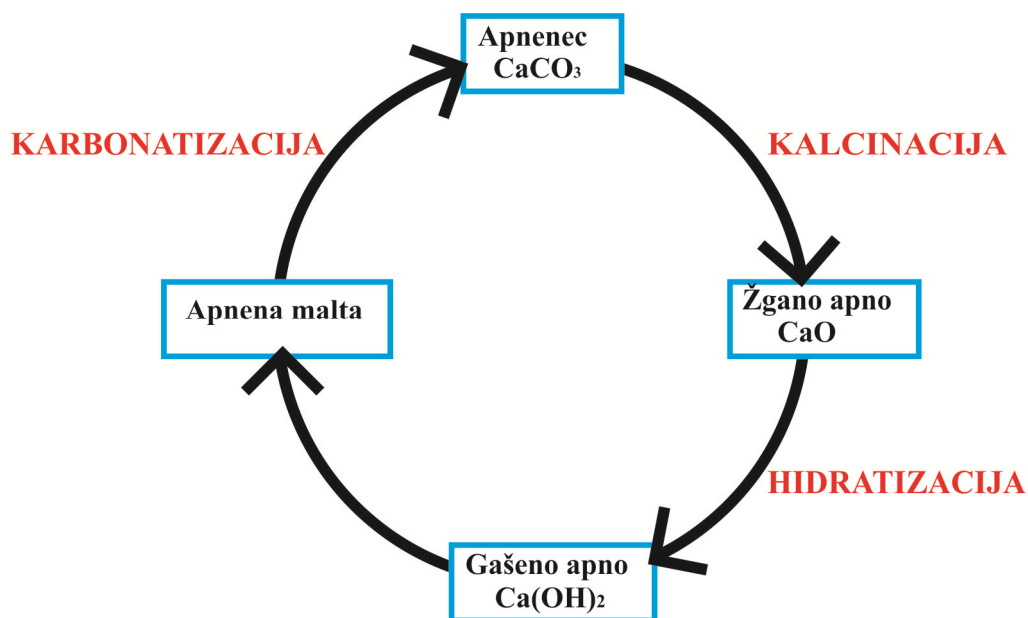
Ko voda v sveži malti izhlapi, lahko zrak pride v odprte pore in ogljikov dioksid lahko reagira z apnom tudi v notranjosti materiala ter tako dosežemo popolno strjevanje (Torraca, 2009). Poteka od zunanje površine proti notranjščini, zato se včasih zgodi, da skorjica, ki se ustvari na površini, ne dopušča več izhlapevanja vode. Ko se  $Ca(OH)_2$  pretvori v  $CaCO_3$ , se namreč njegov volumen poveča za deset odstotkov. To pomeni delno zmanjšanje por, povečanje kompaktnosti površine in s tem otežkočenje popolne karbonatizacije ometa, saj je prodiranje  $CO_2$  omejeno. Zaradi tega v ometih

pogosto srečamo nekarbonatizirano apno, celo v tistih iz antičnih rimskih časov (Križnar, 2006). Prav tako apnene malte ni mogoče uporabiti v jedru debelih sten, ker ogljikov dioksid ne bi povzročil strjevanja v razumnem roku. Pravzaprav nereagiran kalcijev hidroksid pogosto najdemo tudi v jedru starih zidov (Torraca, 2009).

Proces karbonatizacije je hitrejši, če je malta v suhem in zračnem okolju, kjer je stalen dotok svežega zraka (odvajanje vode in dovajanje  $\text{CO}_2$ ) (Žarnić, 2003).

### 3.1.4 Apneni krog

Celoten proces pridobivanja in uporabe apna je najbolj nazorno prikazan grafično s t.i. apnenim krogom (slika 3).



Slika 3: Apneni krog (Štukovnik, 2011: str. 4; Young, 2008: str. 58; Žarnić, 2003: str. 82)

### 3.1.5 Način proizvodnje

Pri žganju je treba paziti na vrsto peči, saj lahko določeni materiali spremenijo lastnosti apna. Apno, pridobljeno v pečeh na drva, je načeloma najboljše, saj take peči pražijo enakomerno. Peči na premog dajejo večjo vročino in apnenec se praži hitreje, a ne tako enakomerno (Križnar, 2006).

Temperatura v starih apnenicah je bila daleč od konstantne, zato se je pogosto zgodilo, da del apnenca ni prejel dovolj toplote in se ni preoblikoval v apno. Še hujši problem je predstavljalo pregretje dela

apnenca, kjer je na kalcijevelem oksidu potekel postopek "sintranja", kar pomeni pretvorbo v zelo kompaktne produkte, ki ne reagirajo z vodo v drugi fazi postopka. Ti produkti reagirajo mnogo kasneje (celo stoletja), s povečanjem volumna in tako poškodujejo malto, v katero so vključeni (Torraca, 2009).

Pred industrijsko revolucijo so žgali apno v tradicionalnih zidanih pečeh ali ilovnatih kopah. Kurili so z lesom. Tradicionalni načini žganja apna temeljijo na ročno narejenih vertikalnih pečeh, ki so bile narejene za enkratno ali večkratno uporabo. Temperatura žganja je bila nižja kot v modernih pečeh današnjega časa. Žgalni čas je bil daljši (nekaj dni), zato so bila taka apna praviloma zelo reaktivna in z nižjim krčenjem, višjo gostoto in manjšo poroznostjo (Kosovel, 2000).

Danes uporabljajo večinoma električne in plinske peči (Križnar, 2006).

### 3.2 Vrste apna

Gradbena apna je mogoče razdeliti v dve skupini :

- Zračno apno je v osnovi sestavljeno iz kalcijevega oksida (negašeno apno) in/ali hidroksida (gašeno apno) (Palomo et al., 2002). Zračno apno veže samo na zraku.
- Hidravlično apno je pretežno sestavljeno iz kalcijevih silikatov, kalcijevih aluminatov in kalcijevega hidroksida (Palomo et al., 2002). Hidravlično apno veže v kontaktu z vodo in zrakom.

Hidratizirano apno dobimo, kadar žgemo čisti apnenec (kalcijev karbonat) v živo apno in ga gasimo z ustrežno količino vode v hidratizirano apno. Glede na količino vode, ki jo bomo pri gašenju uporabili, ločimo:

- Hidratizirano apno v prahu dobimo pri gašenju živega apna z optimalno količino vode. To je količina vode, ki je potrebna za hidratizacijo. Glavna slabost takega apna je, da lahko vsebuje delčke negašenega apna, ki povzročijo nepravilnosti v malti in tako se pojavijo napake na vrhnjem sloju ometa. Poleg tega lahko prah v stiku z ogljikovim dioksidom karbonatizira že v vreči, kjer ga hranimo. Zato moramo tako apno porabiti kar se da sveže (Young, 2008).
- Apneno testo je moker hidrat, ki je kemično enak hidratiziranemu apnu v prahu, vendar je gašen z večjo količino vode kot je potrebna za hidratizacijo. Kljub enaki sestavi prahu in testa je slednji smatran kot boljši material zaradi njegove lepljivosti in boljše sprijemnosti z agregatom v mešanici (Young, 2008). Slabost apnenega testa pa je, da se odmerek barvil in dodatkov določi s pomočjo tehtanja, saj količina vode močno vpliva na količino dodatka.

Hidratizirano apno poznamo tudi pod drugimi nazivi, kot so ne-hidravlično apno, hidrat in podobno (Young, 2008).

Hidravlično apno dobimo ob žganju in gašenju apnenca, ki je kontaminiran z glino (običajno 5-20% gline). Ko žgemo komponente gline, ta postane reaktivna. Na to vplivajo predvsem silikati, aluminati in nekateri železovi oksidi. Od hidratiziranega apna se loči po tem, da doseže trdno stanje neodvisno od ogljikovega dioksida, vendar v vlažnih pogojih. Malte, narejene iz hidravličnega apna, imajo nižjo prepustnost vodne pare in nižjo poroznost, višjo tlačno trdnost in večjo odpornost na kristalizacijo soli v primerjavi s hidratiziranim apnom (Young, 2008).

## 4 AGREGAT

Pod pojmom agregat (zrnat, zdrobljen material) zajemamo vse naravne ali umetne kamnine (ruševine), ki jih uporabimo pri izdelavi malt.

Agregat predstavlja v apneni malti več kot 65% volumna, zato njegove karakteristike zelo vplivajo na lastnosti malte ter na njeno obstojnost (Žarnić, 2003). Je skelet ometa in mu daje trdnost, poleg tega pa določa njegov barvni ton. Njegova poroznost vpliva na način in hitrost karbonatizacije, pa tudi na teksturo in kohezivnost malte (Kramar in Mirtič, 2009).

Agregat ima v malti več funkcij (Križnar, 2006):

- deluje kot polnilo, zmanjša potrebo po vezivu in zato zmanjša krčenje malte;
- je skelet ometa in vpliva na tlačno trdnost ter strukturne lastnosti malte;
- lahko poveča zmrzlinško odpornost;
- njegova poroznost pozitivno vpliva na proces karbonatizacije in s tem na strjevanje malte;
- določa barvni ton ometa.

Zato je treba poznati njegovo mineralno/petrološko sestavo, razmerje vezivo/agregat ter velikost in obliko zrn agregata (Elices in Rocco, 2008) v originalnem materialu, da se izdelata ustrezna malta za sanacijo.

V tradicionalnih maltah lahko najdemo različne naravne agregate, kot so peski, školjke, opečni drobir itd. (Kosovel, 2000). Po mineraloški sestavi pesek v svetovnem merilu vsebuje predvsem kremen, ki se v kristalizirani obliki nahaja delno v prosti obliki, delno pa v različnih spojinah. Oblika in trdota zrn peska vplivata na čvrstost, velikost pa na površinsko strukturo (Križnar, 2006). Trdota agregata je odvisna od vira; vulkanske kamnine so zelo iskan material. Trdota in kompaktnost agregata sta lastnosti, zaradi katerih izdelki dobijo veliko mehansko odpornost.

Vsi agregati morajo biti oprani in čisti preden jih uporabimo. Prav tako ne smejo vsebovati preveč ilovnatih materialov, kemikalij ali organskih nečistoč. Pesek mora biti popolnoma suh, saj je z mokrim težko zmešati dovolj gosto malto. Voda okrog zrn oblikuje film, ki onemogoča, da bi apno prišlo čisto do njihove površine in tako preprečuje dobro vezavo zrn med sabo.

Poleg čistosti so pomembne lastnosti tudi zrnastostna sestava, oblika zrn, delež votlin v kompaktiranem pesku. Zrnastostna sestava nam pove zastopanost posameznih frakcij v agregatu in je podana z zrnastostno krivuljo (Kosovel, 2000). Zrnastostna sestava vpliva na trajnost in kohezivne lastnosti malte. Pesek je lahko rečen, kopan ali zdrobljen. Najboljši je zdrobljeni pesek, saj se na ravne ploskve zrn apno bolje oprime in malta je tako kompaktnjša (Križnar, 2006). Delež votlin v

kompaktiranem suhem pesku nam pove kolikšen del volumna mora zapolniti vezivo. Manj kot je votlin, manj veziva je potrebnega, kar posledično pomeni manjše krčenje (Kosovel, 2000).

Zrnavostna sestava agregata se razlikuje glede na namembnost različnih malt. Tako ima agregat v ometih bolj enakomerno zrnavostno sestavo in manjše največje zrno kot agregat v maltah za zidanje (Kramar in Mirtič, 2009).

Sestava agregata variira glede na geografsko pozicijo objekta, časovno obdobje graditve objekta, kot tudi glede na vrsto aplikacije. Na podlagi dosedanjih raziskav lahko sklepamo, da so vhodne surovine za omete ponavadi pridobivali iz lokalnih virov (Kramar in Mirtič, 2009).

## 5 VODA IN DODATKI

Voda za izdelavo malt ne sme vsebovati snovi, ki bi negativno vplivale na kemijske reakcije med vezivom in vodo. Predpisi svetujejo uporabo vode s pH vrednostjo najmanj 4,5, kar pomeni, da lahko brez predhodnih preiskav uporabljamo vodo iz pipe. Možna je tudi uporaba drugih vod, če se na podlagi primerjalnih preiskav izkaže, da je odstopanje trdnosti malte največ 10% (Kosovel, 2000).

Z namenom spreminjanja in/ali izboljšanja nekaterih lastnosti malte so bili tradicionalno primešani (poleg osnovnih sestavin) nekateri različni izdelki oz. dodatne sestavine (Palomo et al., 2002). Tako so hoteli npr. izboljšati trdnost, obstojnost in doseči počasnejše ali hitrejše sušenje itd.

Ti izdelki (dodatki) so se razvili sčasoma. Na začetku so bili dodatki iz naravnih snovi – tako imenovani organski dodatki. Pod omenjeno vrsto dodatkov štejemo kri, jajca, figov sok, prašičjo mast, gnoj, slamo, živalsko dlako, kazein, sladkor, olje itd. Tradicionalni grobi omet je imel dodano tudi konjsko žimo za armiranje in nadzor krčenja; to je bilo še posebej pomembno, če so omet nanašali na lesene letve ali za osnovo na neravne površine, kot so kamniti zidovi, kjer se je malta pogosto uporabljala v debelejših slojih za kompenzacijo neravnih površin (wikipedia, 2012a). Poleg organskih dodatkov so poznali še nekatere anorganske dodatke: zdrobljena opeka, pucolanske zemlje, marmor, gips, glina (Kramar in Mirtič, 2009). Malti pa so dodajali tudi pigmente (Križnar, 2006).

Najnovejši dodatki so praviloma stranski proizvodi industrije kot so elektrofiltrski pepel in žindra ali drugi, bolj izdelani proizvodi kot so organski polimeri, akrilne smole, epoksi smole itd. (Palomo et al., 2002).



## 6 ANALIZE HISTORIČNIH MALT

Običajno je izbira preskusne metode odvisna od informacije, ki jo želimo pridobiti, in od količine vzorca, ki ga imamo na voljo (Kramar in Mirtič, 2009).

S stališča ohranjanja objekta je potrebno identificirati malto z namenom načrtovanja popravila ob upoštevanju združljivosti, ki mora obstajati med originalnim in novim materialom.

Prvo vprašanje je torej identifikacija hidravlične ali ne-hidravlične karakteristike veziva, ki omogoča temeljno začetno razlikovanje med odkritimi maltami. Poleg tega je hidravličnost malte mogoče drugačnega izvora. Lahko celo temelji na prisotnosti pucolanskih dodatkov, ki so reagirali z apnom, ali na prisotnosti kalcijevih silikatov (Palomo et al., 2002). Identifikacija malte je torej zapleten postopek, saj:

- so lahko začetne sestavine malte reagirale in jih je zelo težko prepoznati ali
- so produkti hidratacije apna-pucolana zelo podobni cementnim izdelkom.

Drugo vprašanje, ki si ga zastavimo, je povezano z vzroki poškodb. Brez izločitve vira problema se bo propadanje malte nadaljevalo in vsaka sanacija bo predstavljala izgubo časa in denarja. Zato je potrebno narediti analize, ugotoviti kaj je vzrok za določeno degradacijo in šele nato ukrepati.

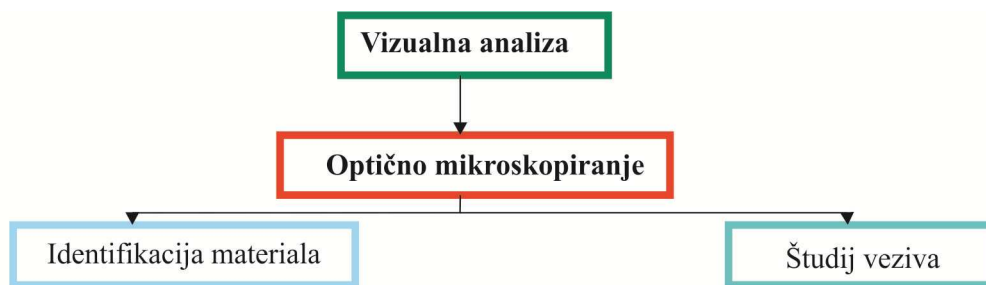
Ko določimo karakteristike originalne malte in ugotovimo vzroke za nastalo škodo, pa se nam poraja vprašanje o sestavi nadomestnega materiala. Tudi tu moramo uporabiti določene analize, da določimo pravilno vrsto agregata, razmerje vezivo/agregat, določene mehanske in fizikalne lastnosti itd.

Analize lahko v grobem razdelimo na dve skupini:

- neporušne analize in
- porušne analize.

Neporušne metode nam dajo podatke o fizikalnih in mehanskih lastnostih malte in tako omogočijo oceniti stopnjo poškodovanosti. Nadalje neporušne analize delimo na In-situ analize ter laboratorijske analize, ki postanejo delno porušne analize, saj moramo odvzeti vzorec in ga primerno pripraviti za izbrano analizo. Porušne preskusne metode pa uporabljamo, da bi določili razmerje sestavin prvotne malte in njene trenutne fizikalno-mehanske lastnosti. Te informacije nam pomagajo zasnovati ustrezno malto za obnovo (Arioglu in Acun, 2006).

Prvi korak postopka karakterizacije je vizualna analiza (ta analiza cilja na splošen opis neznanega vzorca); naslednji korak je popolna študija s pomočjo optičnega mikroskopiranja (to je temeljna tehnika nastavitvenega postopka, katerega cilj je identifikacija agregata in študija veziva) (Palomo et al., 2002). Shematično so koraki, ki sestavljajo metodologijo, prikazani na diagramu 1.



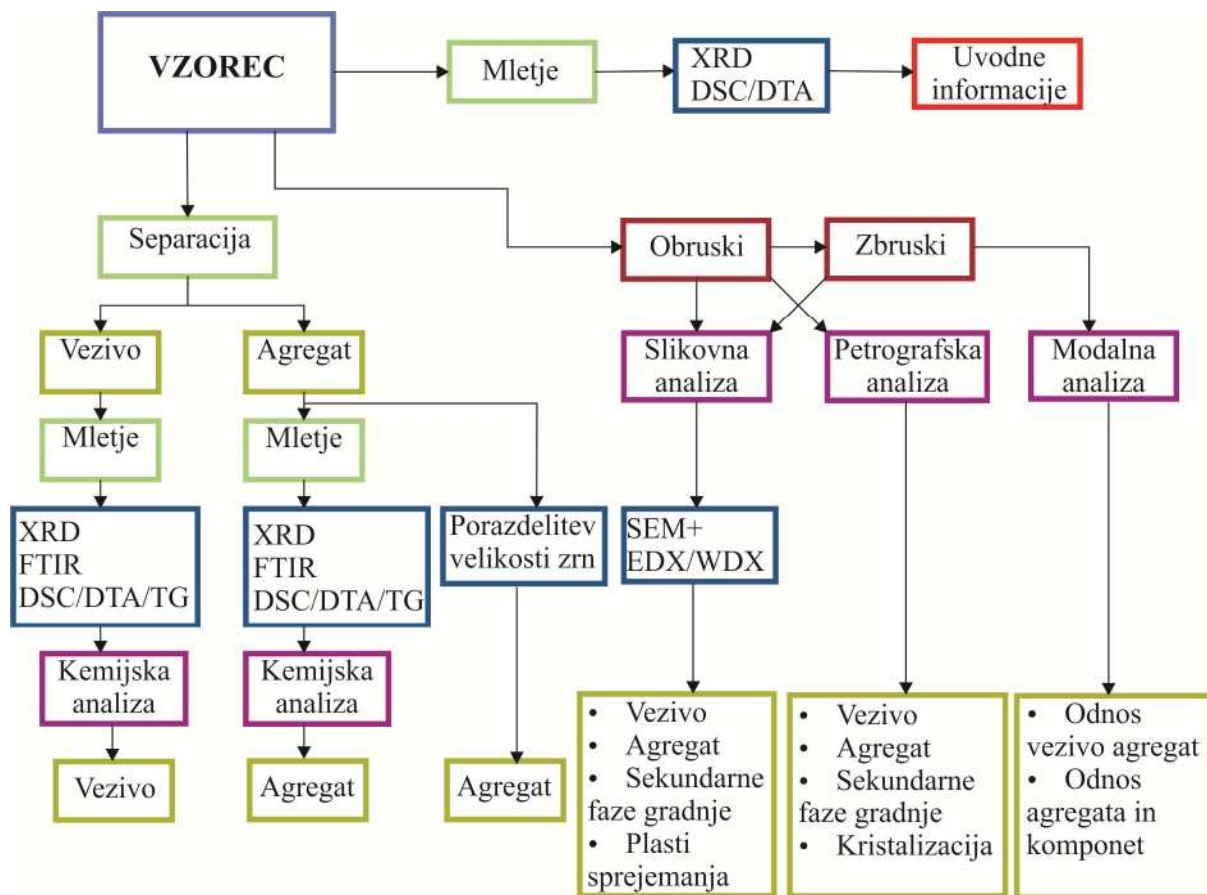
**Diagram 1: Postopek identifikacije tipa malte** (Palomo et al. 2002: str. 6)

Študij veziva prav tako temelji na kombinaciji omenjenih operacij. Vendar pa se rezultati optičnega mikroskopiranja lahko potrdijo le prek uporabe komplementarnih tehnik. Če naštejemo nekaj teh tehnik:

- Rentgenska difrakcija (XRD);
- kemijske analize, ki obsegajo
  - a) test pucolanov ali
  - b) določitev topnih silicijevih dioksidov v vzorcu;
- termična analiza (DTA/TGA);
- infrardeča spektroskopija;
- vrstična elektronska mikroskopija (SEM).

Za identifikacijo in kvantifikacijo mineraloške sestave je najboljša kombinacija različnih metod (Middendorf et al., 2005b). Tako mineraloška kot kemijska karakterizacija historičnih malt morata potekati sistematično.

Primer sistematičnega poteka analiz vzorcev je podan na diagramu 2. Na diagramu vidimo, da najprej pridobimo uvodne informacije o materialu, nat pa s separacijo veziva in agregata natančneje identificiramo agregat ter vrsto in sestavo veziva. Pomembno je tudi, kakšne vrste oz. velikosti vzorca je bilo mogoče pridobiti, da lahko oblikujemo zbruske ali obruske.



**Diagram 2: Shema mineraloško in petrografsko karakterizacijo historičnih malt** (Middendorf et al., 2005: str. 769; Štukovnik, 2011: str. 5)

## 6.1 In-situ vizualna analiza

Pri karakterizaciji materiala moramo upoštevati pomembnost izvajanja vizualne analize malt na terenu pred fizičnim vzorčenjem. Vizualna analiza je učinkovita in poceni neporušna metoda za preiskovanje problemov. Poleg vzorčenja je ključen del praktičnega in analitičnega postopka in se uporablja pri vseh preiskavah historičnih malt (Hughes in Callebaut, 2002). Na podlagi vizualne analize določimo lokacijo vzorčenja in potrebno število vzorcev, ki jih moramo odvzeti.

Najprej naredimo splošno vizualno analizo objekta – stavbo si ogledamo kot celoto. Pri tem smo pozorni predvsem na faze gradnje (prizidki, nadzidave ipd.) in konstrukcijske segmente, ki predstavljajo primarno konstrukcijo zgradbe ter razumevanje le-te. Ko zaključimo pregledno vizualno analizo celotnega objekta, pa se lahko osredotočimo na analizo malte.

Vizualne ocene nam pomagajo pri določanju idej o variantah glede makroskopskih lastnosti materialov malte in s tem omogočajo izbiro analiz, ki se izvedejo na reprezentativnih vzorcih. Izkušena oseba dobi dobro idejo o splošni sestavi malte z nizko stopnjo optične povečave. Na ta način lahko prepozna vezivo, agregat in druge vključke, zlasti dodatke v malti. Ta analiza bo tudi pojasnila način gradnje in skupen profil, kot tudi druga kasnejša popravila. Pri tem je mogoče opaziti značilnosti, kot so število in debelina nanosa malt ali ometov, prisotnost votlin, drobcev, razpok, prisotnost živalske dlake in drugih dodatkov ter številčnost in porazdelitev nemešanega veziva (grudice apna). Določeni bodo tudi splošni tipi veziva (hidravlično vezivo, cement, apno...) ter vrsta in velikost agregata. Prav tako lahko podamo hipotezo o vzroku poškodb (Hughes in Callebaut, 2002). Dodatni pomembni elementi so še pravilno evidentiranje barv in pogojev okolja.

Zavedati se moramo, da so lahko stavbo že večkrat obnavljali in pri tem uporabljali različne materiale in tehnike obnove. Zato moramo biti previdni in poiskati, kje se nahaja originalna oz. prvotna malta (Arioğlu in Acun, 2006).

Poleg vizualne analize nam pomagajo pri pridobivanju začetnih informacij tudi dokumentirani zgodovinski viri v zvezi z različnimi gradbenimi fazami, npr. tip malte, vrsto uporabljenih kamnov za gradnjo, izvor surovin itd. (Hughes in Callebaut, 2002).

Rezultate predhodne analize stavbe je koristno dokumentirati v poročilu. Prav tako je dobro fotografiranje in izdelava skic.

## **6.2 Vzorčenje**

Vzorčenje je definirano kot trajna odstranitev materiala iz objekta z namenom analize ali karakterizacije materiala (Hughes in Callebaut, 2002). Zgodovinski objekt mora biti kar se da zaščiten, saj je vreden historičen in družben material. Te stavbe so poseben primer med objekti, zato je potrebna še posebej skrbna predhodna analiza cilja ohranjanja. Glede na prej navedena dejstva je analitik na historičnih objektih precej omejen pri svojem delu.

Cilji študije morajo biti jasno izraženi pred odvzemom vzorca. Na splošno obstajata dva pristopa za analize historičnih malt (Hughes in Callebaut, 2002):

- ohranjanje objekta in s tem povezana popravila (ugotavljamo vzroke evidentiranih poškodb ter karakterizacijo materialov z namenom proizvodnje nadomestnega materiala);
- študija s ciljem razumevanja arhitekturnega, kemijskega in fizikalnega delovanja historične malte.

Preglednica 1 podaja nekatere povezave med vzroki vzorčenja in morebitnimi zahtevanimi informacijami, ki jih želimo pridobiti z izbranim vzorcem.

