

IVANA DELIĆ-NIKOLIĆ

LJILJANA MILIČIĆ

EMILIJA NIKOLIĆ

ISTORIJSKI MALTERI

OD KARAKTERIZACIJE DO KONZERVACIJE

HISTORICAL MORTARS

FROM CHARACTERISATION TO CONSERVATION



IVANA DELIĆ-NIKOLIĆ LJILJANA MILIČIĆ
EMILIJA NIKOLIĆ

HISTORICAL MORTARS

FROM CHARACTERISATION
TO CONSERVATION



Belgrade, 2024

IVANA DELIĆ-NIKOLIĆ LJILJANA MILIČIĆ
EMILIJA NIKOLIĆ

ISTORIJSKI MALTERI

OD KARAKTERIZACIJE
DO KONZERVACIJE



Beograd, 2024.

Publishers:

Institute of Archaeology, Knez Mihailova 35/IV, Belgrade
Institute for Testing of Materials, Bulevar Vojvode Mišića 43, Belgrade

Editors-in-chief:

Dr Snežana Golubović
Dr Dragan Bojović

Editorial Board:

Dr Snežana Golubović, Dr Aleksandar Kapuran, Dr Ivan Bugarski, Dr Emilija Nikolić
Dr Dragan Bojović, Dr Zagorka Radojević, Dr Anja Terzić, Dr Biljana Ilić

Reviewers:

Dr Suzana Erić, full professor, Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade
Dr Smilja Marković, principal research fellow, Institute of Technical Sciences of SASA
Dr Ana Radivojević, full professor, Faculty of Architecture, University of Belgrade
Dr Nemanja Mrđić, senior research associate, Institute of Archaeology
Dr Marina Aškračić, assistant professor, Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade

Translation:

Grid Studio d.o.o. Belgrade and Emilija Nikolić

Proofreading:

Grid Studio d.o.o. Belgrade and Aleksandra Šulović (Serbian)
Dave Calcutt (English)

Graphic design:

Imagine&George, Belgrade and Davor Radulj

Printing: Grid Studio d.o.o. Belgrade

Impression: 200 copies

Printed edition: ISBN 978-86-6439-079-8 (IA); ISBN 978-86-82081-33-3 (IMS)

Electronic edition: ISBN 978-86-6439-080-4 (IA); ISBN 978-86-82081-38-8 (IMS)

Copyright: © 2024 Institute of Archaeology and Institute for Testing of Materials.



This publication is an open access publication distributed under the terms and conditions of the Creative Commons' Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0 DEED)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>).

Izdavači:

Arheološki institut, Knez Mihailova 35/IV, Beograd
Institut za ispitivanje materijala a.d., Bulevar vojvode Mišića 43, Beograd

Odgovorni urednici:

dr Snežana Golubović
dr Dragan Bojović

Uređivački odbor:

dr Snežana Golubović, dr Aleksandar Kapuran, dr Ivan Bugarski, dr Emilija Nikolić
dr Dragan Bojović, dr Zagorka Radojević, dr Anja Terzić, dr Biljana Ilić

Recenzenti:

dr Suzana Erić, redovna profesorka Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu
dr Smilja Marković, naučna savetnica Instituta tehničkih nauka SANU
dr Ana Radivojević, redovna profesorka Arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Beogradu
dr Nemanja Mrđić, viši naučni saradnik Arheološkog instituta
dr Marina Aškračić, docentkinja Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Prevod:

Grid Studio d.o.o. Beograd i Emilija Nikolić

Lektura:

Grid Studio d.o.o. Beograd i Aleksandra Šulović (srpski jezik)
Dejv Kalkat (engleski jezik)

Grafički dizajn:

Imagine&George, Beograd i Davor Radulj

Štampa: Grid Studio d.o.o. Beograd

Tiraž: 200 primeraka

Štampano izdanje: ISBN 978-86-6439-079-8 (AI); ISBN 978-86-82081-33-3 (IMS)

Elektronsko izdanje: ISBN 978-86-6439-080-4 (AI); ISBN 978-86-82081-38-8 (IMS)

Copyright: © 2024 Arheološki institut i Institut za ispitivanje materijala a.d.



Ova publikacija je dostupna u režimu otvorenog pristupa pod odredbama i uslovima licence
Creative Commons – Autorstvo-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 Međunarodna
(CC BY-NC-ND 4.0 DEED)

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.sr-latn>).

Members of the *MoDeCo2000* project team:

Dr Emilija Nikolić, Principal Investigator, Institute of Archaeology, Belgrade

Dr Mladen Jovičić, Institute of Archaeology, Belgrade

Dr Snežana Vučetić, University of Novi Sad, Faculty of Technology

Prof. Dr Jonjaua Ranogajec, University of Novi Sad, Faculty of Technology

Ljiljana Miličić, Institute for Testing of Materials, Belgrade

Ivana Delić-Nikolić, Institute for Testing of Materials, Belgrade

Dr Nevenka Mijatović, Institute for Testing of Materials, Belgrade

Dr Biljana Ilić, Institute for Testing of Materials, Belgrade

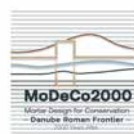


All graphic and photographic appendices are part of the archive and the property of the *MoDeCo2000* project unless otherwise indicated in the appendix description. Authors of the photographic appendices in the property of the *MoDeCo2000* project and graphic appendices are project team members unless otherwise indicated in the appendix description. All testing areas, laboratories, and equipment shown in the appendices are part (property) of the institutions participating in the *MoDeCo2000* project unless otherwise stated in the description of the appendix. All numerical and graphical results given in the text or as a part of the appendix are derived from work on the *MoDeCo2000* project unless otherwise stated in the text or the description of the appendix.

Authors' contribution: Given the multidisciplinary nature of the publication, all authors contributed equally to its concept and content, so authorship is given in alphabetical order.

This research was supported by the Science Fund of the Republic of Serbia, PROMIS, #6067004, MoDeCo2000.

This publication was produced with financial support from the Science Fund. The Institute of Archaeology and the Institute for Testing of Materials are solely responsible for the content of this publication and this content does not express the views of the Science Fund of the Republic of Serbia.



Članovi tima *MoDeCo2000* projekta:

dr Emilija Nikolić, rukovodilac projekta, Arheološki institut, Beograd

dr Mladen Jovičić, Arheološki institut, Beograd

dr Snežana Vučetić, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Novi Sad

prof. dr Jonjaua Ranogajec, Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet Novi Sad, Novi Sad

Ljiljana Miličić, Institut za ispitivanje materijala a.d., Beograd

Ivana Delić-Nikolić, Institut za ispitivanje materijala a.d., Beograd

dr Nevenka Mijatović, Institut za ispitivanje materijala a.d., Beograd

dr Biljana Ilić, Institut za ispitivanje materijala a.d., Beograd



Svi grafički i fotografski prilozi su deo arhive i vlasništvo projekta *MoDeCo2000*, osim ako nije drugačije naznačeno u opisu priloga. Autori fotografskih priloga u vlasništvu projekta *MoDeCo2000* i grafičkih priloga su članovi projektnog tima osim ako nije drugačije naznačeno u opisu priloga. Svi prostori za ispitivanje, laboratorije i oprema prikazani na fotografskim priložima su deo (vlasništvo) institucija učesnica projekta *MoDeCo2000*, osim ako nije drugačije naglašeno u opisu priloga. Svi numerički i grafički rezultati dati u tekstu ili kao deo priloga proistekli su iz rada na projektu *MoDeCo2000*, osim ako nije drugačije naglašeno u tekstu ili opisu priloga.

Doprinos autora: S obzirom na multidisciplinarnost publikacije, sve autorke su jednako doprinele njenom konceptu i sadržaju, pa je autorstvo dato po abecednom redosledu.

**Istraživanje sprovedeno uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije,
PROMIS, #6067004, MoDeCo2000.**

Ova publikacija je izrađena sredstvima finansijske podrške Fonda za nauku. Za sadržinu ove publikacije isključivo su odgovorni Arheološki institut i Institut za ispitivanje materijala a.d. i ta sadržina ne izražava stavove Fonda za nauku Republike Srbije.





Ilustracija projekta *MoDeCo2000*: Nikola Korać
(*MoDeCo2000* project illustration: Nikola Korać)

SADRŽAJ / CONTENTS

	Predgovor	xi
	Preface	xvii
I	Uvod	1
1.1	Ciljevi, koncept i metodologija projekta <i>MoDeCo2000</i>	4
1.2	Konteksti istraživanja istorijskih maltera	19
1.3	Ciljevi karakterizacije istorijskih maltera	33
1.4	Kompatibilnost maltera u arhitektonskoj konzervaciji	35
II	Metode i tehnike u karakterizaciji istorijskih maltera	41
2.1	Uzorkovanje maltera	45
2.2	Vizuelni pregled maltera	53
2.3	Mineraloško-petrografski sastav maltera	74
	<i>(Polarizaciona svetlosna mikroskopija; Skenirajuća elektronska mikroskopija; Rendgenska difrakcija; Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom; Ramanska spektroskopija)</i>	
2.4	Fizička i mehanička svojstva maltera	89
	<i>(Zapreminska masa; Poroznost; Kapilarno upijanje vode; Čvrstoće pri pritisku i savijanju; Čvrstoća prianjanja – adhezija za podlogu)</i>	
2.5	Hemijski sastav maltera	105
	<i>(Klasična hemijska analiza (mokra hemija); Rendgensko-fluorescentna spektrometrija; Optičko-emisiona spektrometrija sa indukovano spregnutom plazmom)</i>	
2.6	Termičke analize maltera	118
	<i>(Gubitak žarenjem; Termogravimetrija; Diferencijalna termalna analiza i diferencijalna skenirajuća kalorimetrija)</i>	
2.7	Hidrauličnost maltera	123
2.8	Određivanje starosti maltera	126
III	Komponente istorijskih maltera	131
3.1	Agregati	136
	<i>(Vrste agregata istorijskih maltera; Ispitivanja agregata)</i>	
3.2	Veživa	154
	<i>(Vrste veživa istorijskih maltera; Nehidraulični-vazdušni kreč; Kreč sa hidrauličnim svojstvima; Ispitivanja kreča)</i>	
3.3	Materijali sa pucolanskim svojstvima	187
	<i>(Osobine materijala sa pucolanskim svojstvima; Vrste materijala sa pucolanskim svojstvima; Ispitivanja materijala sa pucolanskim svojstvima)</i>	

3.4	Dodaci	205
	<i>(Tradicionalni dodaci; Savremeni dodaci)</i>	
IV	Priprema i ispitivanje krečnih maltera za konzervaciju	213
4.1	Tehnička kompatibilnost maltera	214
4.2	Tehnologije pripreme krečnih maltera	218
	<i>(Osobine krečnih maltera; Tehnologije gašenja kreča i pripreme krečnih maltera; Složeni ili produžni malteri)</i>	
4.3	Ispitivanja svežih maltera	232
	<i>(Komponente i priprema maltera tokom projekta MoDeCo2000; Konzistencija (plastičnost); Homogenost; Uvučeni vazduh; Sadržaj hlorida (soli rastvornih u vodi); Zapreminska masa; Vreme ugradivosti)</i>	
4.4	Ispitivanja očvrsljih maltera	248
	<i>(Čvrstoće pri pritisku i savijanju; Čvrstoća prianjanja – adhezija za podlogu; Propustljivost vodene pare; Kapilarno upijanje vode; Toplotna provodljivost)</i>	
4.5	Trajnost i starenje maltera	254
	<i>(Faktori trajnosti; Ispitivanje trajnosti maltera; Karbonatizacija maltera; Kontakt istorijskog maltera i maltera laboratorijskog modela; Rekristalizacija kalcijum-karbonata (samoizlečenje krečnog maltera); Primena i starenje maltera u stvarnim uslovima spomenika)</i>	
V	Zaključak	283
5.1	Kontekst i karakterizacija	284
5.2	Kompatibilnost i konzervacija	294
5.3	Značaj istraživanja istorijskih maltera i projekta <i>MoDeCo2000</i>	301
	Resume	313
	Bibliografija	357

PREDGOVOR

Publikacija *Istorijski malteri – od karakterizacije do konzervacije* predstavlja jedan od rezultata projekta *Mortar Design for Conservation – Danube Roman Frontier 2000 Years After (MoDeCo2000)*, koji je finansirao Fond za nauku Republike Srbije od 2020. do 2022. godine kroz program PROMIS. Projekat je sproveden u saradnji Arheološkog instituta, Tehnološkog fakulteta Novi Sad Univerziteta u Novom Sadu i Instituta za ispitivanje materijala. Tema projekta su krečni malteri građevina podignutih u periodu od I do VI veka na delu dunavskog limesa koji se nalazio na teritoriji današnje Republike Srbije.

U Srbiji se nalaze ostaci brojnih građevina iz svih istorijskih perioda, ali malteri ugrađeni u njihove strukture do sada nisu bili predmet sistematskog proučavanja. Period čiji je razvoj graditeljstva najdirektnije bio uslovljen razvojem pripreme i primene krečnog maltera predstavlja vreme rimske dominacije. Kroz projekat *MoDeCo2000* sprovedeno je istraživanje graditeljstva nastalog tokom ovog perioda na teritoriji dunavskog limesa – granice Rimskog carstva na reci Dunav. S obzirom na to da su rimski krečni malteri u svetu decenijama predmet brojnih naučnih projekata, *MoDeCo2000* predstavlja važan doprinos naučne zajednice Republike Srbije razvoju ovih istraživanja, ne samo kroz osvetljavanje dela slike graditeljskog, pa i društveno-ekonomskog razvoja prostora centralnog Balkana u periodu od I do VI veka nove ere, već i tradicionalnog graditeljstva na predmetnoj teritoriji uopšte. Osim istraživačkog cilja projekta, kao jednako važan je bio onaj usmeren na praktičnu arhitektonsku konzervaciju, odnosno direktnu primenu naučnih rezultata projekta u procesima očuvanja istorijskih građevina u Srbiji, u skladu sa međunarodnim dokumentima iz oblasti zaštite kulturnog nasleđa.

Projekat *MoDeCo2000* sproveden je kroz vezu humanističkih i prirodnih nauka, kao i stručnih i inženjerskih disciplina iz oblasti konzervacije, građevinarstva i tehnologije. Nakon nešto više od dve godine istraživanja istorijskih maltera, uz probne primene odabranih maltera za konzervaciju na eksperimentalnim i autentičnim zidanim strukturama, ova monografija je nastala kao prikaz primenjene metodologije istraživanja.

Rezultati ispitivanja istorijskih maltera i njima kompatibilnih modela za konzervaciju, kao i njihova interpretacija, nisu deo ove monografije, ali su neki od njih uvedeni kroz tekst i grafičke priloge kako bi primenjena metodologija bila jasnije prikazana. Veliki broj rezultata dobijenih tokom istraživanja u okviru projekta biće deo posebnih publikacija u budućnosti (do sada je objavljen samo deo rezultata).

Kroz istoriju graditeljstva na teritoriji današnje Srbije upotrebljavane su različite vrste maltera, podeljene prema preovlađujućem vezivu – zemlji, gipsu, kreću ili cementu. Iako su u građevinama dunavskog limesa, u periodu obuhvaćenom projektom, često upotrebljavani i blatni malteri, opseg istraživanja projekta *MoDeCo2000* i ove publikacije bio je ograničen na krećne maltere. Ona se jednostavnije mogu povezati sa istraživanjima rimskih maltera u drugim državama, koja su fokusirana upravo na ovu vrstu maltera. Za krećne maltere postoji mnogo više mogućnosti za dobijanje raznolikih istorijskih uzoraka za ispitivanje, koji pripadaju svim tipovima građevina, od skromnih do luksuznih. I na kraju, rezultati ispitivanja ove vrste maltera, trenutno mogu više doprineti praktičnoj arhitektonskoj konzervaciji u Srbiji, s obzirom na mnogo veći broj očuvanih spomenika izvedenih uz upotrebu krećnih maltera od onih za čiju izgradnju su primenjeni blatni malteri. U skladu sa iznetim, ova monografija u svom imenu nosi opšti termin *istorijski malteri*, iako je njen fokus na krećnim malterima. Tekst je obuhvatio krećni malter, ali je više ili manje primenjiv i na ispitivanja svih vrsta istorijskih maltera, kao i pripremu i primenu maltera za konzervaciju svih građevina nastalih upotrebom tradicionalnih materijala, bez obzira na istorijski period ili teritoriju sa koje potiču. Ilustrovan je, osim na malobrojnim specifičnim primerima (gde je to i označeno u opisu priloga), fotografijama vezanim za terenska istraživanja i laboratorijska ispitivanja sprovedena tokom projekta *MoDeCo2000*, pa će stoga njegov fokus, barem u očima čitalaca, svakako biti okrenut ka krećnim malterima iz perioda od I do VI veka na predmetnoj teritoriji uz Dunav.

Istraživanja danas manje očuvanih blatnih maltera, koje je upotrebljavao veliki deo stanovništva u svakodnevnoj građevinskoj praksi, gradeći svoje zemaljske i večne kuće još od

početaka graditeljstva, i u čemu se najpre i ogledaju graditeljske veštine čoveka jednog perioda, zaslužuju da budu zasebna tema nekog novog projekta i nove publikacije. Nadamo se da će jedan ovakav projekat istraživači u skorašnjoj budućnosti moći da zasnuju na metodologiji, rezultatima i iskustvima projekta *MoDeCo2000*, što će biti jedan od najvažnijih pokazatelja uticaja projekta na razvoj ove vrste istraživanja u Srbiji, ali i da će u isto vreme unaprediti sve njegove aspekte i tako biti dalji uzor kasnijim projektima vezanim za ispitivanje istorijskih građevinskih materijala i arhitektonsku konzervaciju.

Ova monografija je namenjena naučnoj zajednici, profesionalcima u Srbiji koji deluju u oblastima vezanim za ispitivanje istorijskih građevinskih materijala i praktičnu konzervaciju, ali i studentima različitih usmerenja. Nastala je kao rezultat saradnje fundamentalnih, odnosno društveno-humanističkih i prirodnih nauka, sa primenjenim naukama, odnosno inženjeringom. Monografijom je obuhvaćen veliki obim postojeće literature i standarda u vezi sa postupcima ispitivanja istorijskih maltera, kao i pripremom, primenom i testiranjem maltera za konzervaciju, što će, nadamo se, biti od velike pomoći svim budućim istraživačima. U monografiji je dat širok opseg istraživačkih metoda i tehnika primenjivanih prilikom rada na istorijskim i konzervatorskim malterima, uz naglasak na važnost njihovog pravilnog odabira i kombinovanja rezultata dobijenih kroz njihovu primenu, a tokom stalnog toka interpretacije podataka u okviru konteksta različitih oblasti i disciplina.

Arheološki institut je već više od tri četvrtine veka nosilac arheoloških iskopavanja i naučnih istraživanja iz oblasti arheologije u našem regionu. Ujedno je inicijator najvećeg broja arheometrijskih istraživanja vezanih za sve vrste materijala upotrebljivanih kroz ljudsku istoriju, ali i jedan od nosilaca izrade nominacionog dosijea za dobro *Granice Rimskog carstva – Dunavski limes u Srbiji*, sa ciljem njegovog upisa na Uneskovu listu svetskog nasleđa, što je ispitivanjima maltera kroz projekat pružilo cilj i kontekst. Prikazane laboratorijske metode i tehnike odabrane su na osnovu višedecenijskog iskustva u osnovnim i primenjenim istraživanjima saradnika Instituta za ispitivanje materijala na proučavanju svih vrsta

savremenih i istorijskih građevinskih materijala, kao i pripremi predloga materijala za konzervaciju – od agregata i kamena, preko svih vrsta veziva, do opeka i maltera. Na Tehnološkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu, u okviru Laboratorije za ispitivanje materijala u kulturnom nasleđu (HeritageLab), tokom nešto više od jedne decenije posebno se razvijaju ispitivanja istorijskih materijala u cilju izrade predloga materijala za konzervaciju upotrebnih predmeta, umetničkih dela i građevina. Kao jedan od rezultata projekta *MoDeCo2000* nastala je i publikacija namenjena studentima iz više disciplina čije su autorke članice projektnog tima sa Tehnološkog fakulteta Novi Sad (Vučetić, Ranogajec 2022).

Autorke ove monografije, u svoje ime i u ime istraživačkog tima projekta *MoDeCo2000*, ovim putem zahvaljuju Fondu za nauku Republike Srbije, koji je prepoznao značaj teme i ciljeva projekta, pretvorivši našu davno zamišljenu ideju u stvarnost, kroz finansijsku, administrativnu, promotivnu i moralnu podršku, prateći uspone i zastoje, razvoj i sazrevanje projekta. Nadamo se da smo kroz rad na projektu opravdali poverenje Fonda za nauku, ali i anonimnih recenzenata projekta čije su sugestije doprinele usmeravanju ideje projekta tokom realizacije projektnih aktivnosti.

Zahvalnost dugujemo rukovodstvu, administraciji, tehničkom i laboratorijskom osoblju institucija učesnica projekta, koji su naš rad pratili od samog početka i u njemu aktivno učestvovali. Hvala dr Miomiru Koraću, dr Vencislavu Grabulovu i prof. dr Biljani Pajin na podršci i pozitivnom stavu prema značaju projekta koji smo zajednički sproveli. Bez brojnih kolega koje su bile uključene u naša istraživanja, realizacija projekta takođe ne bi bila moguća. Hvala kolegama iz Arheološkog instituta, Instituta za ispitivanje materijala, Tehnološkog fakulteta u Novom Sadu, nadležnih ustanova zaštite spomenika kulture, muzeja i drugih institucija iz oblasti nauke, obrazovanja i kulture, iz Srbije i inostranstva, na velikoj stručnoj podršci tokom terenskih, kabinetskih i laboratorijskih istraživanja, kao i tokom organizacije i učešća u izuzetno velikom broju aktivnosti sprovedenih tokom trajanja projekta.

Zahvaljujemo dragim kolegicama i kolegi, članovima tima projekta *MoDeCo2000* sa kojima smo podelili sve terenske i la-

xv

boratorijske aktivnosti, kao i rad na publikovanju i diseminaciji rezultata projekta tokom više od dve godine rada: dr Nevenki Mijatović i dr Snežani Vučetić, koje su dragocenim komentari-
ma pomogle u nastanku teksta ove monografije, dr Mladenu Jovičiću, koji nam je pružio neophodne arheološke podatke o uzorkovanim lokalitetima, kao i prof. dr Jonjau Ranogajec i dr Biljani Ilić, čijim učešćem je naš projektni tim zaokružen. Takođe, zahvaljujemo dr Heleni Hiršenberger za učešće u oblikovanju ideje projekta.

Konačno, veliku zahvalnost dugujemo recenzentima ove monografije – dr Suzani Erić, redovnoj profesorki Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, dr Smilji Marković, naučnoj savetnici Instituta tehničkih nauka SANU, dr Ani Radivojević, redovnoj profesorki Arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, dr Nemanji Mrđiću, višem naučnom saradniku Arheološkog instituta, kao i dr Marini Aškrabić, docentkinji Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, čije su preporuke izuzetno unapredile naš tekst. Uz njih, dragocene savete u oblikovanju teksta pružio nam je Aleksa Jelikić, savetnik Republičkog zavoda za zaštitu spomenika kulture u Beogradu, koji je uz naš projektni tim proveo brojne sate na putovanju du-
navskim limesom.

Autorke



Tim projekta *MoDeCo2000*, kolege i saradnici tokom aktivnosti uzorkovanja istorijskih maltera duž dunavskog limesa (srednji red, sredina: Arhiva Centra za kulturu Grocka) (*MoDeCo2000* project team, colleagues and associates during the sampling of historical mortars along the Danube Limes (middle row, middle photo: Archive of the Centre for Culture Grocka))

PREFACE

The monograph *Historical Mortars - from Characterisation to Conservation* is one of the results of the project *Mortar Design for Conservation - Danube Roman Frontier 2000 Years After (MoDeCo2000)*, financed by the Science Fund of the Republic of Serbia during the period from 2020 to 2022, through the PROMIS programme. The project was conducted by the Institute of Archaeology, Faculty of Technology Novi Sad - University of Novi Sad, and the Institute for Testing of Materials. The subject of the project is the lime mortars of the built structures erected during the period from the 1st to the 6th century AD on the part of the Danube Limes that was located on the territory of today's Republic of Serbia.

On the territory of Serbia, there is a large number of built structures from all historical periods, but mortars used in these structures have not been the subject of systematic study until now. The period whose development of construction was most directly conditioned by the development of the preparation and application of lime mortar represents the time of Roman domination. Through the *MoDeCo2000* project, research of construction carried out during this period in the territory of the Danube Limes, the border of the Roman Empire on the Danube River, was conducted. Given that Roman lime mortars have been the subject of numerous world scientific projects for decades, *MoDeCo2000* represents an important contribution of the scientific community of the Republic of Serbia in the development of this research, not only by illuminating part of the picture of the architectural and socio-economic development of the Central Balkans in the period from the 1st to the 6th century AD, but also traditional construction in the subject territory in general. Apart from the research goal of the project, aimed at practical architectural conservation, the direct application of the project's scientific results in the process of preservation of historical built structures in Serbia, in accordance with the international documents in the field of cultural heritage protection, is equally important.

The *MoDeCo2000* project was implemented through the connection of humanities and natural sciences, as well

as professional and engineering disciplines in the fields of conservation, construction, and technology. After a little more than two years of research on historical mortars, with the test application of selected mortars for conservation on experimental and authentic masonry structures, this monograph was created as a presentation of the applied research methodology. The results of the examination of historical mortars and their compatible conservation models, as well as their interpretation, are not part of this monograph, but some of them are introduced through text and graphic contributions in order to show the applied methodology more clearly. A large number of the results obtained during the project research will form part of special publications (so far only some part of the results has been published).

Throughout the history of construction in the territory of today's Serbia, different types of mortar have been used, divided according to their predominant binder – earth, gypsum, lime, or cement. Although earth mortars were often used in construction on the Danube Limes, in the period covered by the project, the scope of the *MoDeCo2000* project's research and this monograph was limited to lime mortars. They can be more easily connected with the research of Roman mortars in other countries, which are focused on this type of mortar. For lime mortars, there is a much greater possibility of obtaining diverse historical samples for research, having been used in types of built structures from modest to luxurious. Finally, the results of researching this type of mortar can currently contribute more to practical architectural conservation in Serbia, given the much larger number of preserved monuments built with the use of lime mortars compared to those whose construction was made with earth mortars. Accordingly, this monograph carries the general term *historical mortars* in its title, although its focus is on historical lime mortars. Thus, the text included lime mortar; however, it is applicable more or less to the examination of all types of historical mortars, as well as to the preparation and application of mortars for the conservation of all monuments built using traditional materials, regardless of the historical period or the territory from which they originate. The text is illustrated, apart from a few specific examples, with photographs

related to field research and laboratory tests carried out during the *MoDeCo2000* project and, thus, its focus, in the eyes of the readers, will certainly be towards the lime mortars of the period from the 1st to the 6th century AD in the subject territory along the Danube.

The research of today's less well-preserved earthen mortars, which were used by a large part of the population in everyday construction practice, building their earthly and eternal houses since the beginning of construction, and in which the construction skills of man of a certain period are first reflected, deserves to be a separate topic of a new project and a new publication. We hope that in a project like this, researchers in the near future will be able to use, as a foundation, the methodology, results, and experiences of the *MoDeCo2000* project, which would be one of the most important indicators of the project's impact on the development of this type of research in Serbia, but at the same time would improve all its aspects and, thus, be a further model for later projects related to historical building materials and architectural conservation.

This monograph is intended for members of the scientific community, professionals in Serbia who work in areas related to the research of historical building materials and practical conservation, regardless of the historical period, as well as students of different fields. It was created as a result of the cooperation of the fundamental, that is social, humanistic, and natural sciences, with the applied sciences, that is, engineering. This monograph covers a wide range of existing literature and standards related to the examination procedures of historic materials, as well as the preparation, application, and testing of conservation mortars, which will surely be of great help to all future researchers. The publication provides a wide range of research methods and techniques applied when working on historical and conservation mortars, with an emphasis on the importance of their correct selection and combination of the results obtained by their application and during the constant flow of interpretation of the data, within the context of different fields and disciplines.

The Institute of Archaeology, for more than three quarters of a century has been the instigator of archaeological excavations

xx

and scientific research in the field of archaeology in our region. It has also been the initiator of the largest amount of archaeometry research related to all types of materials used throughout human history, as well as one of the holders of the nomination file currently being prepared for the *Frontiers of the Roman Empire - Danube Limes (Serbia)*, aiming to inscribe it to the UNESCO World Heritage List, which gave the presented mortar research an aim and context. Laboratory methods and techniques presented in this monograph were selected based on decades of experience of associates of the Institute for Testing of Materials in testing all types of modern and historical building materials, as well as preparing proposals for materials for conservation – from aggregates, stone, through all types of binders, to bricks and mortars. At the Faculty of Technology of the University of Novi Sad, as a part of the Laboratory for Materials in Cultural Heritage (HeritageLab), for more than a decade, tests of historical materials have been specially developed with the aim of developing proposals for compatible materials for the conservation of artifacts, works of art and built structures. As another result of the *MoDeCo2000* project, a publication was created for students from different research fields, whose authors are members of the project team from the Faculty of Technology in Novi Sad (Vučetić, Ranogajec 2022).

The authors of this monograph, on behalf of themselves and the research team of the *MoDeCo2000* project, hereby thank the Science Fund of the Republic of Serbia, which recognised the importance of the topic and the goals of the project, turning our long-conceived idea into reality, through financial, administrative, promotional and moral support, following the ups and downs, development, and maturation of the project. We hope that through our work on the project, we have justified the trust of the Science Fund, as well as that of the anonymous reviewers of the project whose suggestions contributed to the direction of the project idea during the realisation of project activities.

We owe a debt of gratitude to the management and administration of the project's participating institutions, who followed all our activities from the very beginning and actively participated in them. We thank Dr Miomir Korać, Dr Vencislav

Grabulov and Prof. Dr Biljana Pajin, for their support and positive attitude towards the importance of the project that we implemented together. Thank you to all our colleagues from the Institute of Archaeology, the Institute for Testing of Materials, and the Faculty of Technology Novi Sad, competent institutions for the protection of cultural monuments, museums, and other institutions in the field of education, science and culture from Serbia and abroad, for the great professional support during the field, cabinet and laboratory research, as well as during the organisation and participation in an extremely large number of activities carried out over the duration of the project.

We would also like to thank our dear colleagues, the members of the *MoDeCo2000* project, with whom we shared all field and laboratory activities, as well as the work on publication and dissemination of the project results over the more than two years of work: Dr Nevenka Mijatović and Dr Snežana Vučetić, whose precious comments helped with the creation of the text of this monograph; Dr Mladen Jovičić who provided us with necessary archaeological data on the sampled sites; and Prof. Dr Jonjaua Ranogajec and Dr Biljana Ilić, whose participation made our team complete. Additionally, our thanks to Dr Helena Hiršhenberger, for participating in shaping the project idea.

Finally, we would like to thank the reviewers of this monograph – Dr Suzana Erić, full professor at the Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade; Dr Smilja Marković, principal research fellow at the Institute of Technical Sciences, SASA; Dr Ana Radivojević, full professor at the Faculty of Architecture, University of Belgrade; Dr Nemanja Mrđić, senior scientific associate of the Institute of Archaeology; and Dr Marina Aškrabić, assistant professor of the Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, all of whose suggestions did so much to improve our text. In addition to the aforementioned colleagues, we would also like to thank Aleksa Jelikić, advisor to the Institute for the Protection of Cultural Monuments of Serbia in Belgrade, who provided invaluable advice regarding the content of the text and spent many hours with our project team on their journey through the Danube Limes.

Authors



I UVOD

Tragove aktivnosti ljudi iz prošlosti često tražimo u predmetima i građevinama koje su oni ostavili za sobom. Kroz arheologiju nam dostupno postaje i ono što je dugo bilo skriveno. Tokom arheoloških iskopavanja se kroz slojeve zemlje pojavljuju predmeti namerno pohranjeni na određena mesta, zarobljeni na svom uobičajenom mestu nakon nekog događaja i kasnijeg protoka vremena, a često i slučajno izgubljeni i potom zaboravljeni. Oni nam govore o svojim korisnicima, o umetničkim trendovima, zanatskom umeću ili različitim verovanjima, određuju vreme i događaje u kojima je ambijent u kome su pronađeni nastao, trajao ili nestao. Tokom istraživanja istorijskih predmeta i građevina izuzetno je važno poznavati fizičko tkivo od koga su sačinjeni, ono koje je ljudska ruka oblikovala u upotrebnii predmet, umetničko delo ili građenu strukturu. Nekada je to jedan materijal, ali vrlo često ljudske tvorevine čini više različitih materijala.

Otkriveni kroz arheološka iskopavanja kao deo jednostavnih ili složenih građevinskih struktura, građevinski materijali nisu uvek smatrani značajnim za dobijanje vrednih informacija o prošlosti. Najveći broj ovih materijala upotrebljavan tokom istorije za podizanje građevina, ali i danas, ima lokalno poreklo, i u prvom trenutku se čini da kao takvi ne sadrže vredne informacije koje nam mogu preneti. Deluju nam poznato, kao nešto sa čime se svakodnevno srećemo i na šta smo navikli kroz sprovođenje uobičajenih aktivnosti. Ovaj utisak posebno stičemo kada ovi materijali ne nose tragove prethodne upotrebe ili ih do danas nisu sačuvali. Međutim, i kada ne potiču iz udaljenih predela, ne nose natpise, ureze ili slučajne otiske, njihovo istraživanje je dragoceno (Николић 2021: 88; Nikolić *et al.* 2022: 53). Ovo se posebno odnosi na one materijale koji su spajani sa drugim materijalima u nove, i koji tako ostaju vizuelno sakriveni od posmatrača.

Materijale nastale kombinovanjem dva ili više materijala nazivamo kompozitnim. Njihov razvoj predstavlja jedan od najvažnijih napredaka čovečanstva u čitavoj oblasti istraživanja, ispitivanja i primene materijala. Dizajniraju se prema zahtevima i potrebama primene, i kao takvi, izuzetno su doprineli realizaciji inženjerskih zamisli i dostignuća u građevinarstvu čitavog sveta (Stefanidou,

2

Koltsou 2022: 3). Jedan od najstarijih i najznačajnijih materijala ovog tipa je malter.

Malter, integralni deo većine građevina, tradicionalno se sastoji od jednog ili više (obično neorganskih) veziva, agregata, vode, mogućih aditiva i primesa (SRPS EN 16572: 2016), a nakon očvršćavanja postaje solidan materijal koji možemo nazvati i veštačkim kamenim materijalom (Muravljov 1995: 231). Svojstva maltera zavise od karakteristika njegovih komponenti, njihovih međusobnih odnosa, načina njegove pripreme, ali i kasnije primene i izloženosti uslovima u kojima traje. Priprema maltera adekvatnog za planiranu namenu podrazumeva odabir najpogodnijeg veziva i agregata, često i nekog dodatka, određivanje optimalnog odnosa među njima, a zatim vešto spravljanje ugradive mešavine (**Slika 1**) (Tufegđić 1979: 325).



Slika 1. Mešavine tradicionalnih maltera odmah nakon pripreme, nastale od različitih agregata, veziva i dodataka

Malter se danas generalno posmatra kao uobičajen tehnološki građevinski proizvod sa utvrđenim procesima nastanka i odabira komponenti, s obzirom na dugotrajnu dominaciju cementnih maltera koji se jednostavno i brzo pripremaju i primenjuju na gradilištima. Međutim, kroz istraživanje pripreme i primene tradicionalnih blatnih, gipsnih i krečnih maltera, pa i razvoja mnogo mlađih pomenutih cementnih maltera, istraživači mogu doći do saznanja o velikom broju aspekata iz života određenog mesta i istorijskog perioda. Savremenim laboratorijskim metodama i tehnikama ispitivanja materijala koje se koriste u sklopu arheometrije, naučne discipline koja povezuje arheologiju i prirodne nauke (Николић 2021: 88), moguće je u velikoj meri spoznati

3

sastav maltera korišćenih za zidanje građevina tokom istorije i tehnologiju njihove pripreme. Na osnovu ispitivanja maltera koji su u strukturama jedne građevine imali različitu funkciju ili su ugrađeni u različitim periodima, odnosno fazama izgradnje, može se doći do saznanja o mnogim detaljima procesa nastanka građevine, kao i njene kasnije upotrebe (Miriello *et al.* 2010; Miriello *et al.* 2018; Dilaria *et al.* 2022).

Kada malter posmatramo kao izvor brojnih informacija o prošlosti, važnost njegovog istraživanja prevazilazi potrebe arhitektonske konzervacije istorijskih građevina. Jedno od ovakvih istraživanja predstavlja projekat *Mortar Design for Conservation – Danube Roman Frontier 2000 Years After (MoDeCo2000)*, kroz koji su sprovedena ispitivanja istorijskih maltera korišćenih od I do VI veka nove ere za zidanje vojnih utvrđenja i građevina, civilnih građevina, gradskih bedema i sakralnih celina na delu teritorije današnje Srbije vezanom za reku Dunav, radi dobijanja naučnih znanja o njihovoj kompoziciji i tehnologiji izrade, kao i primene ovih znanja u praktičnim procesima konzervacije spomenika (Николић 2021; Вучетић и др. 2021; Јовић 2022; Делић-Николић *et al.* 2022; Мijatović *et al.* 2022; Милић *et al.* 2022; Николић *et al.* 2022; Vučetić *et al.* 2022a; Vučetić *et al.* 2022b; Balvanović *et al.* 2023: 237–238; **(Slika 2)**).



Slika 2. Izrada tradicionalnih krečnih maltera i zidanje kamenom i opekam za potrebe buduće konzervacije tokom radionice održane u Viminacijumu 2022. godine u okviru projekta *MoDeCo2000* (foto: Goran Stojić)

1.1 CILJEVI, KONCEPT I METODOLOGIJA PROJEKTA *MoDeCo2000*

Osnovni cilj projekta *MoDeCo2000* jeste doprinos multidisciplinarnom naučnom znanju o istorijskim građevinskim materijalima i tehnologijama, uz podršku održivoj zaštiti graditeljskog nasleđa iz rimskog perioda na teritoriji današnje Srbije. Projekat je sproveden na studiji slučaja *Frontiers of the Roman Empire – Danube Limes (Serbia)*, to jest *Granice Rimskog carstva – Dunavski limes u Srbiji*, koji predstavlja niz spomenika trenutno na preliminarnoj listi za upis na Uneskovu listu svet-skog nasleđa. Specifični ciljevi projekta uključivali su:

- Razvoj naučne baze podataka iz oblasti arheologije, arhitekture, nauke o konzervaciji, tehnologije, geologije i hemije, u vezi sa malterima i lokalnim građevinskim sirovinama, kao i antičkim tehnologijama spravljanja maltera;
- Dizajn i testiranje kompatibilnih maltera za konzervaciju zasnovanih na lokalnim sirovinama i tradicionalnim tehnologijama proizvodnje u svrhu dugoročne zaštite i rehabilitacije istorijskih spomenika duž dunavskog limesa u Srbiji;
- Kreiranje preporuka (koje mogu postati i deo jedne šire strategije) za procese zaštite dobra *Granice Rimskog carstva – Dunavski limes u Srbiji*, kao priloga nominacionom dosijeu koji se priprema u cilju evaluacije za pristupanje Uneskovoj listi svetskog nasleđa (u skladu sa Konvencijom o zaštiti svetskog i prirodnog nasleđa, smernicama i preporukama ICOMOS-a i međunarodnim poveljama iz oblasti zaštite kulturnog nasleđa (UNESCO, WHC 2023));
- Doprinos savremenom održivom građevinarstvu i arhitekturi promocijom upotrebe tradicionalnih tehnologija i razumnog korišćenja prirodnih resursa, kako bi se unapredio život lokalnih zajednica.

5

Koncept projekta *MoDeCo2000* zasnovan je na nekoliko ideja:

- Savremena nauka o konzervaciji zahteva holistički multidisciplinarni pristup, pa istraživanja maltera moraju polaziti od sveobuhvatnog istraživanja o sirovinama i građevinskim tehnologijama upotrebljenim za njihovu pripremu i primenu, kako bi se dobile informacije potrebne za praktičnu konzervaciju građevina;
- Istraživanje istorijskih materijala i graditeljskih tehnologija je veoma važno i za procese savremene gradnje jer može dati korisne informacije za razvoj novih industrijskih rešenja oslanjajući se na prošlost, kroz očuvanje prirodnih resursa;
- Zaštita istorijskih građevina podrazumeva i očuvanje tradicionalnih veština potrebnih za ovaj proces, postajući tako jedan od načina očuvanja nematerijalnog kulturnog nasleđa;
- Podaci o građevinskim tehnologijama i lokalnim potrebama poboljšavaju naučno razumevanje zajednica i njihovog svakodnevnog života na jednoj teritoriji kroz istoriju.

Među istraživačima rimske arheologije, pod pojmom „limes” podrazumeva se „kontinualna linija utvrđenja povezanih sistemom drumskih puteva i rečnih luka koja je branila (Rimsko, prim. aut.) carstvo” (Golubović, Mrđić 2014: 101). Istraživanjem antičkih izvora, zaključuje se da je ova latinska reč, u svom osnovnom značenju „granica”, tokom rimskog perioda upotrebljavana na više načina, ali bez pomena njene veze sa građenim strukturama duž granice (Isaac 1988: 146). Teritorija Rimskog carstva okruživala je Sredozemno more, a njena granica se protezala preko 7500 km od Atlantskog okeana, preko Evrope do Crnog mora, preko Bliskog istoka do Crvenog mora, a odatle u severnoj Africi, duž ivice pustinje, na kraju izlazeći na obalu Atlantika. Granica Rimskog carstva u većem delu Evrope prostirala se duž prirodnih barijera, kao što su reke Rajna i Dunav. Podunavski deo limesa, koji je deo rimske granice koja se nalazi u današnjoj Srbiji, nastao je u

I i trajao do VI veka (Breeze, Jilek, Thiel 2009: 18, 25, 27, 41, 49–51, 55).

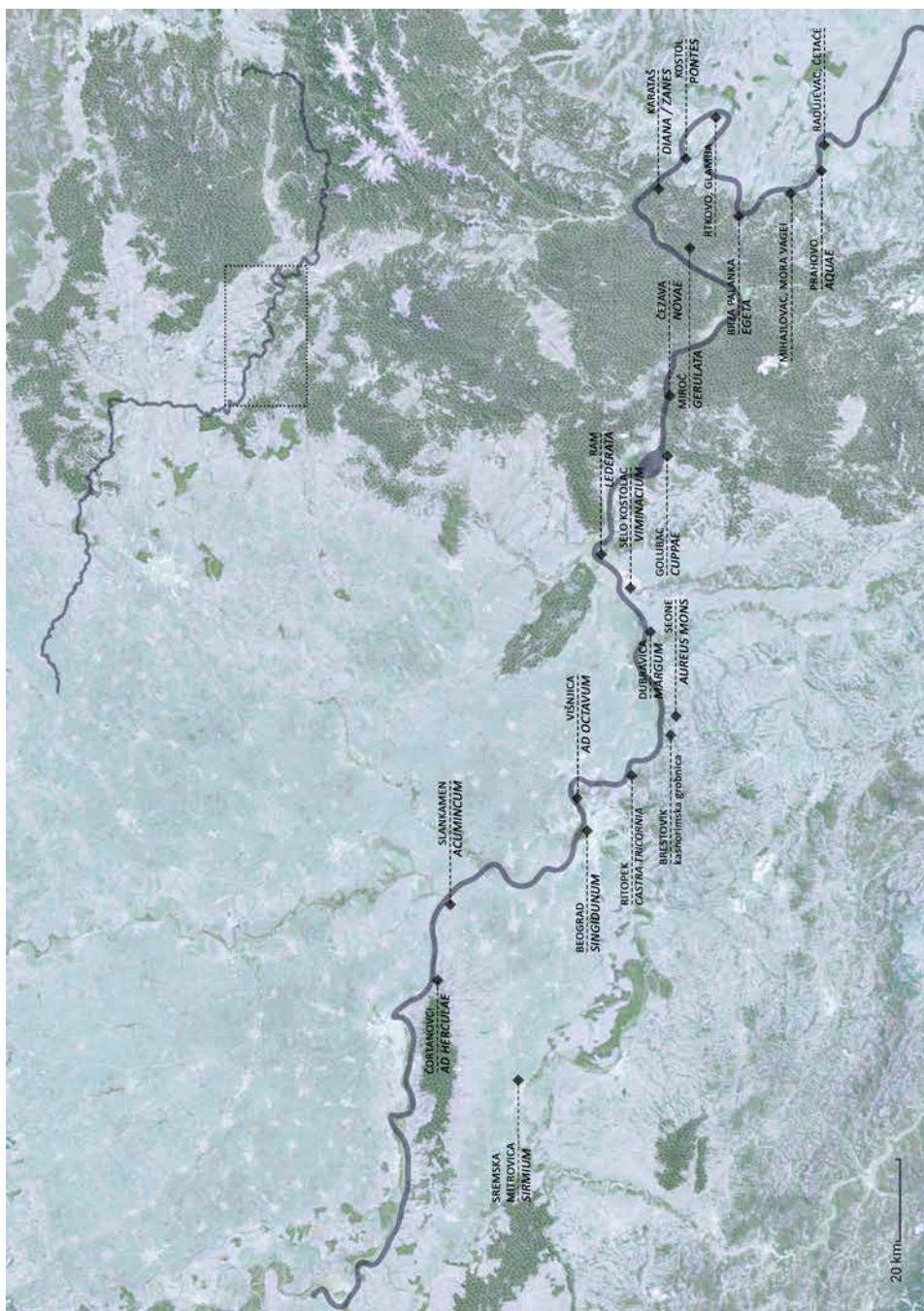
Rezultati arheoloških istraživanja dunavskog limesa u Srbiji potvrdili su izuzetan značaj ovog dela Rimskog carstva za njegov uspon, razvoj i padove tokom vekova. Svedočanstvo o brojnim istorijski značajnim događajima za ceo tada poznati svet, a samim tim i naš savremeni, nalaze se upravo duž Dunava. Značaj dunavskog limesa u Srbiji u pogledu komunikacije i razmene među ljudima prepoznat je i u tekstu koji opravdava njegovu nominaciju za Uneskovu listu svetskog nasleđa.

„Limes je bio neka vrsta tampon-zone ne samo u odbrani Carstva, već i u uticaju na plemena na suprotnoj obali, u trgovinskim, političkim i kulturnim uticajima. Granice su postale veza za intenzivnu kulturnu razmenu između ne samo Rima i Barbarikuma, već i između Istoka i Zapada, jer su se trupe neprestano kretale kako bi intervenisale na slabim tačkama. Vojne formacije su širile običaje i verovanja diljem Carstva. Tokom ovog perioda Rimsko carstvo je pokazalo izuzetnu sposobnost da izgradi i prilagodi svoje granice za zaštitu ili napad, trgovinu i uticaj unutar i van nje, čineći limes najrazvijenijim područjem provincija. Sa stalnom koncentracijom trupa i sa najvećom gustinom civilnog stanovništva, granica postaje najrazvijeniji region sa administrativnog, ekonomskog i vojnog stanovišta. Veliki gradovi, a često i glavni gradovi provincija, takođe su osnovani uz najveća utvrđenja u ovoj zoni” (UNESCO 2020a).

Dunavski limes se na teritoriji današnje Srbije u periodu od I do VI veka prostirao od Neština do Radujevca, obuhvatajući dva velika vojna utvrđenja za smeštaj legija – Singidunum (Beograd) i Viminacium (selo Kostolac), kao i vojna utvrđenja srednje ili manje veličine koja su služila za smeštaj delova legija ili pomoćnih jedinica. U okolini utvrđenja s vremenom su se razvila civilna i vojna naselja, poljoprivredna gazdinstva, kao i nekropole, koji su tako postali neodvojivi deo limesa (Mirković 2007). Ostaci Viminacijuma – glavnog grada provincije Gornje

Mezije, carske table u Đerdapu i Trajanov most, kao i mnoga druga utvrđenja, naselja ili samostalne strukture, danas su u različitom obimu dostupni istraživačima. Pojedini arheološki lokaliteti limesa u Srbiji istražuju se od XIX veka; neki od njih su istraženi u sklopu zaštitnih iskopavanja tokom izgradnje hidroenergetskog sistema Đerdapa u drugoj polovini XX veka nakon čega su mnogi i potopljeni; neki se još uvek istražuju; a neki lokaliteti su i dalje neistraženi (Jovičić i dr. 2023: 220; Popović 1996; Korać *et al.* 2014). Iako su mnogobrojne građevine iz svih perioda ljudske prošlosti tokom ovih aktivnosti na jedan način zauvek i izgubljene, prostor uz reku Dunav danas predstavlja jedinstveni arheološki predeo sa mnogobrojnim tragovima ljudskih aktivnosti, a osim što čuva ove tragove, ujedno predstavlja i zvanično proglašen geopark (UNESCO 2020b).

U projekat *MoDeCo2000* bila su uključena dvadeset dva arheološka nalazišta i spomenika kulture. Izbor lokaliteta za istraživanje u okviru projekta bio je ograničen i obuhvatio je sve lokalitete čije su građevinske strukture danas dostupne (Slika 3) (Jovičić i dr. 2023: 221). Osim dvadeset jednog mesta na desnoj obali Dunava, u aktivnosti na projektu je uključeno i arheološko nalazište Sirmijum (Sremska Mitrovica), čija je izuzetna važnost u rimskom periodu uslovlila izgradnju carskih građevina u njemu, ali i kome su gravitirali obližnji lokaliteti dunavskog limesa i na čiju je izgradnju sigurno ovaj rimski grad uticao. Takođe, u cilju praćenja razvoja tehnologije izrade maltera kroz vekove, uzorkovani su i malteri koji pripadaju strukturama lokaliteta iz XII veka – Braničevo u selu Kostolac (Поповић, Иванишевић 1988) i XV veka – Ramska tvrđava u selu Ram (Симић, Симић 1984), oba u neposrednoj blizini Viminacijuma. Sa ovog značajnog arheološkog nalazišta (Спасић-Ђурић 2015; Korać 2019; Поповић 1988) potiče najveći broj uzoraka, a pripadaju građevinama datovanim u I, II, III, IV i VI vek. Kao deo saradnje sa istraživačima iz oblasti arheologije u Srbiji, a u cilju ostvarivanja ideje projekta o osnivanju nacionalne kolekcije uzoraka maltera za potrebe budućih istraživanja i konzervacije, u projektnu bazu je uključeno i nekoliko uzoraka prikupljenih tokom ranijih arheoloških istraživanja, odnosno zaštitnih iskopavanja (Sirmijum i Kastru Trikornija – Ritopek).



Slika 3. Mapa toka Dunava sa naznačenim lokalitetima koji su obuhvaćeni projektom *MoDeCo2000* (autor mape: Danica Petrović; uz modifikaciju: Davor Radulj)

U prostoru Ramske tvrđave uzorkovana je i građevina za sada okvirno datovana u period pre izgradnje tvrđave, a prema rezultatima arheoloških iskopavanja.¹ Jedini uzorak maltera pouzdano datovan u V vek, koji je bio deo istraživanja projekta *MoDeCo2000*, potiče iz građevine arheološkog nalazišta Sirmijum. Interesantan podatak je da je izgradnja uzorkovanog lokaliteta Egeta II, donedavno široko datovana u antički i kasnoantički period, tokom najnovijih arheoloških iskopavanja sprovedenih nakon uzorkovanja, ipak opredeljena u XI vek (Špehar, Zorić 2022: 993), pa je tako u kolekciji uzoraka maltera koji potiču sa ukupno dvadeset pet lokaliteta, neočekivano, svoje mesto našao i još jedan uzorak koji pripada srednjem veku.

Uzorcima maltera istraženih tokom projekta *MoDeCo2000* (**Slika 3**) potiču sa sledećih lokaliteta: Sirmijum (Sremska Mitrovica), Ad Herkule (Čortanovci), Akuminkum (Slankamen), Singidunum (Beograd), Kastrum Oktavum (Višnjica), Kastrum Trihornia (Ritopek), Kasnorimska grobnica (Brestovik), Aureus Mons (Seone), Margum (Dubravica), Braničevo – Todića crkva (selo Kostolac), Viminacijum (selo Kostolac) (**Slika 4**), Ramska tvrđava (Ram) (**Slika 5**), Lederata (Ram), Kupe (Golubac), Golubačka tvrđava – „Rimska kuća” (Golubac), Kastrum Nove (Čezava), Gerulata (Miroč), Dijana (Karataš) (**Slika 6**), Pontes – sa Trajanovim mostom (Kostol) (**Slika 7**), Glamija I (Rtkovo), Egeta II i Egeta III (Brza Palanka), Mora Vagei (Mihajlovac), Akve (Prahovo) i Četaće (Radujevac) (Jovičić 2022: 41–42; Jovičić i dr. 2023: 221–229).