**Preglednica 1: Relacija med cilji preiskav in zahtevanimi informacijami** (Hughes in Callebaut, 2002: str. 71)

<b>VZROK ZA VZORČENJE</b>	<b>MOREBITNE ZAHTEVANE INFORMACIJE</b>
<b>ohranjanje/restavriranje:</b> ujemanje, analiza propada	vrsta veziva, razmerje agregat:vezivo, vsebnost soli, tlačna trdnost, trdota, vsebnost vlage, mineralogija
<b>analiza materialov:</b> kompozicija, trajnost, mehanske/fizikalne lastnosti	glavni elementi in mineraloške faze, trdota, odpornost na zmrzovanje, poroznost, prepustnost, hidravličnost, tlačna trdnost
<b>arheologija:</b> viri materialov, tehnologija izdelave, konstrukcijska tehnologija	glavni in sledljivi elementi v materialu, kot so razmerje agregat/vezivo, petrografija, tekstura,...

Pred začetkom vzorčenja je potrebno temeljito razumeti uporabljene materiale, način gradnje, poznati zgodovino oz. stratigrafijo objekta z namenom, da se zagotovi vzorčenje pravih materialov ter da je mogoče dobiti dovolj materiala (Hughes in Callebaut, 2002). Pri tem pa izbira analitične metode določa zahteve za vzorčenje (težo oz. velikost vzorca, vzorec v prahu, zbrusek ipd.). Kvaliteta odvzetega vzorca odlikuje kvaliteto analize (Hughes in Callebaut, 2002). Poleg vsega naštetega na vzorčenje in nadaljnje analize vpliva tudi faktor stroškov, ki so povezani s tem. Upoštevati moramo vse stroške, povezane z samim vzorčenjem in popravilom škode, ki smo jo naredili z vzorčenjem.

v splošnem se zahteva, da so vzorci reprezentativni. Glavni dejavniki, ki so upoštevani pri vzorčenju, so variabilnost v različnih koncih stavbe, sestava na specifičnih, pogosto problematičnih točkah in povprečna sestava na določenem območju zidu. Reprezentativni vzorec mora predstavljati širše območje oz. mora predstavljati tipične spremembe. Biti mora torej minimalen, velik ravno toliko kot je potrebno za pridobitev zahtevanih informacij, da ne delamo škode na zgodovinskem objektu, vendar dovolj velik, da zajema tipične lastnosti, ki jih iščemo. Najbolje je, če vzorec vzamemo skozi celotno debelino stene, kar zahteva odstranitev zidnih enot, vendar pa na objektih kulturne dediščine to ni vedno mogoče.

Ko vzamemo vzorec, moramo natančno zabeležiti lokacijo vzorca. To zajema fotografiranje, načrte in skice, ki identificirajo lokacije mest vzorčenja na zgradbi (Hughes in Callebaut, 2002). Vzorce shranimo v primernih vrečkah ali posodah, ki jih jasno označimo.

Vendar se moramo zavedati, da z vsakim vzorčenjem poškodujemo objekt, pa čeprav je to le majhen delček. Prav tako sem omenila reprezentativnost vzorca, ki jo težko dosežemo pri majhnih vzorcih. Zato imajo prednost vse in-situ neporušne analize, kjer ne potrebujemo fizičnega odvzema vzorca in s tem pripomoremo k ohranjanju objekta ter ne tvegamo, da se vzorec poškoduje oz. kako drugače preoblikuje zaradi transporta ali okoljskih sprememb (temperatura, vlaga). Poleg vizualne analize so

in-situ neporušne ali malo-porušne metode ključne za določitev fizikalnih in mehanskih lastnosti malte ter stopnje degradacije le-teh.

### **6.3 Kemijska in sejalna analiza**

Kemijske analize zadovoljijo potrebe po informacijah, ki so potrebne za ohranjanje, popravila in restavratorska dela na historičnih zgradbah za pravilno izbiro kompatibilnega nadomestnega materiala (Middendorf et al., 2005a).

Najenostavnejša oblika analize malte vključuje kislinsko raztapljanje/separacijo veziva od agregata za določitev njunih sorazmernih deležev (Middendorf et al., 2005a). Ta oblika analize omogoča kvalitativno določanje vrste veziva in značilnosti agregata ter drugih dodatkov.

Metoda je omejena, če je agregat kislinsko topen. Zaradi navedene omejitve moramo vedno najprej narediti mineraloške in petrografske analize. Te analize nam povedo, ali imamo topen agregat oz. ali je vezivo hidravlično (Middendorf et al., 2005a).

Karbonatno vezivo se lahko raztopi z uporabo razredčene kisline, najpogosteje HCl. Glavna omejitev te tehnike je, da če je v malti prisoten karbonatni agregat, potem se raztopi skupaj z vezivom. V takem primeru je interpretacija rezultatov kemijske analize brez predhodnih petrografskih analiz kritična. Prisotnost karbonatnega agregata ima velik vpliv na rezultate, zato ga moramo pred kemijsko analizo ločiti od apnenega veziva (Ortega et al., 2008).

Vendar pa trenutno ni nobenega mednarodnega standarda, ki bi določeval vrsto kisline in njeno koncentracijo za kemijsko analizo malt. Različni laboratoriji uporabljajo torej različne kisline, kar pripelje do težav pri primerjavi in interpretaciji rezultatov, dobljenih v različnih laboratorijih (Middendorf et al., 2005a). Da bi dobili primerljive rezultate je potrebno izvajati analizo pri enaki temperaturi, z uporabo enake kisline in koncentracije le-te ter pri enakem trajanju postopka (Middendorf et al., 2005a).

Vzorec mora biti velik od 5 do 15 g (odvisno od količine in velikosti agregata).

Če je v malti apneno vezivo, izvedemo sejalno analizo agregata potem, ko malto raztopimo s kislino. Sejalna analiza se izvaja z namenom, da ugotovimo porazdelitev velikosti zrn peska, ki je bil uporabljen kot agregat za izdelavo malte (Arioglu in Acun, 2006).

### **6.4 Fizikalno in mehansko testiranje**

Fizikalno testiranje malt pretežno zajema določanje lastnosti, kot so značilnosti strukture por (kapilarnost, gostota, krčenje, poroznost, prepustnost, vpijanje vode itd.) in lastnosti toplotnega širjenja malt. Mehansko preskušanje vključuje na primer določanje trdnosti malte, modula elastičnosti,

sprijemnost s podlago in trdoto površine. Fizikalne lastnosti se pogosto merijo, še posebej je treba tu izpostaviti poroznost. Pri mehanskih lastnostih pa imamo težavo z odvzemom dovolj vzorcev.

Poroznost v maltah se lahko meri z uporabo različnih metod, od relativno preprostih do kompleksnih in instrumentalnih. Te lahko vključujejo posredne metode, kot so preproste metode gostote zasičenosti, merjenje poroznosti z vdorom živega srebra, in posredne petrografske metode z uporabo metod avtomatske analize slike. Nekatere posredne metode, kot je merjenje poroznosti z vdorom živega srebra, so po mnenju nekaterih neprimerne za uporabo pri maltah na osnovi apna, saj poškodujejo zgradbo malte in vodijo do nepravilne ocene poroznosti.

Preizkušanje mehanskih lastnosti malte oz. njihovo kakovost in primernost se preizkuša v svežem in strjenem stanju. Še prej se preizkuša kakovost osnovnih sestavin (vezivo, pesek, voda, dodatki).

#### **6.4.1 Testiranje sveže malte**

Pri sveži malti nas zanimajo predvsem lastnosti, ki so v povezavi z vgradljivostjo in obdelavnostjo malte.

- **Konsistenca**

Konsistenca se na terenu ocenjuje vizualno, empirično pa jo ovrednotimo z laboratorijsko preiskavo, npr. razlez na stresalni mizici.

Zidarji izkustveno ugotavljajo konsistenco že v samem mešalcu, da jo lahko še pred nanosom na zid korigirajo z dodajanjem vode, če je pregosta, ali z dodajanjem apna in peska, če je preveč tekoča. Standardnega postopka preizkušanja konsistence malte na terenu ni, ker si ga vsak zidar izdelava sam na podlagi izkušenj.

Razlez na stresalni mizici po SIST EN 1015–3 se izvaja tako, da vzorec sveže malte, ki ga oblikujemo s pomočjo definirane presekanega stožca, namestimo na ploščo stresalne mizice. Po definiranem številu 15-ih padcev plošče stresalne mizice se izmeri razlez vzorca v dveh pravokotnih smereh. Kot rezultat preiskave se poda povprečna vrednost obeh meritev v mm.

Povezava terenskih preizkusov z metodo razleza pokaže, da je za omete primerna mehko plastična malta razleza od 150 mm do 200 mm. Ustrezen razlez je odvisen od: vrste ometa za katerega je malta namenjena (grobi ali fini omet), poroznosti podlage in načina vgradnje (strojno ali ročno).

- **Adhezija (sprijemnost) s podlago**

Pomembna lastnost je tudi adhezija s podlago. Zidarji jo preizkušajo izkustveno. Kakšen deciliter dobro premešane malte zajamemo s čisto in vlažno zidarsko žlico, jo poravnamo po žlici in nato obrnemo. Pri tem opazujemo, kako hitro malta odpade in kakšno sled (sloj veziva) pusti na žlici. Čim

hitreje malta odpade in čim manj je ostane na žlici, slabšo adhezijo ima. Adhezijo izboljšamo z dodajanjem apna.

Vse apnene malte imajo zelo dobro adhezijo s podlago, zato laboratorijske ali terenske meritve te lastnosti niso smiselne.

- **Prostorninska masa (sveže malte)**

Velika prostorninska masa pri debelejšem ometu skupaj s premajhno adhezijo s podlago in preredko konsistenco, lahko povzroči lezenje ometa oziroma odpadanje le-tega s podlage.

Posoda za določanje prostorninske mase sveže malte po SIST EN 1015-6 mora imeti prostornino 1 l, premer 125 mm in pred poskusom jo moramo stehtati. Standard priporoča uporabo posode za določanje poroznosti sveže mešanice (SIST EN 1015-7), način vgradnje malte pa je odvisen od njene konsistence. Če je razlez manjši od 140 mm, uporabljamo vibracijsko mizico, pri mešanicah srednje konsistence (razlez med 140 in 200 mm) vgrajujemo malto tako, da posodo z malto 10-krat spustimo z višine 13 mm, mešanice z razlezom večjim od 200 mm, pa vgrajujemo z vlivanjem.

#### **6.4.2 Strjena malta**

Na strjeni malti se izvajajo preizkusi za ugotavljanje tlačne in upogibne trdnosti ter duktilnosti, preizkusi za vodovpojnost in poroznost, stabilnost prostornine, hitrost strjevanja, zmrzlinško odpornost in homogenost.

- **Trdnost malte**

Trdnost malte se preizkuša na preizkušancih v obliki standardnih prizem dimenzij 40×40×160 mm. Prizme se preizkušajo na upogib, polovički pa na tlak po 28 dneh ali pri večji starosti.

- **Stabilnost prostornine**

Stabilnost prostornine se ugotavlja s preizkusom treh kolačkov premera 90 mm in višine 15 mm. Kolački se hranijo 28 dni v prostoru z relativno vlago 65% ( $\pm 5\%$ ) na sobni temperaturi. Stabilnost prostornine se ugotavlja na osnovi površinskih sprememb (razpoke, drobljenje).

- **Vodovpojnost**

Koeficient vpijanja vode določimo v skladu s SIST EN 1015-18. Prizmice 40×40×160 mm razpolovimo na pol tako, da dobimo dve prizmici dimenzij 40×40×80 mm, ki jih nato sušimo do konstantne mase na  $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Vzorce potem zalijemo z vodo v globini od 5 do 10 mm tako, da so postavljeni pokončno ter je stran, kjer je vzorec prelomljen, v vodi. Med testom mora biti nivo vode konstanten. Po 24 urah vzorec stehtamo. Na podlagi razlike mas določimo koeficient absorpcije vode.



## 7 METODE ZA KARAKTERIZACIJO MATERIALA

### 7.1 Optični mikroskop

Uporaba petrografskih tehnik je učinkovito orodje za ugotavljanje informacij o sestavi in zgodovini historičnih malt. Njihova uporaba je priporočena pri bolj rutinskih analizah. Problem petrografske analize je, da zahteva strokovno znanje in najbolje je, da jo izvajajo le ustrezno usposobljene osebe, ki ima praviloma izobrazbo s področja geologije oziroma mineralogije.

Primerno pripravljen vzorec (zbrusek) se lahko pregleda s pomočjo petrografskega polarizirajočega mikroskopa. To je dobra tehnika za preiskavo v zvezi s sestavinami zgodovinskih malt. Potem, ko je vzorec odvzet, izdelamo zbrusek debeline 20-30  $\mu\text{m}$ . Tako dobimo »tanek sloj«, ki omogoča prenos svetlobe skozi komponente malte (Middendorf et al., 2005b). To se najbolje izvaja na koherentnih vzorcih malte, ki ohranjajo polno teksturo izvirnega materiala, z razliko od razsutega vzorca, ki predstavlja še vedno problem preiskave sestavin s to metodo. Vzorci so pogosto impregnirani z barvno epoksi smolo, da se zagotovi celovitost med rezanjem. Specialist raziskovalec lahko potem dokumentira mineralno sestavo in strukturo agregata, veziva, dodatkov (organskih, anorganskih, vključno s pucolani) in sekundarnih mineralnih tvorb, tudi soli. Prav tako lahko delno določi proces strjevanja (Middendorf et al., 2005b)

Uporaba optične mikroskopije pri raziskavah historičnih malt in ometov se je izkazala kot izredno učinkovita metoda (Middendorf et al., 2005b). V večini primerov se optični mikroskop (slika 4) uporablja kot delno porušna metoda za določitev mineraloških lastnosti in sprememb na historičnih maltah in ometih. Dobljeni rezultati nam lahko služijo kot osnova za nadaljnje preiskave (Štukovnik et al., 2011).

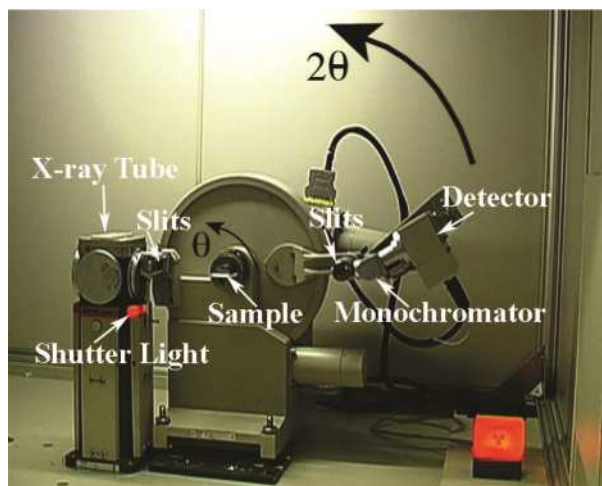


Slika 4: Optični mikroskop v laboratoriju in na terenu

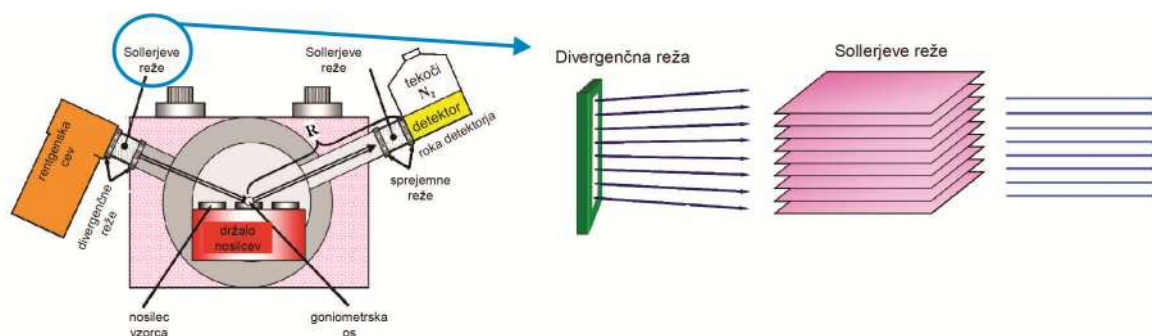
## 7.2 Rentgenska praškovna difrakcija – XRD

Rentgenska praškovna difrakcija je najuporabnejša metoda za rutinske in tudi zahtevnejše strukturne preiskave trdnih kristaličnih vzorcev (Zabukovec Logar, 2008). Uporablja se jo za detekcijo polikristalnih oz. polimineralnih vzorcev ter predstavlja eno od temeljnih metod pri karakterizaciji mineralov in kamnin ter materialov z mineralnim vezivom (malte, ometi) (Artioli, 2010). Primerna je torej za identifikacijo in diferenciacijo veziva in agregata v malti, če je le-ta kristalinična (Middendorf et al., 2005b). XRD se uporablja tudi za odkrivanje sprememb kristaliziranih produktov, ki so lahko vzrok za škodljive reakcije v maltah.

Osnovni princip metode je osnovan na beleženju uklona elektromagnetnega valovanja (valovanja RTG žarkov) na strukturah materiala (Mirtič, 2002). Slika 5 prikazuje aparat, ki ga potrebujemo za rentgensko praškovno difrakcijo; imenuje se praškovni difraktometer (Middendorf et al., 2005b). Vir rentgenske svetlobe v difraktometru je rentgenska cev. Katoda, ki je priključena na napetost, začne oddajati elektrone. Ko je napetost dovolj visoka, le-ti potujejo proti kovinski tarči na anodi, kjer izbijajo elektrone iz tarče in povzročajo emisijo rentgenskih žarkov, ki pa so polikromatski. Ker so rentgenski žarki polikromatski, uporabljamo monokromatorje, da nam izločijo samo karakteristične žarke (monokromatska svetloba). Monokromator je torej naprava, ki iz celotnega spektra izloči del spektra in ga orientira v določeni smeri (Zabukovec Logar, 2008). Sollerjeve reže (slika 6) so postavljene za monokromatorjem in njihova naloga je, da naredijo žarke vzporedne. Žarki potem potujejo do vzorca, kjer se, ko je izpolnjen Braggov zakon (enačba (5)), odklonijo. Detektor beleži sunke odklonjenih žarkov (McMahon, 2008). Intenzivnost refrakcije vzorca s spremenljivim vpadnim kotom rentgenskega žarka je značilen za mineralogijo vzorca. Na ta način se lahko določi sestava malte.



Slika 5: Praškovni difraktometer



Slika 6: Sollerjeve reže (Zabukovec Logar, 2008)

V kristalografiji je uporabna Braggova enačba za opis uklona rentgenskih žarkov na kristalnih ravninah v odvisnosti od valovne dolžine in razdalje med kristalnimi ravninami kot sem že omenila v prejšnjem odstavku. Za ponazoritev si lahko predstavljamo, da rentgenski žarek obseva površino vzorca pod kotom  $\theta$  kot vidimo na sliki 7. Med obratovanjem se vzorec sinhrono vrti s polovično hitrostjo detektorja, tako da je kot med virom žarkov in vzorcem vedno enak kotu med vzorcem in detektorjem. Pri vsakem kotu  $\theta$  se rentgenski žarki "odbijejo" od površine. Če je fazni zamik med različnimi rentgenskimi žarki enak večkratniku valovne dolžine (vrh enega vala sovpada z vrhom drugega vala), se žarki okrepijo, drugače pa izničijo. Kote  $\theta$ , pri katerih se pojavijo ojačitve, izračunamo z Braggovo enačbo (5). Kadar je Braggov zakon zadovoljen, bo beležen uklon na kristalnih ravninah.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (5)$$

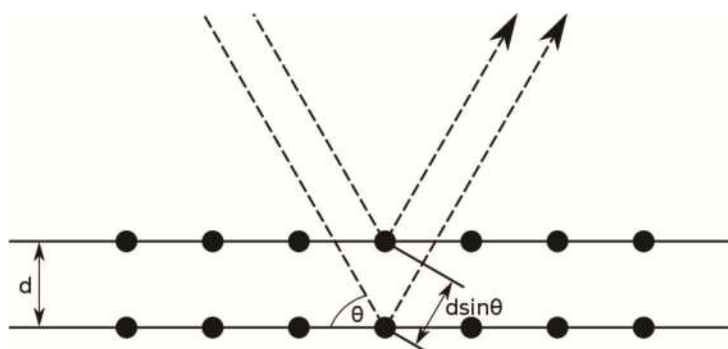
Kjer je:

$n$ ...jakost odboja (uklona)

$\lambda$ ...valovna dolžina

$d_{hkl}$ ...medmrežna razdalja

$\theta$ ...kot odboja (uklona) od ravnine



**Slika 7: Ponazoritev uklona RTG žarkov na kristalnih ravninah** (wikipedia, 2011)

Pri praškovni rentgenski difrakcijski analizi moramo posebno pozornost nameniti sami pripravi vzorca. Za uspešno detekcijo uklonjenih žarkov je potreben vzorec z minimalno površino  $1\text{cm}^2$ . Kot že samo ime analize pove, je potreben vzorec v prahu, težek od 2 do 5g (Hughes in Callebaut, 2002). Če vzorec ni obstojen, ga je potrebno učvrstiti s pomočjo hidravličnega pritiska. V primeru neobstojnega vzorca, tega povežemo z amorfim vezivom, saj nam amorfno vezivo ne vpliva na difrakcijo. Alternativa tej pripravi vzorca je vgraditev vzorca v aluminijast nosilec s plastjo stekla (Whiston in Prichard, 1987). Vzorec mora biti ustrezno nameščen na rotacijsko mizico okoli katere potuje detektor.

Kot rezultat dobimo rentgenski praškovni difraktogram, kjer je predstavljena intenziteta sipanega žarka v odvisnosti od Braggovega kota, na podlagi katerega preiskujemo:

- vrsto materiala;
- kristaličnost in fazno čistost materiala;
- spremembe v elementarni analizi izomorfnih spojin;
- velikost delcev, deformacije v kristalih.

Kvaliteta oz. lastnosti difraktograma so odvisne od energije RTG žarkov, vrste RTG žarkov, resolucije inštrumenta ter fizikalno-kemijskih lastnosti preiskovanega materiala (Zabukovec Logar, 2008).

Vendar pa je XRD analitska metoda za snovi v razsutem stanju. Zato lahko ne dobimo nobenih informacij o medsebojni prostorski povezavi med komponentami malte ali njihovi strukturi. Prav tako z uporabo XRD metode ne zaznamo organskih dodatkov – za odkrivanje le-teh moramo uporabiti mokro kemijsko analizo, termično analizo ali FTIR (Middendorf et al., 2005b).

Če povzamem, XRD je zelo uporabna tehnika za določanje kristalinskih in mineraloških sestavin v malti. Vendar je omejena s tem, da je to tehnika v razsutem stanju, kar je vzrok, da ne razkriva ničesar

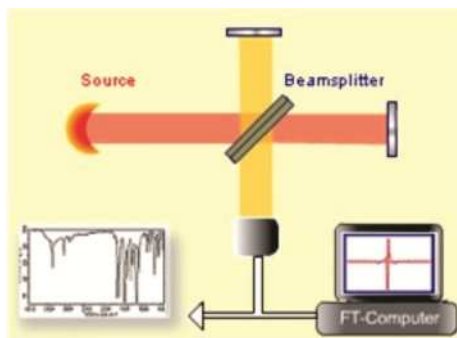
o teksturi ali prostorski razporeditvi komponent v malti. Za uporabo je hitra in relativno poceni, vendar jo je najbolje uporabljati skupaj z drugimi tehnikami, kot so kemične analize in analize za ugotavljanje teksture.

### 7.3 Infrardeča in Ramanska spektroskopija

Ta metoda temelji na interakciji med infrardečim sevanjem in molekulami v snovi. Infrardeče sevanje nima dovolj energije za vzbujanje prehodov med elektronskimi stanji, vendar ima dovolj energije za interakcijo med vibracijskimi ravninami molekul in vezmi skupin atomov. Absorpcija infrardečega sevanja pri vzbujanju prehodov med vibracijskimi ravninami (IR absorpcijska spektroskopija) ali neelastično izmenjavo energije med vpadnim žarkom in vibrirajočo skupino atomov (Ramansko sipanje) zagotovi učinkovite metode za določitev vibracijskega stanja molekul. Vsaka molekula ali skupina atomov ima posebne vibracijske lastnosti, ki so odvisne od vrste atomov, med-atomske kemijske vezi in dinamičnih lastnosti skupine (rotacije, itd). Eksperimentalno merjenje vibracijskih stanj nam torej prikaže določen spekter v infrardečem območju za vsako molekulo in ta prikaz se lahko uporablja za identifikacijo spojine (Artioli, 2010).

Vezi med atomi imajo značilno geometrijo ter naravo vrtenja in vibracij. Trk infrardečega sevanja bo pospešil te vibracije in rotacije in ko je dosežena kritična valovna dolžina lahko dajo energijo vezem. Tedaj bo atomska vez, ki je nabita z energijo, absorbirala infrardečo valovno dolžino. Če se vzorec postavi med vir infrardečega sevanja in detektor, se lahko absorpcija infrardeče svetlobe evidentira kot zmanjšana intenzivnost ter se le-taka lahko nanaša na značilnosti posebne vrste atomskih vezi določene funkcionalne skupine spojin, na primer  $\text{CO}_3$  v karbonatih. Meritve absorpcije IR se večinoma izvajajo z merjenjem dušenja vpadnega žarka v odvisnosti od frekvence ( $\nu$ ), pogosto izraženo z valovnim številom ( $1/\lambda$  v  $\text{cm}^{-1}$ ), ki pa je odvisno od mase opazovanih molekul snovi (Artioli, 2010).