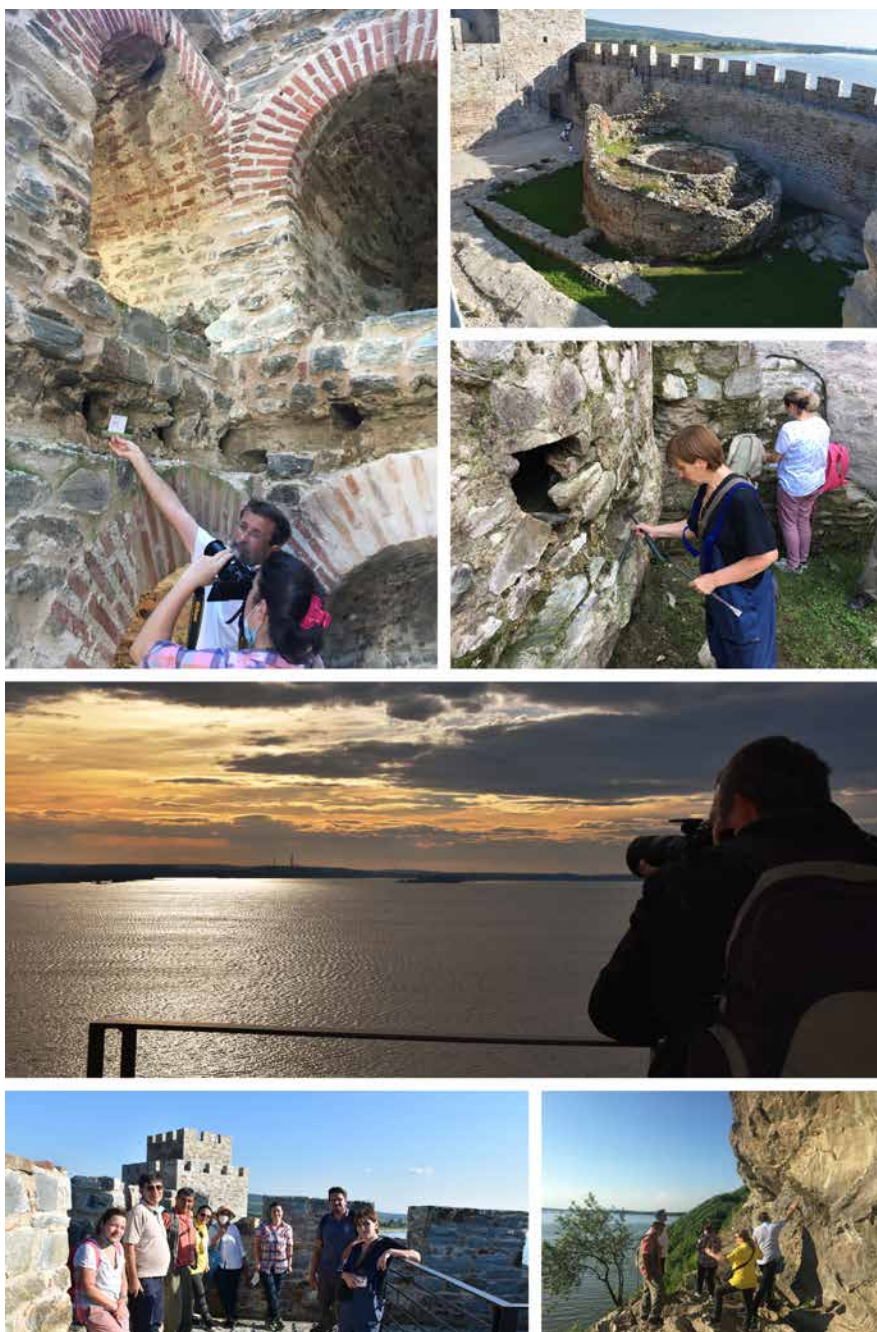
Dinamika različitih zadataka u okviru projekta je bila određena unapred usvojenim gantogramom, zamišljena u skladu sa njihovim međusobnim vezama i uslovljenostima i potrebom za njihovim hronološkim redom u cilju razumnog toka svih aktivnosti. Pet zadataka usvojenih pre početka projekta je bilo grupisano oko kabinetskih, terenskih i laboratorijskih istraživanja. Čine ih:

- *Prikupljanje ulaznih podataka: arhitektonsko i arheološko istraživanje elemenata i celine Granice Rimskog carstva – Dunavski limes u Srbiji* kroz njihovu

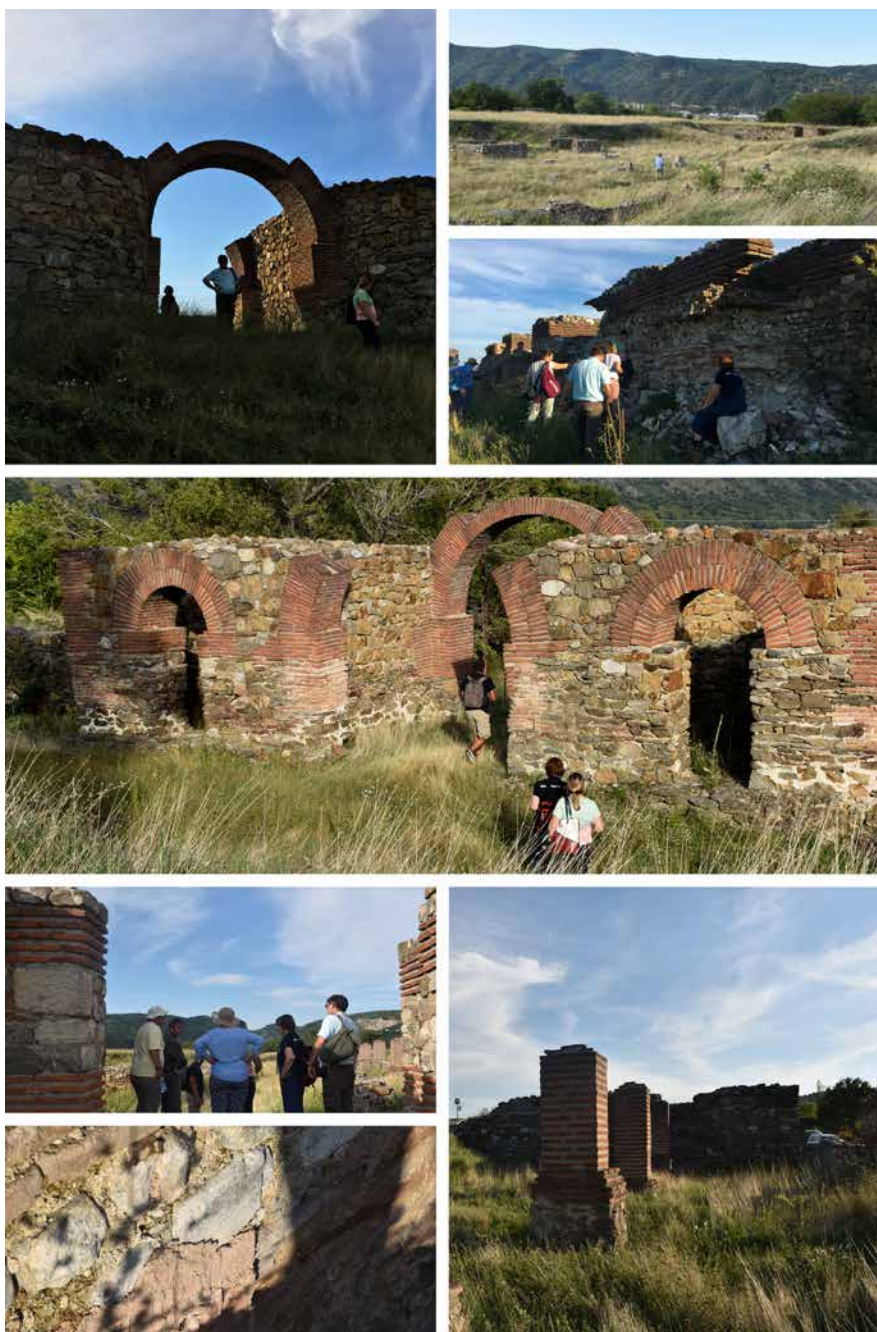
¹ Neobjavljeno, prema razgovoru sa arheolozima Draganom Jacanovićem i Dejanom Radovanovićem



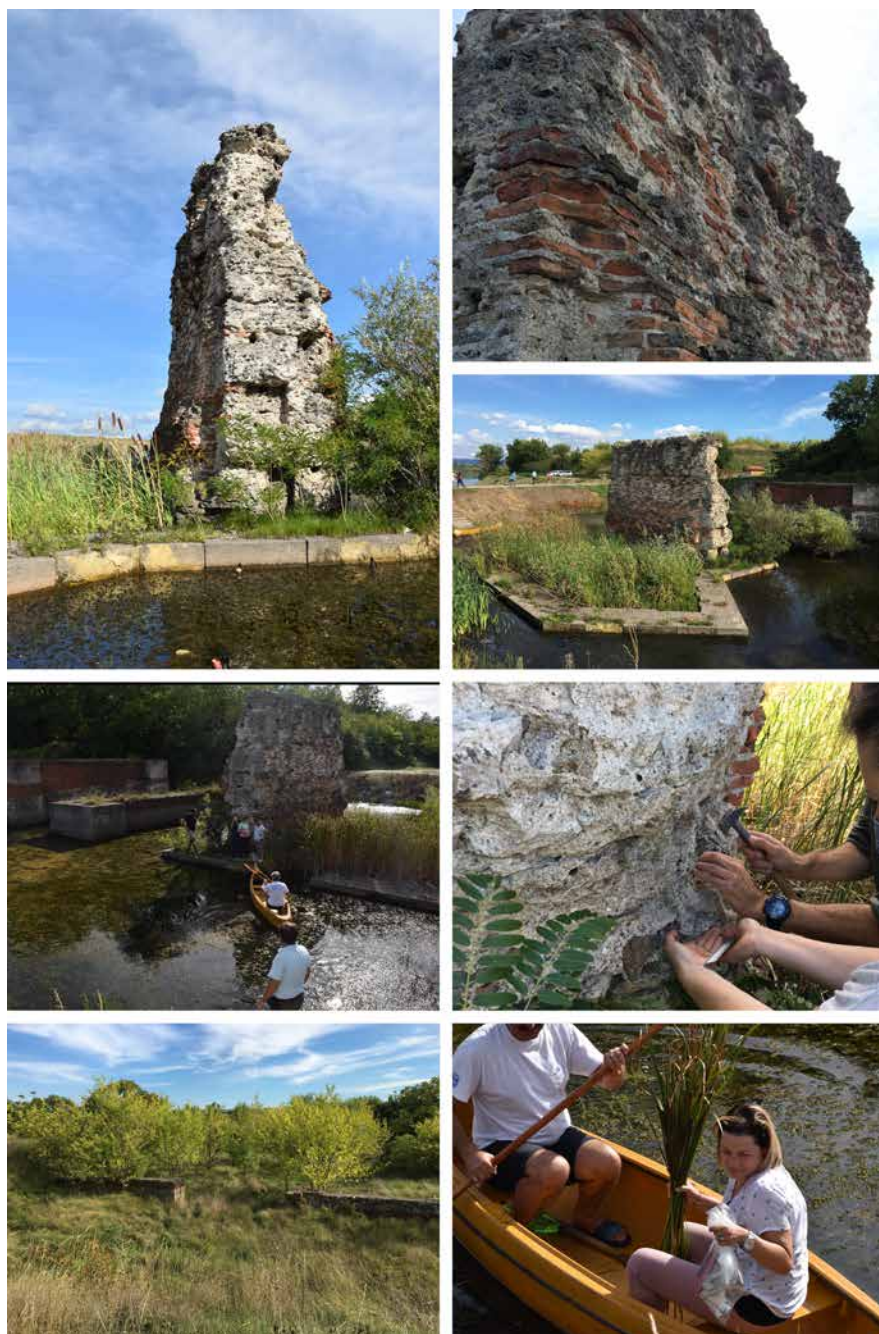
Slika 4. Uzorkovanje maltera grada Viminacijuma
(priprema kolaža: Konstantin Janjić)



Slika 5. Uzorkovanje maltera unutar Ramske tvrđave
(priprema kolaža: Konstantin Janjić)



Slika 6. Uzorkovanje maltera utvrđenja Dijana
(priprema kolaža: Konstantin Janjić)



Slika 7. Uzorkovanje maltera Trajanovog mosta i utvrđenja Pontes (priprema kolaža: Konstantin Janjić)

istoriju, funkciju i ulogu; geološko istraživanje sirovina i materijala koji su mogli da budu korišćeni kao komponente u malterima, i mogu se upotrebljavati (eksploatisati) i danas; istraživanje istorijskih tehnologija pripreme i primene maltera; istraživanje stanja građevina na terenu, uzorkovanje i karakterizacija materijala i sirovina za ispitivanje;

- *Obrada izlaznih podataka*: ukrštanje ulaznih podataka i interpretacija rezultata dobijenih kroz proces; dizajn, izrada, testiranje i starenje konzervatorskih maltera u laboratoriji na osnovu receptura kreiranih nakon interpretacije; kompilacija dobijenih rezultata u cilju pripreme baze podataka; optimizacija odabranih modela maltera uz testiranje i starenje;
- *Kompilacija izlaznih podataka*: priprema podataka za pisanje naučnog doprinosa sa preporukama za upotrebu materijala u konzervaciji, kao mogućeg priloga nominacionom dosijeju za navedeno dobro *Granice Rimskog carstva – Dunavski limes u Srbiji*; uspostavljanje protokola za laboratorijsku izradu konzervatorskih maltera; dizajn baze istraživanja sa mapama i rutama aktivnosti projekta;
- *Primena izlaznih podataka*: primena konzervatorskih maltera i kontinualni monitoring (zidanje manjih eksperimentalnih struktura i intervencije manjeg obima na autentičnoj strukturi); interpretacija svih rezultata projektnog istraživanja u svrhu konzervacije građevina i savremenog građevinarstva, sa preporukama za njihovu primenu;
- *Komunikacija izlaznih podataka*: objavljivanje i diseminacija rezultata u naučnoj i ekspertskoj javnosti, u Srbiji i inostranstvu; organizacija radionica za istraživanje i upotrebu materijala u konzervaciji u cilju edukacije mladih iz predmetnih oblasti projekta; priprema baze podataka uzorkovanih građevina, sirovina i istorijskih maltera, u cilju njenog otvaranja ustanovama zaštite i istraživačima, kao i promocije formiranja zajedničke kolekcije uzoraka na nacional-

nom nivou (Николић 2021: 89–91; Вучетић и др. 2021; Vučetić *et al.* 2022b; 263–264).

Navedeni zadaci su izvršavani prema utvrđenom redosledu, ali je često usled rezultata aktivnosti nekih od njih, bilo potrebno vraćati se na one prethodne, nekada njihove rezultate revidirati, često samo potvrditi, a često i unaprediti. Neki projektni zadaci su bili vezani za laboratorijska ispitivanja maltera uslovljavajući njihovo izvršenje, dok su, obrnuto, određeni zadaci mogli biti izvršeni tek na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja. Projektni tok je pokazao međuzavisnost svih unapred postavljenih zadataka i neophodnost stalnog kombinovanja njihovih rezultata kako bi se dobili relevantni zaključci u interpretaciji, odnosno kako bi proces karakterizacije istorijskih maltera doneo neophodne podatke za izradu konzervatorskih maltera. Uzorkovanju maltera prethodilo je proučavanje objavljenih rezultata dosadašnjih arheoloških istraživanja kako bi se odredile one strukture dostupnih lokaliteta koje imaju potencijal za pružanje najpouzdanijih saznanja o graditeljskim aktivnostima na području dunavskog limesa.

Ispitivanje je obuhvatilo 122 uzorka različitih istorijskih maltera (**Tabela 1**) ugrađenih u strukture zidova i podova 40 građevina, ali i brojne uzorke kamena, agregata, opeke i gline, koji su podvrgnuti različitim metodama i tehnikama laboratorijskih ispitivanja. Laboratorijske metode i tehnike su bile uslovljene jedna drugom, odnosno rezultati ispitivanja osnovnim metodama su davali smernice ka odabiru onih složenijih. Tokom istraživanja su na taj način od velikog broja uzorkovanih maltera odabrani oni za koje se očekivalo da će dati najdragocenije naučne informacije, kao i oni koji su pripadali građevinama koje bi u narednom periodu trebalo da prođu kroz procese konzervacije. Prema ovom grupisanju, određeni su set metoda i tehnika ispitivanja i dinamika njihove primene.

Kako navodi standard vezan za karakterizaciju maltera koji se koriste u kulturnom nasleđu (SRPS EN 17187: 2021), suštinski korak u formulisanju plana konzervacije, sa ciljem donošenja odluka o intervencijama koje bi trebalo da se izvode uz upotrebu adekvatne tehnologije, upravo je karakterizacija istorijskih maltera. U navedenom standardu se ističe da je

lokalityet	datovanje strukture	malter za zidanje	malter iz jezgra zida	malter za fugovanje	malter za spolišnje malterisanje	malter za unutrašnje malterisanje	malter za izradu podova	malter van konteksta	broj uzoraka po lokalityetu
Sirmijum (<i>Sirmium</i>), Sremska Mitrovica	II vek	+	+++				+		17
	IV vek	+++++				+	++	+	
	V vek	+							
Akuminkum (<i>Acumincum</i>), Stari Slankamen	srednji vek (?) antički period (?)	+							2
Ad Herkule (<i>Ad Herculae</i>), Čortanovci	IV vek	+++	+						4
Singidunum (<i>Singidunum</i>), Beograd	II vek	+++							7
	III vek	+++	+						
Kastrum Oktavum (<i>Castrum Octavum</i>), Višnjica	IV-VI vek	+	+	+					3
Kastra Trikornija (<i>Castra Tricornia</i>), Ritopek	IV vek					+			1
Kasnorimska grobnica, Brestovik	III-IV vek	++				+	+		4
Aureus Mons (<i>Aureus Mons</i>), Seone	I-IV vek								2
Margum (<i>Margum</i>), Dubravica	II-IV vek							++	
Braničevo - Todića crkva, Selo Kostolac	XII vek	+						+++	3
Viminacijum (<i>Viminacium</i>), Selo Kostolac	I vek	+	+++			+			29
	II vek		++			+	+++		
	II-III vek	++				+	++		
	III vek	++			+		++	+	
	IV vek	++				++	+		
	VI vek	++							
Ramska tvrđava, Ram	antički period (?) osmanski period	++	+++++			+	++		10

lokalityet	datovanje strukture	malter za zidanje	malter iz jezgra zida	malter za fugovanje	malter za spojnije malterisanje	malter za unutrašnje malterisanje	malter za izradu podova	malter van konteksta	broj uzoraka po lokalitetu
Lederata (<i>Lederata</i>), Ram	II vek		+						3
	III–IV vek		+						
	VI vek		+						
Kupe (<i>Cuppae</i>), Golubac	I–VI vek		+++						3
	III vek					+	+	+	
„Rimska kuća”, Golubačka tvrđava (<i>Castrum Novae</i>), Čezava	II–III vek	++							4
	II–VI vek		+						
	IV–VI vek		+						
	I–III vek	+	++						
Gerulata (<i>Gerulata</i>), Miroč Dijana (<i>Diana</i>), Karataš	II–IV vek	+							4
	IV–VI vek	+				++			
	II vek	+++++	++++						
	III vek		+						
Pontes (<i>Pontes</i>), Kostol	IV vek	+							2
	VI vek	+							
	XI vek		+						
Egeta II (<i>Egeta</i>), Brza Palanka	IV–VI vek	+							1
	IV vek	++							
Mora Vagej, Mihajlovac Akve (<i>Aquae</i>), Prahovo	IV–VI vek		+						1
	IV vek	+							
broj uzoraka prema funkciji u strukturi		52	33	1	1	12	15	8	122

Tabela 1. Malteri uzorkovani tokom projekta *MoDeCo2000* (sa podacima o lokalitetu, datovanju i funkciji u strukturi)

važno koristiti unapred određenu tipologiju maltera i doslednu i jednoobraznu metodologiju u njihovoj karakterizaciji. Kroz ovaj dokument su date smernice za metodologiju i prikaz najprikladnijih analitičkih tehnika ispitivanja uzoraka istorijskih maltera. Međutim, najveći broj standarda vezanih za pripremu novih maltera zasnovan je na cementu i savremenoj izgradnji i ne može se potpuno primeniti u konzervaciji (Henry, Stewart 2011: 234).

Odabir laboratorijskih metoda koje će biti upotrebljene u postupku karakterizacije istorijskog maltera zavisi najpre od definisanih pitanja na koje karakterizacija treba da odgovori, odnosno ciljeva koji se pred nju postavljaju pre ispitivanja. Takođe, zavisi i od nekih izuzetno praktičnih pitanja, kao što su veličina dostupnog uzorka (Elsen 2006: 1417), ali i njegove karakteristike; zatim mogućnosti, nedostaci i zahtevi metoda ispitivanja, vreme potrebno za ispitivanje, kao i troškovi ispitivanja i dostupnost instrumenata (Erić 2019: 1). Svaka laboratorijska tehnika pruža samo delimičnu sliku u okviru karakterizacije, pa se u praksi najčešće koriste njihove kombinacije, a odabir zavisi od cilja karakterizacije, ali i stručnosti i iskustva istraživača (Groot, Ashall, Hughes, Bartos 2004: 6).

Metodologija karakterizacije istorijskih maltera tokom projekta *MoDeCo2000* zato je bila oslonjena na postojeće standarde i preporuke nastale u međunarodnim okvirima kroz rad istraživača građevinskih materijala, i specifično istorijskih maltera, ali zasnovana i na iskustvu članova projektnog tima, prilagođena prostornom i vremenskom kontekstu maltera koji su predmet istraživanja kao i potrebama arhitektonske konzervacije u Srbiji. Nakon karakterizacije originalnih maltera usledio je proces izrade konzervatorskih maltera koji je svoju metodologiju takođe usmerio ka jednoj vrsti grupisanja. Grupe komponenata koje su se odnosile na agregate, veziva i različite dodatke određene za upotrebu i pripremu konzervatorskih maltera, tokom projekta su proširivane. Od početnih aktivnosti usmerenih na najjednostavnije mešavine maltera sa sirovinama detektovanim tokom karakterizacije, preko primene različitih tradicionalnih primesa za unapređenje svojstava i trajnosti, do kombinovanja tradicionalnih komponenata sa savremenim materijalima u istom cilju, praćena je promena

karakteristika mešavina, uz njihovo stalno poređenje sa analognim svojstvima istorijskih maltera.

1.2 KONTEKSTI ISTRAŽIVANJA ISTORIJSKIH MALTERA

Tokom istraživanja istorijskih maltera trebalo bi uzeti u obzir različite kontekste u kojima su nastali i živeli u okviru jedne strukture, kroz izmene njenih svojstava i njeno trajanje. Vrsta i značaj strukture, i šire gledano, građevine, za čiju gradnju je upotrebljen određeni malter, predstavljaju deo njegovog *arheološkog konteksta*, dok njegova uloga u samoj strukturi i posredno građevini, predstavlja *arhitektonsko-graditeljski (konstruktivni) kontekst*. Proces degradacije maltera i okolnog materijala tokom života građevine zavisi od *konteksta sredine* u kojoj se građevina nalazi, kao i *konteksta upotrebe građevine* (koji obuhvata i prestanak korišćenja, i posledično, urušavanje građevine). Kompoziciju i način izrade maltera opredeljujemo kao *tehnološki kontekst* vezan za njegov nastanak, a on neophodno uključuje *prirodno-geološki kontekst* vezan za poreklo sirovina korišćenih za njegovu pripremu. Ako pak tražimo odgovore u vezi sa organizacijom odabira i eksploatacije sirovina, zatim njihovim transportom, ali i procesima na gradilištu tokom izrade i ugradnje maltera, napred navedene kontekste moramo međusobno povezati kako bismo sagledali jedan širi *društveno-ekonomski kontekst*. Ovaj kontekst, uz različite istorijske događaje, od kojih su neki direktno vezani za izgradnju neke građevine, celog naselja ili uređenje neke teritorije, kao i njihovo uništenje ili zamiranje života u njima, daje onaj najširi – *istorijski kontekst*.

Međusobnim povezivanjem istraživanja maltera više građevina u jednom regionu, prostor u kome se one nalaze ili kome su u prošlosti gravitirale dobija izuzetnu važnost, pa nas istraživanja vode ka eventualnim putevima transporta materijala, ekonomije i veza između udaljenih oblasti. Izdvojene specifičnosti u svojstvima pojedinačnih maltera tada postaju manje važne, i ono što je zajedničko grupi maltera jedne građevine dalje se upoređuje sa podacima dobijenim na isti način prilikom istraživanja grupe maltera neke druge

građevine, sa kojom je preko određenog aspekta prethodna građevina povezana. Međusobne sličnosti maltera nas dalje vode ka uzajamnom povezivanju tehnoloških, odnosno zanatskih (ili čak, industrijskih) procesa korišćenih za njihov nastanak, što je posebno važno kada one pripadaju različitim teritorijama, a dalje može voditi i ka traganju za poreklom upotrebljivanih sirovina. Na osnovu karakterizacije geoloških građevinskih materijala i mineralnih sirovina korišćenih za izradu maltera mogu se utvrditi načini njihove eksploatacije, transporta i upotrebe kroz istoriju na jednom prostoru ili više njih. Prilikom proučavanja maltera koji potiču iz različitih istorijskih perioda, moguće je pratiti razvoj tehnologije njihove izrade kroz vekove u jednom prostornom okviru. Sva saznanja dalje otvaraju put ka proučavanju fizičkih i duhovnih veza među prostorima.