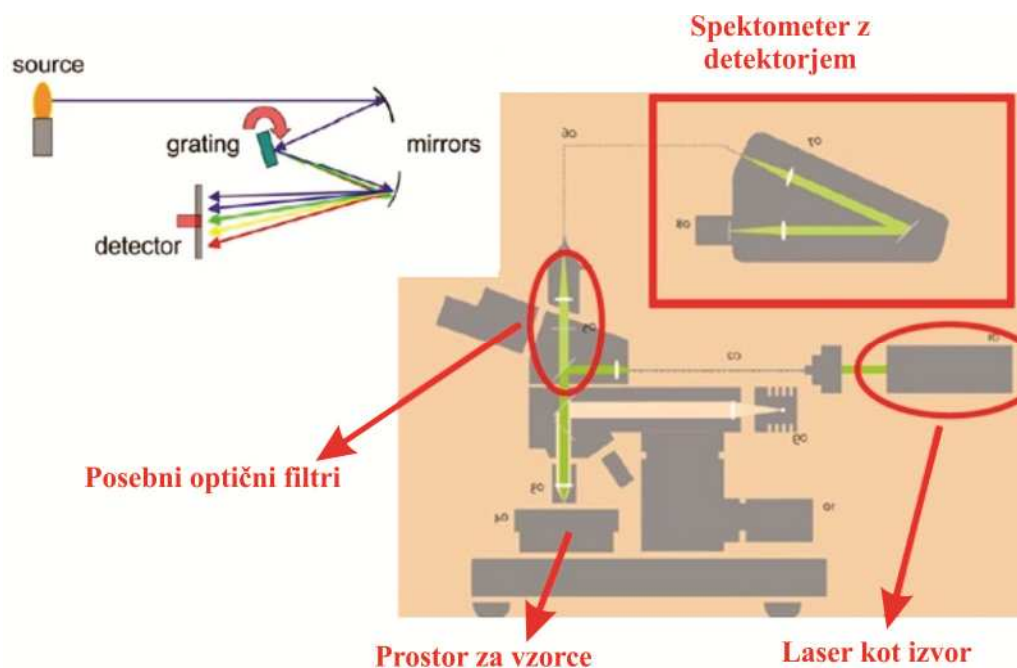
Naprava je sestavljena iz vira infrardečega sevanja, komore za vzorec, interferometra in sistema za zaznavanje. Žarek iz vira, preden gre skozi vzorec, se razdeli na dva žarka (slika 8). Oba žarka se odbijeta nazaj s pomočjo dveh pravokotnih ogledal (eno pritrjeno in eno premično) in se nato združita, preden gre žarek skozi vzorec na detektor. Z absorpcijo v vzorcu se formira oblika interference. Preprosta Fourierova transformacija signala omogoča matematično rekonstrukcijo absorpcije vzorca, kot da bi bila zabeležena v disperzijskem načinu. Ta metoda, imenovana infrardeča spektroskopija s fourierovo transformacijo (FTIR) se uporablja v sodobnih instrumentih zaradi boljše ločljivosti in boljše hitrosti meritev (Arsov, 2011).



**Slika 8: FTIR spektrometer** (Arsov, 2011)

Pri Raman sipanju je mehanizem drugačen, saj vpadno sevanje dejansko deformira atomski naboj in povzroči trenutni dipolni moment v molekuli. Odvisno od sposobnosti polariziranja molekule, oz. če se deformacija elektronskega naboja odziva na možno vibracijsko stanje molekule, je način Raman aktiven in opaziti bo vrhunec Raman sipanja. Zaradi teh različnih mehanizmov in izbirnih pravil, merita IR in Ramanska spektroskopija različna stanja vibracij in zato zagotovita komplementarne informacije o analiziranem materialu. V večini primerov IR in Raman spekter omogočata enako enostavno identifikacijo molekul, ki so prisotne v vzorcu, čeprav se načeloma lahko uporablja ena tehnika za opazovanje določenih stanj, ki so neaktivna pri drugi. Izolirana voda je splošni primer molekule, ki ni Raman aktivna. To pomeni, da moramo za opazovanje majhne količina vode v vzorcu uporabiti IR; to tudi pomeni, da moramo uporabiti Ramansko spektroskopijo za opazovanje signalov drugih molekul, ko so razpršene v vodi (Artioli, 2010).

Raman spektrometri so sestavljeni iz vira svetlobe, pogosto je to helij/neon laser, sistema optične osvetlitve vzorca (posebni optični filtri) in detektorja, ki zaznava razpršene signale. Slika 9 prikazuje skico ramanskega mikroskopa, kjer so nazorno označeni vsi prej naštetni elementi. Spektrometer ima prizmo ali napravo, ki omogoča, da zaznavate intenzivnost razpršitev kot funkcijo frekvenčnega premika nedelujočega elastičnega sevanja (Rayleigh sipanja). Podobno kot pri FTIR instrumentih, večina sodobnih Raman spektrometrov temelji na interferometričnih sistemih in načinu, ki sloni na Fourierovi transformaciji signala z namenom izboljšanja kakovosti merjenih spektrov (FTRS). Spektralna ločljivost je odvisna od disperzijskih lastnosti uklonske mrežice in od goriščne razdalje zrcal v spektrometru (Artioli, 2010).



Slika 9: Shema disperzijskega ramanskega mikroskopa (Arsov, 2011)

FTIR tehnika uporablja zelo majhne vzorce, manjše od 0,5 mg s površino manj od 0,5 mm<sup>2</sup>, kar je izredno uporabno pri proučevanju vrednih objektov kot so stenske poslikave (Middendorf et al., 2005b).

Infrardeča spektrometrija je primerna za identifikacijo materiala in študijo kemijske strukture in narave vezi med atomi. Za naše potrebe nas zanima samo identifikacija materialov v malti, predvsem v vezivu in možnosti za kvantifikacijo njihove številčnosti. Zlahka zazna pigmente in ostale organske dodatke (Middendorf et al., 2005b). Poleg tega pa je ta tehnika relativno enostavna za uporabo, zahteva majhne vzorce in ne vzame veliko časa.

Vendar vibracijske spektroskopije ni mogoče uporabiti za analizo posameznih atomov in elementarnih kompozicij, temveč se uporablja za identifikacijo molekul organskih snovi in vezane skupine atomov v anorganskih materialih, na primer strukturne skupine v kristalnih fazah, kot so karbonatna skupina, molekule vode, hidroksilne skupine, silikatne skupine in mnoge druge.

Študije historičnih malt, ki se poslužujejo infrardeče spektrometrije redko uporabljajo samo to tehniko. Najpogosteje se uporablja v kombinaciji z uporabo XRD, TG ali DTA.

Za zaključek je narejen povzetek v preglednici 2, kjer primerjam IR spektroskopijo in ramansko spektroskopijo.

**Preglednica 2: Primerjava IR in ramanske spektroskopije**

	<b>IR</b>	<b>RAMAN</b>
<b>Pojav</b>	Absorbcija	Sipanje
<b>Izbirno pravilo</b>	Sprememba dipolnega momenta	Sprememba polarizabilnosti
<b>Način zajema</b>	Absorbcija	Razlika glede na izvor
<b>Izvor</b>	Globar, sinhrotron	Monokromatski laser
<b>Tipične valovne dolžine</b>	2-25 $\mu\text{m}$	Vidna ali NIR
<b>Sestavni deli</b>	Interferometer (FTIR), reflektivna optika, detektor	Spektrometer, optični filtri, detektor
<b>Tipi vzorcev</b>	Zelo raznovrstno (omejitve pri uporabi $\text{H}_2\text{O}$ )	Zelo raznovrstno (primerno pri uporabi $\text{H}_2\text{O}$ )
<b>Krajevna ločljivost</b>	Pogojena z optiko ter $\lambda$	Pogojena z optiko ter $\lambda$
<b>Spektralna ločljivost</b>	Odvisna od nastavitve interferometra	Odvisna od nastavitve spektrometra
<b>Čas zajema</b>	Reda velikosti nekaj minut	Reda velikosti nekaj minut

#### 7.4 Termične analize – DTA in TG

Termične analize se lahko uporabljajo za malte s pomočjo treh osnovnih tehnik, TG, DTA in DSC. Vse metode, čeprav imajo različne značilnosti, dajejo približno enake informacije, ki temeljijo na fizikalnih spremembah, ko spojine izpostavimo vročini v nadzorovanih pogojih (Middendorf et al., 2005b).

Termogravimetrija (TG) meri izgubo teže vzorca, ko ga segrevamo. Izguba teže med segrevanjem je lahko povezana z posebno fizično razgradnjo v materialih, ki se pojavi kot posledica učinka povečanja temperature. Na primer sadro lahko prepoznamo z izgubo teže med 120 in 200 ° C, saj izgubi vodo in se preoblikuje v anhidrit (Middendorf et al., 2005b).

Diferenčna termična analiza (DTA) in diferenčna dinamična kalorimetrija (DSC) sta zelo koristni in najbolj uporabljani metodi. Pri DTA merimo razliko termonapetosti (in s tem razliko temperatur) med preizkušancem, ki za potek fizikalnih ali kemijskih reakcij porablja ali sprošča toploto in primerjalnim telesom (inertna snov, običajno iz aluminija), v kateri v raziskovanem temperaturnem območju ne pride do energetskih sprememb. Razliko termonapetosti med preizkušancem in primerjalno snovjo določamo v odvisnosti od časa (t) ali od temperature (T) in jo temu ustrezno grafično prikažemo. Ko



inertna snov še naprej povečuje svojo temperaturo, vzorec pa ne, so zajeti endotermni viški. Takrat vzorec absorbira toplotno energijo in jo uporablja za začetek razgradnje ali mineraloške pretvorbe, običajno izgube kemično vezanih elementov, na primer vode iz sadre ali ogljikovega dioksida iz kalcita in dolomita. Endotermni ali eksotermni prehodi so značilni za določene minerale, ki jih je mogoče identificirati in kvalificirati z uporabo DTA (Middendorf et al., 2005b)

DSC izhaja iz istih osnovnih principov kot DTA. Medtem ko pri DTA merimo temperaturne razlike med vzorcem in primerjalnim telesom, se pri uporabi DSC med segrevanjem vzorcu dodaja energija, da se ohrani vzorec in inertni material na isti temperaturi. Pri tem se beleži poraba energije. Ti podatki se nato uporabljajo kot merilo kaloričnih vrednosti toplotnih prehodov, ki jih vzorec doživi. DTA in DSC imata še eno prednost pred TG glede identifikacije mineralov v maltah s tem, da sta sposobna zaznavati polimorfne spremembe v spojinah, ki ne vključujejo izgube teže (Middendorf et al., 2005b).

### **7.5 Vrstični elektronski mikroskop – SEM**

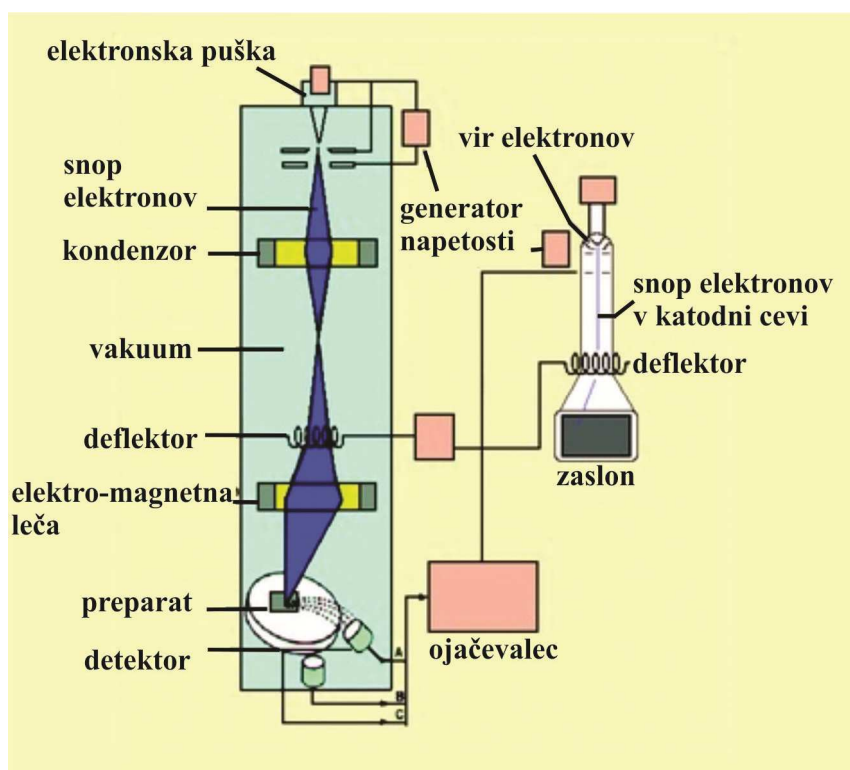
Za natančnejšo analizo malte, predvsem dodatkov in veziva, uporabljamo vrstično elektronsko mikroskopijo (Kramar in Mirtič, 2009). Vrstični elektronski mikroskop (slika 10) je mikroskop, ki za opazovanje površine uporablja elektronski curek. Curek »tipa« raziskovano površino po vzporednih črtah. SEM se uporablja za opazovanje morfologije in strukture površin. Omogoča neposredne posnetke zelo majhnih struktur (tudi do 10 ali 100 nanometrov). Z njim lahko opazujemo površine z elektronsko ločljivostjo v nanometerskem področju in v širokem razponu povečav, ki sega pri sodobnih komercialnih mikroskopih od 10 do 500000. Odlikuje ga velika globinska ostrina. Njena uporaba za študijo malt večinoma vključuje kvalitativne in kvantitativne karakterizacije komponent malte in njene teksture nastanka. Torej se uporablja za karakterizacijo morfologije in teksturnih medsebojnih povezav komponent malte, vključno s karbonati in hidrati (njihovo naravo, obliko in strukturo) v vezivu ter identifikacijo faz spreminjanja.



**Slika 10: SEM (levo) in vakuumsko jedro (desno)** (Biotehniška fakulteta, 2010; wikipedia, 2011)

Vrstični elektronski mikroskop je sestavljen iz elektronske puške, v kateri nastane snop pospešenih elektronov; elektronskih leč, ki služijo za fokusiranje in odklanjanje elektronskega curka; detektorjev, ki sprejemajo elektrone in elektromagnetna valovanja, ki nastanejo pri interakciji elektronskega snopa z vzorcem ter krmilja za optimiranje pogojev dela in prikaz elektronske slike. Pri elektronski mikroskopiji kot vir valovanja uporabljamo elektrone, ki zaradi kratke valovne dolžine teoretično omogočajo do 100.000-krat boljšo ločljivost od vidne svetlobe. Zaradi njihove majhne mase je pot elektronov v zraku omejena, zato je potrebno v notranjosti elektronskega mikroskopa zagotavljati vakuum. Vir elektronov (elektronska puška) je nameščen v zgornjem delu mikroskopa (slika 11). Elektromagnetne leče v kondenzorju izsevane elektrone zberejo v ozek snop, ki ga nato deflektor v vrsticah vodi po površini preparata. Ob stiku snopa elektronov s površino preparata prihaja do vrste reakcij, med drugim tudi do izbijanja sekundarnih elektronov iz površine preparata, ki jih zazna detektor. Ojačen signal sekundarnih elektronov potuje v katodno cev, kjer ga z deflektorjem v mikroskopu usklajen sistem vodi na površino ekrana. Slika na ekranu tako nastaja sočasno s pomikanjem snopa elektronov po površini preparata, povečava mikroskopa pa je razmerje med površino ekrana in površino skeniranega preparata. Odbite elektrone uporabljamo za kvalitativno in kvantitativno kemijsko analizo sestave vzorcev (na katodni cevi iz točk različne svetlosti, ki sovpadajo z atomskim številom, dobimo kemično sestavo vzorca).

Za tridimenzionalne analize so potrebni zelo majhni vzorci, morda samo 1 gram. Pri izdelavi zbruska pa je potreben košček malte v velikosti škatlice za vžigalice. Vzorci so lahko zelo različni: masivni, praškasti, različni delci, vlakna, debele in tanke plasti na podlagah; v naravni obliki, polirani, jedkani itd. Vzorci za konvencionalno vrstično elektronsko mikroskopijo morajo biti električno prevodni, obstojni v vakuumu in neobčutljivi za lokalno segrevanje, ki nastane pri interakciji elektronov z materialom. Nprevodne vzorce moramo pripraviti tako, da na površino vzorcev nanesemo tanko plast kovine ali plast ogljika debeline od 20 nm do 30 nm (Middendorf et al., 2005b). Za izdelavo kovinske prevleke na površini vzorca se uporabljata dve tehniki: naprevanje in npraševanje. Kovinske plasti (Au, Pt, Au-Pd, Cr, ...) največkrat nprašujemo z metodo magnetronskega ionskega npraševanja v argonovi plazmi ali z naprevanjem kovine v visokem vakuumu. Ogljik nanašamo z naprevanjem iz grafitne nitke ali grafitne elektrode. Za preiskave mikrostrukturnih lastnosti materialov se pogosto uporablja klasična metalografska priprava poliranih površin vzorcev in kemijsko ali termično jedkanje.



Slika 11: Princip delovanja SEM (Biotehniška fakulteta, 2010)

Dejansko je vrstična elektronska mikroskopija med najbolj pogosto uporabljenimi tehnikami za analizo zgodovinskih malt, čeprav relativno visoka cena pomeni, da je njena uporaba večinoma omejena na specializirane raziskovalne centre na univerzah ali nacionalnih ustanovah za izvajanje raziskav. Razlog za njeno priljubljenost je verjetno povezan z njeno enostavno uporabo, enostavno

pripravo vzorca, privlačnostjo slik, ki se jih lahko proizvaja, in majhno potrebno velikostjo vzorca. Zadnji dve točki sta morda najbolj pomembni, a prinašata metodi nekaj kritik. Reprerentativnost je glavni pogoj za interpretacijo mikrostrukturnih značilnosti, čeprav je to zelo težko doseči na tako majhnem obsegu in naše oči pogosto pritegnejo "zanimive" podrobnosti, ki pa niso nujno reprerentativne za celoto. Še enkrat, pri načrtovanju analize malte mora biti uporaba SEM skrbno utemeljena in informacije, ki bodo pridobljene, morajo biti skrbno določene.

### **7.6 Analiza mikrožarka elektronov**

Druga metoda za analizo kemijske sestave materiala je uporaba metode mikrožarka elektronov. Pri tem se žarek elektronov usmeri skozi vakuum na vzorec za analizo. Ko je bil material enkrat v stiku z elektroni, bo le-ta oddajal rentgensko sevanje različnih valovnih dolžin, odvisno od elementov. Intenzivnost tega sevanja je mogoče odkriti in njeno intenzivnost povezati z deleži elementov v vzorcu na točki, kjer ga zadane elektronski žarek. Strokovna analitična oprema obstaja imenovana mikroproba elektronov, vendar je sedaj meritvena tehnika na voljo na vseh skenirnih elektronskih mikroskopih, ponavadi navedena kot EDS ali EDX - energijska disperzijska spektroskopija rentgenskih žarkov. Metoda se redno uporablja za potrditev identifikacije mineralnih vrst v študijah zgodovinskih malt, še posebej, če se izvaja slikanje mikrostruktur.

Tehnike mikrožarka elektronov obetajo podrobne in natančne kemijske analize malt, ki jih je mogoče povezati s teksturami in komponento združb in reakcij med njimi. V kombinaciji s SEM študijo in BSE slikanjem je to še ena učinkovita metoda, ki pa še ni veliko uporabljana v študijah zgodovinskih malt.

## 8 PROPADANJE HISTORIČNIH MALT IN OMETOV

Število materialov, ki so jih uporabljali pri graditvi zgodovinskih objektov, je omejeno. Po navadi so uporabljali material, ki je bil na voljo v bližnji okolici. Tradicionalni materiali so torej kamen, opeka, les, malta in omet. Med temi pa so malte in ometi najbolj občutljivi na okoljske razmere in zato pride do pojavnosti degradacije najprej na teh dveh omenjenih materialih ter so zato najbolj potrebni obnove (Arioglu in Acun, 2006).

Poškodbe malte ali ometa so lahko estetski in funkcionalni problem (van Hees et al., 2004). Propadanje malte se pojavi zaradi različnih kemičnih, fizikalnih, mehanskih, bioloških ipd. procesov. Navadno poteka hkrati več kot en mehanizem sprememb, poleg tega pa imajo kemijski, biološki in drugi procesi pogosto fizične in mehanske učinke. To pomeni, da je identifikacija vzroka propadanja redko enostavna in pogosto zahteva interdisciplinarni študij problema (Palomo et al., 2002).

### 8.1 Faktorji, ki vplivajo na proces propadanja

Na proces propadanja malte in ometa vpliva več različnih faktorjev, ki so povezani z delovanjem okolja, atmosfere, materialom, zasnovo objekta, izdelavo in postopkom gradnje, vplivom uporabe in vplivom destruktivnih učinkov restavriranja in vzdrževanja (Arioglu in Acun, 2006; van Hees et al., 2004).

Osnovni faktorji propadanja materiala, ki so povezani z delovanjem okolja so vlaga (dež, zračna vlaga, sneg, vlaga iz tal in talne vode), sol (izločena iz tal, zraka – aerosoli, talne ali površinske vode, zidu), zračno onesnaževanje, nenehno nihanje temperature in ekstremne temperature, izpostavljenost požaru, dinamična obremenitev (potresi, veter, vibracije zaradi prometa) ter posedanje tal (van Hees et al., 2004).

Materialne faktorje, ki vplivajo na proces degradacije, predstavljajo sestava malte (vrsta in količina veziva, velikost zrn peska), lastnosti opeke ali kamna in malte ter njuno medsebojno delovanje in prisotnost soli v malti (van Hees et al., 2004).

Glavni faktorji oblikovanja so primarno strukturno oblikovanje zgradbe in nadaljnje modifikacije, izbira materiala, detajli zgradbe (še posebej elementi, ki so kritični za vodo kot so odprtine – okna, vrata, žlebovi ipd.) ter izbira metod in materialov za popravilo (van Hees et al., 2004).

Faktorji, ki so povezani z izvedbo, so kvaliteta izvedbe, mešanje malte na mestu, način sušenja materiala in okoliščine sušenja, zaščita (sveže) malte in pomanjkanje znanja o tradicionalni izvedbi (van Hees et al., 2004).

Pod faktorje vzdrževanja uvrščamo slabo vzdrževanje (ne takojšnje popravilo) ter neprimeren program vzdrževanja (monitoring, časovni razpon) (van Hees et al., 2004).

Vsi navedeni faktorji, ki vplivajo na proces propadanja, so predstavljeni v preglednici 3.

**Preglednica 3: Pomembni faktorji, ki vplivajo na procese degradacije (van Hees et al., 2004: str. 645)**

OKOLJE	vlaga	dež, sneg
		talna voda
		zračna vlaga
		poplave
	sol	izločena iz zraka
		aerosoli
		talne ali površinske vode
		zid
	onesnaževanje zraka	poplave
	izpostavljenost požaru	
	temperaturni faktorji	nihanje
		ekstremi
	dinamična obremenitev	potres
veter		
promet		
vibracije		
posedanje tal		
MATERIALI	sestava malte	vrsta veziva
		količina veziva
		velikost zrn peska
	lastnosti sistema	poroznost
		kapilarni transport
	opeka/kamen in malta	adhezija / vez
prisotnost soli v materialih		
OBLIKOVANJE	primarno strukturno oblikovanje in modifikacije	
	izbira kombinacije materialov	
	detajli zgradbe	
	izbira metod in materialov za popravilo	
IZVEDBA	kvaliteta izvedbe	izvedba mešanja malte na terenu
		način sušenja materialov in pogoji sušenja
		zaščita sveže malte
	pomanjkanje znanja glede (tradicionalne) izvedbe	
VZDRŽEVANJE	slabo vzdrževanje	
	neprimeren program vzdrževanja	

## 8.2 Procesi propadanja in poškodbe

Najpogostejše poškodbe na ometih so:

- razpoke različnih oblik,
- nabrekanje ometa na posameznih mestih,
- odstopanje ali odpadanje celotnega ometa ali posameznih delov,
- madeži, cvetenje, plesen ali gubanje na površini ometa.

Mnoge poškodbe na ometih so posledica pojavov, kot so posedanje objekta, tresljaji zaradi prometa itd., na katere ne moremo vplivati. Velik del poškodb pa je posledica nepravilne kombinacije gradbenih materialov ali nepravilne tehnologije izdelave.

Arıoglu in Acun (2006) sta procese propadanja razdelila na propadanje zaradi vpliva okolja in propadanje zaradi popravila oz. obnove (preglednica 4). Sama sem raje procese propadanja razdelila na mehanske procese propadanja, fizikalne procese propadanja, kemijske procese propadanja in biološke procese propadanja kot je prikazano v preglednici 5. Vsak posamezen proces ima specifične efekte na oz. v materialu, ki se kažejo kot poškodbe, značilne za posamičen proces. Ker sem nekatere od teh poškodb srečala na objektu, sem določene procese propadanja opisala v eksperimentalnem delu.

**Preglednica 4: Procesi propadanja in z njimi povezane poškodbe** (Arıoglu in Acun, 2006: str. 1225)

PROCES	EFEKT	POŠKODBE
<i>Propadanje zaradi vpliva okolja</i>		
Kisli dež	Razpad karbonatov	Slaba kohezivnost malte, izluževanje agregata
Zmrzovanje/tajanje	Izločanje agregatov	Vodi do razpada malte
Izpostavljenost ekstremni količini pare (v primeru ognja)		Razpad malte
Agregat za malto vsebuje glino	Odtekanje drobnih delcev v vlažnem okolju	Razpadanje malte, lokalne izbokline
Morska voda, onesnažen zrak, uporaba kontaminiranega materiala	Rast kristalov soli (nitrati, sulfati, kloridi)	Razpad malte, razpoke
Rast rastlin	Življenjski cikel rastlin	Biološka degradacija
Delovanje organske snovi	Življenje organizmov	Mikrobiološka degradacija
<i>Propadanje zaradi popravila, obnove</i>		
Uporaba cementa namesto apna	Povečanje trdnosti, pokanje	Razpoke zaradi krčenja in difuzija vode skozi razpoke (različna procesa)
Sol iz malte	»cvetenje« površine	Razvoj soli
Dodajanje umetnih smol	Sprememba naravnega parnega režima	Odstopanje od površine

**Preglednica 5: Procesi propadanja malt in njihove poškodbe**

<b>PROCES PROPADANJA</b>	<b>EFEKT</b>	<b>POŠKODBE</b>
<b>Mehanski procesi</b>		
<i>Napetosti zaradi obtežbe</i>	Koncentracija napetosti	Širjenje razpok
<i>Delo človeka</i>	Površinske poškodbe	Slabša odpornost materiala
<i>Vibracije prometa</i>	Povečanje napetosti, dinamična obtežba	Širjenje razpok
<i>Nihanje temperature</i>	Spremembe dimenzij materialov oz. kristalov	Povečanje poroznosti, izguba kohezije
<b>Fizikalni procesi</b>		
<i>Kapilarni dvig</i>	Rast kristalov soli, življenje organizmov	Razpad malte, razpoke, biološka degradacija
<i>Morska voda, sol iz materiala</i>	Rast kristalov soli	Razpad malte, razpoke
<i>Zmrzovanje/tajanje</i>	Izločanje agregatov	Razpad malte
<b>Kemijski procesi</b>		
<i>Kisli dež</i>	Razpad karbonatov	Slaba kohezivnost malte, izluževanje agregata
<i>Onesnažen zrak</i>	Rast kristalov soli	Razpad malte, razpoke
<b>Biološki procesi</b>		
<i>Rast rastlin</i>	Življenje organizmov	Biološka degradacija



## 9 MALTE ZA SANACIJO

Zavedati se moramo, da naši posegi na objektu ne preprečijo propadanja (Zehnder, 2007). Cilj celotnega postopka je izdelati material, ki bi zmanjšal oz. upočasnil nadaljnje propadanje originalnega materiala. Malto za popravilo projektiramo na podlagi dobljenih rezultatov iz analiz in jo primerjamo z originalno historično malto. Nazadnje sprejmemo zaključne odločitve na katerih slonijo dejanski ukrepi na objektu.

Vse narejene analize nam podajo ustrezne parametre za določitev izdelave materiala za sanacijo, ki mora biti čim bolj podoben originalnemu materialu objekta. Najpomembnejši parametri, ki jih moramo pri tem upoštevati, so razmerje vezivo/agregat, določitev vrste veziva, disperzija teksture agregata v vezivu, mineraloška definicija agregata in prisotnost organskih snovi (Arioglu in Acun, 2006). Le tako lahko nov material »sobiva« z originalom, mu nudi podporo in se v primeru poškodb tudi na nek način žrtvuje.

Poleg fizikalnih in mehanskih lastnosti pa ne smemo pozabiti na estetske lastnosti kot so strukturna in barvna usklajenost originalne in sanacijske malte (Arioglu in Acun, 2006).

Zaradi vseh naštetih pogojev je uporaba cementa v primeru sanacijskih ali restavratorskih del na stavbni dediščini neprimerna in lahko povzroči dodatno škodo na objektu, saj zaradi svojih lastnosti ni kompatibilen material z apneno malto.

Nizka poroznost cementnega kamna ovira prehod vodne pare in s tem povzroči zastajanje vode v originalnem materialu ter posledično vodi do razvoja plesni, mehanskega propadanja, problemov pri zmrzovanju. Poleg tega pa s preusmeritvijo deževnice na originalen material pride do izpiranja historičnih malt in s tem do pospešenega propadanja. V primerjavi z apneno malto ima cementna malta višji koeficient raztezanja, zato vpliv toplotnih ciklov povzroči škodo na primarnem oz. originalnem materialu. Modul elastičnosti sodobnega betona daleč presega modul elastičnosti tradicionalnih apnenih malt in tako pri obremenitvi podleže šibkejši material, v našem primeru apnena malta. Cementno vezivo pa vsebuje tudi nekatere topne soli, ki najverjetneje potujejo v sosednje porozne materiale in povzročijo cvetenje (Torraca, 2009).

Idealna malta za saniranje ima določene lastnosti, kot so (Palomo et al., 2002):

- enostavna uporaba;
- hiter in zanesljiv nanos v suhem in mokrem okolju;
- počasno strjevanje med nanašanjem;
- mehanske in toplotne lastnosti, podobne lastnostim originalnega materiala;
- čim manj vsebnosti topnih soli;

- čim večje ujemanje v barvi in teksturi s historično malto;
- večja ali vsaj tolikšna paroprepustnost in manjša trdnost in togost kot originalen material.

Napetosti znotraj zidu, ki jih povzročajo ekspanzija, krčenje, migracije vlage ali način strjevanja, se morajo na nek način porazdeliti znotraj zidu. Pri zidanih stenah je treba te napetosti prevzeti s potencialnimi poškodbami malte in ne zidakov. Malta z višjo tlačno trdnostjo kot zidaki povzroči poškodbe zidakov - kar povzroči trajno škodo na zidu, kot so razpoke in luščenja, ki jih ni mogoče zlahka popraviti. Napetosti lahko prekinejo stik med malto in zidaki, kar omogoča vdor vode v nastale tanke razpoke. Vendar je to poškodbo lažje popraviti s sanacijo kot prekinitev v zidaku (kamnu, opeki).

Pomembna značilnost malte za sanacijo je tudi barva, saj vpliva na estetski videz celotnega objekta. Barva in tekstura sta predvsem odvisni od izbranega agregata v malti (Palomo et al., 2002).

Malte za sanacijo morajo biti mehkejše in bolj prepustne kot zidaki (kamen ali opeka) in nič bolj neprepustne kot zgodovinske malte, za preprečitev škode na zidakih. Pogosto domnevamo, da sta trdota ali visoka trdnost merilo primernosti, vendar je to napaka, še posebej pri historičnih maltah, ki temeljijo na apnu.

Prepustnost ali hitrost prenosa pare je prav tako kritična. Cilj je, da se voda transportira preko malte in ne preko opečnih ali kamnitih enot zidu. Če pa malta ne dovoljuje prehoda vode ali vodne pare, da prehaja iz stene in izhlapeva, bo rezultat poškodba zidakov.

Ko določimo recepturo nadomestne malte, jo moramo testirati. Preveriti moramo vse fizikalne in mehanske lastnosti, njen odziv na okoljske razmere, trajnost ter skladnost z originalnimi materiali zgradbe (Arıoğlu in Acun, 2006; Palomo et al., 2002). Če so rezultati sprejemljivi, odobrimo novo malto za uporabo, drugače jo zavrnamo in poskušamo narediti ustrežnejšo mešanico.

## 10 UVOD V EKSPERIMENTALNI DEL DIPLOMSKE NALOGE

V diagramu 3 (Arioglu in Acun, 2006) je predstavljen celoten postopek oblikovanja malte za obnovo. Postopek sestavljajo štiri faze: vizualna analiza in dokumentiranje objekta, eksperimentalne raziskave, vrednotenje ter sprejemanje odločitev. Vse faze so bile predstavljene v teoretičnem delu diplomske naloge.

Zaradi časovne in finančne omejitve moje diplomsko delo zajema samo prvo in drugo fazo, t.j. vizualna analiza in dokumentiranje objekta ter eksperimentalne raziskave.

Obravnavala sem dva objekta in sicer cerkev sv. Treh kraljev na Planini pod Šumikom in Kolizej v Ljubljani. Pri prvem objektu, t.j. cerkev sv. Treh kraljev, sem bila prisotna od začetka procesa obravnave objekta do samega vrednotenja rezultatov. Pri Kolizeju je bila prva faza postopka že narejena, izvedeno je bilo tudi vzorčenje, tako da sem se vključila v sam proces samo v okviru laboratorijskih testov.

Prva faza, t.j. vizualna analiza in dokumentiranje objekta, je sestavljena iz treh delov, in sicer iz ugotavljanja zgodovinskega poteka del na objektu, popisa morfološkega poslabšanja in popisov tipov malte in ometa.

Za ugotavljanje zgodovinskega poteka del na objektu sem se obrnila na Zavod za varstvo kulturne dediščine Maribor, kjer imajo v arhivu zbrane podatke o starosti objekta, dozidavah in prezidavah, sanacijskih in restavratorskih posegih ipd.

Sledil je popis morfološkega poslabšanja. Popis sem izvajala na terenu tako, da sem dejansko stanje objekta primerjala z arhivskim gradivom. Najprej sem izvedla splošno vizualno analizo. Pod splošno vizualno analizo se šteje kontrola dejanskega tlorisa objekta z izvirnim, ugotavljanje faz gradnje, kasnejše dozidave in popravila. Nato sem se osredotočila na analizo malte. S pomočjo vizualne analize sem določila tipe malte oz. ometa in na podlagi tega izbrala mesta za in-situ preiskave in mesta za odvzem vzorcev. Identificirala sem mesta poškodb in napisala hipotetični vzrok poškodb.

Tu pa že prehajamo v drugo fazo, kjer sem kot neporušno metodo uporabljala in-situ optično mikroskopiranje s pomočjo HIROX KH-3000-LCD 3D optičnega mikroskopa. Mikroskopski sistem HIROX omogoča opazovanje ter meritve na terenu kot tudi izvajanje preiskav v laboratoriju. Z njim je možno analizirati in spremljati napredovanje površinskih poškodb ter posneti trenutno stanje površine kot multi-fokus sliko. Omogoča opazovanje tako v presevani kot tudi v odsevni svetlobi (Štukovnik et al., 2011). Mikroskopski sistem HIROX vključuje prenosni leči: makro lečo 0-50x z globinsko ostrino  $\infty$ -3 mm ter lečo s povečavo 50x-400x z globinsko ostrino 13-0,2 mm ter neprenosno lečo povečave od 350x-700x z globinsko ostrino 40-08  $\mu$ m. Pri leči s povečavo 50x-400x so na voljo tudi številni adapterji (difuzor, analizator itd.), ki nam omogočajo dodatne ali razširjene analize poškodb. Eden

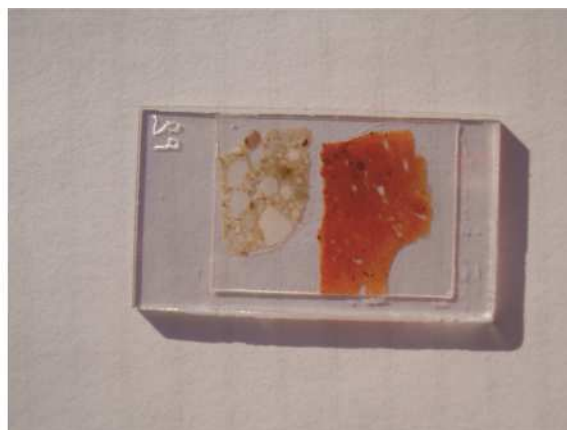
izmed dodatkov je rotacijska glava s spremenljivim kotom opazovanja ( $25^{\circ}$ - $55^{\circ}$ ). Vrtljiva glava omogoča opazovanje predmeta z različnih strani. Sistem je nadgrajen še z enoto motoriziranega stojala z minimalnim premikom  $0,05\ \mu\text{m}$ , ki omogoča slikanje v več korakih in s tem izdelavo 2D (multi-fokus) ali 3D slik. Na voljo so tudi orodja za merjenje dolžine, obsega, ploščine, kotov itd. (Bokan Bosiljkov, 2011).

Za analizo vzorcev kot primer delno porušnih metod sem uporabljala polarizacijski mikroskop Nikon Eclipse E200. Vzorci so bili ustrezno pripravljani. Zbruski debeline nekaj  $\mu\text{m}$  so bili uporabljeni pri mineraloškem petrografskem opisu (slika 13), za XRD pa sem samo ustrezno pripravila praškovne vzorce s pomočjo terilnice, ki je prikazana na sliki 12, za nadaljnje preiskave.



**Slika 12: Terilnica in pripravljene praškovni vzorci za XRD**

Na podlagi rezultatov mikroskopiranja smo določili razmerje sestavin originalne malte ter lastnosti le-te. Zaradi omejitve s časom sem se osredotočila samo na petrografsko in mineraloško analizo. Na koncu sem izvedla vrednotenje rezultatov v celoti.



**Slika 13: Prikaz priprave zbruska za mikroskopiranje**

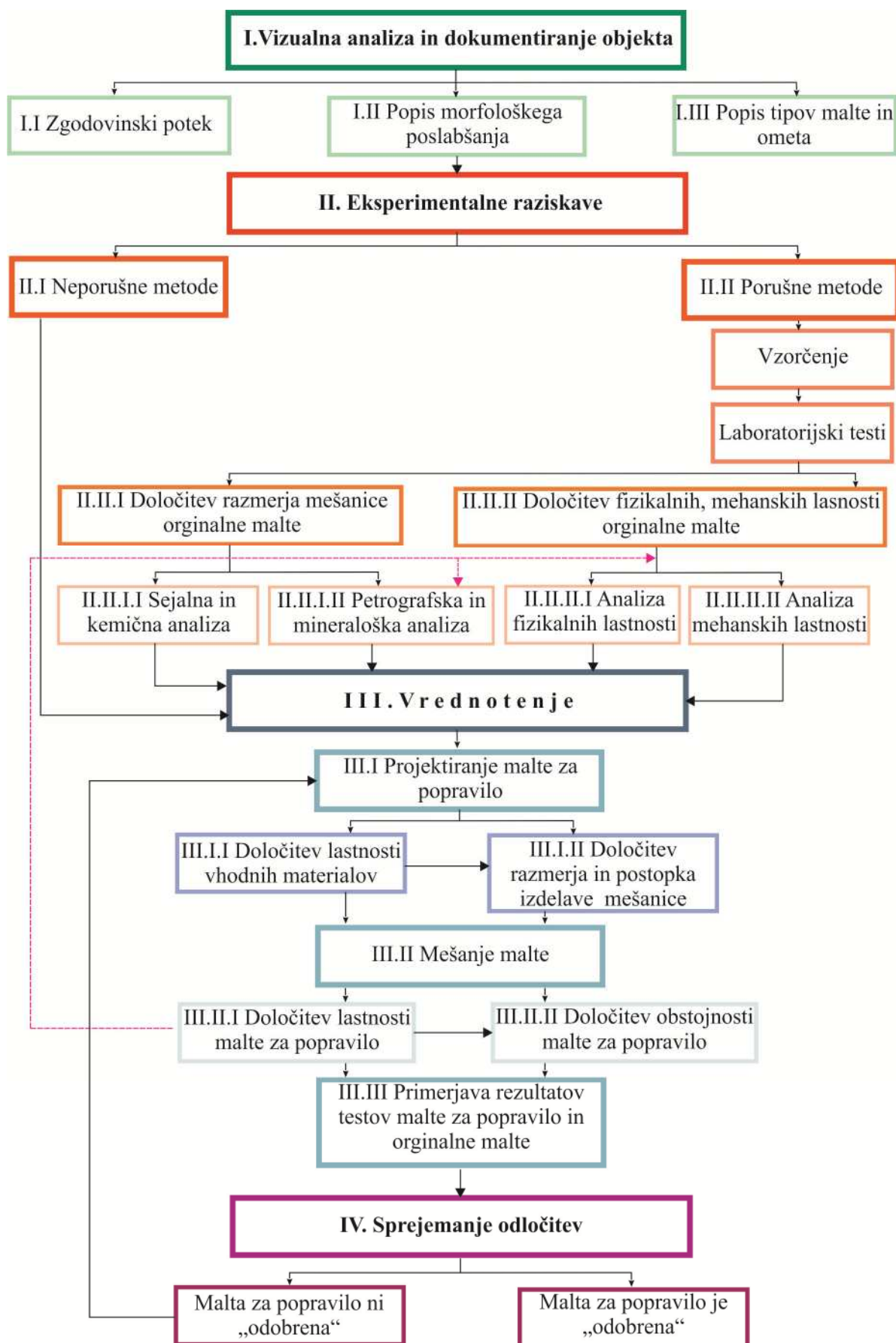


Diagram 3: Proces oblikovanja malte za obnovo (Arioglu in Acun, 2006: str. 1226; Štukovnik, 2011: str. 3)

## 11 OBJEKT 1: CERKEV SV. TREH KRALJEV

### 11.1 Značilnosti lokacije

#### 11.1.1 Položaj in lega

Cerkev sv. Treh kraljev se nahaja na Planini pod Šumikom v občini Slovenska Bistrica na pogorju Pohorje (slika 14). Cerkev leži na nadmorski višini 1188 m. To območje lahko glede na geografsko delitev Slovenije na makroregije uvrščamo v predalpsko regijo (Bat et al., 2004).



Slika 14: Lokacija objekta Cerkev sv. Treh kraljev (<http://zemljevid.najdi.si/>, 2012)

#### 11.1.2 Geologija

Kot sem že omenila se cerkev Sv. Treh kraljev nahaja na območju Pohorja, kjer prevladujejo magmatski in metamorfni tipi kamnin. Najbolj razširjena in znana magmatska kamnina Pohorja je granodiorit, ki gradi njegov osrednji del (Bavec et al., 2009). V preteklosti je bilo uveljavljeno ime zanj pohorski granit, danes pa je splošno poznano ime tonalit. Granodiorit je nastal v miocenu pred približno 16 milijoni let (Vesel et al., 2004).

Iz geološke karte Slovenije (Mioč in Žnidarčič, 1977) je razvidno, da na širšem območju Planine pod Šumikom prevladujeta dve kamnini: granodiorit in blestnik s prehodi v gnajs.

Pohorski granodiorit (slika 15) je sive barve z rahlim modrikastim odtenkom in ima zrnat videz. Homogenost kamnine prekinjajo različno široke in različno razporejene sivkasto bele aplitne in pegmatitne žile (Vesel et al., 2004). Prevladujejo beli kristali Na-Ca glincev (plagioklazi), ki jih je od 50 do 60%. Sledijo rahlo sivkasti kremen (20 do 30%), nekaj zrn biotita (10 do 15%), K-glinenec (ortoklaz, 5 do 10%) ter rogovača (1%). Poleg glavnih mineralov se v sledovih pojavljajo še apatit, cirkon, pirit, titanit in epidot. Zrna so velika do nekaj milimetrov, povprečno pa so manjša. Struktura

kamnine je srednjezrnata, hipidiomorfna. Tekstura je usmerjena in jo v glavnem povzročajo vzporedno usmerjeni kristali biotita in delno kremenca (wikipedia, 2011).



**Slika 15: Pohorski granodiorit**

### **11.1.3 Podnebje**

V slovenskem prostoru ima gorski masiv Pohorja specifične klimatske razmere. Leži na prehodu alpsko-predalpskega sveta Slovenije, kjer se prepletajo vplivi različnih klimatskih vzorcev. Glede na podnebne tipe Slovenije (Rogelj in Ogrin, 2002) se Pohorje uvršča med območja s podnebjem nižjega gorskega sveta in vmesnih dolin v severni Sloveniji. Na Pohorju prevladuje zmerno podnebje, brez velikih temperaturnih sprememb. Za omenjeni podnebni tip je značilno, da je povprečna temperatura najtoplejšega meseca nad 10°C in najhladnejšega meseca manj kot -3°C (Bat et al., 2004).

Spada v subkontinentalni padavinski režim, torej je povprečno od 1100 do 1700 mm padavin na leto (Bat et al., 2004).

### **11.1.4 Tla**

Na digitalni pedološki karti Slovenije (Šporar et al., 1999), kjer so izrisane generalizirane pedokartografske enote vidimo, da na opazovanem območju prevladujejo distrična rjava tla, ki jih ponavadi najdemo na nekarbonatnih kamninah. Poleg distrično rjavih tal tu opazimo še rankerje.

Za Pohorje so značilna zelo kislata tla. Povprečna pH gornjega horizonta je v večini 4.6–5.5%, ponekod tudi pod 4.5% (Bat et al., 2004).

## 11.2 Opis objekta

### 11.2.1 Zgodovina objekta

Cerkev sv. Treh kraljev (slika 16) je zgrajena v gotsko-renesančnem slogu v začetku 16. stoletja. Sprva je imela obokan prezbiterij in v vseh treh ladjah raven kasetiran strop. Kasneje so jo obokali in dogradili pevsko emporo (kor). Cerkev je triladijska, z zvonikom in mežnarijo na zahodu ter prezbiterijem in zakristijo na vzhodni strani. Triosminsko zaključen prezbiterij obkrožajo stopnjevani oporniki. Na južni steni vodi v cerkev polkrožni kamnit portal s posnetim robom. Kamnit portal je prav tako na zahodni fasadi, vendar je pravokoten in ima profilirano preklado. V notranjščini so vse ladje enako visoke in križno obokane, delijo jih šilasti loki, ki slonijo na masivnih stolpih. Prezbiterij je rebrasto obokan, rebra nosijo polkrožni služniki. Ima zbita ilovnata tla (ZVKDS, 1962-2009).



**Slika 16: Cerkev sv. Treh kraljev**

Domačini že dolga leta opozarjajo na propadanje cerkve. Prvi pisni vir je iz leta 1962, kjer še posebej poudarjajo nujnost sanacije strešne konstrukcije, kar realizirajo leta 1968. Takrat se poraja tudi ideja o obnovi notranjščine, vendar pisnega vira, ki bi potrdil dejanske aktivnosti, ni bilo zaslediti. Oktobra 1978 dokumentacija navaja probleme glede uničene kritine in problem nosilnosti nekaterih konstrukcijskih elementov, predvsem na stolpu na zahodni strani cerkve. V letu 1981 nato celovito sanirajo stolp ter fasado. Vendar šele 1986 Zavod za spomeniško varstvo Maribor omenja nekatere neprimerne posege na objektu kot je streha stolpa z železnim ostrešjem in, kar je z našega vidika pomembnejše, izdelava fasade z obrizgom. V tem letu so omenjeni še dotrajani opleski, zato Zavod za spomeniško varstvo Maribor poda smernice za obnovo notranjosti, kjer predpiše, da se notranjost



sanira s podaljšano malto. Prav tako opozori na močno vlago in izrazi sum podtalnega toka. Zadnji posegi na objektu so bili izvedeni leta 2009 in sicer popravilo strehe (ZVKDS, 1962-2009).

### 11.2.2 Opis trenutnega stanja

Po ustnem izročilu je bila prvotno celotna cerkev poslikana s freskami (slika 17), ki so sedaj skrite pod beležem. Opažena je bila močna biodegradacija objekta, še posebej na severni steni. Prav na tej steni je posebnost tudi to, da je zunanja kota terena ob severni steni objekta za 40 cm višja kot kota tal v objektu.



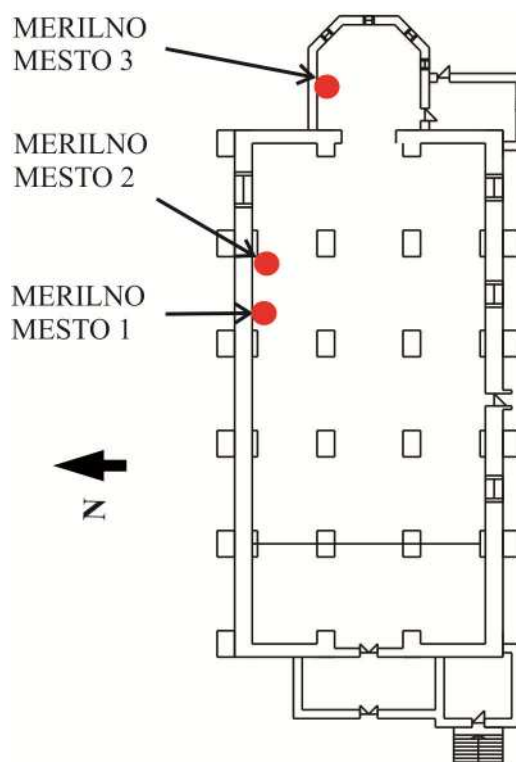
Slika 17: Vidna freska pod sedanjim beležem

Trenutna temperatura zraka na dan meritev, t.j. 29.9.2011, v cerkvi sv. Treh kraljev je bila 13.1°C, relativna vlažnost pa je bila 66.8%.

Na dan 29.9.2011 smo obiskali objekt z namenom, da ugotovimo stanje objekta, naredimo vizualno analizo, opravimo meritve s 3D optičnim mikroskopom in odvezamemo vzorce za nadaljnje preiskave.

### 11.3 Preiskave s 3D optičnim mikroskopom

Meritve smo opravili z mikroskopskim sistemom HIROX na treh različnih merilnih mestih znotraj cerkve (slika 18) z namenom, da ugotovimo stopnjo poškodovanosti in določimo vzroke za degradacijo objekta. Vsa tri merilna mesta so bila na severni steni objekta, kjer je bil objekt tudi najbolj prizadet.



Slika 18: Merilna mesta z mikroskopskim sistemom HIROX

### 11.3.1 Prvo merilno mesto

Na prvem merilnem mestu (označeno na sliki 18) je opaziti močno prisotnost biodegradacije. Stena na območju prvega merilnega mesta je bila biodegradirana na površini približno 7 m<sup>2</sup>. Mesto je bilo preiskano z mikroskopskim sistemom HIROX na dveh pozicijah (slika 19).



Slika 19: Poziciji mikroskopiranja na prvem merilnem mestu ter prikaz optičnega mikroskopiranja

### 11.3.1.1 Pozicija 1

Na prvi poziciji smo analizirali steno na višini 1250 mm od tal. Tu smo se opredelili predvsem na površino, ki je bila poškodovana. Biodegradacijo je bilo moč opaziti že z makroskopskim pogledom (s prostim očesom). Stena je bila močno zelene barve na površini približno 7 m<sup>2</sup>. Opazovali smo predvsem površino, prekrito z živimi organizmi z namenom, da bi ugotovili vizualne lastnosti ter posledično biološko vrsto le-teh. Pri tem smo uporabili 200x povečavo (slika 20).