* * *

Kombinovanjem različitih komponenata, kroz istoriju su formirani malteri sa različitim ulogama u strukturama, pa ih prema funkciji možemo podeliti (Pappayianni 1994 u Pappayianni, Pachta, Iliadou 2008: 271; van Hees *et al.* 2012: 1297) na:

- maltere za zidanje (posteljice na koje naležu elementi za zidanje – ležišne spojnice; i malteri između elemenata za zidanje) **(Slika 8)**;
- maltere za formiranje jezgra zida **(Slika 9)**;
- maltere za ispunjavanje spojnica između elemenata zidova (fugovanje) **(Slika 10)**;
- maltere za osiguranje (spojeve) i zaštitu elemenata krovova;
- maltere za izradu podova (kao podloge ili završni slojevi) **(Slika 11)**;
- maltere za malterisanje (spoljašnje i unutrašnje) **(Slika 12)** i podloge za zidno slikarstvo **(Slika 13)**; i
- maltere za dekoraciju, odnosno imitaciju arhitektonskih elemenata.

Upotreba maltera u savremenom građevinarstvu nije mnogo drugačija od one istorijske, iako se njegove uloge razvijaju u skladu sa nastankom novih elemenata za zidanje, i razvojem propisa iz oblasti građevinarstva, zaštite životne sredine, samih građevina i njihovih korisnika. Bez obzira na njegovu vrstu, odnosno poreklo komponenata koje ga čine, malter u savremenim građevinama prepoznamo kao sredstvo za:

- međusobno povezivanje (ali ujedno i razdvajanje i držanje na odstojanju) elemenata od zemlje, kamena, opeke, građevinske keramike, savremenih blokova od drugih materijala (zidanje);
- ispunjavanje horizontalnih i vertikalnih spojnica između elemenata (fugovanje);
- unutrašnje i spoljašnje malterisanje zidova uz izradu fasada;
- izradu podloga i završnih slojeva podova;
- sanaciju površina i injektiranje pukotina i šupljina;
- zaštitu konstrukcija od različitih uticaja;
- poboljšavanje toplotne i zvučne izolacije građevine; i
- izradu unutrašnjih i spoljašnjih dekoracija.

Savremeni standardi ispitivanja materijala odnose se na fabrički pripremljene i gradilišne „maltere za zidanje” (eng. *masonry mortars*), u koje spadaju malteri za posteljice, odnosno malteri na koje naležu elementi za zidanje; malteri između elemenata za zidanje; i malteri za fugovanje (eng. *bedding mortars, jointing mortars, pointing mortars*) (SRPS EN 998-2: 2017), spoljašnje i unutrašnje malterisanje (eng. *rendering mortars, plastering mortars*) (SRPS EN 998-1: 2017; SRPS EN 13914-1: 2016; SRPS EN 13914-2: 2016; SRPS EN 15824: 2017; SRPS EN 13279-1: 2009), kao i različiti malteri za zaštitu, izolaciju i sanaciju konstrukcija (prema velikom broju standarda).

S obzirom na činjenicu da savremene građevinske konstrukcije uglavnom nastaju uz upotrebu betona i blokova od različitih materijala, čelika i savremenih proizvoda od drveta, ređe pune opeke, a najređe zidanjem kamenom ili zemljom, ulogu maltera kao materijala za heterogene ispune jezgra



Slika 8. Rimski malteri dunavskog limesa u Srbiji za zidanje: Viminacijum (gore), Trajanov most (sredina), Kastrum Nove (dole)

zida, poznate kroz istoriju zidanih konstrukcija, skoro da ne srećemo u savremenom graditeljstvu. U skladu sa naučnim razvojem disciplina koje proučavaju ponašanje konstrukcija, proračunima koji pružaju potrebne dimenzije elemenata, kao i usled velike upotrebe armiranog betona, zidovi su danas tanji, jezgra zidova u svom istorijskom obliku više ne postoje, pa tako ni maltere za povezivanje raznorodnog materijala u okviru jezgra nekog zida ne srećemo u savremenim podelama materijala. Njihovu ulogu nalazimo u arhitektonskoj konzerva-



Slika 9. Rimski malteri dunavskog limesa u Srbiji u jezgrima zidova: Kastrum Nove (gore), Viminacijum (dole)



Slika 10. Rimski malteri dunavskog limesa u Srbiji za ispunjavanje spojnica – fugovanje: Kastrum Oktavum



Slika 11. Rimski malteri dunavskog limesa u Srbiji za podove (slojevi iz više faza građevine): Viminacijum



Slika 12. Rimski malteri dunavskog limesa u Srbiji za spoljašnje materisanje (gore) i unutrašnje malterisanje (dole): Viminacijum



Slika 13. Rimski malteri dunavskog limesa u Srbiji sa slikanom dekoracijom (fragmenti neposredno nakon iskopavanja): Viminacijum

ciji. S druge strane, s obzirom na to da rad na konzervaciji istorijskih građevina ne obuhvata samo restauraciju ili anastilozu uz ponovno zidanje istorijskim tehnikama, već mnogo češće održavanje i zaštitu struktura od spoljnih uticaja, kao i njihovu sanaciju/popravku i konsolidaciju/ojačanje, navedene istorijske uloge maltera u procesima konzervacije moramo dopuniti onim savremenim. Zato je upotrebom maltera u arhitektonskoj konzervaciji, osim tradicionalnog zidanja i ispunjavanja jezgra zidova, izrade spojnica, izrade podova, i malterisanja sa dekoracijom ili bez nje, potrebno izvesti i druge intervencije. Ovde spadaju injektiranje konstrukcija, konzervacija elemenata od kamena ili zaštita završnih horizontalnih slojeva struktura izloženih atmosferskim uticajima (eng. *capping*) (van Hees *et al.* 2012: 1297), često uz dodatnu upotrebu savremenih materijala.

* * *

Lokalno dostupni prirodni materijali su uvek predstavljali osnovu za razvoj svih ljudskih aktivnosti, pa i građevinarstva. Od njih su zavisile primenjene tehnike građenja i zidanja, ali često i oblikovanje u arhitekturi. Možda je najbolji primer za ove tvrdnje rimsko građevinarstvo, gde je upravo razvoj jednog materijala, tzv. rimskog betona na teritoriji današnje Italije doveo do graditeljske revolucije. Beton koji je omogućio dostizanje monumentalnih raspona, prema većini istraživača, bio

je zasnovan na upotrebi hidrauličnog maltera, a on upravo na lokalnim sirovinama, odnosno vulkanskim produktima sa tzv. pucolanskim svojstvima u slučaju današnje Italije, gde je i razvijen. Brojni autori rimski beton često nazivaju *opus caementicium* i navode da se ovaj materijal sastojao od hidrauličnog maltera nastalog uz upotrebu vulkanskog pepela (*materia*) i uglavnom lakog vulkanskog agregata, ali i agregata od fragmenata kamena i opeke (*caementa*), i da je kao središnji deo zida imao glavnu ulogu u njegovoj nosivosti, potpuno spojen sa licima od kamena i/ili opeke kao stalne oplata i dekoracije zida. (Slika 14).

Međutim, istraživanja datuma prve primene i daljeg razvoja rimskog betona (Mogetta 2019) dovode u pitanje isključivo određivanje unutrašnjih struktura zidova sa hidrauličnim malterom, koji u sastavu ima vulkanske produkte sa pucolanskim svojstvima, kao rimskog betona, jer se na taj način pravi podela između betona i onih struktura čiji malteri nemaju pomenute produkte. Razlog za ovo razmišljanje leži prvenstveno u tome što su hidraulični malteri nastajali i sa dodatkom nekih drugih materijala sa pucolanskim svojstvima, koji nisu bili vulkanskog porekla, odnosno nisu poticali isključivo iz današnje Italije. Još dalje, u ovim istraživanjima se izbegava upotreba termina *opus cementicium* kao sinonima za rimski beton, a zbog nepostojanja „precizne paralele“ za njega u antičkim tekstovima (o čemu piše i Oleson 2014: 11) kao i zbog toga što se svim antičkim varijantama ovog termina označavaju slične strukture rađene sa hidrauličnim, ali i nehidrauličnim malterima (Mogetta 2019: 8–13). Latinski pisac Vitruvije (80–70. godine pre nove ere – posle 15. godine pre nove ere) u svom spisu o arhitekturi, pod nazivom *De Architectura*, piše samo o *structura caementorum* kao o „jednostavnoj arhitekturi“ sa lomljenim materijalom, vezanim krečnim malterom, (Mogetta 2013: 17). Zato Marčelo Mogeta (Mogetta 2019: 13) koristi dva termina za jezgro zida: *mortared rubble* – jezgro izvedeno sa nehidrauličnim malterom, koji može imati podtipove u zavisnosti od vrste upotrebljenog veziva u malteru (kreč, zemlja); i *cemented rubble* – jezgro od hidrauličnog maltera sa materijalima koji imaju pucolanska svojstva (prirodnim i veštačkim) – ali je, ukoliko je poznato, važno napomenuti o kojim je materijalima reč, jer ne dostižu svi malteri sa dodacima pucolanskih svojstava ista hidraulična



Slika 14. Hadrijanova vila u Tivoliju, Italija – vidljiva jezgra od rimskog betona sa licima od opeke (privatna arhiva: Emilija Nikolić)

svojstva. Međutim, primena ove podele je uglavnom teška (jer iziskuje naučne analize maltera kako bi se saznalo koji su materijali u pitanju – Hurst 2022: 286). Još je Džon Brajan Vard Perkins koristio isti termin – *mortared rubble*, za jezgro koje je razlikovao od „rimskog betona” (koji je nazivao i *opus caementicium* ili *structura caementicia*). Ovo jezgro je, prema njegovom mišljenju, podsećalo na rimski beton, ali nije imalo njegovu čvrstoću i hidraulična svojstva koja su poticala od upotrebe vulkanskih peskova iz Kampanje i Lacija. Bilo je „lokalna alternativa rimskom betonu”, odnosno njegova „provincijska varijanta” (Ward-Perkins 1981: 273, 276–278, 481).

Lin Lancaster (Lancaster 2005: 3) rimski beton uvodi kao tehniku srodnu vrsti *mortared-rubble* objašnjavajući njegovu razliku u odnosu na savremeni beton. Džon Piter Oleson (Oleson 2014: 11) pominje *mortared rubble* kao tehniku koju istoričari rimske arhitekture razlikuju od rimskog betona usled pret-

postavke da kod upotrebe betona mora postojati razlika između izgleda lica i jezgra zida. Međutim, dalje navodi da u latinskoj terminologiji ne postoje različiti termini za dve nama danas vizuelno različite tehnike. Citirajući savremene ekonomske analize rimskih konstrukcija koje objašnjavaju usvajanje upotrebe agregata skoro uniformnih dimenzija („dimenzija pesnice”) u jezgru zida², objašnjava, u stvari, kako je došlo do tih vidljivih razlika u izgledu lica i jezgra zida i pojave misli o razlici između dve tehnike (Oleson 2014: 11). Prema Mogeti, obe vrste jezgra, odnosno *mortared-rubble* i *cemented-rubble*, grade strukture u kojima se njihov agregat može razlikovati od elemenata za formiranje lica ili ne. Međutim, struktura sa drugom vrstom jezgra ima bolje mehaničke osobine od one sa prvom vrstom, a posebno kada se u jezgru nalazi manji agregat oko koga je uniformnije raspoređen malter. Stoga u slučaju postojanja specifičnih „stilova” lica od kamena ili opeke (*opus*) odabir materijala koji ih formiraju često je posledica vrste jezgra, pa u slučaju *mortared-rubble*, lica uglavnom čine elementi od kamena koji imaju noseću ulogu (Mogetta 2019: 15–17). Iako se stiče utisak da je rimski beton, kako ga vide drugi istraživači, u stvari isto što i *cemented-rubble* kod Mogete, teško je shvatiti da li ovaj autor obe vrste jezgra smatra betonom, jer „beton” kroz rečnik objašnjava kao materijal koji sadrži hidraulični malter. Vidimo da je terminologija više autora slična, ali da i dalje ne postoji jedna opšteprihvaćena definicija rimskog betona.

Na teritoriji današnje Srbije i dunavskog limesa na njoj, uglavnom srećemo jezgro zida lokalno poznato kao *trpanac* (Radivojević, Kurtović-Folić 2006: 693–694; Nikolić 2013: 31, 33; Nikolić, Milovanović, Raičković Savić 2017: 44–50; Radivojević 2018: 35; Bjelić, Nikolić 2020: 187). Ovo jezgro je bilo odlika arhitekture koja se razvijala na teritoriji provincija Rimskog carstva, a posebno u njegovim istočnim delovima (Radivojević, Kurtović-Folić 2006: 693–694; Ward-Perkins 1981: 223, 273–277, 344, 453, 481, 494; Uğurlu Sağın, Engin Duran, Böke 2021: 2). Ono je bilo građeno od fragmenata lomljenog kamena i opeke i uglavnom nehidrauličnog krečnog

² Dimenzija agregata „koji staje u ruku” usvojena je kao kompromis između brzine izgradnje i zahteva konstrukcije nakon eksperimentisanja sa agregatima različitih dimenzija (De Laine 2001: 238–239).

maltera, gde je mnogo manju zapreminu zauzimaio malter nego što je to slučaj kod napred navedenog jezgra sa agregatom „dimenzija pesnice“. Zidalo se u redovima, malter se brzo sušio, pa nije moglo doći do potpunog sjedinjavanja i homogenosti. Takođe, veze jezgra sa licima od kamena i opeke, koja su tako preuzela glavnu ulogu u konstrukciji (odnosno nisu bila obloga već deo konstrukcije bez kojih ona nije mogla opstati), nisu mogle u svim slučajevima biti jake (Radivojević 2018: 37–39, 59).

Zidovi (lica i trpanac) struktura uzorkovanih tokom projekta *MoDeCo2000* duž dunavskog limesa u Srbiji nastajali su od kamena i opeke. U Viminacijumu su tokom izgradnje prvog logora bili prisutni i blokovi od prirodno pečene zemlje nastale usled gorenja donjih ugljenih slojeva, tzv. *crvenke*, specifičnog lokalnog prirodnog materijala (Nikolić *et al.* 2023), odnosno zidovi su nastajali od lica sa blokovima crvenke (slično tehnici *opus quadratum*) i ispune u vidu trpanca uz upotrebu lomljene crvenke. Kada su u pitanju lica od kamena (koji se više ili manje razlikovao od agregata jezgra), na dunavskom limesu u Srbiji je to uglavnom bio lomljeni kamen kao element lica zidanih u više tehnika (uglavnom *opus incertum*, ali i *opus incertum mixtum*, gde su zone lomljenog kamena razdvajane zonama od nekoliko redova opeke), ali se sreću i zidovi sa licima od više ili manje pravilnih kamenih blokova (u tehnikama zidanja bliskim tehnikama *opus quadratum* ili *opus vittatum mixtum*). Većina građevina na dunavskom limesu sačuvana je u nivou temelja i najnižih zona zidova od kamena, dok su nadzemne zone uglavnom srušene tokom razaranja ili razidane tokom vekova, pa tako ne postoji mnogo ostataka zidova sa licima od opeke (u tehnici *opus testaceum*). Zidanje opekom je bilo vezano za lukove i svodove, kao i stupce i različite pregrade, ali se sreću i zidovi širine dve opeke bez jezgra, zidani u celosti od ovog materijala.

I pored pretežne upotrebe trpanca na teritoriji današnje Srbije u rimskom periodu, postoje primeri jezgara koje možemo nazvati rimskim betonom prema najčešće korišćenoj terminologiji. Zidove velikih širina nalazimo u funkciji bedema ili kao zidove kula, sa jezgrom u vidu trpanca, ali i sa jezgrima sličnim rimskom betonu i licima zidanim u različitim napred navedenim tehnikama (**Slika 15**).



Slika 15. Zidovi građevina dunavskog limesa u Srbiji: lice u tehnici sličnoj *opus incertum* i ispuna zida (trpanac) od lomljenog kamena (Viminacijum, gore levo – stanje tokom iskopavanja); otisci u malteru nakon vađenja kamena sa vidljivom ispunom (Viminacijum, gore desno – stanje tokom iskopavanja; Arhiva Arheološkog instituta, foto: Nemanja Mrđić); zid od blokova crvenke sa ispunom u vidu trpanca (Viminacijum, sredina levo – stanje tokom iskopavanja; Arhiva Arheološkog instituta, foto: Nemanja Mrđić); zid od opeka bez ispune (Viminacijum, sredina desno – stanje tokom iskopavanja); lice bedema i zidova kula utvrđena izvedeno u tehnici *opus incertum mixtum* bliskoj *opus vittatum mixtum* (Dijana, dole – restaurirani zidovi).

31

U strukture sa jezgrom koje možemo nazvati rimskim betonom spada svakako i Trajanov most, čiji danas najbolje očuvan nadzemni stubac najbliži Dunavu ima ostatke lica od opeke (*opus testaceum*) i jedva vidljive ostatke kamenih blokova (*opus quadratum*) lica, uz čvrsto jezgro u vidu rimskog betona, izrađeno od sitnog kamena i čvrstog maltera (**Slika 16; Slika 17**).



Slika 16. Trajanov most na Dunavu: očuvani stubac na srpskoj obali, najbliži reci, na kome se vide ostaci lica od opeka i kamena i jezgro

32

U temeljnim zonama ostalih obalnih stubaca mosta danas se vide dobro očuvani otisci drvene oplata „betona” (Vjelić 2020; Vjelić 2022; Гарашанин, Васић 1980) (**Slika 17**).



Slika 17. Trajanov most na Dunavu: jezgro u vrhu najočuvanijeg stupca kome nedostaju lica (gore); restaurirani stubac s vidljivim otiscima oplata u temelju (dole)

Tako su karakteristike i dostupnost različitih materijala upravljale građevinskim tehnikama i tehnologijama i uticale na konačan izgled rimske arhitekture (Ulrich 2017). Sigurno

je da se kroz istoriju dešavalo i obrnuto, odnosno da je napredak tehnika i tehnologija u graditeljstvu uticao na razvoj samih kompozitnih materijala. Međutim, iako je susretanje različitih kultura sigurno sa sobom podrazumevalo i razmenu znanja o građevinskim tehnikama i tehnologijama, čini se da ovi procesi nikada nisu ni na koji način zaustavili upotrebu lokalnih sirovina, već su ih, naprotiv, samo unapredili (Iskra-Janošić 1992: 207). Tako je za izradu istorijskih (ali i savremenih) maltera upotreba sirovina u čitavom svetu zasnovana skoro isključivo na eksploataciji lokalnih resursa, a znanje o njihovoj pripremi i primeni je prenošeno i unapređivano kroz vekove. Za proizvodnju kreča su korišćeni krečnjaci iz lokalnih majdana, agregat je bio lokalnog prirodnog porekla, a za poboljšanje svojstava maltera korišćeni su različiti dodaci i primese shodno nameni maltera, i naravno zavisno od lokalne dostupnosti samog dodatka. Na taj način stvarane su brojne kombinacije komponenta, odnosno brojne kompozicije malternih mešavina.

1.3 CILJEVI KARAKTERIZACIJE ISTORIJSKIH MALTERA

Proces karakterizacije istorijskih maltera (**Slika 18**) uglavnom vezujemo za istraživanja sprovedena u laboratoriji uz upotrebu različitih metoda i tehnika. Kroz laboratorijska ispitivanja, uz dostignuća prirodnih nauka, dobijamo izuzet-



Slika 18. Fragmenti uzoraka istorijskih maltera dunavskog limesa u Srbiji

ne podatke za dalja istraživanja iz ovih, ali i drugih nauka. Međutim, karakterizacija maltera je mnogo više od laboratorijskih analiza. Inicijativa za ovakva istraživanja često dolazi iz humanističkog polja, kada je u pitanju karakterizacija maltera kao nosioca važnih istorijskih podataka, odnosno tehničko-tehnološkog polja, kada se ona koristi za razvijanje novih materijala ili arhitektonsku konzervaciju. U svakom slučaju, uspešna karakterizacija maltera mora biti zasnovana na neophodnoj saradnji između osnovnih i primenjenih nauka iz više naučnih polja.

Karakterizacija istorijskih maltera se uglavnom sprovodi iz dva razloga. Prvi je vezan za potrebe praktične konzervacije i održavanja spomenika, dok je drugi usmeren na naučna istraživanja. Karakterizacija u vezi sa konzervacijom ima za cilj praktičan i adekvatan odabir materijala i njihovih međusobnih odnosa u malteru, kao i tehnologije pripreme samih maltera za konzervaciju, uz utvrđivanje uzroka problema i propadanja maltera u okviru istorijskih struktura kojima sledi konzervacija. Cilj naučnih istraživanja je razumevanje svojstava istorijskih maltera radi dobijanja saznanja o građevinskim tehnologijama i društvenom kontekstu u sklopu istorijskih i arheoloških istraživanja, ali i u svrhu unapređenja tradicionalnih materijala ili razvoja savremenih materijala za konzervaciju onih postojećih. U oba pristupa, istorijski malteri se mogu proučavati upotrebom velikog broja istraživačkih tehnika i metoda. Njih odabiramo upravo u zavisnosti od vrste podataka koje želimo da dobijemo na osnovu karakterizacije (Hughes, Callebaut 2002: 71).

Slično ovome, Jan Elsen (2006: 1417) piše o karakterizaciji istorijskih maltera kao predmetu interesovanja najmanje tri različita stručno-naučna polja, od kojih svako ima svoje različite pristupe i zahteve. To su polje konzervacije, polje arheologije i polje ispitivanja materijala. Interesovanje konzervatora je vezano za istraživanje istorijskih maltera u cilju dizajna konzervatorskih maltera, saznanja o uzrocima degradacije, kao i razlikovanja građevinskih faza. Arheolozi svoja pitanja postavljaju u okvir hronologije, prostorne distribucije sirovina i proizvoda, u svrhu donošenja zaključaka o poreklu sirovina i procesima proizvodnje, povezujući sve u društveno-

-ekonomski kontekst. Na kraju, istraživači nauke o materijalima proučavaju upotrebu analitičkih tehnika u procesima karakterizacije maltera, kako bi unapredili znanja o njihovoj proizvodnji, ponašanju i procesima koji se u njima odvijaju (Elsen 2006: 1417). Kroz veze istraživačkih ciljeva i aktivnosti istraživanja potrebnih za njihovo ispunjavanje, Hjuze i Kalebaut (Hughes, Callebaut 2002: 71) također su tri osnovna razloga za uzorkovanje istorijskih maltera povezali sa tri oblasti, odnosno sa konzervacijom/restauracijom, istraživanjem materijala i arheologijom.

Ispunjavanje, ali i prethodno postavljanje ciljeva naučnih istraživanja, kao i procene stanja istorijske građevine usko je vezano sa detaljnim poznavanjem cele strukture i u njoj upotrebljenih materijala (Hughes, Callebaut 2002: 71). Malteri koji su se do danas održali u istorijskim građevinama predstavljaju važan izvor podataka za buduću konzervaciju, a uz odgovarajuću kombinaciju ispitivanja uzoraka ovih maltera, moguće je napraviti malter sa svojstvima sličnim originalnom malteru (Balksten 2007: 64; Balksten 2010: 11).

1.4 KOMPATIBILNOST MALTERA U ARHITEKTONSKOJ KONZERVACIJI

U okviru arhitektonske konzervacije malteri zauzimaju posebno mesto kao materijali čija upotreba utiče na sve karakteristike građevine – od strukturnih do estetskih, koje zajedno utiču na njenu stabilnost i percepciju korisnika i posmatrača. Odluka o odabiru maltera za konzervaciju zato ne sme biti donesena samo na osnovu laboratorijskih ispitivanja materijala i tehničkih zahteva građevine već i istraživanja svih njenih nematerijalnih vrednosti.

Prema jednom od rečnika, dva objekta, bića ili pojave su kompatibilni, između ostalog, kada su sposobni „da postoje zajedno u harmoniji”, „da formiraju homogenu smešu koja se ne razgrađuje niti menja hemijskom interakcijom”, ili kada su „dizajnirani da rade sa onim drugim predmetom ili sistemom bez modifikacije” (Mirriam-Webster 2022). Ovi opisi nam mnogo govore o potrebnom odnosu maltera za konzervaciju građevine sa postojećim istorijskim malterima, kao i ostalim

elementima istorijskog tkiva. Standard iz oblasti konzervacije kulturnog nasleđa, koji donosi opšte termine i definicije, pojam *kompatibilnost* opisuje kao „meru do koje se jedan materijal može koristiti uz drugi materijal bez ugrožavanja značaja ili stabilnosti objekta”, gde se pod „objektom” smatra „pojedinačna manifestacija opipljivog kulturnog nasleđa”, bilo da je ono nepokretno ili pokretno, dok se pod „materijalima” podrazumevaju konzervatorski materijali i komponente objekta (SRPS EN 15898: 2020). O potrebi kompatibilnosti među materijalima na jedan način pisao je i Vitruvije, savetujući odabir perioda izrade opeka (ćerpiča) u godini i da dužina sušenja bude dve godine. „Kad se uzidaju sveže i neosušene, pa se na njih nabaci malter, on se brzo osuši i ostane na svom mestu, a opeke se i dalje sležu i ne mogu održati istu visinu koju i malter. Kod stezanja se one pomaknu i na taj način odvoje od maltera. Tada se i malter rastavi od zidne osnove, i zbog toga što je tanak, ne može ostati sam, nego puca; onda se i zidovi sležu i kvare” (Vitruvije 1951: II.3).

U procesima arhitektonske konzervacije pod pojmom kompatibilnosti se podrazumeva da bi novi materijal trebalo da ima karakteristike slične onom istorijskom, te da ni na jedan način ne sme ugroziti njega, niti strukturu koju on gradi (Николић 2021: 92). Ako posmatramo samo fizičko-mehaničke, hemijske ili mineraloške karakteristike materijala, ovo predstavlja nešto što možemo nazvati *tehnička kompatibilnost*. U okviru ovog vida kompatibilnosti potrebno je u obzir uzeti i adekvatan odnos sa spoljnom sredinom, odnosno otpornost novog materijala na mraz, soli i dr., usklađenost sa funkcijom koju novi materijal treba da nosi u istorijskoj strukturi, kao i sa trenutnim stanjem očuvanosti strukture (Groot, Bartos, Hughes 1999: 449). Novi malter, prema van Hizu (Rob van Hees) zato ne sme direktno ili indirektno da uzrokuje štete na originalnom materijalu, ali mora da bude trajan (Groot, Bartos, Hughes 1999: 449). Malter za konzervaciju bi trebalo uvek da štiti istorijsko tkivo na kom je primenjen, a skoro u svim slučajevima mora biti slabijih karakteristika od njega. Iako, na primer, čvrst novi malter verovatno neće imati negativne posledice po čvrst postojeći kamen, njegova upotreba je opravdana samo kada

postoji i čvrsto postojeće tkivo i visoka izloženost novog maltera spoljašnjim uticajima (Odgers, Henry 2012: 295).