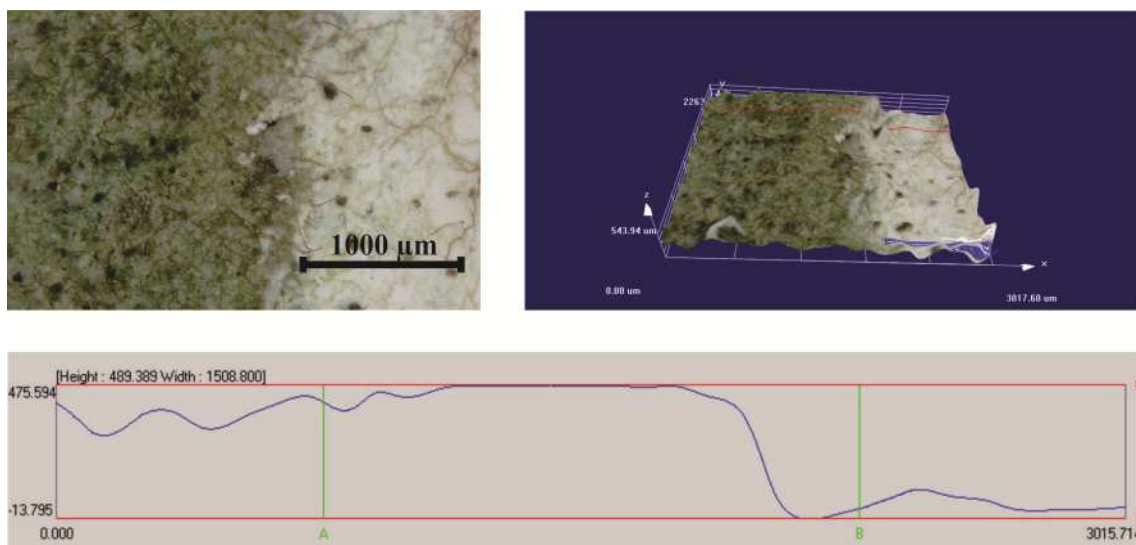
Slika 20: Slika biodegradacije pri 200x povečavi

Biodegradacija je postopek uničenja materiala zaradi živih organizmov ali produktov njihove presnove. Proces napada malte je odvisen od njenih lastnosti (poroznost, sestava in hrapavost). Te značilnosti omogočajo zadrževanje vode v materialu in posledično povzročajo rast alg in cianobakterij. Te zadnje ustvarjajo bio površinski sloj, podoben sluzi, ki omogoči zadrževanje peska in prahu ter je primeren substrat za rast drugih živih organizmov, ki lahko celo spodbujajo rast superiornih rastlin. Da bi se izognili kolonizaciji in posledično škodi, se uporabljajo nekateri biocidni proizvodi za sanacijo (Palomo et al., 2002).

### 11.3.1.2 Pozicija 2

Na drugi poziciji (Slika 19) smo mikroskopirali na višini 1305 mm od tal. Z razliko od prve pozicije smo tu opazovali površino na meji, kjer je viden organizem in delom, kjer na finalnem sloju še ne zaznamo prisotnosti organizma s prostim očesom. Uporabili smo 100x, 200x in 400x povečavo.

Slika 21 prikazuje multi-fokus sliko, posneto na prvem merilnem mestu, pozicija 2, ter pripadajočo 3D sliko in topografijo prereza vzdolž izbrane linije. Opazen je rob med poraščenim območjem na levi strani z izrazito zeleno barvo in neporaščenim območjem stene na desni strani tako na multi-fokus sliki kot tudi na 3D sliki. Na multi-fokus sliki se jasno vidi, da se organizem širi tudi že na nepoškodovan del, saj opazimo nitkast preplet na desni strani slike. Na topografiji prereza vzdolž izbrane linije lahko odčitamo debelino sloja organizma. Stena je tu izbočena za 489 µm.



**Slika 21: Multi-fokus slika pr povečavi 100x (levo zgoraj), pripadajoča 3D slika (desno zgoraj) in topografija prereza vzdolž izbrane linije (spodaj)**

### 11.3.2 Drugo merilno mesto

Na drugem merilnem mestu (Slika 18) smo mikroskopirali samo na eni poziciji. Tu so bile opažene soli. Namen opazovanja na merilnem mestu 2 je bila identifikacija soli in s tem posledično vzrok za njihov nastanek. Naredili smo dva posnetka – multifokus s 100x in 200x povečavo. Ker so kristali soli svetli, se jih na beli podlagi ne vidi dobro, vendar dovolj za zaznavanje le-teh in za potrditev, da vidimo kristale. Soli, ki so bile opažene, imajo tipično igličasto strukturo (slika 22). Glede na faze kristalizacije po Zehnder in Arnold (1989) lahko opažene kristale soli uvrstimo v četrto fazo. Torej lahko sklepamo, da je površina slabo vlažna oziroma skoraj suha.



**Slika 22: Opažene soli na steni na drugem merilnem mestu (levo) in multi-fokus slika le-teh pri 100x povečavi (desno)**

Soli so nedvomno eden izmed najpomembnejših dejavnikov, ki ogrožajo poslabšanje zgodovinskih objektov iz anorganskih poroznih materialov kot so kamen in malte (Blauer Bohm, 2005). Zato v ometih kot posledico razgradnje največkrat najdemo v vodi topne soli (Kramar in Mirtič, 2009). Zaradi kristalizacije soli se ometi, malte in opleski luščijo. Sol kristalizira kot odziv na podnebna nihanja in druge okoljske spremembe (Zehnder, 2007). Soli so narejene iz ionov, ki jih voda pridobi iz spremenjenih kamnov, tal, malt, betonov, opek, itd. Aerosoli pri morju ter onesnaževalci industrijskega in urbanega okolja prispevajo k odlaganju soli na omenjene materiale. Tudi metabolizem živih organizmov je lahko vir nekaterih ionov (Palomo et al., 2002). Higroskopična narava soli je tako eden od pomembnih dejavnikov za uničujoč potencial soli (Blauer Bohm, 2005).

Glede na porozno naravo gradbenih materialov, ioni penetrirajo in krožijo skozi njih kot razredčene raztopine. Sol bo kristalizirala, ko voda izhlapi in aktivnost ionov v raztopini premaga zasičenost. Prav tako pride do kristalizacije soli, ko je relativna vlažnost ozračja v okolici materiala manjša od ravnotežne relativne vlage nasičene raztopine soli (Palomo et al., 2002).

Na ta način bodo v porah, ki vsebujejo akumulirane soli, le-te kristalizirale ter se ponovno raztopile, glede na relativno vlažnost v zraku (Palomo et al., 2002).

Apnene malte so na splošno porozni in prepusten material, zato posledično vsebujejo precejšnje število raztopin v sistemu por ter pospešujejo proces izhlapevanja. Iz tega razberemo, da so malte občutljiv material kar se tiče poslabšanja zaradi kristalizacije soli. Hidravlična apnena malta in cementna malta sta veliko manj porozni in prepustni kot apnena malta (še posebej, če sta prej omenjena materiala podvržena dobremu procesu strjevanja). Tako je volumen tekočine, ki kroži v teh materialih, in dostop raztopljenih soli slabši kot v apneni malti (Palomo et al., 2002).

Če kristalizacija soli poteka na površini materiala, ni verjetno, da povzroči napetosti in škodo; vidni kristali soli se formirajo s t.i. cvetenjem (Torraca, 2009).

Notranja rast kristalov, ki je najbolj škodljiv proces, se imenuje subeflorescenca. Pravzaprav, oba procesa, tako cvetenje kot subeflorescenca, pogosto potekata v strukturi zgodovinskih stavb in arheoloških ruševin, razširjenost enega postopka pred drugim pa določajo predvsem okoljske razmere okoli objekta (Torraca, 2009).

Pogoji, ki dajejo prednost počasnemu izhlapevanju vode iz vlažnih poroznih materialov (nizka do zmerna temperatura, srednja do visoka relativna vlaga, nizka hitrost gibanja zraka), vodijo do cvetenja. Toplo, vetrovno in suho podnebje pa pospešujejo subeflorescenco in globlje poškodbe (Torraca, 2009).

Med kristalizacijo se pojavijo veliki pritiski, ki so posledica rasti kristala, to pa je posledica hidratacije. Uničujoč efekt je odvisen od mehanskih karakteristik in od strukture por v materialu (Palomo et al., 2002).

Višja je mehanska trdnost, večja je odpornost na pritiske zaradi kristalizacije. V tem smislu je jasno, da so cementne malte močnejši material kot apnene, zato bodo manj občutljive na poslabšanja (Palomo et al., 2002).

Soli, ki kristalizirajo na objektu, je veliko vrst. Poznanih je preko 40 različnih vrst (Blauer Bohm, 2005). Najpogosteje je to sadra, ki nastane z reakcijo med apnenim vezivom in žveplovim oksidom iz ozračja. Sadra se pogosto pojavlja v obliki plasti na površini ometa. Če je v ometu tudi magnezij, lahko pod površino ometa nastanejo različni magnezijevi sulfati hidrati (Kramar in Mirtič, 2009).

Najpogostejše oblike, ki jih zavzamejo sveže kristaljeni kristali na površini poroznega materiala, so lahko v obliki prizme, iglic ali kot las tankih kristalov, t.i. »bradatih kristalov« (Arnold, 1996).

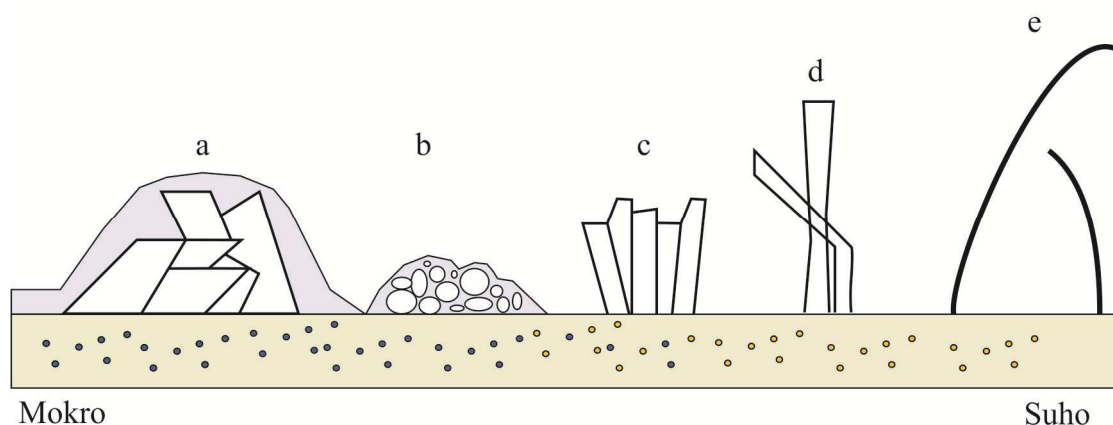
Kristalizacija soli poteka v več fazah. Avtorja Zehnder in Arnold (1989) sta predstavila faze kristalizacije na primeru natrijevega nitrata. V prvi fazi (faza 1) je površina še mokra, zasledimo lahko relativno velike, izometrične kristale. Substrat in kristali so pokriti s tankim filmom raztopine (slika 23a).

Dokler sta v drugi fazi (faza 2) substrat in površina še mokra, se formirajo kristali izometrične oblike in nakopičeni zrnati kristali. Prav tako so kristali pokriti s tankim filmom raztopine (slika 23b).

V tretji fazi (faza 3) je površina suha, vendar še zmeraj zmerno vlažna, tvori se nitkasta skorja stebričastih kristalov, ki stojijo pravokotno na površino (slika 23c).

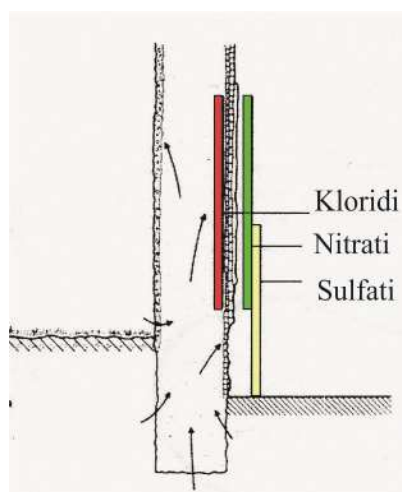
V četrti fazi (faza 4) tako imenovani »brdati kristali« kristalijo na površini, ki je skoraj suha. Ta faza je razdeljena še na dve podfazi. V fazi 4 a (slika 23d) so kristali praviloma skrivljeni, polikristalni, ki sestojijo iz vzporednih nitih, ki lahko tvorijo nitasto skorjo. Kristalijo iz slabo vlažne površine. V fazi 4 b kristali kristalijo iz skoraj suhe površine, kristali so praviloma popolne oblike in so izredno tanki (slika 23e).

Poznavanje sestave sistema soli lahko pomaga pri oceni njenega obnašanja v določeni klimi in s tem tudi pripomore k razumevanju njenega uničevalnega potenciala (Blauer Bohm, 2005).



**Slika 23: Faze kristalizacije na površini poroznega medija. Skica razvoja kristalov od mokre do suhe površine (Zehnder in Arnold, 1989: str. 515)**

Lahko pa nam položaj kristalizacije soli pove tip soli. Če opazujemo območje kapilarnega dviga, se iz mešanice ionov, ki izvirajo iz različnih okoljskih virov, ustvarjajo soli zaradi izhlapevanja raztopine v naslednjem zaporedju: manj topne spojine se usedajo najprej. Nato se višje akumulira skupina zmerno in slabo topnih higroskopskih soli (pretežno sulfati in kalijeve nitrati). Sledi preostali del najbolj topnih in higroskopskih soli, ki so običajno raztopljeni (magnezijevi in kalcijevi kloridi in nitrati) (Zehnder, 2007). Položaj akumulacije je prikazan na sliki 24. Prav tako pa nam vrsta ugotovljenih soli in položaj koncentracije le-te lahko dajo podatke o njihovem izvoru (Blauer Bohm, 2005).



**Slika 24: Položaj akumulacije soli (Zahnder, 2007: str. 357)**

Vendar se moramo pri tem zavedati, da se koncentracija posameznih soli, njihova oblika in tudi vpliv na objekt spreminjajo tekom časa. Zato nekateri strokovnjaki (Zehnder, 2007) predlagajo dolgoročen monitoring zaznanih soli.

### 11.3.3 Tretje merilno mesto



Slika 25: Tretje merilno mesto

Na tretjem mestu (slika 18, slika 25) je bila ponovno opažena biodegradacija, vendar predvidevamo, da je vrsta organizmov drugačna kot na prvem merilnem mestu, saj je vizualni odtenek le-teh drugačen (prvi so zelene barve, drugi pa so rjavi). Mesto je bilo preiskano na dveh pozicijah.

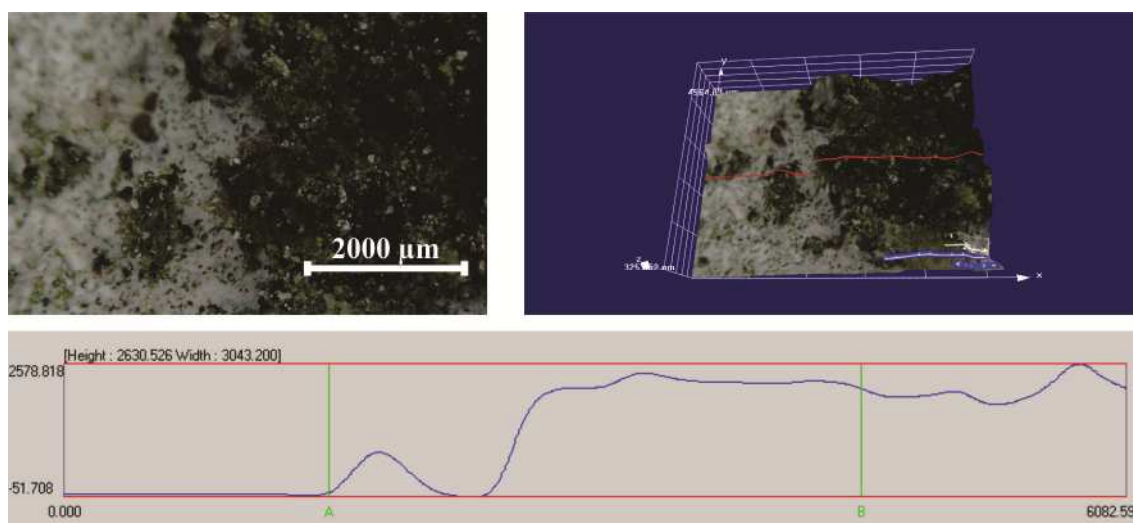
#### 11.3.3.1 Pozicija 1

Na prvi poziciji smo uporabili 50x in 200x povečavo. Pri obeh povečavah se zopet jasno vidi razrast organizma in posledično v topografskem pogledu neravnost površine, še posebej na 50x povečavi (slika 27). Beli okruški, ki smo jih opazili na multi-fokus slikah (najbolje vidno na 200x multi-fokus, slika 26), so dokaz, da se je biodegradacija začela pod finalnim slojem. Sčasoma, ko je organizem rasel, se je povečal njegov volumen in s tem uničil površino stene. Tu je razrast v debelini 2630  $\mu\text{m}$ , kar je še celo več kot pri prvem merilnem mestu na poziciji 2.



Slika 26: Ostanke finalnega sloja (označeni rdeče)





**Slika 27: Multi fokus slika pri 50x povečavi (levo zgoraj), pripadajoča 3D slika (desno zgoraj) in topografija prereza vzdolž izbrane linije (spodaj) na poziciji 1 na tretjem merilnem mestu**

### 11.3.3.2 Pozicija 2

Uporabili smo 200x povečavo. Ta pozicija se od drugih razlikuje po tem, da smo tu našli poleg rastlinskega organizma tudi živalski organizem (Slika 28). Predvidevam, da se je na območju, kjer je prišlo do pojava biodegradacije, razvilo več vrst živalskih mikroorganizmov, ki se prehranjujejo z nastalimi organizmi in s tem tvorijo nekakšen mikro-ekosistem.

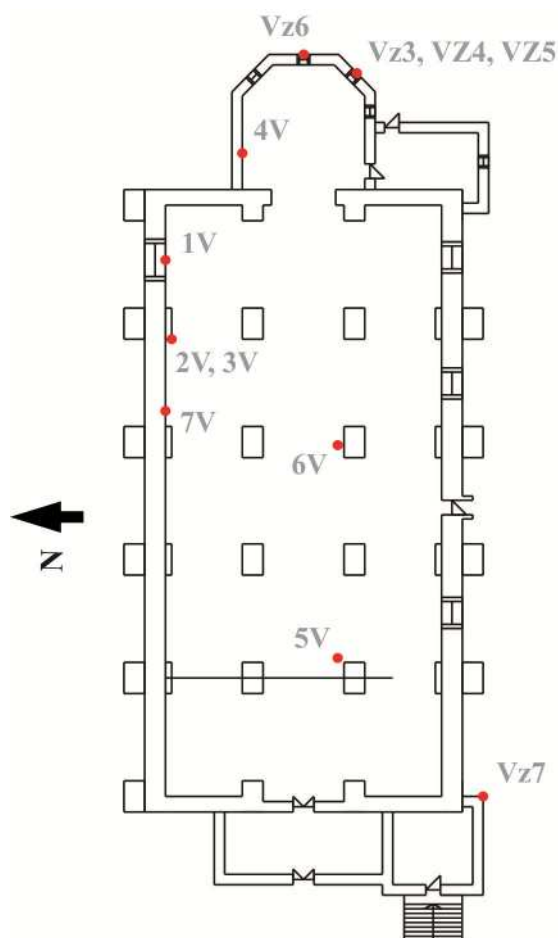


**Slika 28: Živalski organizem (označen rdeče)**

## 11.4 Vzorčenje materialov

Odvzem vzorcev na objektu je potekal izključno s površin, ki so bile močno poškodovane in s katerih je del materiala že odpadel. To pomeni, da z odvzemom nismo dodatno poškodovali objekta.

Na območju objekta smo vzeli 14 vzorcev, od tega 7 znotraj objekta in 7 zunaj objekta. Mesta odvzema vzorcev so prikazana na sliki 29.



Slika 29: Mesta vzorčenja

Seznam vzorcev:

- Vzorec 1 (1V): vzorec notranjega ometa
- Vzorec 2 (2V): vzorec soli na steni
- Vzorec 3 (3V): vzorec soli in ometa
- Vzorec 4 (4V): vzorec ometa (ekspanzija)
- Vzorec 5 in vzorec 6 (5V, 6V): zemljina (tla v notranjosti)

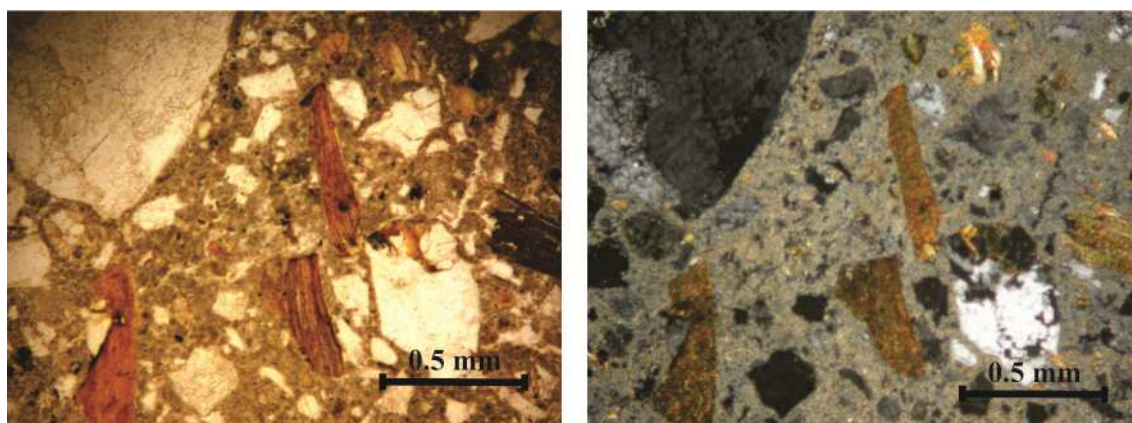
- Vzorec 7 (7V): biodegradacija
- Zunanji vzorec 1 (VZ1): temeljna kamnina
- Zunanji vzorec 2 (VZ2): zemljina
- Zunanji vzorec 3 (VZ3): čisti apneni omet
- Zunanji vzorec 4 (VZ4): apneni omet
- Zunanji vzorec 5 (VZ5): omet
- Zunanji vzorec 6 (VZ6): apneni omet II
- Zunanji vzorec 7 (VZ7): vzorec kamnine s strehe

Iz vzorcev 1V in VZ4 smo naredili zbrusek za mikroskopiranje, vzorce 4V, 5V, 6V, 7V, VZ2, VZ3, VZ4, VZ5 in VZ6 pa smo pripravili za RTG analizo tako, da smo naredili praškaste vzorce. Vzorec 2V je bil premajhen za uporabo, 3V pa je bil preveč nečist, da bi se ga lahko uporabilo za identifikacijo soli.

### 11.5 Mikroskopiranje na vzorcih 1V in VZ4

Za mikroskopiranje smo uporabljali svetlobni mikroskop Nikon Eclipse E200 dne 5.3.2012.

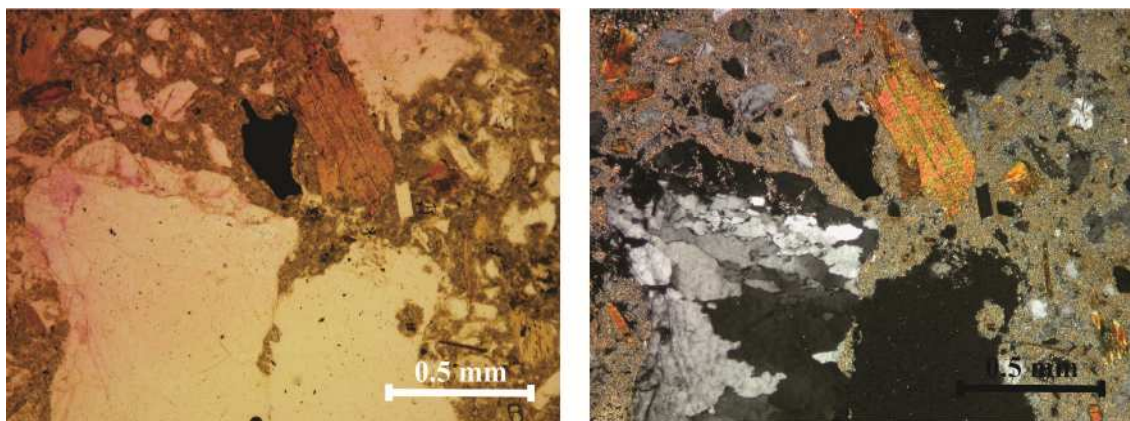
Najprej smo analizirali vzorec VZ4, t.j. vzorec apnenega ometa. Ugotovili smo, da je vzorec homogen; to pomeni, da sta agregat in vezivo enakomerno porazdeljena. Homogenost se lepo vidi na sliki 30. Razmerje med agregatom, vezivom in porami smo ocenili na 50:40:10 (po Terry & Chilinger, 1955).



**Slika 30: Splošna mikroskopska slika vzorca VZ4 z analizatorjem (desno) in brez analizatorja (levo)**

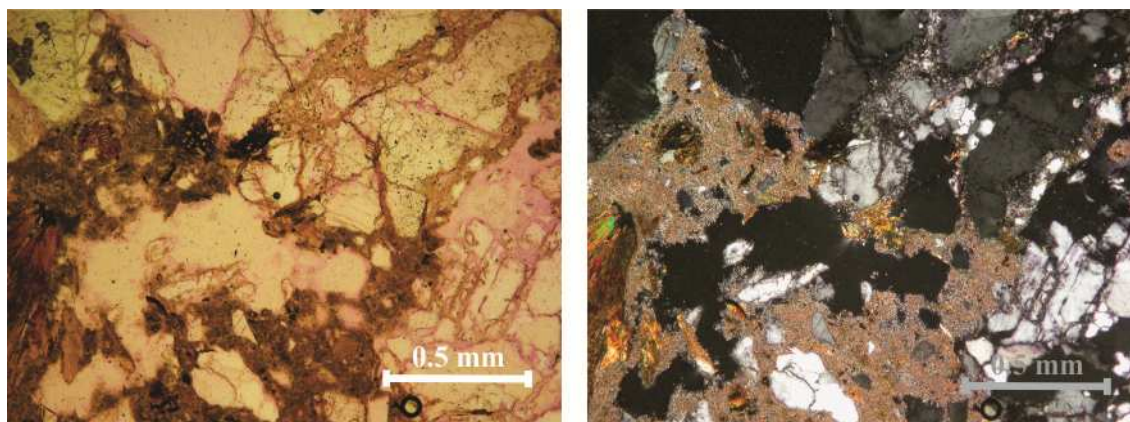
Po mineralni sestavi je agregat heterogen. Zrna so oglate oblike in različnih velikosti, od nekaj mikrometrov do nekaj milimetrov. Agregat predstavljajo magmatske in metamorfne kamnine. Najbolj pogost mineral, ki gradi agregat, je kremen ( $\text{SiO}_2$ ). Poleg kremena je opaziti še plagioklaze ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_{10}$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$ ), biotit ( $\text{K}(\text{MgFe})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ), muskovit ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ),

rogovačo in neporozne minerale. Vsi ti minerali so gradniki magmatskih in metamorfnih kamnin s poudarkom na metamorfnih kamninah. Agregati so pretežno kisli zaradi kremenca. Na sliki 31 je viden kremen, biotit in neporozni mineral, rogovača pa je prisotna na sliki 33.

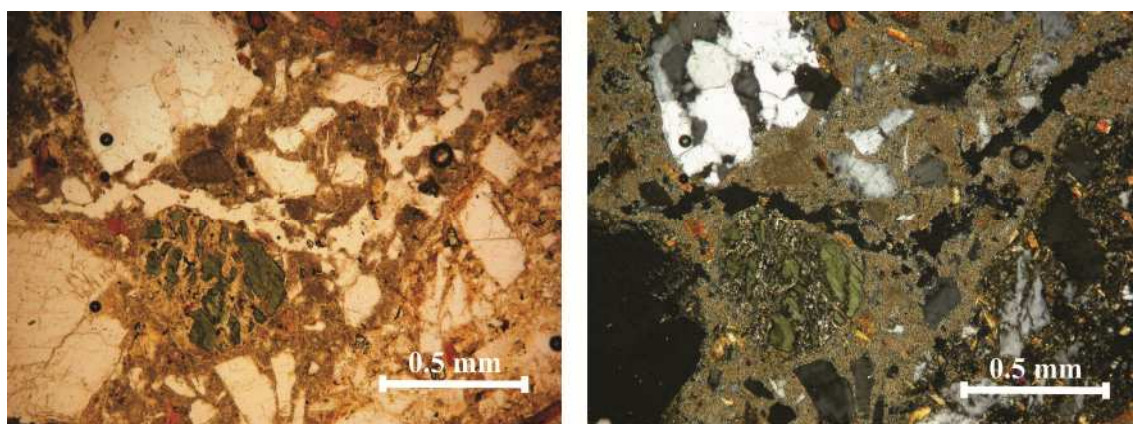


**Slika 31: Heterogenost agregata po mineralni sestavi**

Vso vezivo je kristaljeno kot vidimo na sliki 30, pa tudi na sliki 31. To pomeni, da je karbonatizacija v celoti potekla. Vezivo je na osnovi apna, saj se v stiku z lazerin rdeče obarva (slika 32). Opaziti je karbonatizacijo okoli por in zrn agregata (slika 32). Pore niso okrogle, ampak nastopajo v različnih oblikah. Viden je prehod iz por v razpoke, kar je prikazano na sliki 33. Značilna rahlost strukture apnenih veziv ni izrazita.



**Slika 32: Kalcitno vezivo reagira z lazerin rdeče**



**Slika 33: Viden prehod iz por v razpoke, pod razpoko je vidna rogovača**

Vzorec 1V, ki predstavlja notranji omet, je bistveno slabši kot vzorec VZ4. Prav tako je vzorec homogen z razmerjem agregat/vezivo/pore 65:20:15. Agregat ima enake lastnosti kot agregat pri vzorcu VZ4. Sklepamo lahko, da je vir agregata enak in da je metamorfnege oz. magmatskega izvora. Pri vezivu ni opaziti tipičnih struktur, značilnih za vezivo na osnovi apna. Postavljen je sum, da naj bi šlo za vrsto malte, ki so jo uporabljali za popravilo in vsebuje določen delež cementa.

### 11.6 Vrednotenje rezultatov

Cerkev je v slabem stanju že več desetletij, kar je opisano v arhivskih dokumentih ZVKDS in je potrdila splošna vizualna analiza. Poškodbe so vidne tako v notranjščini kot na zunanem delu objekta. V glavnem opazimo razpad ometa, cvetenje, biodegradacijo in madeže na površini, ponekod tudi nabrekanje ometa. Organizmi, ki so prisotni pri biodegradaciji so najverjetneje plesni, vendar bi potrebovala biologa za potrditev te hipoteze. Z in-situ preiskavami in mikroskopijo smo ugotovili, da je za biodegradacijo ter rast kristalov soli glavni vzrok kapilarni dvig ter neprimerna sanacija prejšnjih let, saj so uporabljali podaljšano malto in materiale na osnovi vodne disperzije polimernih veziv.

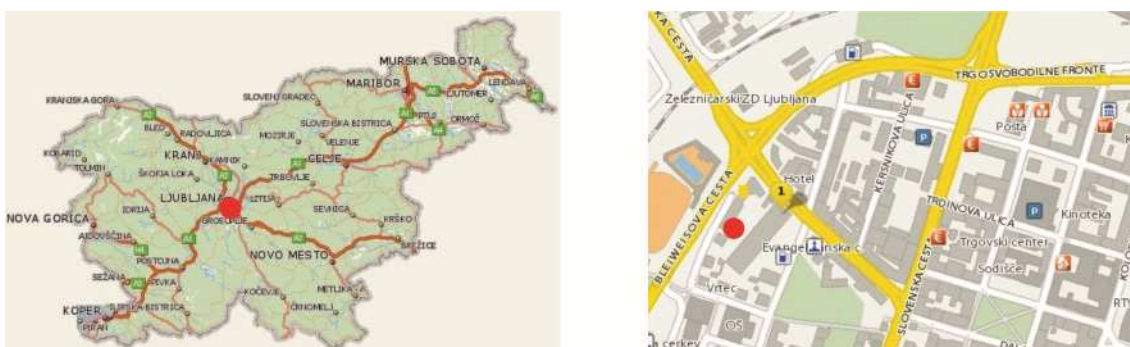
Originalna oz. primarna malta, ki je uporabljena na objektu, je narejena iz apnenega veziva. Torej gre za tradicionalno apneno malto. Agregat je glede na mineralno sestavo in strukturo lokalni tamkajšnji agregat. Ker v bližnji okolici objekta ni na voljo nobenega vira agregata (kamnoloma) predvidevam, da je agregat pridobljen kar iz neposredne bližine objekta v času gradnje. Agregat je oglete oblike kar kaže na to, da je pridobljen z drobljenjem večjih kamnov. V samem vezivu dodatkov, tako organskih kot anorganskih, ni opaziti.

## 12 OBJEKT 2: PALAČA KOLIZEJ

### 12.1 Značilnosti lokacije

#### 12.1.1 Položaj in lega

Palača Kolizej se je nahajala na območju Ljubljanske kotline, ki je velika tektonska udorina med Julijskimi in Savinjskimi Alpami ter Dolenjskim Krasom. Njena lokacija je bila v samem centru Ljubljane, na Gosposvetski cesti 13 (slika 34). Stavba je stala v gramoznici med Tivolsko, Gosposvetsko cesto in Župančičevo ulico.



Slika 34: Lokacija palače Kolizej, označena z rdečo piko (<http://zemljevid.najdi.si/>, 2012)

#### 12.1.2 Geologija

Območje mesta Ljubljane se razprostira na prehodu med Ljubljanskim poljem in Barjem. Ljubljansko polje in tudi Barje se je močno pogrezalo. To dokazujejo velike množine naplavin, ki so zapolnile udorino. Usedline na Ljubljanskem polju so sestavljene pretežno iz savskega proda, ki je v raznih globinah in v različni debelini sprijet v konglomerat. Na Barju nastopajo predvsem gline, ki se menjavajo s peščenimi in meljastimi plastmi (Drobne in Tovornik, 1961).

V osrednjem delu Ljubljane imamo pod vrhno plastjo prsti in nasipnin prodno plast. Vendar zaradi prehoda Ljubljanskega polja v Barje debelina prodne plasti polagoma pojema. V bližini Rožnika in Gradu se nahajajo pod savskim prodom meljaste in glinaste naplavine, preperine karbonskih skrilavcev in peščenjakov (Drobne in Tovornik, 1961).

#### 12.1.3 Podnebje

Ljubljano uvrščamo glede na podnebne tipe Slovenije (Rogelj in Ogrin, 2002) v območje z zmernokontinentalnim podnebjem osrednje Slovenije, kjer prevladujejo topla poletja in zmerno mrzle zime. Povprečne januarske temperature so med 0 in  $-3^{\circ}\text{C}$ , julijske med 15 in  $20^{\circ}\text{C}$  z dnevnimi vzponi

običajno med 25 in 30°C. Padavine za omenjeni tip podnebja so razmeroma enakomerno porazdeljene med letnimi časi, čeprav sta zima in pomlad po navadi nekoliko bolj suha, kot poletje in jesen. Zaradi lege v padavinski senci za alpsko-dinarsko pregrado količina padavin znaša od 1300 do 1500 mm na leto, kar je nekoliko manj kot je običajno za to podnebje (Bat et al., 2004).

Predvsem pozimi je značilen pojav t. i. temperaturnega obrata, pri katerem se hladnejši in vlažen zrak zadržuje v nižjih plasteh. Mesto je poznano tudi po megli, ki je zabeležena v povprečju 121 dni na leto, večinoma v jeseni in pozimi (wikipedia, 2012b).

#### **12.1.4 Tla**

Na digitalni pedološki karti Slovenije (Šporar et al., 1999), kjer so izrisane generalizirane pedokartografske enote vidimo, da na opazovanem območju prevladujejo evtrično rjava tla, ki so značilna za mehke karbonatne kamnine. Poleg tega lahko na območju Ljubljane najdemo tudi šotna tla nizkega barja (Bat et al., 2004).

### **12.2 Opis objekta**

#### **12.2.1 Zgodovina objekta**

Palača Kolizej je bila zgrajena po načrtih graškega arhitekta Josepha Benedikta Withalma za potrebe vojske Avstro-Ogrske monarhije. Poleg tega je objekt služil kot zabavišče. Temeljni kamen je bil položen 31.5.1845 (Mavrič, 2008). Objekt je bil zgrajen leta 1847 (slika 35) in je bil dolg približno 122 m, širok približno od 29 do 32 m ter je bil nekoliko nepravilne oblike. Imel je 3 do 5 etaž (Kržan et al., 2009). Spodnjo etažo lahko smatramo za kletno, saj se je Kolizej na severni in južni strani nahajal pod nivojem tal. Tako je bilo pritličje na severni strani na nivoju Gosposvetske ulice. Krajni severni del ter določeni vmesni segmenti so imeli dve nadstropji, krajni južni del ima tri nadstropja, za večino osrednjega dela objekta pa lahko rečemo, da je imel samo eno nadstropje (Kržan, 2008).

20.12.1847 je palačo zajel in hudo poškodoval požar ter posledično nekoliko spremenil podobo Kolizeja. Pri tem so bili poškodovani predvsem leseni deli oz. notranjščina (Mavrič, 2008). Vendar je bil v pol leta obnovljen.

Do leta 1886 so v njem še prenočevale vojaške enote, z gradnjo stalnih vojašnic pa so prostore, namenjene vojski, začeli oddajati v najem različnim stanovalcem, obrtnikom in trgovcem, ki so prostore prilagajali svoji dejavnosti tudi tako, da so jih spreminjali (Mavrič, 2008).



**Slika 35: Kolizej po 1847** (Dešman, 2008: str. 13)

Potres leta 1895 je prizadel tudi Kolizej. V prijavi škode je Josef Viktor Withalm navedel, da je potrebno delno rušenje. Zaradi posledic potresa so morali podreti arkadni hodnik, ki je dotelj krasil stavbo (Mavrič, 2008).

Leta 1905 so bile narejene prve večje obnove (Kržan, 2008).

V letih 1945-1960 je potekal postopek nacionalizacije. V 50. letih je bila stavba v celoti obnovljena; prenovljeno je bilo pročelje, zamenjana so bila okna in vrata, prenovljeni in prebeljeni hodniki, popravljena napeljava. Po drugi svetovni vojni so oblasti tu naselile socialno ogroženo prebivalstvo (Mavrič, 2008). V tistem času je bil objekt zanemarjen oz. se ga ni vzdrževalo (Kržan, 2008).

Leta 1993 je bila stavba denacionalizirana ter razglašena za spomenik lokalnega pomena. Kljub temu stavba ni bila deležna ustreznega vzdrževanja. Marca 1995 je zaradi nenadzorovanega poseganja v gradbeno konstrukcijo prišlo do delnega rušenja objekta v njegovem severnem sredinskem delu. Nato je v tem delu zgradbe bila nadomestna nosilna konstrukcija, sestavljena iz jeklenih odrov, ki je nosila streho (Kržan, 2008). Po letu 1995 je bila stavba zapuščena (Mavrič, 2008). Leta 2005 je bil objekt razglašen za spomenik državnega pomena.

### **12.2.2 Opis trenutnega stanja**

Palača Kolizej je bila avgusta 2011 porušena.

Pred porušitvijo so objekt nosili zidani, delno pasovni, delno točkovni temelji. Nosilno konstrukcijo zgradbe so sestavljali zidani nosilni obodni zidovi in posamezni notranji nosilni zidovi, zidani stebri z



loki, ki so nosili masivne oboke nad kletjo, večinoma tramovne stropove v gornjih etažah in leseno ostrešje. Po celem objektu so zidani polnilni oziroma predelni zidovi (Kržan, 2008). Objekt je bil v prečni smeri (le fasadni zidovi) povezan s posameznimi jeklenimi vezmi, vendar ne vzdolž celotnega objekta (Kržan et al., 2009).

Prvotna zasnova objekta je do sedanjih časov oz. do porušitve doživela precej sprememb. Zaradi sprememb namembnosti je bilo v vseh etažah dodanih mnogo, predvsem prečnih zidov, nekaj prvotnih pa so porušili (Kržan, 2008).

Na sliki 36 opazimo slabo zunanjo podobo objekta (zgoraj levo in zgoraj desno), spodaj levo je pročelje z Gosposvetske ulice in spodaj desno je fotografija začetka rušenja stavbe.



**Slika 36: Stanje objekta pred porušitvijo** (<http://m.delo.si/clanek/167200>)

### 12.3 Vizualne analize objekta

Na samem terenu je bilo vidno, da je objekt zgrajen iz opeke starega avstrijskega formata (30×15×6 cm). Makroskopsko je bilo opaziti, da je barva zidakov različna (slika 37). Iz tega lahko predpostavljamo, da je bila kakovost zidakov neenakomerna, kar je lahko posledica različne sestave

osnovnega materiala ali pa različne temperature žganja opeke (Kržan, 2008). Te hipoteze bi bilo potrebno preveriti z laboratorijskimi preiskavami.

Tudi v primeru malte se lahko loči dve različni vrsti (slika 37). In sicer opazimo prvotno malto rjavkaste barve in manjšim deležem nadmernih zrn (zrna večja od 4 mm). Nadmerna zrna so zaobljena in imajo lahko premer do 17 mm. Iz tega razloga tudi debelina spojnice variira med 10 in 20 mm. Sprijemnost malt z opeko je razmeroma dobra, kar je sicer značilno za apnene malte ustrezne granulacije. V zahodnem in vzhodnem delu Kolizeja se je lokalno zasledilo nekoliko drugačno vrsto malte, ki ima, z razliko od originalne malte, bistveno svetlejšo barvo, drugačno strukturo, večji delež nadmernih zrn in se zelo težko drobi v roki. Tovrstna malta je bila v glavnem uporabljena za refugiranje in prezidavo poškodovanih zunanjih zidnih slopov (Kržan, 2008). Menim, da druga vrsta malte vsebuje določen delež cementa, ki pa nas v mojem diplomskem delu na zanima oz. nam potrdi neprimerno sanacijo objekta.



**Slika 37: Uporaba različnih vrst opeke (levo) in uporaba različnih vrst malt (desno) (Kržan, 2008: str. 20)**

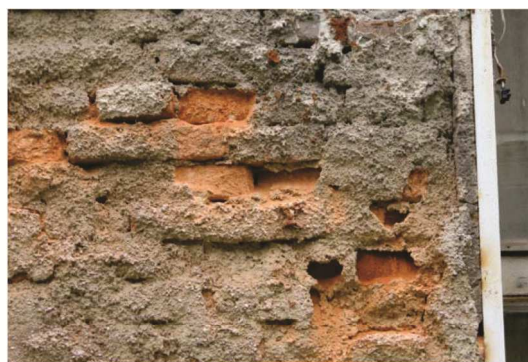
S pregledom objekta pred rušenjem je bilo ugotovljeno, da je zidovina nosilne konstrukcije v precej slabem stanju. Opaziti je bilo številne poškodbe kot so razpoke zaradi preobremenitev (slika 38), plesen oz. biodegradacijo (slika 39), odstopanje in odpadanje ometa (slika 39d), razpad malte in opeke (slika 39b) ter slaba kohezivnost malte (Kržan et al., 2009).



**Slika 38: Razpoke na loku zaradi preobremenitev (Kržan, 2008: str. 14)**



*a) Poškodbe ometa na oboku (plesen)*



*b) Poškodbe zaradi kristalizacije soli*



*c) Poškodbe ometa zaradi kapilarnega dviga*



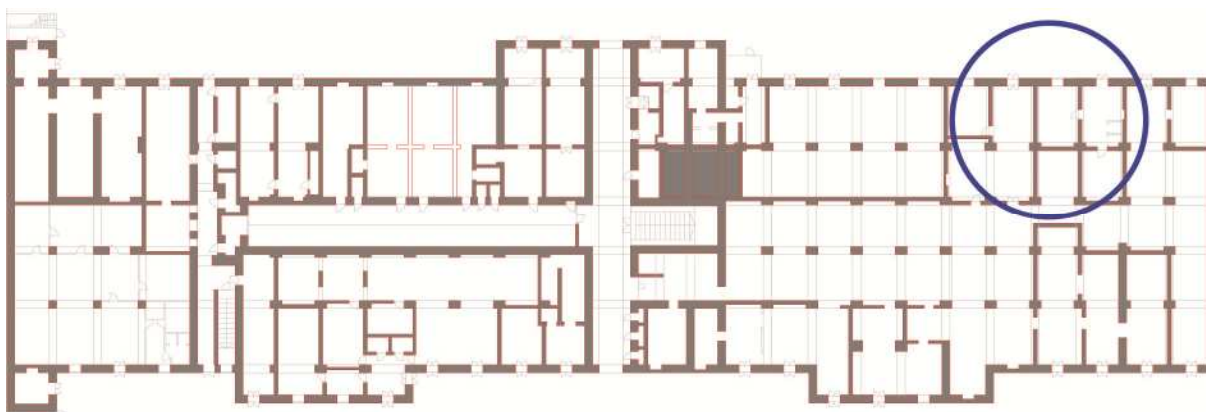
*d) Biodegradacija in odpadanje ometa*

**Slika 39: Opazne poškodbe na Kolizeju (Kržan, 2008: str. 12,13)**

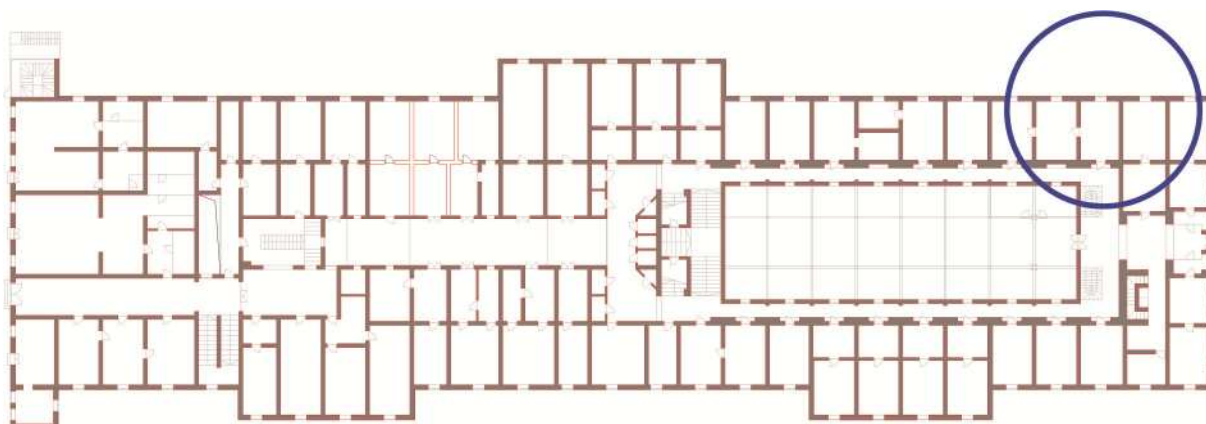
## 12.4 Vzorčenje materialov

Vzorci so bili odvzeti z namenom celovitih preiskav kot so karakterizacija malte, opeke ter ometa, lastnosti ter način stikovanja med malto in opeko, poleg tega pa tudi tlačna trdnost opeke in vpojnost vode.

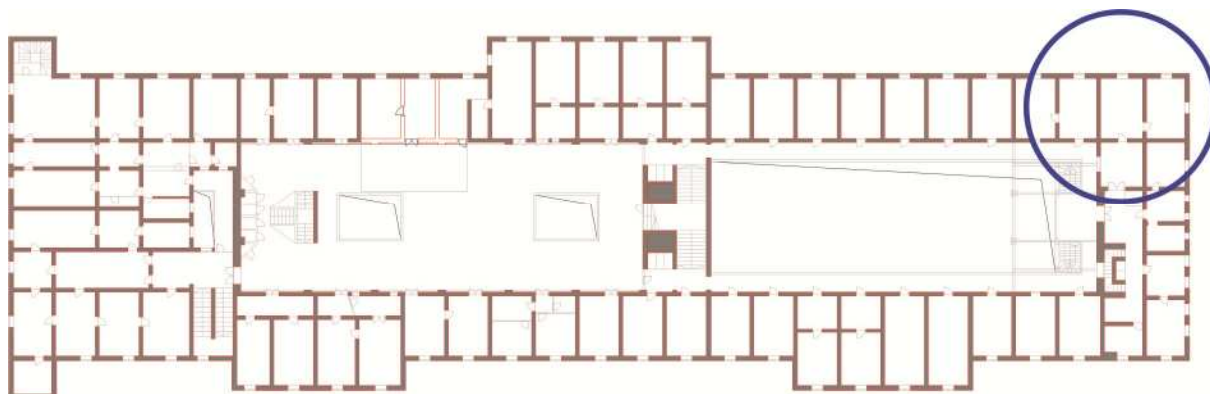
Vzorčili so na 5 mestih, in sicer en vzorec zunaj v višini kletne etaže (KZ1), en vzorec v pritličju (P2) ter trije vzorci v nadstropju (V1, V2, N2). Vsa mesta vzorčenja so bila v južnem delu objekta. Območja vzorčenja so prikazana na slikah 40, 41 in 42.



Slika 40: Tloris kleti, stanje pred porušitvijo in območje vzorčenja



Slika 41: Tloris pritličja, stanje pred porušitvijo in območje vzorčenja



Slika 42: Tloris nadstropja, stanje pred porušitvijo in območje vzorčenja

### 12.5 Laboratorijske preiskave mehanskih lastnosti malte in opeke

Predhodne preiskave vzorcev opek in malte iz palače Kolizej so bile opravljene že v sklopu diplomske naloge Parametrična analiza potresne odpornosti Kolizeja v Ljubljani avtorice Mete Kržan. Vzoredno z mojo diplomsko nalogo pa potekajo še ostale preiskave mehanskih lastnosti uporabljenih materialov na objektu.

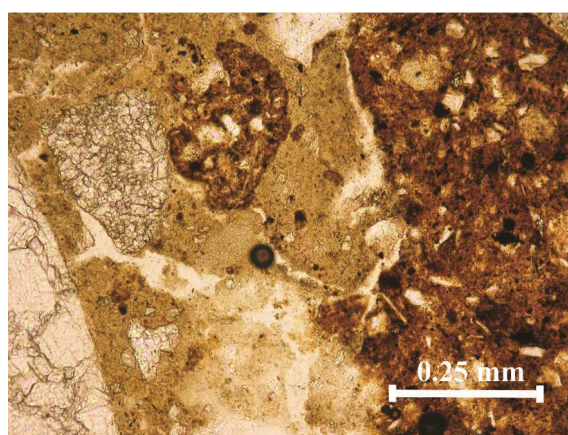
V prej omenjeni diplomski nalogi so preiskane naslednje fizikalne in mehanske lastnosti: vlažnost opeke, vodovpojnost opeke, tlačna trdnost opeke in tlačna trdnost malte. Na podlagi teh preiskav lahko trdimo, da je bila vlažnost opeke večja v kletni etaži in se je zmanjševala proti vrhnji etaži, prav tako je bila vodovpojnost opeke višja v spodnjih etažah v primerjavi z zgornjimi etažami ter najdena sta bila dva velikostna reda tlačnih trdnosti opeke. Tudi tlačna trdnost maltnih preizkušancev iz zgornjih etaž se razlikuje od tlačne trdnosti maltnih preizkušancev iz spodnjih etaž. Vzorci iz zgornjih etaž imajo višjo tlačno trdnost kot malta iz spodnjih etaž.

### 12.6 Mikroskopiranje na vzorcih

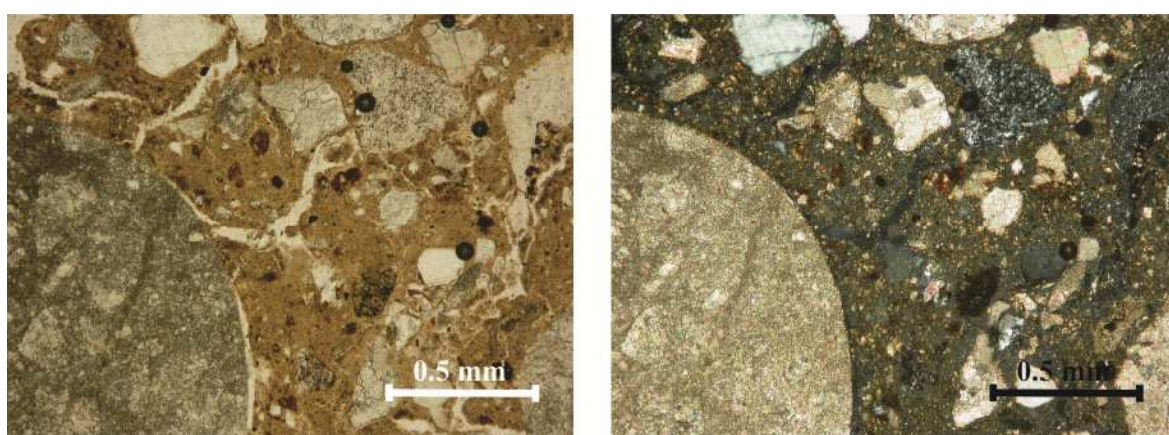
Vzorci V1, V2, P2, KZ1 in N2 smo mikroskopirali dne 9.3.2012 z mikroskopom Nikon Eclipse E200.