Osim tehničke kompatibilnosti koja, kako je već navedeno, podrazumeva da novi malter ne ugrožava postojeću strukturu u fizičkom smislu i da poseduje otpornost na spoljne uticaje, čemu najpre i služe laboratorijske pripreme i kasnije probe modela maltera za konzervaciju, neophodno je u procesima zaštite građevina razmotriti i druge vidove kompatibilnosti. Među njima su kompatibilnost koja se tiče filozofije konzervacije i etike, kao i ona koja se odnosi na tradicionalni pristup i konzervatorsku praksu (Groot *et al.* 2004: 2). Identifikacija vrednosti građevine predstavlja jednu vrstu filtera za donošenje odluke šta čuvamo i prezentujemo te na koji način to činimo. Međutim, koju god odluku da donesemo, građevina nešto gubi, a konzervatorski proces, koji je često ireverzibilan, dobija moć i prednost nad procesima kroz koje je građevina prošla tokom svoje istorije i čiji su svedoci ostaci koji su pred nama. Čak i konzervacijom koja kroz osnovne intervencije pokušava da sačuva neko istorijsko delo, kako Salvador Munjuz Vinjas piše (Muñoz Viñas 2009: 52), uvek se nešto od njegovih originalnih osobina briše i gubi, čime ujedno nestaju informacije koje ono nosi sa sobom, a sa njima i deo njegove istorije.

Osnovne fizičke i mehaničke osobine novih maltera značajne za konzervaciju građevina, koje utiču na njegovo ponašanje, pa i kompatibilnost sa postojećim malterima i okolnim istorijskim tkivom, jesu: čvrstoće na pritisak i savijanje, plastičnost, poroznost, propustljivost, kapilarno upijanje vode i otpornost na mraz i kristalizaciju soli. Međutim, osim ispunjavanja zadatih vrednosti navedenih svojstava, konzervatorski malter bi trebalo da ispuni i princip reverzibilnosti. Iako je, na primer, injekcione smeše nemoguće ukloniti nakon intervencije na postojećem oslabljenom zidu, uz dovoljno veštine, nehidraulični ili slabo hidraulični malteri upotrebljeni za sanacije se uglavnom mogu ukloniti bez štete, čak i nakon više godina, dok je uklanjanje maltera sa jakim hidrauličnim krečom i cementom teško i skoro nemoguće (Henry, Stewart 2011: 243). S obzirom na to da je opštevažeće konzervatorske principe *minimalnih intervencija* i *reverzibilnosti* teško održati, kao primenjiv istraživači uvode princip *ponovljivosti*, koji osigu-

rava da novi materijali i tehnike koje planiramo da primenimo ne ugrožavaju mogućnost primene i drugih potrebnih tretmana u budućnosti (Schueremans *et al.* 2011: 4339).

Svaki savremeni malter treba da ispuni nekoliko funkcionalnih zahteva. Malter bi trebalo da osigura nosivost zida (tamo gde je to primenjivo), ne dozvoli prodor vode kroz zid i odbije spoljašnje uticaje koji deluju na njega, unapredi trajnost samog zida, spreči štetu usled efekata deterioracije/degradacije, ali i pozitivno utiče na estetski aspekt i trajnost zida (Groot *et al.* 2004 i van Balen *et al.* 2001 u Schueremans *et al.* 2011: 4339). Isto se odnosilo u prošlosti, na tadašnje, to jest za nas danas, istorijske maltere. U procesu restauracije, navedeni funkcionalni zahtevi moraju biti *prevedeni* u one tehničke, koji onda obuhvataju estetski (boja, tekstura, izgled); hemijski (sastav, vrsta veziva, odnos veziva i agregata, hidrauličnost); mineraloški (mineralne faze, vrsta agregata i veziva); fizički (otpornost na mraz, raspodela veličine čestica, poroznost, zadržavanje vode); i mehanički (čvrstoća i tvrdoća) zahtev, što dalje znači da je prilikom projektovanja maltera za konzervaciju potrebno razmotriti više oblika same tehničke kompatibilnosti, odnosno estetsku, hemijsku, mineralošku, fizičku i mehaničku kompatibilnost (Schueremans *et al.* 2011: 4339) (**Slika 19**).



Slika 19. Tehnička kompatibilnost istorijskog (levo) i konzervatorskog maltera (desno) izgrađenog za jednu od rimskih građevina dunavskog limesa u Srbiji dostignuta kroz projekat *MoDeCo2000*

U arhitektonskoj konzervaciji naučne i stručne discipline su nerazdvojive. Konzervacija „pruža retku i privilegovanu mogućnost da se razume, poboljša i zaštiti kulturno nasleđe”, a s obzirom na njen značaj za čitavo društvo, odluke o konzervaciji se moraju doneti ne samo na stručan već i odgovoran način (SRPS EN 16853: 2017). Uz postojanje prethodnih istraživanja istorijski upotrebljenih građevinskih materijala, prilikom ovog procesa podjednako je važno da oni koji sprovode konzervaciju razumeju prirodu i ponašanje različitih materijala te da konzervatori i majstori poseduju iskustva i zanatske veštine u radu sa tradicionalnim materijalima.

Arhitektonsko nasleđe je izloženo mnogobrojnim spoljašnjim faktorima usled kojih nastaju različiti vidovi njegovih promena, pa i degradacije (Vučetić *et al.* 2022a: 52–53). Odgovorna arhitektonska konzervacija teži očuvanju istorijskog tkiva građevine upotrebom adekvatnih materijala, pri čemu je uloga konzervatorskog maltera jedna od najvažnijih. Ovaj kompozit, čije su ponašanje i odnos sa ostalim materijalima uslovljeni njegovom kompozicijom i primenom, često predstavlja razlog degradacije pomenutog tkiva u slučaju posedovanja neadekvatnih svojstava (Николић 2021: 94).

Davanje preporuka za odabir sirovina i njihov međusobni odnos u malteru za konzervaciju, kao i tehnologiju pripreme samog maltera, možemo povezati sa metodologijom tzv. obrnutog inženjeringa, kroz koji tokom pripreme novih maltera proveravamo hipoteze nastale na osnovu istraživanja istorijskih maltera. Na ovaj način, za istorijske maltere koji su degradirali, a uz prepoznavanje uzroka, možemo dizajnirati maltere za njihovu konzervaciju, oslanjajući se na karakteristike onih istorijskih maltera koji su otporniji (Moropolou *et al.* 2005: 278). Ako tokom karakterizacije utvrdimo da je istorijski malter u lošem stanju usled njegove neadekvatne kompozicije, verovatno neće biti prikladno da pripremimo skoro identičan konzervatorski malter (Odgers, Henry 2012: 131). Međutim, prilikom dizajna novih maltera uvek se moramo kretati u okviru zadatih limita karakteristika onih istorijskih, kako bismo sačuvali međusobnu kompatibilnost maltera, ali i kompatibilnost novog maltera sa okolnim tkivom (Moropolou *et al.* 2005: 278).

Postoje i određene razlike u pogledu generalnog shvatanja kompatibilnosti u okviru naučnih istraživanja i konzervatorske prakse, jer istraživanja podrazumevaju dizajn maltera za konzervaciju sa aspekta poštovanja već pomenutih estetskih, hemijskih, mineraloških, fizičkih i mehaničkih svojstava originalnih maltera, dok sa druge strane, konzervatori, kada su u pitanju vrednosti nasleđa i autentičnost, najviše razmatraju estetske osobine novih maltera, a u okviru praktičnih radova brinu o njegovoj obradivosti; upravo na pitanja do koje mere možemo objediniti sve ove zahteve, te da li moramo žrtvovati neki od vidova kompatibilnosti, odgovaramo kroz dizajn maltera za konzervaciju (Schueremans *et al.* 2011: 4348). Prilikom konzervatorskih intervencija, moramo delovati između dve krajnosti, između potpune nekompatibilnosti i potpune kompatibilnosti, što zavisi od svakog pojedinačnog slučaja maltera i konteksta u kome se nalazi. Prema tome, možemo reći da tokom konzervacije naš cilj ne može biti potraga za aktivnostima koje omogućavaju savršenu kompatibilnost, već za onim čije sprovođenje nekompatibilnost svodi na minimum (Delgado Rodrigues, Grossi 2007: 34–35).



II METODE I TEHNIKE U KARAKTERIZACIJI ISTORIJSKIH MALTERA

Do sedamdesetih godina XX veka laboratorijska karakterizacija istorijskih maltera uglavnom se vršila klasičnim hemijskim analizama, da bi nakon ovog perioda za identifikaciju komponenti maltera u upotrebu bila uvedena i optička mikroskopija i rendgenska difrakcija (Elsen 2006: 1417).

Pretpostavlja se da su prve analize nekog istorijskog materijala na teritoriji današnje Srbije obavili stručnjaci tadašnjeg Zavoda za zaštitu i naučno proučavanje spomenika Narodne Republike Srbije, i to nakon završetka Drugog svetskog rata, na malterima koji potiču iz građevina srpskih srednjovekovnih manastira. To su bile upravo hemijske analize. Jedno od ovih istraživanja, vezano za konzervaciju, obuhvatilo je malterne slojeve naknadno nanete na dekorativne maltere Crkve Bogorodice Ljeviške kako bi se pronašao način njihovog skidanja i otkrivanja originalnih zidnih slika bez oštećenja. Ujedno je to bio i pokušaj razlikovanja zidnog slikarstva izvedenog u različitim periodima života crkve. Istraživanje je pokazalo minimalne razlike u sastavu ovih maltera, jer se „materijal istog sastava vekovima upotreb-
ljavao” (Вуловић 1956: 195–197; Balvanović *et al.* 2023: 235–236).

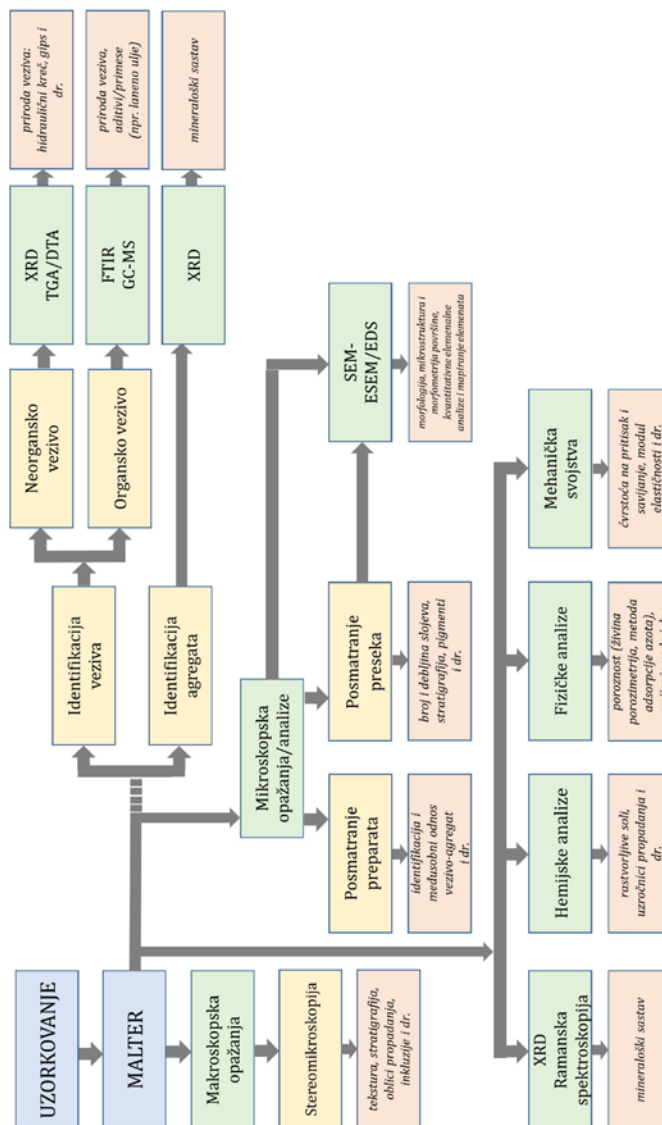
Slično se desilo i sa rezultatima hemijskih analiza koje su sedamdesetih godina XX veka sproveli Arheloški muzej u Splitu i „Dalmacija-cement”, na malterima iz istorijskih građevina Solina u današnjoj Republici Hrvatskoj, odnosno antičke i ranohrišćanske Salone i kasnijih srednjovekovnih građevina. Na to ih je podstakla sumnja u mogućnost njihovog datovanja na osnovu vizuelnih razlika koja su vršili prethodni istraživači. Interpretacija rezultata analiza pokazala je da su razlike uočene prilikom vizuelnog pregleda slučajne prirode, a da „postupak pripremanja žbuke nije se mijenjao i u svim ispitanim uzorcima je jednak, bilo da se radi o žbuki 1. st. bilo onoj iz 10. st.” (Rapanić, Pranić 1980: 103).

U teoriji, sve metode ispitivanja razvijene za analize sastava neorganskih materijala mogu biti primenjene na malter,

pa odabir adekvatne metode zahteva poznavanje načina izvođenja svih dostupnih metoda i rezultata koje one mogu doneti (Schnabel 2009: 1). Standard za karakterizaciju maltera koji se koristi u kulturnom nasleđu (SRPS EN 17187: 2021) kao pomoć istraživačima u njihovom odabiru predlaže kroz dijagram više metoda i tehnika te pokazuje njihovu povezanost (Slika 20).

U ovoj monografiji prikazane su metode i tehnike koje je najčešće primenjivao najveći broj istraživača u svetu tokom karakterizacije maltera. Svaka od njih je u određenom obimu primenjena u okviru projekta *MoDeCo2000* tokom ispitivanja rimskih maltera dunavskog limesa u Srbiji. Metode i tehnike ispitivanja istorijskih maltera mogu biti grupisane na različite načine. Posebno je teško grupisati metode usled postojanja instrumentalnih tehnika koje se koriste u ispitivanjima više naučnih disciplina. Na malteru se mogu ispitati njegova vizuelna, mineraloško-petrografska, hemijska, fizičko-mehanička, termička svojstva ili se može odrediti njegova starost. Međutim, neka od svojstava ispituju se kombinacijama više metoda i tehnika, a s druge strane neke metode i tehnike koristimo za utvrđivanje više svojstava ovih materijala. Grupisanje metoda i tehnika u ovoj monografiji stoga je izvršeno u skladu sa iskustvom u ispitivanju maltera tokom projekta *MoDeCo2000*.

- *vizuelni pregled maltera*: makroskopska i mikroskopska opažanja uzoraka i svežih preseka, kolorimetrija;
- *određivanje mineraloško-petrografskog sastava maltera*: optička mikroskopija uz upotrebu propuštene polarizovane svetlosti (tj. polarizaciona svetlosna mikroskopija (PLM)), skenirajuća elektronska mikroskopija sa energetske-disperzivnom spektrometrijom (SEM-EDS), rendgenska difrakcija (XRD), ramanska spektroskopija; infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR);
- *određivanje fizičko-mehaničkih svojstva maltera*: određivanje zapreminske mase, poroznosti, kapilarnog upijanja vode, testiranje čvrstoće na pritisak i na savijanje, i prijanjanje (adhezija) maltera za podlogu;



Slika 20. Metode i tehnike laboratorijske karakterizacije maltera, veziva i agregata nakon uzorkovanja (šema nacrtana na osnovu SRPS EN 17187: 2021)

- *određivanje hemijskog sastava maltera*: klasična hemijska analiza, rendgensko-fluorescentna spektrometrija (XRF), optičko-emisiona spektrometrija sa indukovano spregnutom plazmom (ICP-OES);

- *termičke analize maltera*: gubitak žarenjem, diferencijalna termalna analiza (DTA), diferencijalna skenirajuća kalorimetrija (DSC), termogravimetrija (TGA).

Primetno je da najveći broj metoda i tehnika pripada grupi što ispituje mineraloško-petrografska svojstva. Naime, najveći broj ispitivanja istorijskih maltera u cilju naučnih istraživanja obavljan je da bi se odredilo poreklo sirovina, što podrazumeva pre svega petrografsku karakterizaciju i određivanje minerala u komponentama maltera. U poslednje vreme su prepoznavanje hemijskih reakcija između agregata i veziva, kao i uloga materijala sa pucolanskim svojstvima, teme svetskih istraživanja koje nam pružaju dodatne informacije o razlozima trajnosti rimskih maltera kao i procesima njihove proizvodnje. Takođe, skenirajuća elektronska mikroskopija sa energetske disperzivnom spektrometrijom je, na primer, izuzetno važna tehnika kod određivanja poroznosti maltera i tragova degradacije, ali i za identifikaciju ovde pomenutih novih jedinjenja – minerala nastalih pucolanskom reakcijom. Neke od ovde navedenih tehnika koristimo i za određivanje eventualnih organskih dataka. Ispitivanje istorijskih maltera može obuhvatiti i dodatne metode u zavisnosti od informacije koju tražimo, a koje ne moraju biti povezane samo sa karakterizacijom maltera u smislu identifikacije upotrebljenih materijala. Među njima je izuzetno značajno i *određivanje starosti maltera*.

Načini primene laboratorijskih metoda i tehnika za ispitivanje materijala koje danas koristimo standardizovani su na međunarodnom nivou i uglavnom su vezani za savremene proizvode, kao što je već napred navedeno. Međutim, za neke od metoda i tehnika postoje i specijalizovani standardi koji se odnose na njihovu primenu u ispitivanju istorijskih maltera. Za druga ispitivanja koja je moguće izvršiti na istorijskim malterima upotrebljavaju se i dalje standardi pripremljeni za pojedinačne tradicionalne i savremene građevinske materijale prisutne u današnjem građevinarstvu (kreč, gips, cement, prirodni agregati za savremene maltere, cementni malteri, prirodni kamen i dr.).

Laboratorijskim ispitivanjima istorijskih maltera prethodi rad na terenu, bilo da on obuhvata vizuelni pregled građevine, ocenu njenog stanja, snimanje struktura nedestruktivnim metodama, ili uzimanje različitih vrsta uzoraka. Laboratorijske metode karakterizacije istorijskih maltera su generalno destruktivne, mada su, kako se navodi i u standardu za karakterizaciju maltera koji se koriste u kulturnom nasleđu (SRPS EN 17187: 2021), nedestruktivne metode uvek poželjnije od destruktivnih, ukoliko mogu da pruže potrebne informacije. Kako navedeni standard poručuje, analize maltera treba da budu u skladu sa ciljem ispitivanja, a uvek je neophodno uzeti u obzir značaj i trenutno stanje građevine koja se istražuje, kao i obim ili vrstu planirane konzervatorske intervencije.

Malteri za konzervaciju istorijskih građevina pripremaju se u cilju popravke ili zamene maltera koji su degradirali, kao zamena savremenih neadekvatnih maltera nanetih kroz prethodne konzervatorske intervencije, zaštita i ojačanje oslabljenog istorijskog tkiva, ili kao sredstvo za zidanje tokom restauracije. Njima je potrebno popuniti šupljine, zameniti degradirane spojnice, obezbediti zaštitni sloj ili završni sloj zida, ali i ponovo ozidati zidove koji su oslabljeni, prezidati neki njihov deo ili nanovo omalterisati neku površinu. U zavisnosti od potrebe konzervacije često su neka određena svojstva konzervatorskih maltera važnija od drugih. Tako je, na primer, kod maltera za zidanje čvrstoća na pritisak izuzetno značajna, dok su za većinu ostalih intervencija važnije čvrstoća na savijanje i karakteristike vezane za propustljivost maltera (Henry, Stewart 2011: 235).

2.1 UZORKOVANJE MALTERA

Uzorkovanje je veoma značajan deo praktične terenske procedure koja se sprovodi tokom istraživanja istorijskih maltera. Njegovu važnost ne možemo dovoljno naglasiti, s obzirom na to da upravo od njegovog kvaliteta i relevantnosti uzoraka zavise zaključci koje kasnije donosimo tokom istraživanja (Goins 2004: 4; Hughes, Callebaut 2002: 71 u Goins 2004: 4). Istraživači ga definišu kao „čin trajnog uklanjanja materijala iz tkiva građevine u svrhu njegove karakterizacije” (Hughes,

Callebaut 2002: 70). Standard koji obuhvata metodologiju za uzorkovanje materijala iz kulturnih dobara (SRPS EN 16085: 2014) navodi da je uzimanje uzoraka invazivna procedura i da uvek uzrokuje štetu, ma koliko ona bila mala. Stoga se, kako ovaj standard dalje naglašava, uzorkovanje sprovodi samo ako postoji izuzetno opravdan razlog. Pritom je neophodno konsultovati se sa odgovornim licima i onima koji će dalje proučavati uzorke, i ujedno razmotriti da li bi se ista informacija mogla dobiti neinvanzinim metodama, odnosno snimanjem istorijskog tkiva *in situ*.

Postupak uzorkovanja odvija se u sledećim fazama: definisanje ciljeva istraživanja; vizuelna analiza i dokumentovanje celokupne strukture i korišćenih materijala, faza izgradnje i stratigrafije; izbor analitičke metode za analizu materijala; i na kraju, praktično uzorkovanje sa prikupljanjem potrebnih informacija (Hughes, Callebaut 2002: 71). Prema navedenom standardu (SRPS EN 16085: 2014) uzorkovanje mora biti izvršeno u skladu sa određenim kriterijumima, odnosno:

- ciljevi uzorkovanja bi trebalo da budu jasno definisani i opravdani, a plan uzorkovanja zasnovan na tim ciljevima;
- uzorkovanje bi trebalo vršiti u skladu sa važećim zakonodavstvom i/ili uslovima organa nadležnog za staranje o kulturnom dobru;
- pre uzorkovanja je potrebno sačiniti odgovarajuću evidenciju o stanju kulturnog dobra u skladu sa standardima za uslove snimanja pokretnog (SRPS EN 16095: 2014) ili nepokretnog (SRPS EN 16096: 2014) nasleđa;
- uzorkovanje zahteva rad ljudi sa manuelnim veštinama i znanjem o kulturnom dobru;
- uzorkovanje bi trebalo izvršiti tako da se umanje svi vidljivi i/ili ometajući/oštećujući efekti, a uzorci uzmu, kada je to moguće, sa što neupadljivijeg mesta, pod uslovom da se ispunjavaju ciljevi samog uzorkovanja; i
- uzorkovanje bi trebalo izvršiti u skladu sa specifičnim zahtevima istraživanja.

Svaka tehnika ispitivanja ima svoje zahteve za minimalnom količinom i kvalitetom uzorka, pa je neophodno pažljivo izvršiti aktivnosti koje prethode uzorkovanju, uzeti u obzir

prirodu i stanje maltera, kao i potrebu očuvanja spomenika. To dalje znači da ne treba nikada uzimati veću količinu uzorka nego što je to potrebno (Hughes, Callebaut 2002: 72). Stoga, kako napred navedeni standard navodi, potrebno je uspostaviti plan uzorkovanja koji se utvrđuje na osnovu preliminarnog istraživanja terena i građevine. On daje pregled lokacija za uzimanje uzoraka, kao i broj, veličinu i prirodu budućih uzoraka, a u njemu treba da bude navedeno i šta treba učiniti sa delom uzorka koji ostane nakon ispitivanja, odnosno da li se on vraća vlasniku/odgovornom licu ili ga zadržava onaj ko sprovodi istraživanje (SRPS EN 16085: 2014).

Uzorak potreban za karakterizaciju, odnosno određivanje kompozicije istorijskog maltera trebalo bi da bude reprezentativan deo materijala, kako bi rezultati dobijeni prilikom kasnijeg istraživanja bili što pouzdaniji. Međutim, pitanje reprezentativnosti uzorka kod istorijskih materijala može biti veoma diskutabilno. Detaljno poznavanje konstrukcije građevine i vizuelni pregled koji vode uzorkovanje mogu dovesti do jedne vrste pristrasnosti prilikom procesa, jer samo slučajni odabir uzoraka u stvari daje stvarni statistički podatak (Hughes, Callebaut 2002: 73). Dalje, dostizanje reprezentativnosti može biti otežano zbog nemogućnosti dobijanja dovoljne količine materijala usled zaštite same istorijske građevine i konzervatorskog principa minimalnih intervencija, ali i selekcije pogodnih uzoraka nastale na osnovu njihovog stanja, prisutne hemijske ili biološke deterioracije, izloženosti i spoljašnjih uticaja (Hughes, Callebaut 2002: 72–73). Stoga ne bi trebalo vršiti uzorkovanje na mestima na kojima postoji kontaminacija spoljnim faktorima koji nisu postojali u vreme ugradnje maltera (mesta bliže tlu) ili na mestima gde su malteri veoma degradirali (izložena mesta na velikim visinama) (Henry, Stewart 2011: 205). Određena nedestruktivna ispitivanja *in situ* mogu pomoći da se identifikuju varijacije u makroskopskim karakteristikama materijala pre uzorkovanja, što dalje može uticati na lakše dostizanje reprezentativnosti (Hughes, Callebaut 2002: 73).

Uzimanje uzoraka zidarskih maltera obavlja se kao kada se uzorkuje prirodni kamen. Postoje dva postupka, a oba imaju prednosti i nedostatke. Ručnim mehaničkim uzorkova-

njem uzorak se uzima pomoću čekića i dleta, dok se mašinski olakšano uzorkovanje sprovodi uz upotrebu dijamantskih bušilica (sa vodenim hlađenjem ili bez njega) (Průkrýl 2007: 10). Uzorkovanje maltera za malterisanje vrši se skalpelom ili malim dijamantskim diskovima, a uzorci maltera bilo koje funkcije mogu se uzeti ne samo kao čvrsti fragmenti već i u praškastom obliku u cilju ocene njihovog trenutnog stanja (Henry, Stewart 2011: 206).