Vzorec V1 predstavlja notranji omet. Omet je homogen, agregat in vezivo sta enakomerno porazdeljena po vzorcu. Razmerje med agregatom, vezivom in porami smo ocenili s pomočjo lestvice po Terry in Chilingar (1955) na 60:30:10. Agregat, ki nastopa v ometu, je heterogen. Pojavijo se prodniki in ostanki zdrobljene keramike (opeke) (slika 44). V mineralni sestavi kamnin prevladuje kalcit oz. dolomit. V agregatnih zrnih je moč opaziti tudi mineral kremen ter tu pa tam kakšen neporozen mineral. Velikost zrn se giblje od nekaj mikrometrov do skoraj centimetra. Manjša zrna so

z razliko od večjih oglate oblike, kar kaže na to, da so večje prodnike drobili. Drobci opeke so prav tako veliki od nekaj mikrometrov do nekaj milimetrov. Verjetno so opeko (najverjetneje ostanke starejše opeke ali poškodovane kose) dodajali kot mineralni dodatek z namenom izboljšanja lastnosti malte. Vezivo je na osnovi apna. Zaradi velike količine prisotnega opečnega prahu je vezivo obarvano. Večjih posebnosti v vzorcu nismo odkrili.

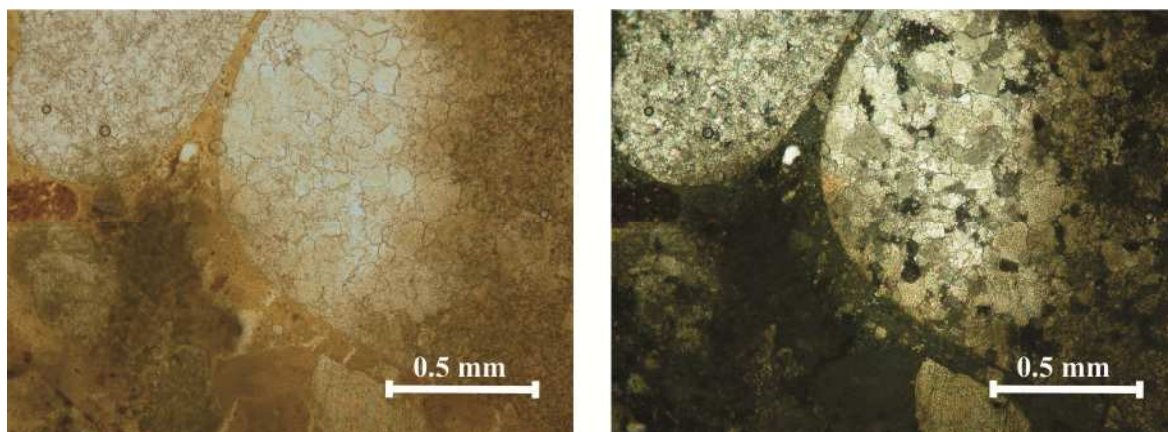


**Slika 43: Košček opeke vzorca V1**

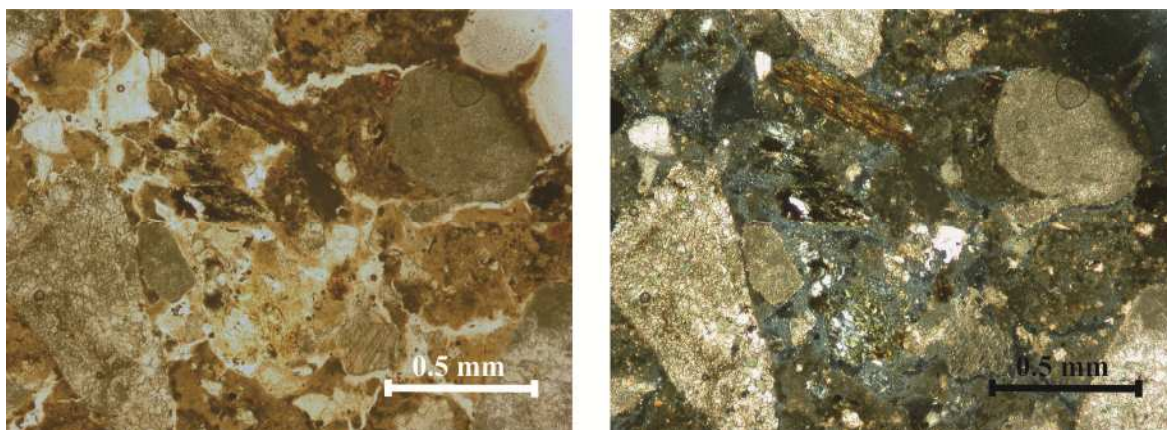


**Slika 44: Splošna slika vzorca V1 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)**

Vzorec V2 predstavlja notranji omet v bližini dimnika. Vzorec je homogen, ocena razmerja po lestvici med agregatom, vezivom in porami je 60:25:15, od koder opazimo, da je prisotnih več por kot pri vzorcu V1. Agregat in vezivo je identično kot pri vzorcu V1, t.j. heterogen agregat z različno velikimi zrni in prevladujočimi karbonatnimi prodniki ter vezivom na osnovi apna, ki je obarvan zaradi opečnega prahu. Z razliko od vzorca V1 pa je tu opaziti potemnjenost agregata na določenih mestih vzorca (slika 45). Vzrok za potemnitev je verjetno ravno bližina dimnika in posledično prisotnost dimnih plinov oz. saj. Nekatere manjše razpoke so zapolnjene (slika 46). Predpostavljamo, da gre za sadro. Za potrditev predpostavke bi bilo potrebno narediti dodatne laboratorijske preiskave (npr. Raman spektroskopija).



**Slika 45: Prehod med svetlim in temnim, najverjetneje zadimljenim delom Splošna slika vzorca V2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)**

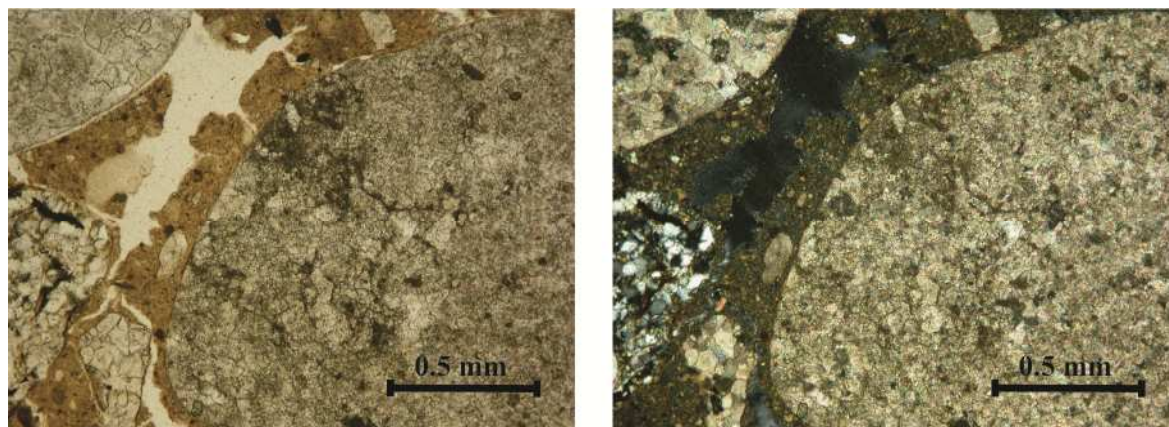


**Slika 46: Splošna slika vzorca V2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)**

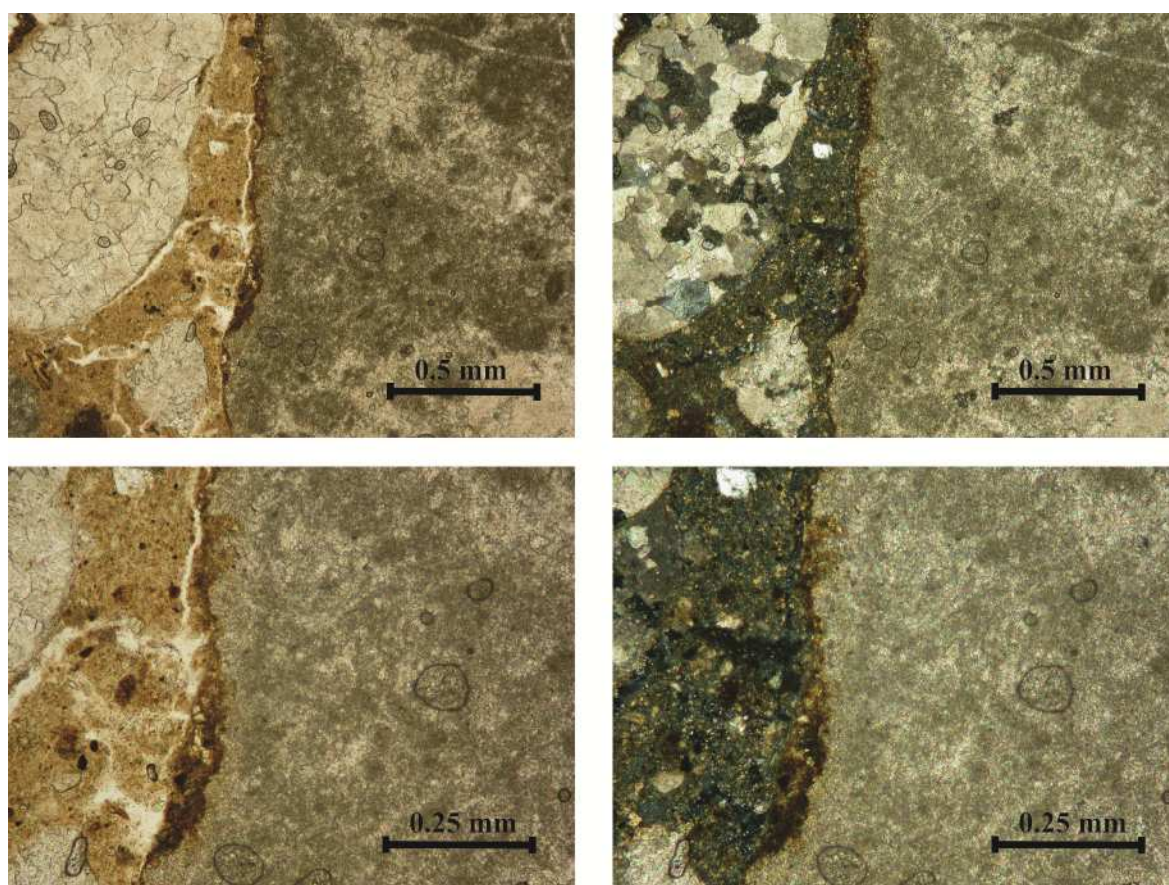
Vzorec P2 je sestavljen iz vzorca malte in vzorca opeke, ki smo ju obravnavali ločeno. Malta ima identične lastnosti kot vzorec V1 (slika 47). Prav tako opazimo zelo raznovrstna agregatna zrna, tako v velikosti kot tudi po obliki. Prevladujejo karbonatni prodniki. Tudi tu so razpoke zapolnjene, najverjetneje s sadro (slika 49, slika 50). Pojavi se sprememba na agregatu, ki je pod mikroskopom vidna kot obarvan rob agregata (slika 48). To bi lahko bila alkalno-karbonatna reakcija, ki lahko v nekaterih primerih povzroči propadanje agregata.

Opeka pri vzorcu P2 je nehomogena, zrna so usmerjena (slika 51, slika 52). Večinoma je opaziti kremen ( $\text{SiO}_2$ ), zrna so velika od nekaj mikrometrov do nekaj milimetrov (slika 53). Delež por je okoli 2% (slika 48). Opazimo redukcijska jedra ter spremembo odtenkov značilne oranžne barve, kar je posledica neenakomerne temperature žganja (slika 49).

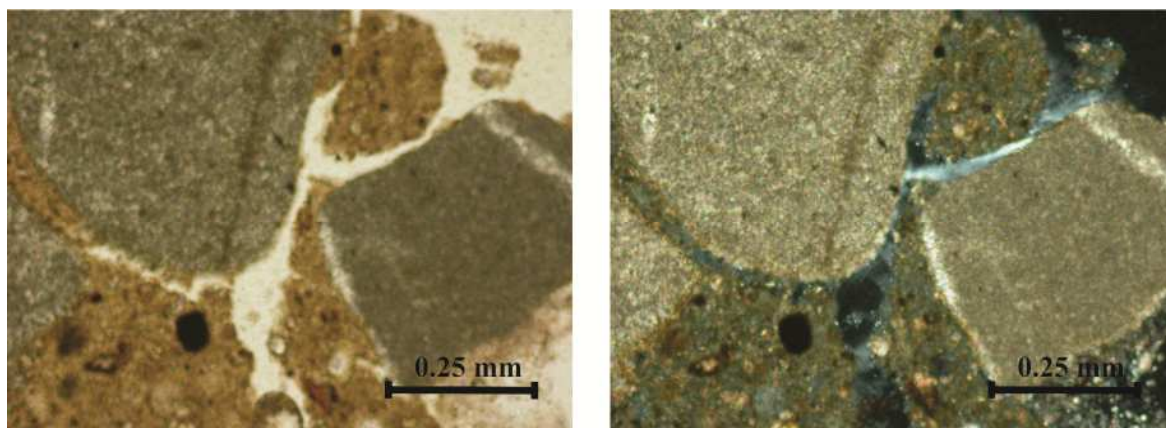




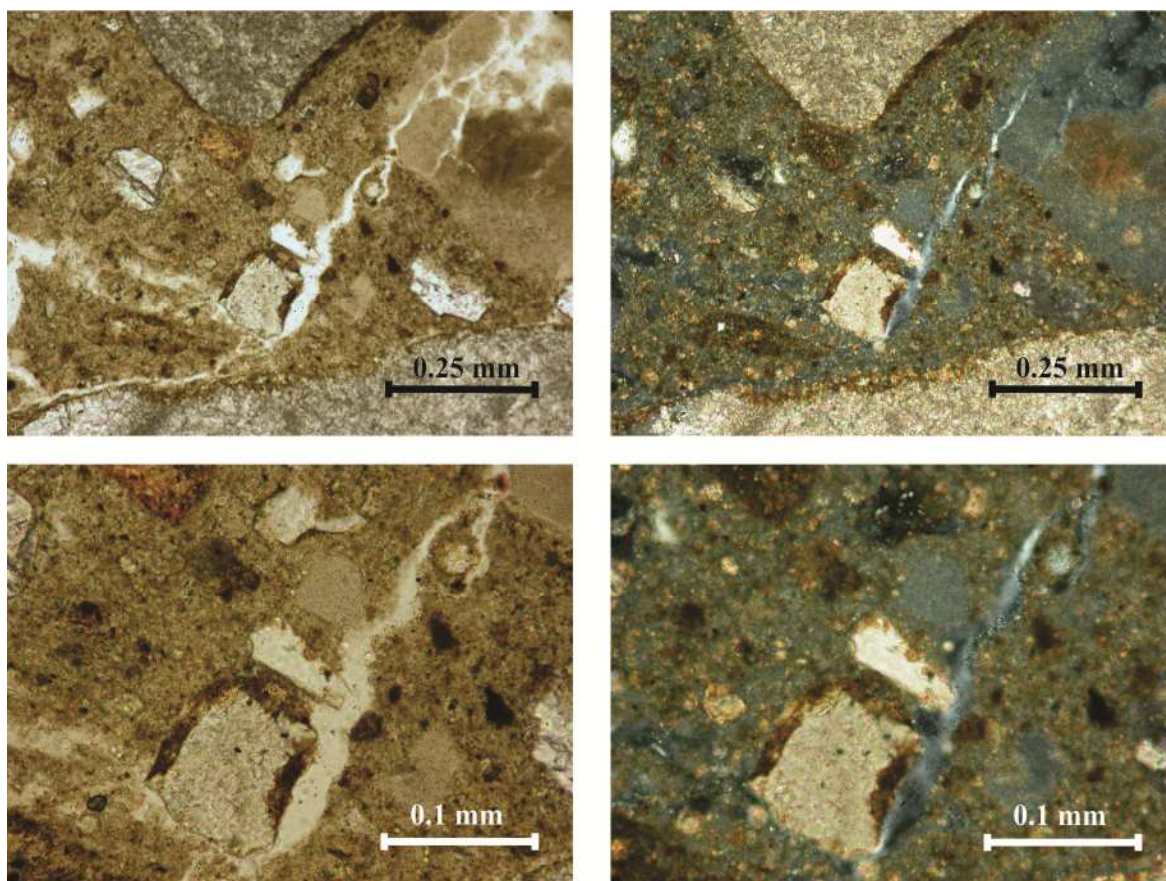
Slika 47: Splošna slika malte vzorca P2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)



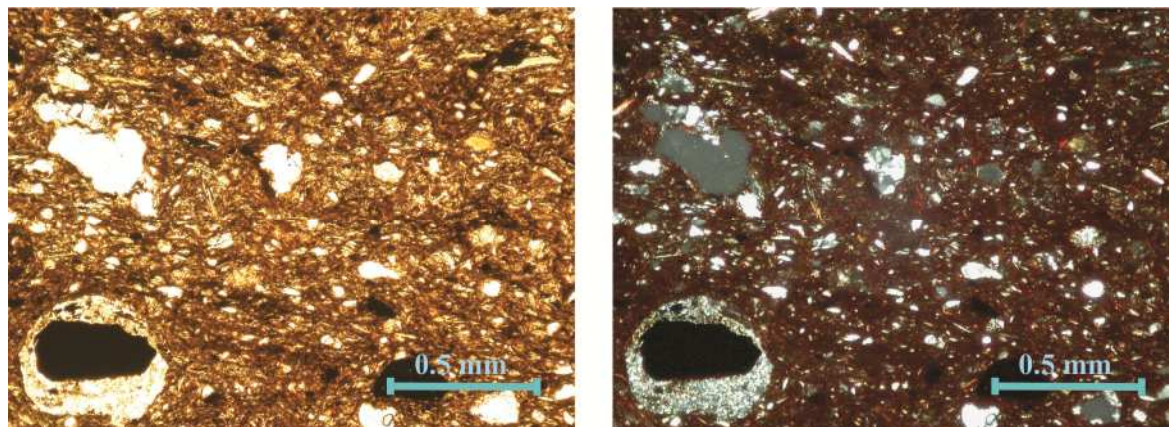
Slika 48: Sprememba na robu agregatnega zrna pr 5x povečavi (zgoraj) in 10x povečavi (spodaj)



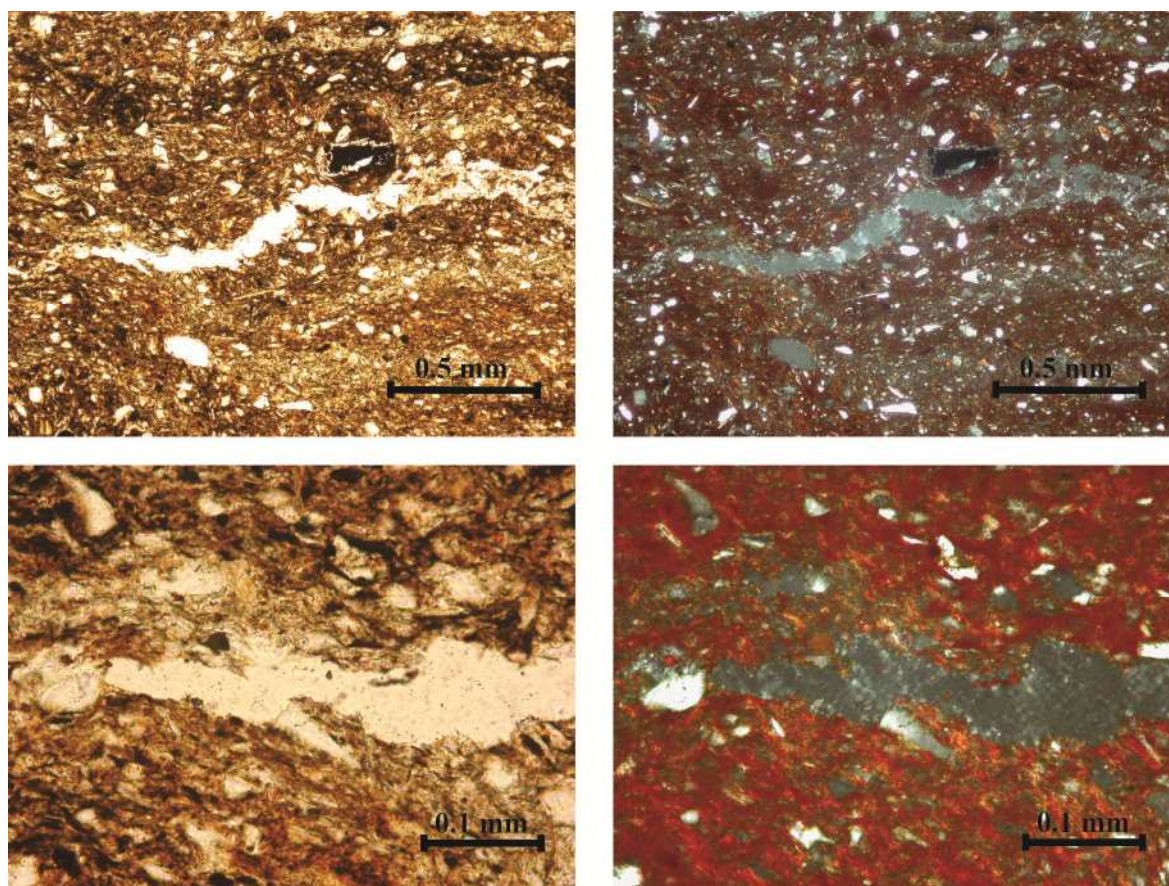
Slika 49: Razpoka, zapolnjena s sadro pri 10x povečavi



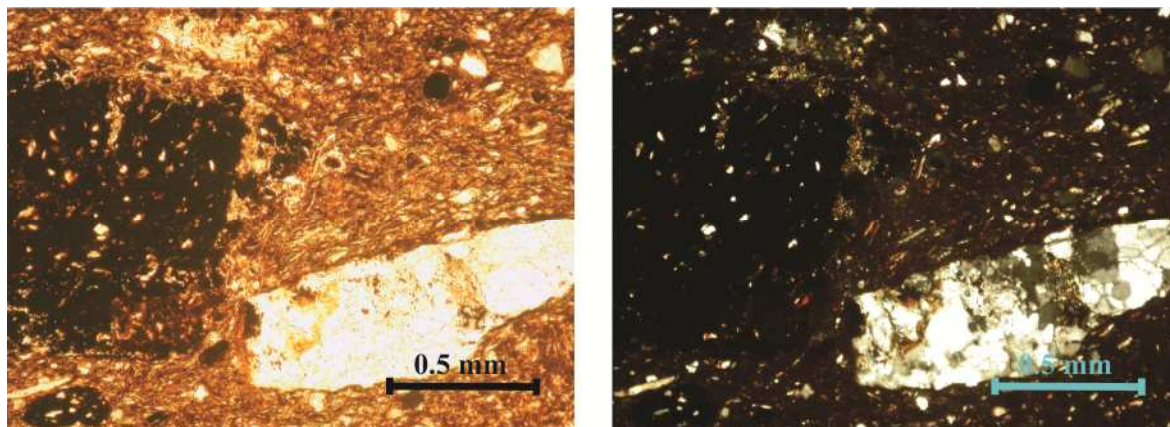
Slika 50: Zapolnjena razpoka ter sprememba na robu agregata pri 10x povečavi (zgoraj) in 20x povečavi (spodaj)



Slika 52: Splošna slika opeke pri vzorcu P2 brez analizatorja (levo) in z analizatorjem (desno)



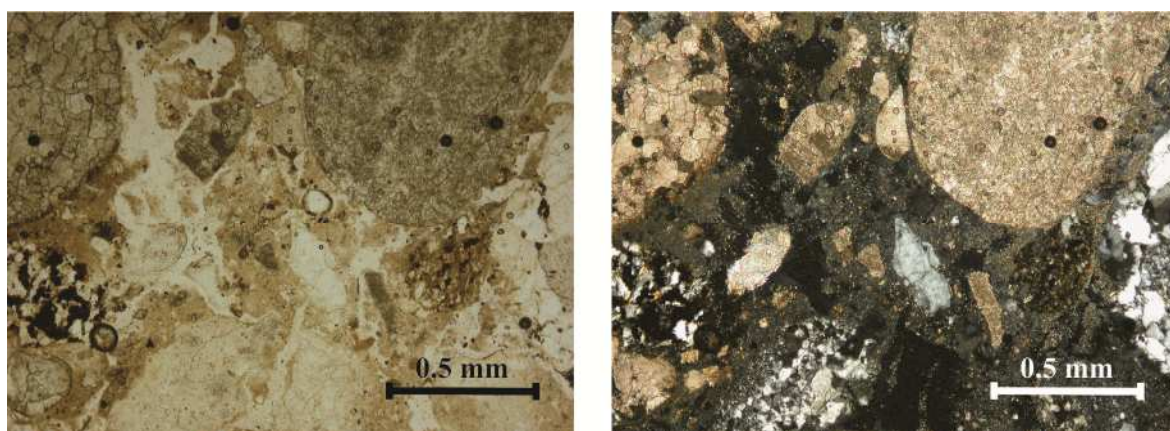
Slika 51: Razpoka v vzorcu opeke P2 pri 5x povečavi (zgoraj) in 20x povečavi (spodaj)



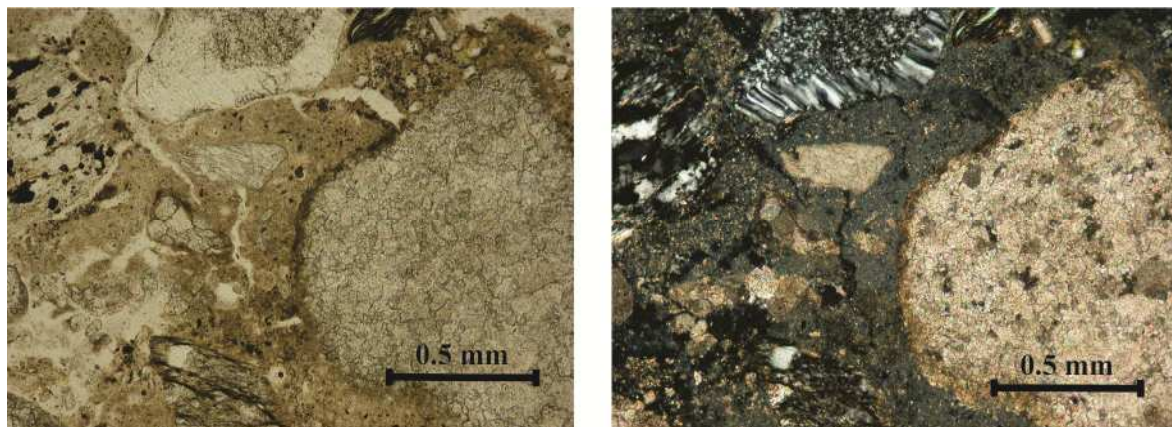
Slika 53: Redukcijsko jedro in večje zrno kremenca

Prav tako kot vzorec P2 je tudi vzorec KZ1 sestavljen iz vzorca malte in vzorca opeke. Malta v vzorcu KZ1 je enaka malti iz vzorca V1, vendar z manjšim deležem ostanka opeke (slika 54). Tudi tu se kot pri vzorcu P2 pojavi sprememba na agregatu, ki je pod mikroskopom vidna kot obarvan rob agregata (slika 55).