Uzorkovanje zidarskih maltera čekićem i dletom obavlja se bez vode i stoga kasnije omogućava tačno određivanje količine rastvorljivih soli i sadržaja vlage, a to su u nekim slučajevima veoma važni parametri, kada se uzorkovanje vrši u cilju određivanja stanja materijala. S druge strane, to može izazvati pojavu novih pukotina, što kasnije prilikom ispitivanja može dovesti do dobijanja netačnih vrednosti mehaničkih svojstava. Kod mašinskog bušenja sa vodenim hlađenjem, oštećenja koja nastaju uglavnom su manja od onih koja nastaju ručnim uzorkovanjem, uzorci se mogu direktno koristiti za merenje mehaničkih osobina, ali se na ovaj način mogu ukloniti sve rastvorljive soli (ili čak uvesti novi anjoni i katjoni iz vode) (Průkrýl 2007: 10). Za uzimanje praškastih uzoraka koriste se bušilice kojima se buše rupe prečnika uglavnom do 6 mm, prikuplja se prah koji nastaje, a zatim on analizira za potrebe utvrđivanja vlage ili sadržaja soli. Nedostatak metode vezan je za mogućnost generisanja toplote bušenjem koja remeti postojeću vlagu u uzorku, što se može prevazići tehnikama sporog bušenja (Henry, Stewart 2011: 206).

Najveći broj uzoraka istorijskih maltera dobija se ručnim uzorkovanjem (**Slika 21**). Često je kod istorijskih građevina kojima sledi konzervacija moguće uzeti fragmente maltera i bez upotrebe alata. Nekada su uzorci potpuno ili delimično odvojeni od strukture ili čak sprašeni usled protoka vremena. Ovo olakšava uzorkovanje i smanjuje oštećenja na samoj građevini. Veoma je važno da položaj uzoraka nije kompromitovan nekom prethodnom ljudskom aktivnošću sprovedenom u periodu nezvanom za nastanak samog maltera, spoljnim hemijskim ili biološkim uticajima, i da njihovo stanje odgovara potrebama ciljeva ispitivanja. U slučaju bilo kakve sumnje vezane za poreklo uzorka (nejasno pripadanje određenoj strukturi kada je



Slika 21. Ručno uzorkovanje maltera: konsolidovanih uzoraka pomoću čekića i dleta (gore levo); potpuno odvojenih od strukture i sprašenih uzoraka (gore desno); potpuno odvojenih od strukture i fragmentovanih uzoraka (dole levo); uzoraka delimično odvojenih od strukture (dole desno)

uzorak odvojen od same strukture i dislociran), uzorak se ne može smatrati validnim za ispitivanje.

Prema napred navedenom standardu za uzorkovanje materijala kulturnih dobara, propisani su i rukovanje uzorcima, kao i vođenje dokumentacije o njima. Uzorci se nakon praktičnog uzorkovanja pakuju na odgovarajući način kako u postupku transporta ne bi došlo do njihove kontaminacije i mehaničkih oštećenja. Tokom uzorkovanja se vodi zapis sa podacima o procesu koji treba da sadrži: jedinstvenu oznaku uzorka; cilj uzorkovanja; identifikaciju kulturnog dobra; identifikaciju uzorka (datum uzorkovanja; podatke o osobi koja je uzela uzorke; opis fizičkog stanja uzorka; tip uzorka – fragment, jezgro, prah; boja; stratigrafija); lokaciju uzorkovanja uz grafičku i foto-dokumentaciju sa metričkom skalom i kolorimetrijskom referen-

50

com po potrebi; postupak uzorkovanja; i/ili vrstu korišćenog alata. Preporučuje se i unošenje informacija o izloženosti uzorka spoljašnjim uslovima, uslovima prilikom uzorkovanja, načinu pakovanja uzoraka, kao i davanje preporuka za uslove skladištenja. Tokom uzorkovanja se moraju poštovati svi potrebni zdravstveni i bezbednosni propisi, u cilju zaštite lica koja u njemu učestvuju (SRPS EN 16085: 2014) (**Slika 22**; **Slika 23**; **Slika 24**).



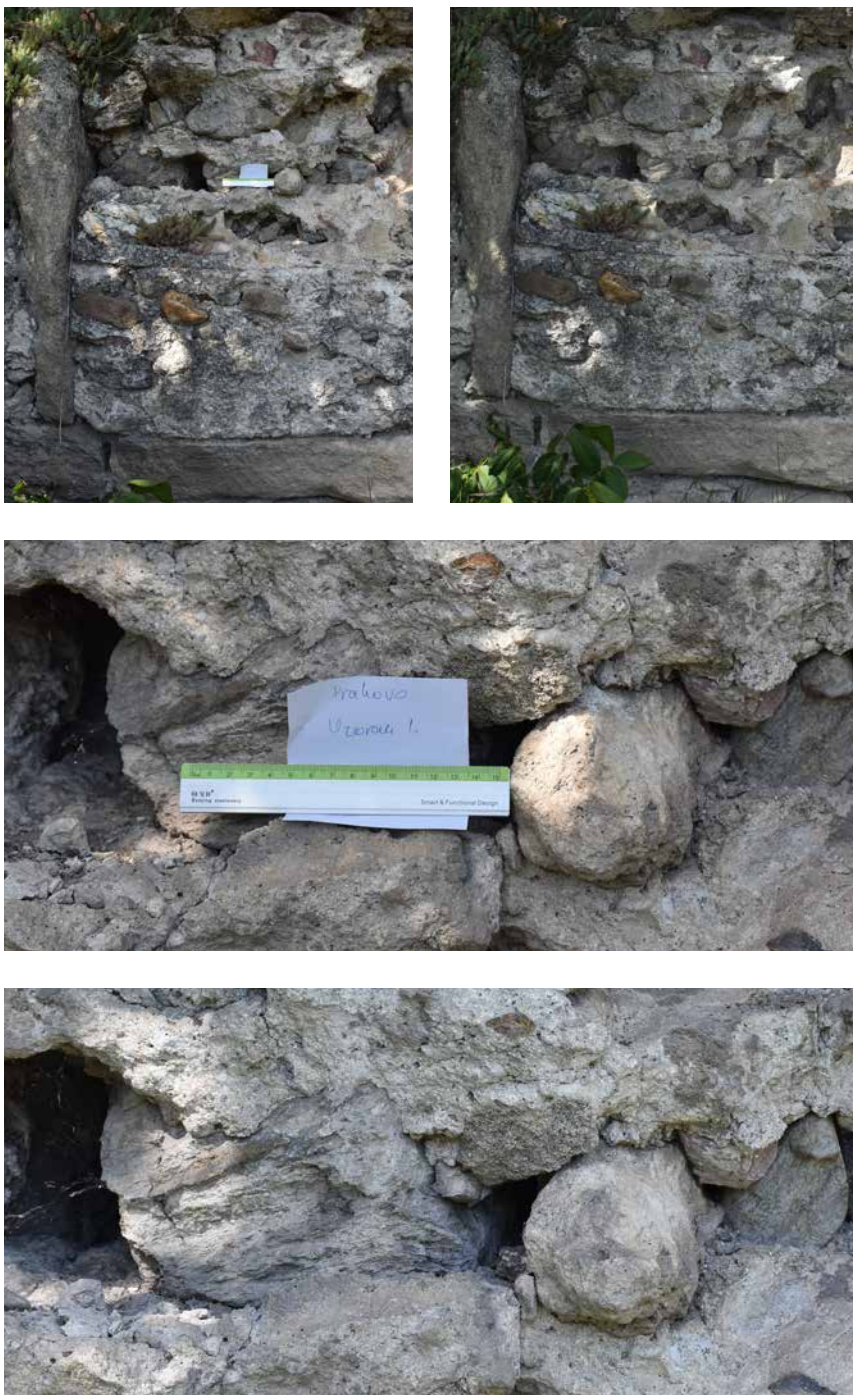
Slika 22. Očitavanje GPS koordinata sa uređaja postavljenog na mesto uzetog uzorka i pakovanje uzorka sa oznakom

51



Slika 23. Tipični uzorci istorijskih maltera nakon donošenja u ispitnu laboratoriju

52



Slika 24. Način fotografisanja pozicije uzimanja uzorka (bez metričke skale i sa njom), širi i uži kontekst: Akve

2.2 VIZUELNI PREGLED MALTERA

Vizuelni pregled istorijskih maltera sastoji se od makroskopskog i mikroskopskog pregleda. U „iskusnim rukama” makroskopska opažanja maltera uz dodatnu upotrebu lupe nekada mogu biti i dovoljna ako se ispitivanje vrši za potrebe manjih intervencija, a ne naučnog istraživanja (Henry, Stewart 2011: 207). Usled ispitivanja sprovedenih tokom ranijih konzervacija ili poznavanja kompozicije upotrebljenog maltera (kada potiče iz savremenog perioda i kada znamo koji sastav je bio propisan) nekada unapred imamo dovoljno podataka, pa je značajno samo proveriti stanje maltera, oštećenja ili bilo kakve promene.

Standard za karakterizaciju maltera koji se koriste u kulturnom nasleđu (SRPS EN 17187: 2021) utvrđuje karakteristike maltera koje bi trebalo ispitati prilikom makroskopskih i mikroskopskih opažanja (detaljnije opisana standardom za petrografsko ispitivanje prirodnog kamena – SRPS EN 12407: 2019, ali i standardom za karakterizaciju prirodnog kamena koji se koristi u kulturnom nasleđu – SRPS EN 16515: 2016).

Makroskopska opažanja istorijskih maltera omogućavaju procenu izgleda i stanja uzorka golim okom kao i kod prirodnog kamena, uz mogućnost upotrebe stereomikroskopa ili ručne lupe (**Slika 25**), a vrše se na sveže polomljenim presecima uzoraka, ali i poliranim presecima ako je to neophodno (SRPS



Slika 25. Ispitivanje svežeg preseka uzorka maltera pod prenosnom digitalnom opremom za uvećanje

EN 12407: 2019). Kroz ova opažanja se utvrđuju ili procenjuju boja, karakteristike, sadržaj i veličina zrna agregata, karakteristike veziva, eventualna stratigrafija i hronologija, tekstura maltera sa poroznošću, kohezija/adhezija unutar maltera, prisustvo prslina, pukotina, šupljina i pora, prisustvo ispuna, uklopaka, nečistoća, makrofosila, grudvica, vlakana, oblici propadanja i promena stanja, kao i tragovi tretmana i upotrebe alata (Balksten 2010: 11–12; SRPS EN 12407: 2019; SRPS EN 17187: 2021) (**Slika 26; Slika 27; Slika 28**).

Na osnovu makroskopskih opažanja se lako mogu ustanoviti i neki obrasci (Henry, Stewart 2011: 181). Primera radi, nehidraulični kreč se veoma lako grebe, a neki fragmenti maltera u kojima je on vezivo nekada mogu biti i izdrobljeni između prstiju, dok su hidraulični kreč i cement mnogo otporniji. Ove osobine ne zavise samo od veziva već i od agregata i njihovog međusobnog odnosa, te stepena očuvanosti maltera, pa se nijedna metoda vezana za grebanje ne može koristiti za određivanje veziva, već samo kao indikacija za njegovu vrstu (Henry, Stewart 2011: 181). Priroda veziva se u ovoj fazi ispitivanja maltera može proveriti i preko reakcije maltera sa 5–10 % rastvorom hlorovodonične kiseline (HCl). Kalcijum-karbonatno vezivo reagovaće sa kiselinom (**Slika 29**) – nehidraulični kreč će se potpuno rastvoriti, dok će hidraulični kreč imati nerastvorni ostatak. Gips će se rastvoriti bez stvaranja mehurića, dok će se kod cementnog maltera takođe pojaviti mehurići i delimično će se rastvoriti vezivo, ostavljajući fini glineni ostatak (Henry, Stewart 2011: 181). Makroskopski pregled uzoraka istorijskih maltera usmerava sva naredna ispitivanja, odnosno na neki način daje pretpostavke koje se dokazuju ili opovrgavaju prilikom daljeg ispitivanja. Slično navodi i standard prema kome ova opažanja daju preliminarne podatke koje bi trebalo dalje potvrditi (SRPS EN 17187: 2021).

Prema standardu za karakterizaciju maltera koji se koristi u kulturnom nasleđu (SRPS EN 17187: 2021), mikroskopska opažanja maltera se mogu vršiti optičkom mikroskopijom uz upotrebu odbijene svetlosti ispitivanjem poliranih preseka maltera i optičkom mikroskopijom uz upotrebu propuštene svetlosti ispitivanjem retrografskih preparata. Prva tehnika bi, prema standardu, trebalo da pruži uvid u vrstu, oblik, veličinu,

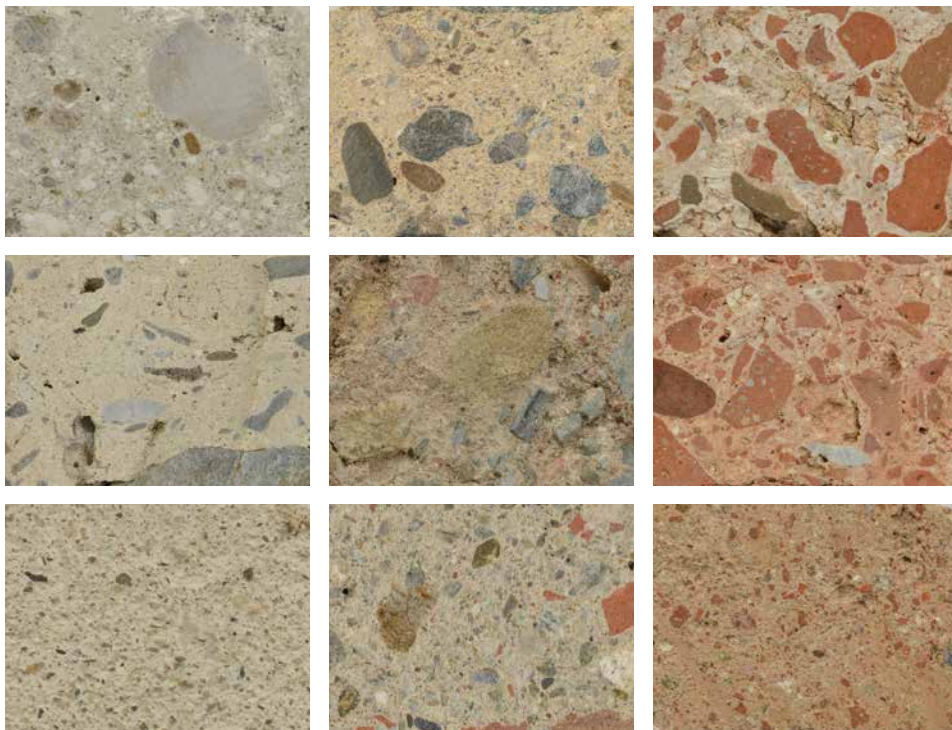


Slika 26. Raznolikost uzoraka istorijskih maltera uzorkovanih duž dunavskog limesa u Srbiji (foto: Goran Stojić)

56



Slika 27. Malteri za malterisanje sa vidljivom stratigrafijom (foto: Goran Stojić)



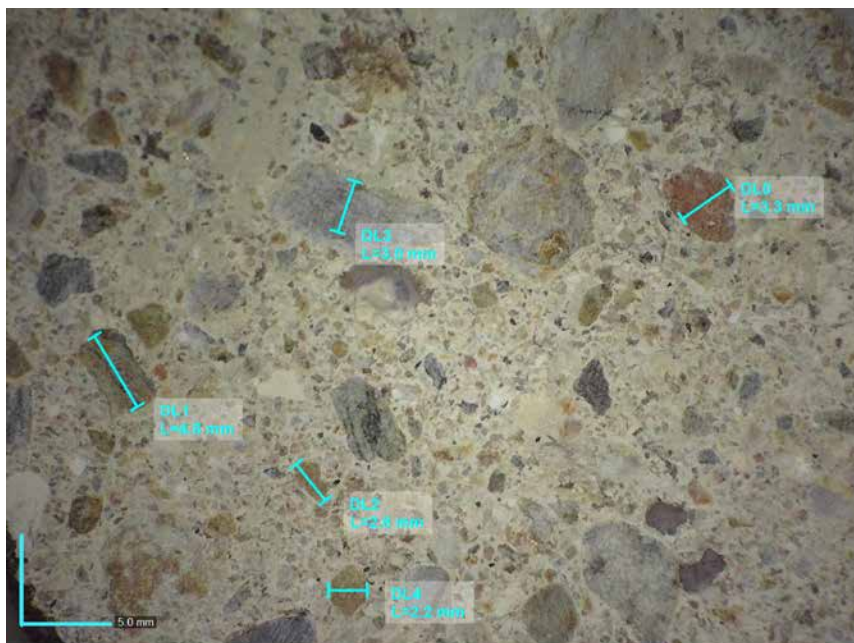
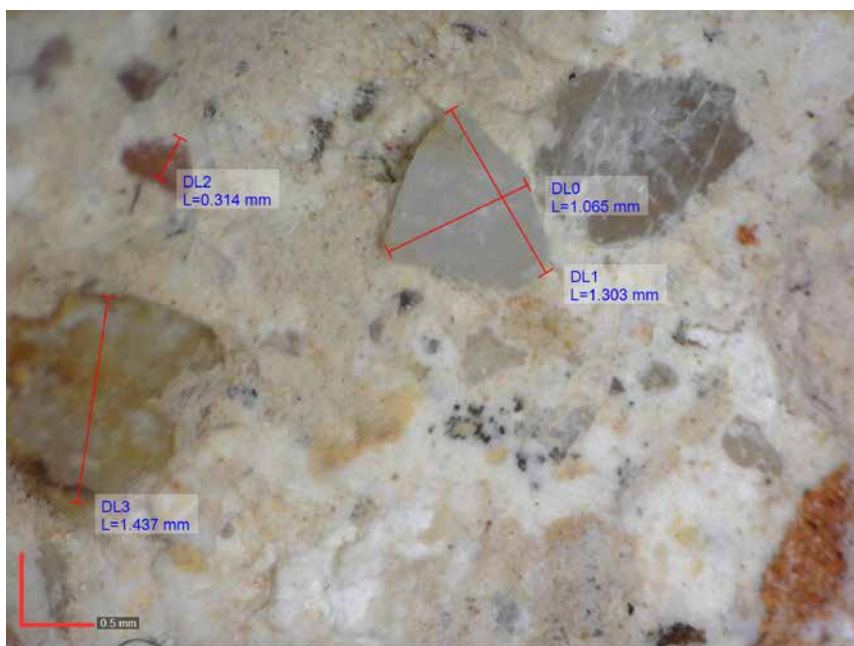
Slika 28. Raznolikost boja veziva i agregata, oblika i veličine zrna agregata istorijskih maltera, vidljivi golim okom (foto: Goran Stojić)



Slika 29. Reakcija karbonatnog veziva u istorijskom malteru sa HCl

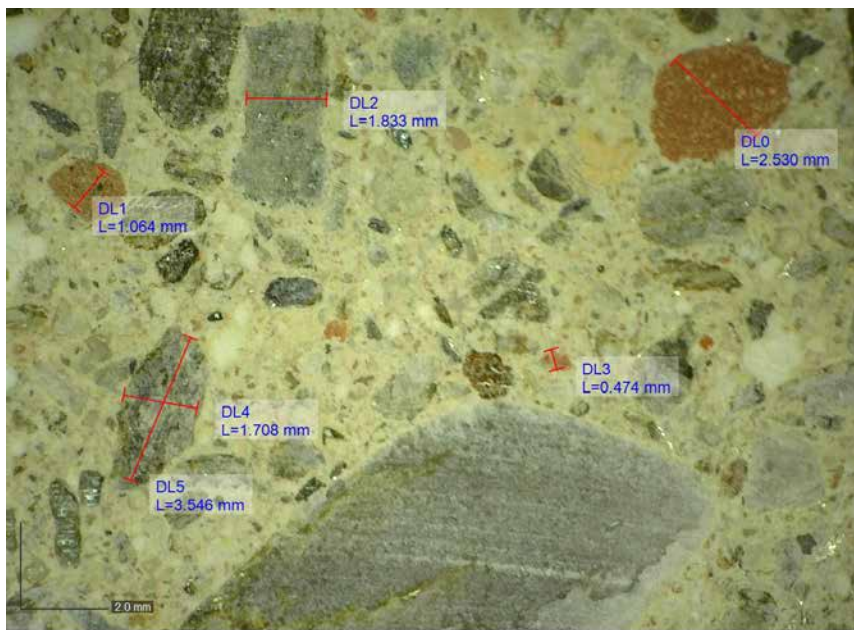
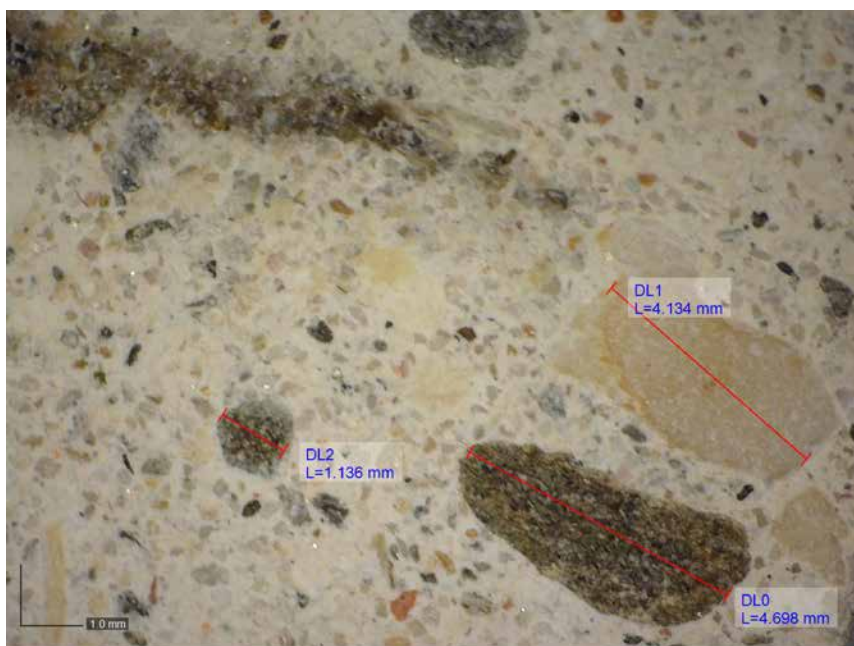
zastupljenost i distribuciju zrna agregata (homogenost), različite prekide u tkivu uzorka, broj i raspored slojeva, njihovu debljinu, teksturu i obojenost, kao i međusobni kontakt, procenjen zapreminski odnos vezivo–agregat, i prisustvo pigmenata. Tehnika se retko koristi kod ispitivanja istorijskih maltera, a primenjuje se, uglavnom, na malterima koji potiču iz perioda od XVIII do XX veka, odnosno kod ispitivanja klinkera portland cementa (jer je veoma korisna kod identifikacije različitih mineralnih hidrauličnih faza – C_2S , C_3S , C_4AF i dr.) (Elsen 2006: 1418), ali i u slučajevima dekorativnih maltera i potrebe identifikacije pigmenata (Arizzi, Cultrone 2021: 11). Većina karakteristika gore navedenih kao one koje se ispituju na poliranim presecima, kod istorijskih maltera se uglavnom procenjuje upotrebom stereomikroskopa u kombinaciji sa makroskopskim opažanjima, a na svežim, nepoliranim presecima maltera (**Slika 30**; **Slika 31**; **Slika 32**). Optička mikroskopija uz upotrebu propuštene svetlosti će biti prikazana u odeljku o ispitivanju mineraloško-petrografskog sastava maltera (2.3 Mineraloško-petrografski sastav maltera, *Polarizaciona svetlosna mikroskopija (PLM – polarised light microscopy)*).

58



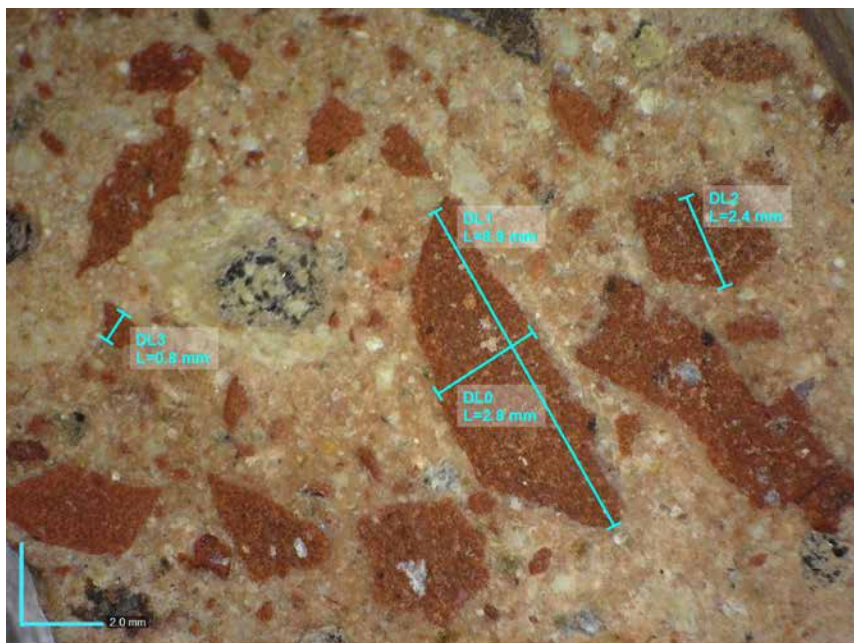
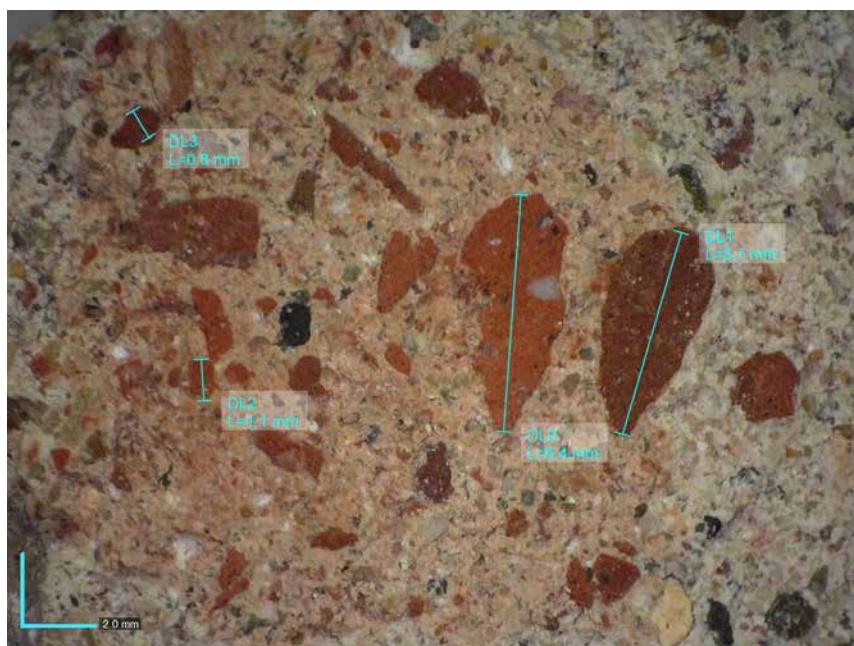
Slika 30. Zrna agregata u uzorcima maltera, prisutni razmernici 0,5 mm (gore) i 5 mm (dole)

59



Slika 31. Poprečni presek uzoraka maltera sa vidljivim odnosom zrna veličine ispod 1 mm i krupnijih zrna, prisutni razmernici 1 mm (gore) i 2 mm (dole)

60



Slika 32. Zrna drobljene opeke u poprečnim preseccima uzoraka maltera, prisutan razmernik 2 mm

Inkluzije. U malterima su često prisutne i različite inkluzije. Iako je njihova količina uglavnom mala, odnosno ne iznosi više od 2–3 % u odnosu na vezivo, one mogu da upute na tehnologiju izrade maltera ili na funkciju određenog maltera u nekoj strukturi. Inkluzije mogu biti neorganske prirode kao što su krečne ili glinene (grudvice), kao i ostaci školjki, i organske, kao što su čestice uglja, drveta, različita biljna vlakna i dr. (Stefanidou, Papayianni, Pachta 2012: 737). Prisustvo inkluzija je posledica različitih faktora: tehnologije pripreme malterske smeše, namere da se poboljšaju svojstva maltera, različitih slučajnosti nastalih usled prisustva nečistoća ili prirode sirovina upotrebljenih u izradi maltera, kao i usled nepažnje tokom rada (Pachta *et al.* 2014: 851–852; Stefanidou, Papayianni, Pachta 2012: 750; Станојловић 1992: 58; Nikolić, Rogić 2018: 43–45; Васић-Деримановић, Адамовић, Николић 2016: 161).

Krečne inkluzije, poznate u literaturi kao *lime lumps*, predstavljaju grudvice koje se često mogu naći u istorijskim malterima. U pitanju su bele ili bledožute grudvice, različitih oblika i dimenzija manjih od milimetra, ali i do 10 mm, a ponekad i veće. Najčešće su homogene, mogu biti veoma kompaktne, ali i dosta porozne i/ili ispucale (Hughes *et al.* 2001: 359–360) (**Slika 33; Slika 34; Slika 35**). Na osnovu analiza krečnih grudvica izdvojenih iz velikog broja uzoraka maltera različitih funkcija koji potiču iz spomenika datovanih od helenističkog perioda do ranog XX veka sa teritorije današnje Grčke, utvrđeno je da njihov sastav čini 80–90 % CaCO_3 (Stefanidou, Papayianni, Pachta 2012: 748). Karakteristika ovih inkluzija je da nakon prelaska CaO u CaCO_3 preuzimaju ulogu agregata. Njihovo prisustvo je često uzrok dobijanja previsokog sadržaja efektivnog veziva u malteru kod razdvajanja veziva od agregata postupkom rastvaranja u kiselini (Hughes, Leslie, Callebaut 2001: 359), o čemu će biti reči u odeljku o klasičnoj hemijskoj analizi (2.5 Hemijski sastav maltera, *Klasična hemijska analiza (mokra hemija)*).

Jan Elsen razlikuje tri tipa krečnih grudvica – nepečene i prepečene krečne grudvice i krečne grudvice „u užem smislu”. Prema ovom autoru, nepečeni fragmenti mogu dati informaciju o vrsti krečnjaka korišćenog za proizvodnju kreča, a time i o

hidrauličnosti kreča. Prepečeni odlomci su često delimično sinterovani komadi kreča, nastali kao posledica pečenja krečnjaka u tradicionalnim pećima u kojima postoje zone sa temperaturom dovoljnom za iniciranje sinterovanja kreča koji je slabo reaktivan, ali u malteru hidratiše i karbonizuje. Mineraloške analize ovih fragmenata mogu dati podatke o maksimalnim temperaturama pečenja (Elsen 2006: 1420). Grudvice „u užem smislu” često su zaobljene i porozne. Uzrok njihovog nastanka pretpostavlja se preko napred navedene upotrebe živog kreča u izradi maltera metodom *suvog gašenja*, odnosno gašenja kreča uz minimalnu upotrebu vode, odnosno vlažnog agregata (Knöfel 1991; Hughes, Cuthbert, Bartos 1999; Callebaut, van Balen 2000 u Elsen 2006: 1421). Neki autori su ostavili mogućnost da grudvice predstavljaju fragmente karbonatne skrame koja se formira na gašenom kreču tokom njegovog sazrevanja (Bruni, Cariati, Fermo *et al.* 1997 u Elsen 2006: 1421), međutim, ova pretpostavka se u poslednje vreme napušta (Copsey 2022: 201).

Poslednjih nekoliko decenija, sa povećanim istraživanjima tradicionalne tehnologije spravljanja krečnih maltera upotrebom tzv. vrućeg postupka (eng. *hot-mixing*), odnosno gašenja živog kreča tokom mešanja sa agregatom (o čemu će biti reči



Slika 33. Krečne inkluzije u uzorku maltera

63



Slika 34. Krečne inkluzije u uzorku maltera, kompaktne i homogene, prisutni razmernici 1 mm (gore) i 2 mm (dole)



Slika 35. Krečne inkluzije različitih veličina, oblika i homogenosti u jednom uzorku, prisutan razmernik 2 mm (gore); krečna inkluzija sa istaknutom pukotinom po sredini, prisutan razmernik 2 mm (dole)

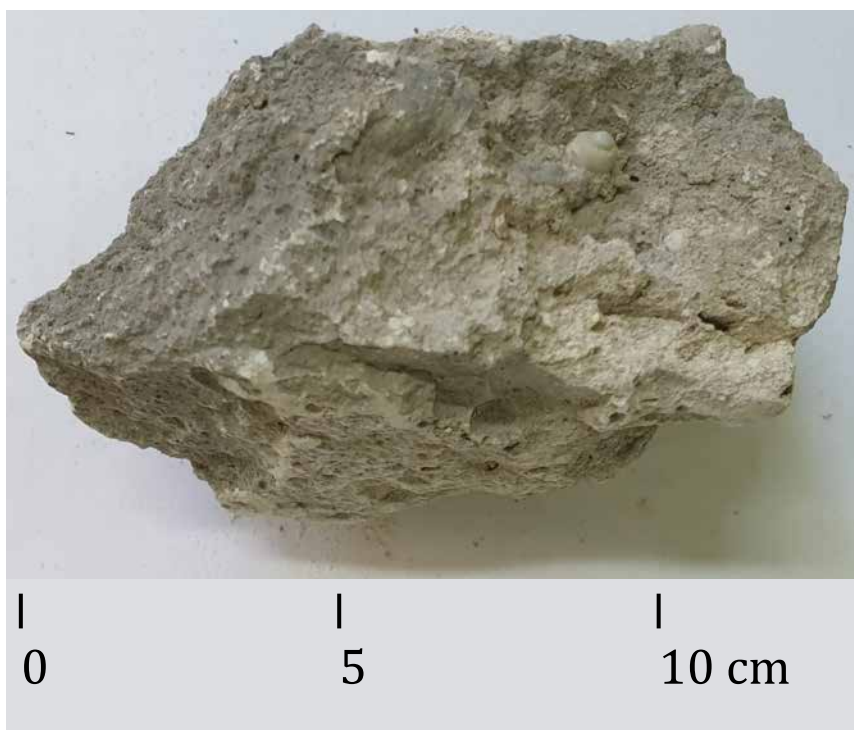
kasnije) (Moropolou *et al.* 1996; Balksten 2007; Margalha *et al.* 2011; Válek, Mataš 2013; Henry 2018; Copsey 2019a; Copsey 2019b; Copsey 2019c; Copsey 2019d; Köberle 2020; Pesce *et al.* 2021), dolazi se do pretpostavki da su upravo krečne grudvice u malterima najčešći dokaz upotrebe živog kreča prilikom pripreme maltera, a posebno posle pregleda istorijskih izvora (Copsey 2019b: 130, 158; Copsey 2019d: 49, 53–54, 95; Copsey 2022: 200–201). Savremena laboratorijska istraživanja istorijskih maltera podržavaju pretpostavku upotrebe živog kreča i *hot-mixing* tehnologije kao razloga postojanja krečnih grudvica (Midtgaard, Brajer, Taube 2020; Seymour *et al.* 2023). Što se tiče projekta *MoDeCo2000*, laboratorijski tehničari, ali i tradicionalni majstori pripremili su brojne mešavine maltera uz upotrebu živog kao i gašenog kreča u laboratoriji i na terenu. Utvrđeno je da se krečne grudvice pojavljuju u malterima bez obzira na postupak pripreme. Naredna istraživanja na ovu temu trebalo bi da obuhvate dublju analizu morfoloških i fizičkih svojstava ovih grudvica.

U uzorcima istorijskih maltera nekada se mogu sresti i školjke ili njihovi ostaci poreklom iz upotrebljenog agregata, što može pružiti podatke o mestu njegove eksploatacije (Stefanidou, Papayianni, Pachta 2012: 744, 749–750) (**Slika 36**).

Relativno često se u uzorcima istorijskih maltera mogu pronaći ostaci ugljena (uglja) (**Slika 37**). Ove čestice su zabeležene u 20 % ispitivanih uzoraka maltera svih epoha sa teritorije današnje Grčke. Prilikom njihovog mikroskopskog ispitivanja pokazano je da su različitih oblika, od uglastog do okruglog, u rasponu od 0,5 cm do 2 cm, te da ih karakteriše jaka veza sa vezivom. Na osnovu SEM-EDS analize utvrđeno je da je njihova struktura biljnog porekla, što je dovelo do pretpostavke da su verovatno bili izvor energije za pečenje krečnjaka, odnosno da u samom kreču predstavljaju nečistoće (Stefanidou, Papayianni, Pachta 2012: 747).

Neki drugi autori (Callebaut *et al.* 1999 u Ngoma 2009: 14) prisustvo ovih organskih ostataka takođe posmatraju kao posledicu postupka proizvodnje kreča, prilikom čega su komadi ugljena umešani u kreč tokom pečenja. Dalje, neki autori pokrenulo ovih organskih uklopaka tumače dvojako: ukoliko je njihova količina mala, smatraju da se radi o slučajnim ostacima

66



Slika 36. Školjke u uzorku maltera, prisutan razmernik 2 mm (gore); vidljivo golim okom (dole – Arhiva Laboratorije za kamen i agregat)

67



Slika 37. Čestice ugljena (uglja), prisutan razmernik 2 mm

goriva iz peći, drvenih podloga na kojima se meša malter ili čak zidarskog alata, dok velike količine ugljena objašnjavaju kao nameru da se malteru dâ tamnija boja (Ingham 2010: 148). Njihov procenat u uzorcima iz Grčke isuviše je mali (od 0,5 do 1 % količine veziva) da bi se posmatrale kao agregat dodat da olakša strukturu ili izmeni boju maltera (Stefanidou, Papayian-ni, Pachta 2012: 747). Primeri maltera iz Engleske koji potiču iz XIX veka ukazuju nam na namernu upotrebu otpadnog materijala, to jest pepela drveta i pepela uglja, kao i klinkera iz opekarskih peći i šljake u malterima kao agregata. Drobļjeni i mleveni sa krečom, davali su maltere tamnijih boja i blagih hidrauličnih svojstava (Henry, Stewart 2011: 57).

U istorijskim malterima mogu se pronaći i neki drugi ostaci različitih dodataka biljnog i životinjskog porekla. Na prostoru teritorije današnje Srbije, a prema iskustvu autorki ove monografije, to su najčešće bili biljni dodaci, pre svega slama i pleva, ređe mekinje žitarica i konoplja, dok od životinjskih ostataka srećemo životinjsku dlaku, vunu i dr. Javljaju se uglavnom u malterima za malterisanje (**Slika 38; Slika 39**). Komadići slame u napred navedenim uzorcima maltera sa teritorije Grčke obično se sreću kao isečeni, maksimalne dužine od 3 cm. Njihov udeo je često visok, od 1 do 5 %, posebno kada se radi o blatnim ili čistim krečnim masama koje ne sadrže agregat (Stefanidou, Papayianni, Pachta 2012: 746). U istorijskim malterima su, osim navedenih, pronalazena i različita druga biljna vlakna, dostupna na datoj lokaciji, kao što su kućina (lan, konoplja), vlakna tropskih drvenastih biljaka, juta i dr., dok se od vlakana životinjskog porekla, sreću najpre dlake govoda, ali i konja, magaraca i koza, retko i čoveka (suviše su slabe) (Henry, Stewart 2011: 64–65). U veoma starim malterima organski ostaci su se s vremenom uglavnom dezintegrisali, tako da se često sreću samo tragovi njihovog postojanja, odnosno njihovi otisci u vezivu.

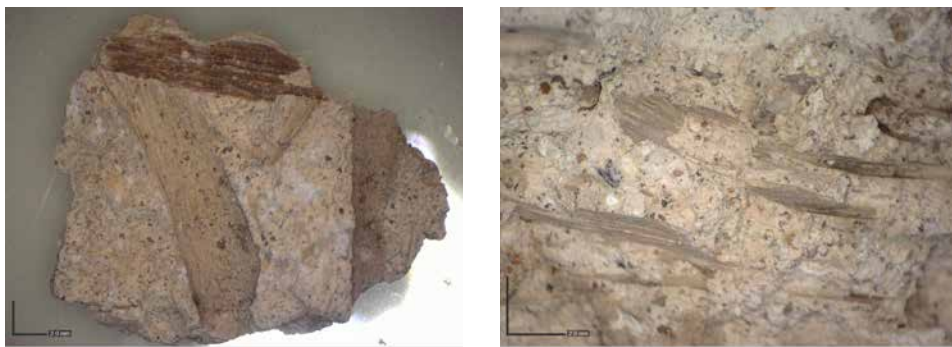
Uloga navedenih organskih vlakana, kada su korišćeni namerno, bila je poboljšanje mehaničkih svojstava maltera, kao što su savojna čvrstoća, fleksibilnost, umanjeње sklono-sti ka pucanju (Henry, Stewart 2011: 64), ali i otpornost na vremenske uslove. Organska vlakna kroz koheziju sa matriksom premošćuju pukotine koje nastaju i sprečavaju kolaps

69

samog materijala, a takođe često čine mrežu koja povećava koheziju između dva sloja maltera za malterisanje (Stefanidou, Papachristoforou, Kesikidou 2016: 423). Važna okolnost kod upotrebe ove vrste dodatka jeste i njihova dostupnost na mestu primene, pa se njihovo prisustvo uglavnom povezuje sa mestom na kome se nalazi građevina čiji ih malteri sadrže (Stefanidou, Papayianni, Pachta 2012: 750).



Slika 38. Tragovi biljnih vlakana u uzorcima istorijskih maltera za malterisanje vidljivi golim okom



Slika 39. Tragovi biljnih ostataka u uzorku maltera za malterisanje, prisutni razmernici 2 mm

Ostatke vlakana uglavnom srećemo u malterima za unutrašnje malterisanje zidova i plafona. Kod spoljnog malterisanja bi njihova upotreba napravila putanju za lako uvođenje vlage u malter, pa su u ovim malterima vrlo retke, ali ih povremeno nalazimo u spoljnim malternim spojnicama. Njihovo prisustvo je potvrđeno na mestima spojeva zidova i drvenih konstrukcija, kako bi se izbegle pukotine usled pomeranja

konstrukcije (Henry, Stewart 2011: 65). Nalazi ovih vlakana tokom projekta *MoDeCo2000* u malternim slojevima kod spoljnog malterisanja demantuju njihovo odsustvo u malterima ove funkcije, ali u nekim slučajevima mogu biti i indicija da su zidovi na kojima ih nalazimo možda originalno bili natkriveni ili bili deo unutrašnjih prostora. Većina projektnih uzoraka maltera sa vlaknima potiče sa zidova koji su nekada nosili slikanu dekoraciju. Iako tema projekta nisu bili dekorativni malteri dunavskog limesa (Rogić, Despotović, Milovanović 2008; Porić 2014; Nikolić, Rogić, Milovanović 2015), pa stoga oni nisu ni uzorkovani, uzeto je nekoliko uzoraka donjih slojeva ovih maltera sa površina na kojima su samo oni bili i očuvani, dok gornji i kasnije bojeni sloj nisu sačuvani. Oni su pripadali, prema ulaznim podacima, spoljnim površinama, ali sadrže tragove vlakana. Dalje, kod zidova građevina istraženih na dunavskom limesu u Srbiji može se pretpostaviti da su spojnice često dodatno ispunjavane istovremeno sa malterisanjem, potpuno istim malterom (koji je sadržao vlakna), pa ni prisustvo vlakana u malternim spojnica (Nikolić *et al.* 2016: 139–140) nije neobično u ispitanim uzorcima.

Boja. Određivanje boje svakog pojedinačnog uzorka istorijskog materijala važno je radi utvrđivanja estetske kompatibilnosti kod pripremanja modela za konzervaciju (SRPS EN 17187: 2021). Često korišćen način jeste onaj koji definiše boju ispitivanog uzorka prema boji standardnog uzorka dato u odgovarajućim vodičima ili katalogima boja po određenom sistemu. Najviše upotrebljavan u stručnoj i naučnoj praksi jeste Manselov sistem boja. Drugi način određivanja boje je instrumentalno merenje, odnosno upotreba kolorimetra, a definisan je i u standardu namenjenom merenju boja poroznih neorganskih materijala u kulturnom nasleđu, kao što su kamen, malter, opeka i dr. (SRPS EN 15886: 2016).

Katalozi standardnih uzoraka boja prema Manselovom vizuelnom sistemu (*Munsell Color Chart Books*) pripremljeni su za više različitih materijala. Tokom određivanja boja u okviru kompozicije istorijskog maltera upotrebljava se katalog za boje stena (*Munsell Rock Color Chart*), a s obzirom na prisustvo fragmenata opeke i drugih keramičkih proizvoda u malterima, značajan je i katalog za boje zemljišta (*Munsell Soil Color*

Chart), koji se u arheologiji koristi i tokom pregleda keramičkih proizvoda (Gerharz, Lantermann, Spennemann 1988).

Manselov sistem boja smislio je i razvio američki umetnik i inženjerski umetnik A. H. Mansel (A. H. Munsell, 1858–1918) krajem XIX i početkom XX veka. Istraživanja prethodnih naučnika koja su se bavila percepcijom boja, među kojima je i tema tri jednostavna svojstva boje koje direktno utvrđujemo okom, on je praktično iskoristio kroz njihovu vizualizaciju, tako što je ih ilustrovao u serijama standardnih kolornih tabli. U pitanju su sledeća svojstva: ton (*hue*), svetlina (*value*) i hroma (*chroma*) (Cooper 1921: 5–7, 23, 27, 32). Ova svojstva su definisana standardom (SRPS EN 15886: 2016) na sledeći način:

- hroma (*chroma*), kao „zasićenost boje pigmentom” i „osobina boje koja se koristi da ukaže na stepen njenog odstupanja od sive boje iste čistoće tona”;
- svetlina (*value*), kao „osobina kojom se opažena boja prosuđuje kako bi bila ekvivalentna nekoj od serije sivih u opsegu od crne do bele”, i
- ton (*hue*), kao „osobina vizuelne percepcije prema kojoj zona izgleda slično jednoj od boja, crvenoj, žutoj, zelenoj i plavoj, ili kombinaciji odgovarajućih parova ovih boja posmatranih u zatvorenom prstenu”.

Manselov sistem razlikuje pet glavnih tonova (*hue*): crvenu (R), ljubičastu (P), plavu (B), zelenu (G) i žutu (Y) i pet tonova između njih: crvenoljubičastu (RP), ljubičastoplavu (PB), plavozelenu (BG), zelenožutu (GY) i žutocrvenu (YR). Svaki od navedenih deset tonova ima po deset *koraka* koji se označavaju brojevima, pa sistem prepoznaje ukupno 100 tonova. Svetlina (*value*), odnosno stepen svetlosti ili zatamnjenosti u odnosu na neutralnu skalu sive, kreće se u granicama od teoretski apsolutno crne (oznaka 0) do teoretski apsolutno bele (oznaka 10). Hroma (ili zasićenost) (*chroma*) čistoća je boje, odnosno stepen zasićenosti boje, od neutralno sive (oznaka 0) do najživlje, tj. „čiste” boje (oznaka je uglavnom 14, nekada i preko 20, a fluorescentne boje idu i do 30, pa tačno određen kraj skale ne postoji) (Munsell Color Company, Inc. 1970; Munsell 2022). U skladu sa navedenim, na primer, odrednica boje jednog isto-

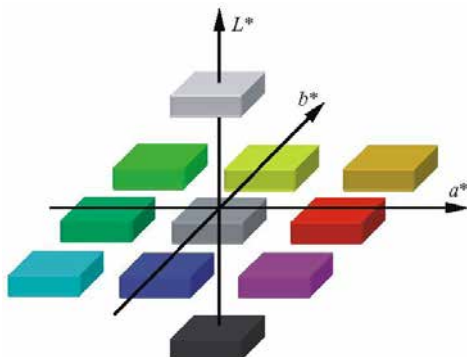
rijskog maltera istraženog tokom projekta *MoDeCo2000*, odnosno *10YR 8/2 Very Pale Orange*, znači da ona ima sledeće vrednosti: *hue* = 10 YR; *value* = 8; *chroma* = 2, a da je njen naziv *Very Pale Orange* (**Slika 40**). Važno je i napomenuti da se razlikuju odrednice boje za mokar i suv uzorak, pa na primer kod stena vlažni uzorci uglavnom imaju smanjenu svetlinu, ali im se hroma ne menja (Munsell Color 2009). S obzirom na subjektivnost određivanja boje poređenjem sa katalogom, istraživači ispituju modele unapređivanja procesa prema Manselovom sistemu kroz upotrebu elektronskih uređaja i različitih softvera (Milotta *et al.* 2018; Nadi *et al.* 2023).



Slika 40. *Munsell Rock Colour Chart*, primer stranice kataloga uz uzorak maltera

Što se tiče kolorimetrije, kako navodi standard (SRPS EN 15886: 2016), određivanje boje površine se instrumentalno vrši kvantifikacijom boje izraženom numerički prema trihromatskom sistemu koji je definisala Međunarodna komisija za osvetljenje (International Commission on Illumination – CIE), odnosno CIE $L^*a^*b^*$ sistemu (**Slika 41**). Ovaj sistem predstavlja *prostor boja* u kome je svaka boja vidljivog opsega prikazana trima koordinatama. Kao koordinate, ovim standardom su definisane:

- L^* – koordinata svetline; skala od 0 (crna) do 100 (bela);
- a^* – crvena/zelena koordinata; $+a^*$ udeo crvenog, $-a^*$ udeo zelenog;
- b^* – žuta/plava koordinata; $+b^*$ udeo žutog, $-b^*$ udeo plavog.



Slika 41. L * a * b prostor boja (preuzeto iz SRPS EN 15886: 2016)

Prema navedenom standardu, za merenje boje se uglavnom koriste tristimulus kolorimetri ili spektrofotometri za merenje reflektanse. Merenje se obavlja na uzorcima dovoljno velikim da prelaze granice merne zone instrumenta. Površina za ispitivanje mora reprezentovati boju uzorka, biti poravnata po potrebi i očišćena. Kako bi se obezbedila prosečna vrednost, merenje se obavlja na, ukoliko je moguće, najmanje pet mernih pozicija. Prečnik merne oblasti mora odgovarati vrsti ispitivanog materijala i veličini uzorka, pa je za ispitivanje heterogenih površina potrebno vršiti merenje na što većim oblastima (SRPS EN 15886: 2016) (**Slika 42**).



Slika 42. Kolorimetrijsko ispitivanje boje uzorka maltera

2.3 MINERALOŠKO-PETROGRAFSKI SASTAV MALTERA

Metode mineraloških ispitivanja materijala su brojne, ali se one najčešće primenjivane mogu podeliti u četiri osnovne grupe: optičke i rendgenske metode, te metode elektronske mikroskopije i spektroskopske metode (Erić 2019: 1–2). Najznačajniji rezultati ispitivanja dobijaju se kombinovanjem ovih metoda.

Petrografska ispitivanja su veoma važna jer se jedino njima, u odnosu na sve druge analitičke tehnike, može izvršiti adekvatno razlikovanje očuvanog originalnog od degradiranog materijala, a mogu se dobiti i podaci o mikrostrukturi maltera (Henry, Stewart 2011: 208). Kompleksnost ovih ispitivanja zavisi od informacije koju želimo da dobijemo. Prvi i osnovni korak je pregled strukture na terenu, koji nekada može biti i dovoljan za dobijanje željenih informacija. Drugi korak daje dodatne, nešto složenije informacije koje dobijamo u laboratoriji pomoću ručne lupe, optičkog mikroskopa i jednostavnih testova fizičkih svojstava. Međutim, identifikacija nekih minerala i sitnozrnih materijala traži detaljniju pripremu uzorka kako bi se upotrebila sofisticiranija oprema kao što su petrografski polarizacioni mikroskop, skenirajući elektronski mikroskop sa energetsko-disperzivnim spektrometrom (SEM-EDS) i rendgenski difraktometar (XRD). U slučaju potrebe za dodatnim kvantitativnim informacijama, uključuju se kvantitativne ili modalne analize, od određivanja granulometrije agregata do dobijanja složenih slika pomoću specijalnih softvera, a uzorke možemo i forenzički ispitivati (lom ili oštećenje, prisustvo određenih hemijskih primesa), uz upotrebu specijalizovane opreme (Poole, Sims 2016: 3–4).

Polarizaciona svetlosna mikroskopija (PLM – polarised light microscopy)

Polarizaciona svetlosna mikroskopija, odnosno optička mikroskopija uz upotrebu propuštene polarizovane svetlosti (SRPS EN 17187: 2021) predstavlja osnovnu metodu kojom se preko optičkih karakteristika vrši identifikacija minerala

(Erić 2019: 3). Predložene metodologije karakterizacije maltera ovu metodu predstavljaju kao prvi korak u identifikaciji korišćenog agregata, različitih mineralnih dodataka, tipa veziva i čestica povezanih sa njim, u opisivanju strukture pora i dr. (Elsen 2005: 1417–1421).