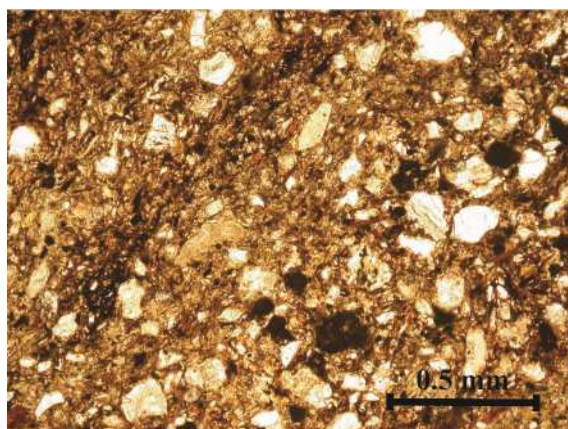
Vzorec opeke je izredno nehomogen. Zrna so večinoma kremenova in so usmerjena (slika 56). Velikost zrn je od nekaj mikrometrov do nekaj milimetrov, vendar so večja zrna redkejša. Opazna so redukcijska jedra in prehod le-teh v leče (slika 57). Prav tako kot pri vzorcu P2 je tudi tukaj opaziti menjavanje obarvanosti. Pri večjih zrnih je v razpokah opaziti zapolnjenost (slika 58), prav tako razpoke ob zrnju. Prisotnost por je ocenjena od enega do dveh procentov. Prazne razpoke so redke, večina je delno zapolnjenih ali povsem zapolnjenih. Predvidevamo, da naj bi šlo za sadro.



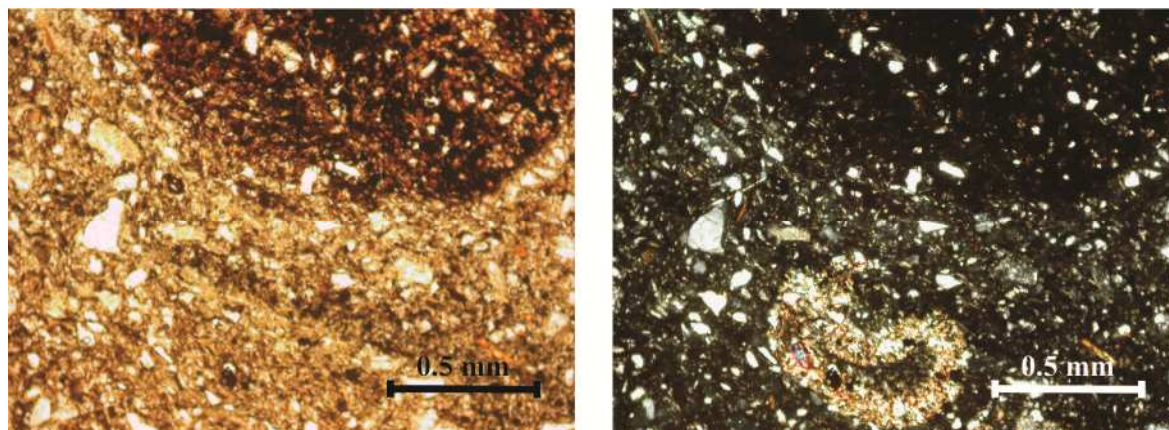
Slika 54: Splošna slika malte vzorca KZ1



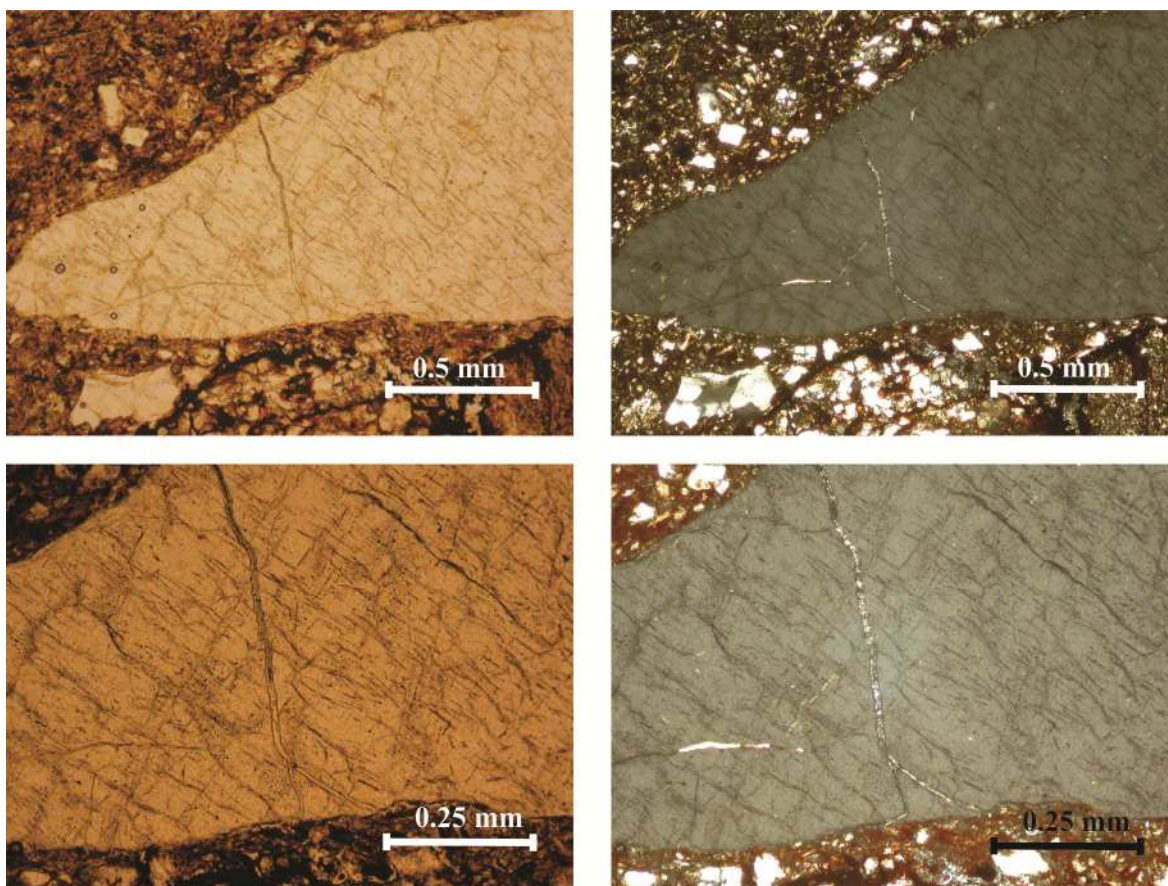
Slika 55: Obarvan rob agregata v malti vzorca KZ1



Slika 56: Splošna slika opeke vzorca KZ1

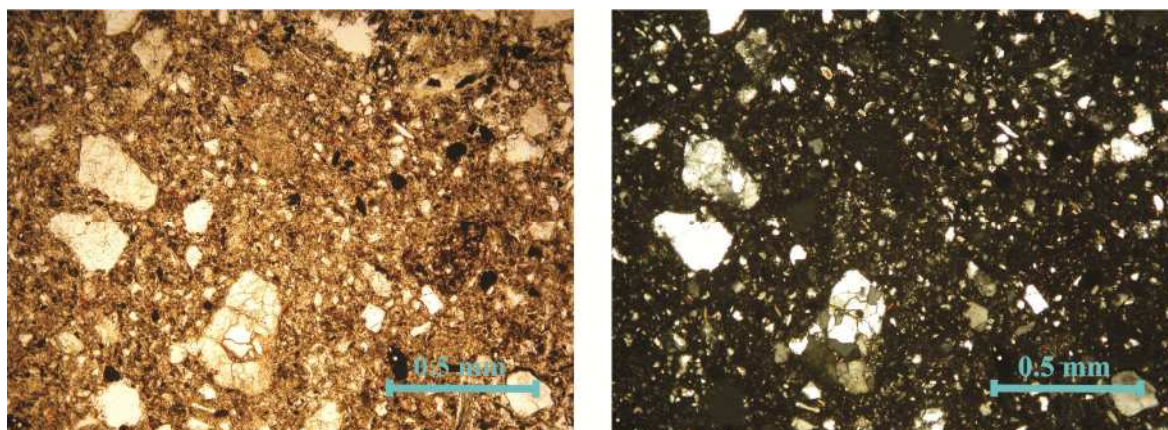


Slika 57: Redukcijsko jedro v vzorcu KZ1

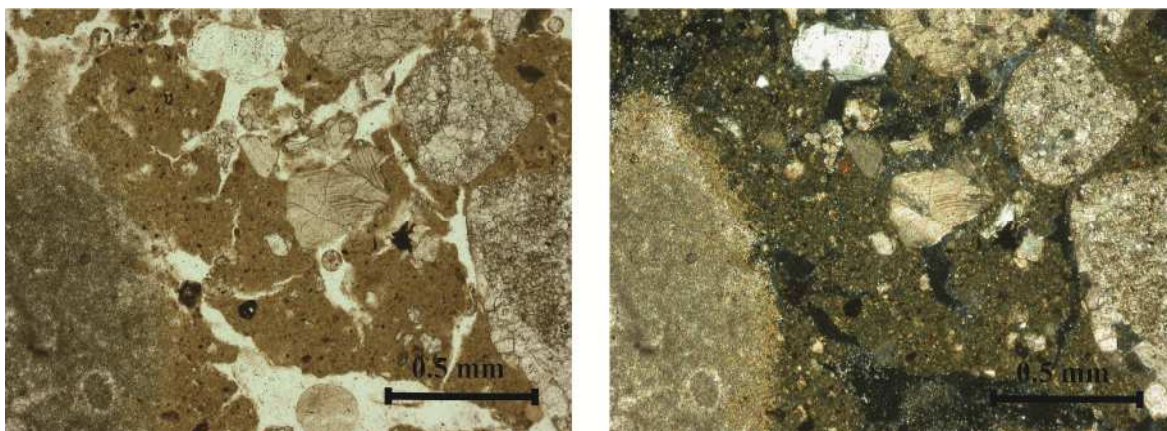


**Slika 58:** Večje agregatno zrno z zapolnjenimi razpokami pri 5x povečavi (zgoraj) in 10x povečavi (spodaj)

Vzorec N2 je odvzet v prvem nadstropju. Malta v obravnavanem vzorcu ima enake lastnosti kot vzorec V1, opeka pa je ekvivalentna opeki v vzorcu P2.



**Slika 59:** Splošna slika opeke vzorca N2



**Slika 60: Splošna slika malte vzorca N2**

### 12.7 Vrednotenje rezultatov

Na palači Kolizej je bilo moč najti skoraj vse vrste poškodb, ki lahko nastanejo pri maltah. Razpoke, biodegradacija, izpiranje materiala, luščenje in nabrekanje so tvorile številne poškodbe na vseh delih objekta. Poglavitni vzroki za nastale poškodbe so predvsem vlaga (dež, talna vlaga, sneg, vlaga iz megle) in slabo oz. neprimerno vzdrževanje, poleg tega pa še preobremenitev posameznih elementov nosilne konstrukcije, dinamična obremenitev zaradi vpliva prometa, onesnažen zrak ter zmrzal.

Vsi vzorci malt so si podobni in so tvorjeni iz enakih oz. podobnih gradnikov. Povsod je prisotno vezivo na osnovi apna. Agregat je heterogen. Prevladuje kalcitni agregat v obliki prodnikov, kar je na tem območju lokalna kamnina in pomeni, da je bil agregat pridobljen v bližini. Dodana je tudi zdrobljena keramika kot mineralni dodatek in daje malti posebno oranžno barvo. Pri vzorcu V2 je opaziti spremembe zaradi vpliva dimnika, kar vpliva samo na barvo ter zapolnjenost por s sajastimi delci iz dima, nič pa ne vpliva na poslabšanje materiala oz. njegovih lastnosti. V vzorcih P2 in KZ1 se pojavijo spremembe v agregatu. Le-te so posledica reakcije veziva s karbonatnim agregatom.

Tudi opeka je v vseh vzorcih podobna. Ima usmerjena zrna kar nam pove, da je bila temperatura žganja neenakomerna. Zaradi istega vzroka se pojavljajo tudi redukcijska jedra. Prišlo je do pretvorb mineralov pri višjih temperaturah. Opazne so limonitne kroglice, ki so po žganju prešle v hematit. Tvori se oksidacijski rob med oksidacijsko atmosfero (svetlejši predeli vzorca opeke), kjer se železovi minerali spreminjajo v hematit, in redukcijsko atmosfero (temnejši predeli vzorca opeke).

### 13 ZAKLJUČEK

Število materialov, ki so jih včasih uporabljali pri graditvi objektov, je omejeno. Po navadi so uporabljali material, ki je bil na voljo v bližnji okolici. Tradicionalni materiali so torej kamen, opeka, les, malta in omet. Med temi pa so malte in ometi najbolj občutljivi na okoljske razmere in zato so najbolj potrebni obnove (Arioglu in Acun, 2006).

Cilj obravnavanega pristopa k obnovi objektov kulturne dediščine je izdelati material, ki bi zmanjšal oz. upočasnil nadaljnje propadanje originalnega materiala. Za doseg tega cilja je potrebno najprej preučiti originalen material in vzroke za poškodbe. V diplomski nalogi je proces preučevanja malt iz historičnih objektov z namenom sanacije potekal v skladu z naslednjimi koraki:

1. Vizualna in-situ analiza in dokumentiranje zgradbe.

Obsega določitev faz gradnje in stratigrafijo, identifikacijo uporabljenih materialov in način kako so povezani. Na koncu opišemo problem in oblikujemo hipoteze.

2. In-situ neporušne preiskave in vzorčenje.

Po opravljenem vizualnem pregledu opravimo in-situ preiskave z neporušnimi metodami ter odvzem vzorcev, vključno z shranjevanjem le-teh in transportom do laboratorija.

3. Laboratorijske preiskave vzorcev.

4. Vrednotenje.

Rezultate, pridobljene z IN-situ analizo in laboratorijskimi analizami interpretiramo in določimo sestavo in lastnosti originalne malte.

Pred začetkom vzorčenja je treba temeljito razumeti način gradnje in stratigrafijo objekta, da se zagotovi vzorčenje pravih in reprezentativnih materialov ter da je vzorec dovolj velik za zahtevane analize. Oblikovanje hipotez v zvezi z mehanizmi poškodb, stopnjo razpada stavbe in predmetom študije nas usmerja k izbiri ustrezne analitske metode. Pri tem pa ne smemo pozabiti na pomembno vlogo in-situ neporušnih preiskav (v našem primeru optično mikroskopiranje), saj z njimi lahko dobimo jasen vpogled v sestavo historične malte. V pomoč pa so te preiskave tudi pri določevanju vzroka/vzrokov za poškodbe na objektu, ne da bi pri tem kakorkoli vplivali na ali dodatno poškodovali opazovani objekt. Pa vendar samo z omenjenimi metodami ne dobimo popolnega odgovora na vprašanje o sestavi in lastnostih malte ter degradaciji le-te, zato se moramo poslužiti laboratorijskih preiskav. Pri obeh objektih, t.j. cerkev sv. Treh kraljev in palača Kolizej, smo uporabili kot primer laboratorijskih preiskav mikroskopiranje. Na podlagi vseh navedenih dejstev lahko ugotovimo, da v procesu priprave na sanacijska ali restavratorska dela, s katerimi bomo posegali v historične malte, ne moremo zasnovati ustrezne sanacijske malte na podlagi rezultatov preiskav, opravljenih z eno preskusno metodo, ampak je potrebno uporabiti ustrezno kombinacijo različnih preskusnih metod.



Tekom celotnega postopka analiz sem prišla do zaključka, da je sanacija historičnega objekta v večini primerov zahteven gradbeni poseg, saj uporabljen tradicionalni material ni standardiziran kot današnji materiali, poleg tega pa so vzroki za nastanek poškodb lahko zelo različni. Zavedati se moramo tudi dejstva, da so proizvodi za vzdrževanje, obnovo, popravilo in zaščito obstoječih konstrukcij in sami postopki sanacije relativno dragi. Kot rezultat vseh ugotovitev menim, da morajo o izbiri ustreznih postopkov in materialov odločati za to usposobljeni strokovnjaki, ki znajo identificirati poškodbe in vzroke zanje ter opraviti ustrezne analize, s pomočjo katerih na koncu določijo sestavo ustrezne sanacijske malte.

## VIRI

Arioglu, N., Acun, S. 2006. A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: A staging system approach. *Building and Environment* 41, 9: 1223-1230.

Arnold, A., Zehnder, K. 1996. Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts. V: Sharon, C. (ur.). *The Conservation of Wall Paintings, Proceedings of a Symposium organized by Courtauld Institute of Art and Getty Conservation Institute, London, July 13-16, 1987*. Los Angeles, The Getty Conservation Institute: str. 103-134.

Arsov, Z. 2011. (Vibracijska) Infrardeča in Ramanska Spektroskopija.  
[http://bf.ijs.si/Downloads/CO\\_karakter\\_material\\_arsov\\_distrib.pdf](http://bf.ijs.si/Downloads/CO_karakter_material_arsov_distrib.pdf) (Pridobljeno 27.12. 2011).

Artioli, G. 2010. *Scientific Methods and Cultural Heritage*. Oxford, Oxford University Press: 536 str.

Bat, M., Devetak, D., Grčman, H., Hudnik, V., Kaligarič, M., Lobnik, F. 2004. *Narava Slovenije*. Ljubljana, Mladinska knjiga: 231 str.

Bavec, M., Brenčič, M., Buser, S., Dobnikar, M., Dozet, S. 2009. *Geologija Slovenije. = The geology of Slovenia*. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije: 612 str.

Blauer Bohm, C. 2005. Quantitative Salt Analysis in Conservation of Buildings. *Restoration of Buildings and Monuments* 11, 6: 1-10.

Bokan Bosiljkov, V., Štukovnik, P., Čepon, F. 2011. On-site analysis of damaged parts of historical monuments with portable 3D optical microscope system. V: Mauko, A. (ur.), Kopar, T. (ur.), Gartner, N. (ur.). *13<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Ljubljana, Slovenia, June 14-18, 2011. Ljubljana, ZAG, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute: str. 83-94.

Drobne, F., Tovornik, S. 1961. Obvestilo o raziskavah geoloških pogojev za gradnje na območju mesta Ljubljana. *Geologija* 7, 1: 269-274.

Elices, M., Rocco, C.G. 2008. Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics* 75, 13: 3839-3851.

Hughes, J., Callebaut, K. 2002. In-situ visual analysis and practical sampling of historic mortars. *Materials and Structures* 35, 2: 70-75.

Hughes, J.J., Valek, J. 2003. Mortars and Historic Buildings: A review of the Conservation and Scientific Literature. Edinburgh, Historic Scotland: 80 str.

Kosovel, M. 2000. Trajnostna obnova apnenih ometov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kosovel): 132 str.

Kramar, S., Mirtič, B. 2009. Karakterizacija historičnih ometov kot del konservatorsko-restavratorskih posegov in arheoloških poizkopavalnih analiz. RMZ - Materials and Geoenvironment 56, 4: 501-519.

Križnar, A. 2006. Slog in tehnika srednjeveškega stenskega slikarstva na slovenskem. Ljubljana, ZRC SAZU: 360 str.

Kržan, M. 2008. Parametrična analiza potresne odpornosti Kolizeja v Ljubljani. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba M. Kržan): 95 str.

Kržan, M., Bosiljkov, V., Žarnić, R. 2009. Parametrična analiza potresne odpornosti Kolizeja v Ljubljani. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Zborovanje gradbenih konstrukterjev, Rogaška Slatina, 8-9 oktober 2009. (Zbornik 31. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije). Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstrukterjev: str. 265-272.

Mavrič, D. 2008. Ljubljanski Kolizej v ogledalu časa. Arhitektov bilten 14, 2: 6-11.

McMahon, G. 2008. Analytical Instrumentation - A Guide to Laboratory Portable and Miniaturized Instruments. West Sussex, Wiley: 296 str.

Middendorf, B., Hughes, J., Callebaut, K., Baronio, G., Papayianni, I. 2005a. Investigative methods for the characterisation of historic mortars - Part 2: Chemical characterisation. Materials and Structures 38, 8: 771-780.

Middendorf, B., Hughes, J.J., Callebaut, K., Baronio, G., Papayianni, I. 2005b. Investigative methods for the characterisation of historic mortars - Part 1: Mineralogical characterisation. Materials and Structures 38, 8: 761-769.

Mioč, P., Žnidarčič, M. 1977. Geološka karta Slovenije: List Slovenj Gradec, merilo 1:100.000. Ljubljana, Geološki zavod Slovenije.

Mirtič, B. 2002. Preiskovalne metode v mineralogiji. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo: 162 str..

Ortega, L.A., Zuluaga, M.C., Alonso-Olazabal, A., Insausti, M., IbÁÑEZ, A. 2008. Geochemical characterization of archaeological lime mortars: Provenance inputs\*. *Archaeometry* 50, 3: 387-408.

Palomo, A., Blanco-Varela, M.T., Martinez-Ramirez, S., Puertas, F., Fortes, C. 2002. Historic Mortars: Characterization and Durability. *New Tendences for Research*. Madrid, Eduardo Torroja Institute: 20 str.

Popovics, S. 1992. *Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing*, 2. natis. New Jersey, William Andrew Publishing/Noyes: 661 str.

Rogelj, B., Ogrin, D. 2002. Karta podnebnih tipov v Sloveniji. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo.

Schofield, J. 1995. *Lime in Building. A Practical Guide*. Devon, Great Britan Black Dog Press: 27 str.

Šporar, M., Ruprecht, J., Prus, T., Vrščaj, B., Vidic, N.J., Zupan, M. 1999. Digitalna pedološka karta Slovenije, izris generaliziranih pedokartografskih enot, merilo 1:25.000. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Center za pedologijo in varstvo okolja.

Štukovnik, P. 2011. *Materiali z mineralnim vezivom na osnovi apna*. Seminarska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba P. Štukovnik): 12 str.

Štukovnik, P., Čepon, F., Bokan Bosiljkov, V. 2011. Analiza poškodb stavne deiščine s 3D optičnim mikroskopom. *Zbornik gradbnih konstrukterjev Slovenije* 33, 1: 253-260.

Torraca, G. 2009. *Lectures on Materials Science for Architectural Conservation*. Los Angeles, The Gette Institute: 193 str.

Uroševič, M. 2005. Preiskave apnenih ometov iz baročnega dvorca Novo Celje. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geologijo (samozaložba M. Uroševič): 128. str..

Van Hees, R., Binda, L., Papayianni, I., Toumbakari, E. 2004. Characterisation and damage analysis of old mortars. *Materials and Structures* 37, 9: 644-648.

Vesel, J., Senegačnik, A., Curk, J., Brate, T., Kobe, J., Kočica, J., Kvas, M., Pezdíček, E., Suhadolc, J., Suhadolc, M., Zupan, G., Zupančič, B. 2004. Pohorski tonalit: mineralov kamnolom na Cezlaku. Ljubljana, Mineral: 86 str.

Whiston, C., Prichard, F.E. 1987. X-ray methods: analytical chemistry by open learning. Chichester [etc.], John Wiley & Sons: 448 str.

Wikipedia. 2011. Tonalit.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Tonalit> ( Pridobljeno 11.10. 2011.)

Wikipedia. 2012a. Lime mortar.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Lime\\_mortar](http://en.wikipedia.org/wiki/Lime_mortar) ( Pridobljeno 20.1. 2012.)

Wikipedia. 2012b. Ljubljana.

<http://sl.wikipedia.org/wiki/Ljubljana#Geografija> (Pridobljeno 16.3. 2012.)

Young, R. 2008. Lime-based plasters renders and washes. V: Forsyth, M. (ur.). *Materials and Skills for Historic Building Conservation*. Oxford, Blackwell Publishing Ltd: str. 56-91.

Zabukovec Logar, N. 2008. Rentgenska praškovna difrakcija.

[http://www.ki.si/fileadmin/user\\_upload/datoteke-L09/nzl/Kristalografija-NZL-POGL4.pdf](http://www.ki.si/fileadmin/user_upload/datoteke-L09/nzl/Kristalografija-NZL-POGL4.pdf)  
(Pridobljeno 17.11. 2011.)

Zehnder, K. 2007. Long-term monitoring of wall paintings affected by soluble salts. *Environmental Geology* 52, 2: 353-367.

Zehnder, K., Arnold, A. 1989. Crystal growth in salt efflorescence. *Journal of Crystal Growth* 97, 2: 513-521.

ZVKDS, 1962-2009. Arhivsko gradivo cerkve sv. Treh kraljev. Maribor, ZVKDS OE Maribor: 24 str.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.