Predmetna metoda je zasnovana na tome da svaki mineral ima svoje specifične optičke karakteristike u polarizacionom mikroskopu, po kojima se razlikuje od drugih minerala. Tako se minerali u nekom petrografskom preparatu mogu kvalitativno i semikvantitativno identifikovati pomoću polarizacionog mikroskopa (Erić 2019: 4).

Mineralogija agregata maltera odražava njegovo geološko poreklo i može dati dragocene informacije o izvoru korišćenih materijala. Identifikacija minerala, ali i prikupljanje drugih zapažanja u istraživanju istorijskih maltera, vrše se na isti način kao i ispitivanja koja se koriste u standardnim petrografskim metodama prilikom geoloških ispitivanja (Elsen 2008: 1418). Petrografsko ispitivanje maltera upotrebom polarizacione mikroskopije vrši se ispitivanjem petrografskih preparata u skladu sa standardom za prirodni kamen (SRPS EN 12407: 2019). Kvalitativna analiza se koristi kako bi se utvrdili prisustvo i opšti prostorni raspored neke materije u uzorku, dok se kvantitativnom analizom mere količina materije i njen specifičan prostorni raspored u uzorku (Echlin 2009: 201).

Prvi petrografski preparat je pripremio ser Henri Klifton Sorbi (Sir H. C. Sorby, 1826–1908), godine 1849, a nakon unapređenja mikroskopa iz XVI veka, izuma prizmi za dobijanje polarizovane svetlosti 1828. godine, kao i nešto ranijeg razvoja preparata minerala i čvrstih supstanci za koje su zaslužni drugi istraživači. Prvi petrografski mikroskop koji je koristio polarizovanu svetlost izložio je Dž. L. Smit (J. L. Smith, 1818–1883) na Velikoj izložbi 1857. godine. Njegova prva primena u ispitivanju cementnih klinkera se obično pripisuje H. L. le Šateljju (H. L. Le Chatelier, 1850–1936), 1882. godine. Međutim, tek nakon dostupnosti komercijalno proizvedenih epoksidnih smola od 1946. godine izrada preparata maltera i betona je postala praktična, a proces izrade preparata za ispitivanje betona na petrografskom polarizacionom

mikroskopu postao je rutinski tek tokom šezdesetih godina XX veka (Judd 1908; Poole, Sims 2016: 2–3).

Petrografski preparat je prema standardu (SRPS EN 12407: 2019) fragment materijala (kamen, malter, keramika, beton i sl.) debljine oko 30 μm . Pripremljen je tako da kroz njega prolazi svetlost, i to tako da svi minerali posmatrani kroz polarizacioni mikroskop pokazuju svoje karakteristične osobine (na primer: reljef, boje polihroizma, interferentne boje i dr.). Priprema preparata je proces koji zahteva mnogo pažnje (**Slika 43**). Postupak prema standardu, ali i iskustvu Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS, započinje tako što se od komada maltera dijamantskom testerom odseče deo veličine $\pm 4\text{--}5\text{ cm} \times \pm 3\text{--}4\text{ cm} \times \pm 3\text{--}4\text{ mm}$, a zatim suši i impregnira u rastvoru šelaka (prirodne smole) u alkoholu. Nakon toga se zagrejanim termostabilnim lepkom uzorak lepi na staklenu pločicu, tzv. predmetno staklo, uglavnom veličine 28 mm \times 48 mm \times 1,8 mm. Kod maltera sa krupnozrnijim agregatom predmetna stakla mogu biti i veća (na primer 75 mm \times 50 mm) ili se može napraviti nekoliko preparata uobičajenih dimenzija. Debljina ovako pripremljenog komada maltera smanjuje se postupkom brušenja i poliranjem na staklenoj ploči pomoću abrazivnih materijala različitih finoća, sve dok se ne dobije željena debljina. Sve vreme se debljina uzorka proverava, pri čemu se kontrolišu polarizacione boje odbačenog referentnog minerala. Konačno, završeni preparat u kome su postignute propisane boje pokriva se drugom staklenom pločicom, tzv. pokrovnim staklom, veličine 24 mm \times 32 mm, koja se lepi kanada balzomom, prirodnom smolom stalnog indeksa prelamanja $n \sim 1,54 (1,537 \pm 0,003)$.

Nakon pripreme preparata vrši se njihovo ispitivanje pod mikroskopom (**Slika 44; Slika 45**). Standard za karakterizaciju maltera u kulturnom nasleđu (SRPS EN 17187: 2021) navodi da ispitivanje petrografskih preparata maltera može da pruži informacije o: kontaktu između slojeva; zapreminskom odnosu vezivo–agregat; prirodi veziva; prisustvu zrna veziva koje nije reagovalo, zaostalih zrna klinkera ili drugih elemenata (šljake, itd.); prirodi agregata; veličini i rasporedu zrna agregata; karakteristikama makropora (veličina, geometrija); prisustvu mikrofraktura (gubitak materijala);



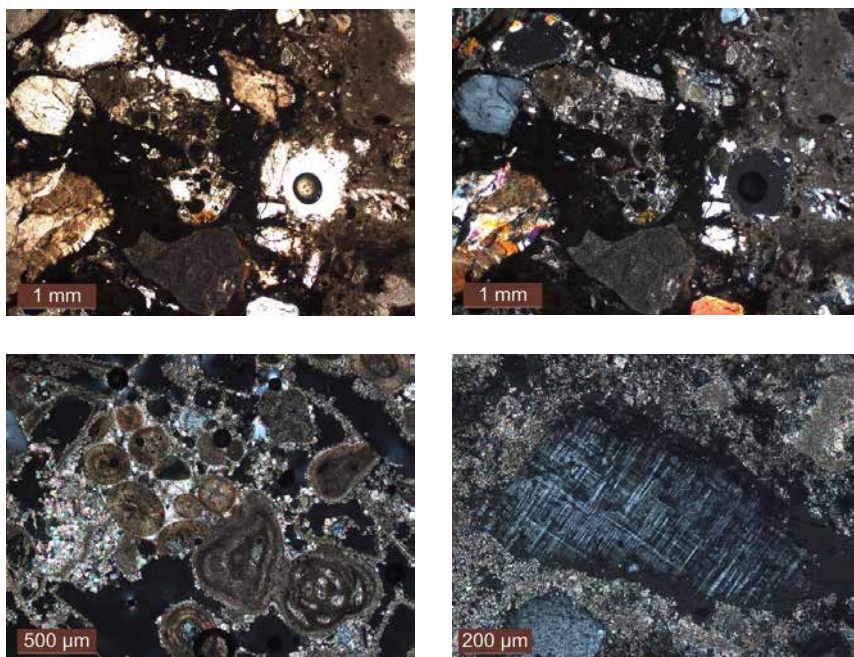
Slika 43. Sečenje uzorka za pripremu petrografskog preparata (gore levo); brusna ploča (gore desno); uzorak maltera zalepljen za predmetno staklo i pripremljen za brušenje (sredina); izbrušen uzorak – pripremljen preparat (dole)



Slika 44. Polarizacioni mikroskop za ispitivanje petrografskih preparata maltera (levo) i stereomikroskop (desno)

prisustvu dodataka/primesa; novoformiranim produktima. Ispitivanje često omogućava i zaključke o vrsti i načinu primene tehnologije za izradu istorijskih maltera, pa na osnovu strukture vazdušnih šupljina saznajemo o načinu mešanja maltera, preko teksturnih i kompozicionih karakteristika upoznajemo tehnologiju proizvodnje kreča i maltera i dr. (Balksten *et al.* 2019: 455–456).

Prednost polarizacione mikroskopije su jednostavnost i brzina, a nedostaci su nemogućnost kvantitativnog određivanja prisustva mineralnih faza i dobijanja podataka o hemijskom sastavu, kao i njena destruktivna priroda (Erić 2019: 4).

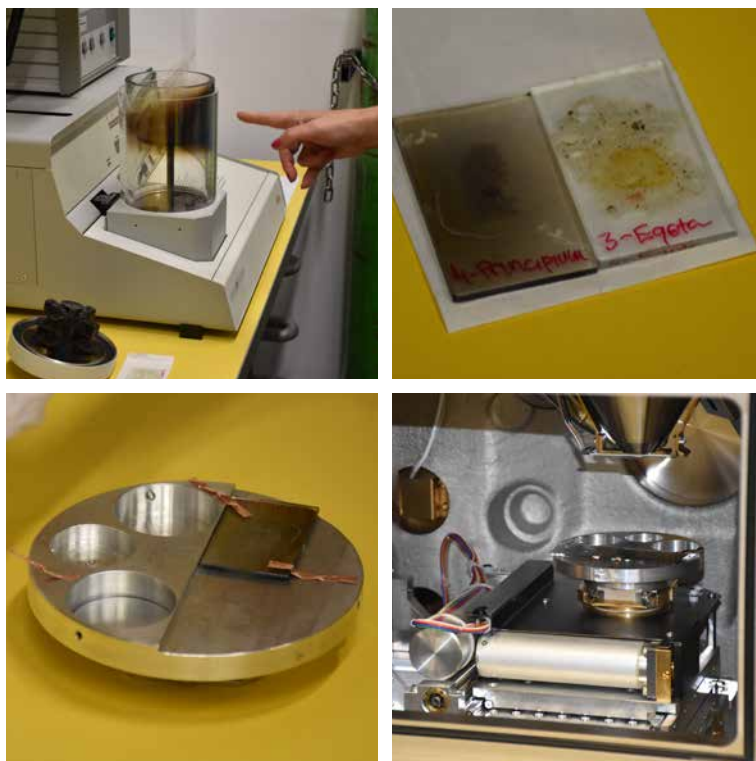


Slika 45. Mikrofotografije petrografskog preparata maltera (snimak: prof. dr Kristina Šarić)

Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM – scanning electron microscopy)

Počeci skenirajuće elektronske mikroskopije tokom tridesetih i četrdesetih godina XX veka doneli su izuzetan napredak u istraživanjima mikrostrukture, sastava i osobina materijala u konsolidovanom obliku. Prve slike skenirajućim elektronskim mikroskopom površina ovih materijala napravio je M. Nol (M. Knoll, 1897–1969) 1935. godine. M. fon Arden (M. V. Ardenne, 1907–1997) 1938. godine upostavio je osnovne principe ove mikroskopije, a 1942. godine V. K. Zvorkin (V. K. Zworkyn, 1888/1889–1982) sa timom pravi skenirajući elektronski mikroskop (SEM), koji u poređenju sa već postojećim transmissionim elektronskim mikroskopom (TEM) nije bio zadovoljavajući u pogledu rezolucije. Ser Č. V. Outli (Sir C. W. Oatley, 1904–1996) sa svojim studentima u Kembridžu 1948. godine gradi unapređen skenirajući elektronski mikroskop, koji nakon daljih unapređenja postaje komercijalno dostupan 1965. godine. Od tada se tehnika konstantno razvija i napreduje (Stokes 2008).

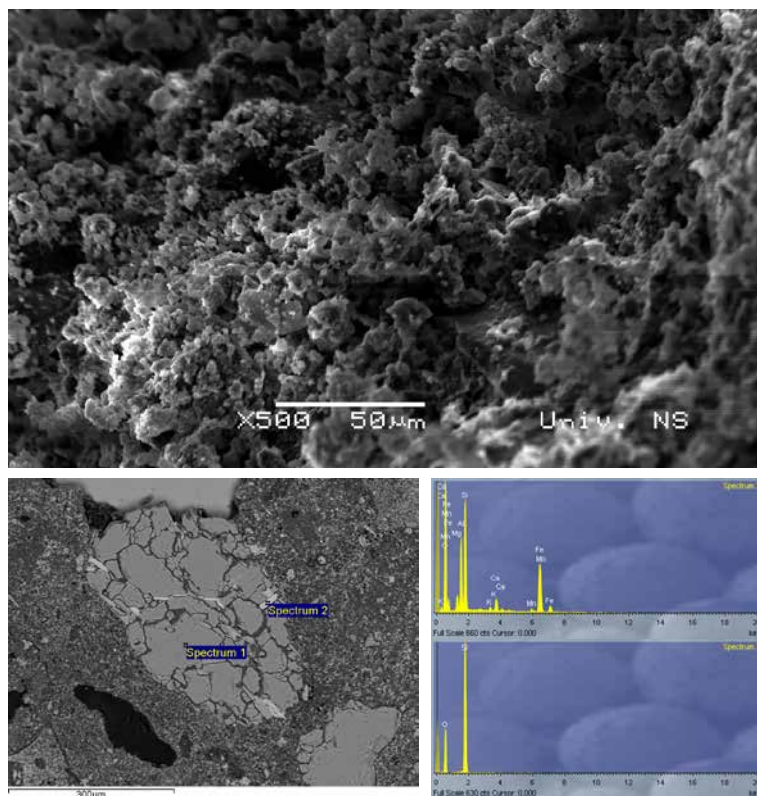
Transmisioni elektronski mikroskop (TEM) nudi izuzetno visoke rezolucije i uvećanja, ali se veoma retko koristi u ispitivanjima istorijskih maltera, pa dalje neće biti detaljnije prikazan (Poole, Sims 2016: 24–25). Kombinacijom skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) sa mikroanalizama dobijenim zahvaljujući karakterističnom rendgenskom zračenju nastaju tehnike SEM-EDS, SEM-EDX i SEM-EDAX (Henry, Stewart 2011: 211). Svaki uzorak koji se ispituje SEM tehnikom mora biti pažljivo pripremljen (Echlin 2009: 2). Uzorci moraju biti čvrsti, ali i elektroprovodni – u suprotnom se moraju prekriti nekim provodnikom (Erić 2019: 10). Ovo je upravo slučaj sa stenama, mineralima i građevinskim materijalima među kojima su krečni malteri, kao neorganski materijali koji su loši provodnici (Echlin 2009: 3; Goodhew, Humphreys, Beanland 2001: 139) **(Slika 46)**.



Slika 46. Priprema uzorka za SEM-EDS analizu i postavka u uređaj Laboratorije za SEM Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

81

Skenirajuća elektronska mikroskopija se koristi za posmatranje čestica čvrstih materijala u okviru od milimetarske do nanometarske skale, sa mogućnošću uvećanja do 300.000 puta (Erić 2019: 9). Deo mikroskopa pod nazivom elektronski top daje snažan izvor elektrona kojima se bombarduje površina uzorka. Emitovani elektroni u interakciji sa elektronima u uzorku proizvode: sekundarne elektrone, povratno rasute elektrone i rendgensko zračenje (Erić 2019: 10). SEM kombinuje slike u visokoj rezoluciji sa velikom dubinskom oštrinom, zahvaljujući kratkim talasnim dužinama elektrona i njihovoj mogućnosti da budu fokusirani upotrebom elektrostatičkih i elektromagnetnih sočiva (Stokes 2008: 1). Nastanak slike u mikroskopu se prilično razlikuje od istog procesa u optičkom mikroskopu, jer se slika stvara postepeno tokom skeniranja (Goodhew, Humphreys, Beanland 2001: 133) (Slika 47).



Slika 47. SEM mikrosnimak svežeg preseka uzorka maltera (gore); poliranog uzorka maltera (dole levo) sa EDS spektrima mineralnih faza predmetnog poliranog uzorka (dole desno)

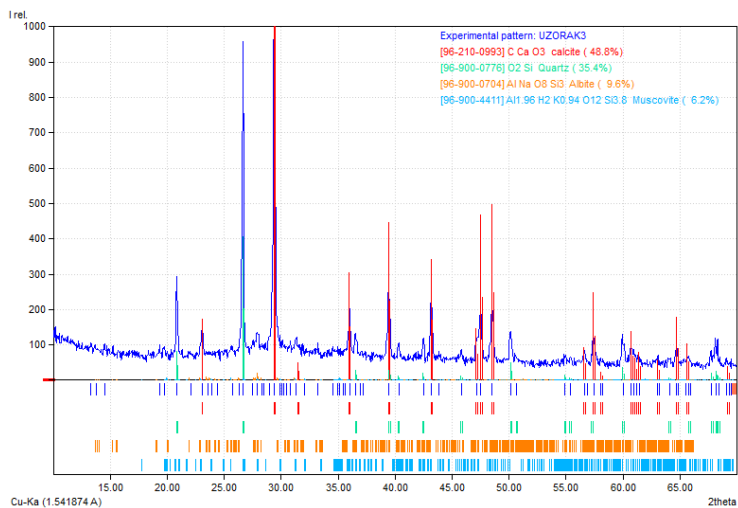
SEM uređaj se može koristiti za utvrđivanje poroznosti usled mogućnosti dobijanja slika visoke rezolucije, snimajući različite veličine pora i njihovu tačnu geometriju (Stefanidou, Pavlidou 2018: 3). Prednosti SEM metode jesu mogućnost određivanja karakteristika minerala koji se nalaze u okviru sitnozrnih agregata, kao i to što i kod nepoliranih uzoraka dobijamo slike izuzetne dubinske oštine (Erić 2019: 11). Uz spektrometar (EDS ili WDS), skenirajućom elektronskom mikroskopijom se mogu utvrditi mikrostrukturalne i morfometrijske karakteristike maltera, izvršiti kvantitativne elementarne analize i mapiranje elemenata (SRPS EN 17187: 2021). Kod grubih površina uzoraka SEM-EDS uređajem se mogu analizirati veličine čestica, morfologija površine, kao i frakture, dok se na poliranim površinama može dobiti hemijski sastav prisutnih faza (Stutzman 2000: 60).

Rendgenska difrakcija (XRD)

Prvi eksperiment upotrebom difrakcije X-zraka izveden je 1912. godine. Od tada XRD metoda neprestano napreduje, pa iako prvobitno primenjivana samo na kristalnim strukturama posmatranim kao idealnim, danas se koristi prilikom analize bilo kog materijala koji ima sposobnost difrakcije X-zraka (Lavina, Dera, Downs 2014: 1).

Nakon mlevenja uzorka na čestice manje od 50 μm , i njegove dalje pripreme, uzorak se analizira u uređaju koji se naziva difraktometar (St John, Poole, Sims 2016: 33). Osnovni delovi difraktometra su izvor zračenja, držač uzorka i detektor zraka. Generisanje rendgenskih zraka u katodnoj cevi nastaje zagrevanjem volframskog vlakna (katoda) kako bi ono proizvelo elektrone; ubrzavanja elektrona ka metalnoj meti (anodi) koja postaje izvor rendgenskog zračenja (Kumar, Kumbhat 2018: 181). Kada se snop generisanih rendgenskih zraka usmeri na uzorak, dolazi do difrakcije sa kristalnih rešetki prisutnih faza. Difrakcija nastaje samo ako je zadovoljen Bragov zakon (ukoliko je fazna razlika jednaka celobrojnom umnošku talasnih dužina zraka – $n\lambda = 2d \cdot \sin\theta$) (Erić 2019: 5–6). Difraktometar meri uglove pod kojima je došlo do difrakcije (Callister, Jr., Rethwisch 2018: 90). Dijagram praha, odnosno difrakto-

gram sastoji se od niza pikova različitog intenziteta i položaja; svaka kristalna faza ima svoj karakteristični difraktogram, pa se poređenjem podataka difraktograma dostupnih u bazama, a koji se koriste kao standardi, identifikuju materijali tokom ispitivanja ovom tehnikom (Erić 2019: 6) (**Slika 48**).



Slika 48. Difraktogram uzorka maltera sa detektovanim mineralnim fazama

Metodom rendgenske difrakcije (XRD – *X-ray diffraction*) direktno se identifikuju kristalne faze u analiziranom materijalu (Poole, Sims 2016: 33). Najčešće se koristi za identifikaciju nepoznatih kristalnih materijala, kao što su minerali i neorganska jedinjenja. Njen napredak je mnogo uticao na razvoj geoloških istraživanja, s obzirom na to da pruža informacije o strukturama, fazama, prevlađujućoj teksturi (orijentaciji kristala) i dr. (Bunaciu, Udriștioiu, Aboul-Enein 2015: 289–290, 295).

Prednosti metode su brza identifikacija nepoznatih minerala, uglavnom nedvosmisleno određivanje minerala, minimalna priprema uzorka i relativno jednostavna interpretacija podataka (Bunaciu, Udriștioiu, Aboul-Enein 2015: 290). Njeni nedostaci se ogledaju u tome što bolje identifikuje minerale kod homogenih i jednofaznih materijala, što je za polikristalne materijale granica detekcije minerala oko 2 % njegovog prisustva u uzorku, kao i što može doći do preklapanja pikova (Bunaciu,

Udriștioiu, Aboul-Enein 2015: 290). XRD metoda zahteva postojanje kristalne materije, odnosno njene dovoljne količine u ispitivanom uzorku, što nije uvek slučaj, a limitirana je i u slučaju postojanja amorfne materije (Erić 2019: 7).

Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR)

Otkriće da zračenje postoji izvan vidljivog spektra, zasluga je ser V. Heršela (Sir W. Herschel, 1738–1822), koji je nakon eksperimenta izvedenog 1800. godine došao do saznanja o infracrvenom zračenju (Barr 1961: 1). Osnove savremene infracrvene spektroskopije sa Furijeovom transformacijom (FTIR) nastale su krajem XIX veka, kada je A. A. Mikelson (A. A. Michelson, 1852–1931) konstruisao interferometar (1881. godine), a zatim su nešto kasnije dobijene interferograme naučnici povezali sa matematičkom operacijom poznatom kao Furijeova transformacija (Perkins 1986: A5; Albert, Keppeler Albert, Quack 2011: 967). Malo primenjivana, ova tehnika je svoj uspon doživela tek više decenija kasnije uz razvoj digitalnih računara koji su mogli da izvedu operaciju brzo i ekonomično (Perkins 1986: A5). Tako su komercijalni uređaji od osamdesetih godina XX veka doneli veliki proboj u primeni ove tehnike (Albert, Keppeler Albert, Quack 2011: 967).

FTIR tehnika se zasniva na interakciji infracrvenog zračenja i ispitivanog uzorka materijala (Erić 2019: 17). Skoro svako jedinjenje koje ima kovalentne veze, bilo organsko ili neorgansko, apsorbuje različite frekvencije elektromagentnog zračenja u infracrvenom opsegu elektromagnetnog spektra (Pavia, Lampman, Kriz 2001: 13). Energija apsorbovana od strane molekula uzrokuje promene u njihovim vibracionim i rotacionim energetskim nivoima (Erić 2019: 17). Drugim rečima, FTIR uređaj meri koliko infracrvenog zračenja apsorbuje uzorak u odnosu na talasnu dužinu zračenja, gde su apsorbovane dužine karakteristične za molekularnu strukturu uzorka (Poole, Sims 2016: 34). Infracrveno zračenje se široko odnosi na deo elektromagnetnog spektra između vidljivog dela i mikrotalasa. Najkorisniji deo za analizu hemičara jeste interval između 4000 i 400 cm^{-1} . Čak i najjednostavniji molekul daje veoma složeni

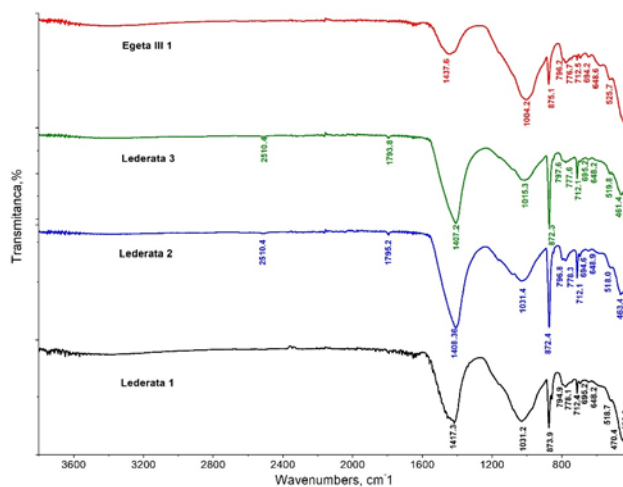
spektar i skoro je nemoguće da dva jedinjenja, osim u slučaju enantiomera³ daju potpuno isti IR spektar (Silverstein, Webster, Kiemle 2005: 72).

Instrument koji određuje spektar apsorpcije kod jedinjenja zove se infracrveni spektrometar, odnosno spektrofotometar, čija se dva tipa uglavnom koriste u organskoj hemiji – disperzivni i instrument sa Furijeovom transformacijom (FT). Oba daju skoro isti spektar za određeno jedinjenje, ali FT spektrometri obezbeđuju infracrveni spektar mnogo brže (Pavia, Lampman, Kriz 2001: 20). U današnje vreme, disperzivni spektrometri, kao prvobitna varijanta IR spektrometara, koji su razlagali pojedinačne frekvencije koje emituje izvor svetlosti pomoću prizme kao disperzionog elementa, skoro da se više i ne koriste. Kod modernijih FTIR spektrometara, ne vrši se razlaganje svetlosti, pa nema ni prizme. Kod njih, polihromatska svetlost od izvora dolazi do polupropustljivog ogledala, a ono dalje polovinu zračenja propušta ka pokretnom, a drugu polovinu reflektuje na fiksno ogledalo. Zraci se zatim reflektuju od ogledala, vraćaju na polupropustljivo ogledalo i usmeravaju dalje ka detektoru, tokom čega dolazi do njihove interferencije, koja zavisi od dužine pređenog puta. Signal na detektoru se preko Furijeove transformacije prevodi iz prostornog u frekventni domen i kao rezultat dobijamo spektar koji predstavlja zavisnost intenziteta zračenja od frekvencije (Jović 2021: 20–21, 23) (**Slika 49**).

U mineralogiji se IR tehnikom vrši identifikacija mineralnih faza i kvantitativno određivanje faznog sastava (Erić 2019: 17). Ovom tehnikom se mogu identifikovati organske i neorganske supstance u sva tri agregatna oblika (Hromiš 2015: 42). Za ove potrebe se može vršiti i upotreba gasne hromatografije (Henry, Stewart 2011: 213).

Kod FTIR tehnike konverzija podataka iz analognog u digitalni oblik omogućava kasniju jednostavnu manipulaciju podacima, rezultati više snimanja se kombinuju, a mogu se dobiti izuzetni spektri i kod analize veoma malih uzoraka (Silverstein, Webster, Kiemle 2005: 79).

³ Jedinjenja istih hemijskih i fizičkih osobina, ali različite konfiguracije – kao lik i odraz u ogledalu.



Slika 49. FTIR spektar četiri uzorka maltera sa karakterističnim trakama mineralnih faza (Ilić *et al.* u pripremi)

Ramanska spektroskopija

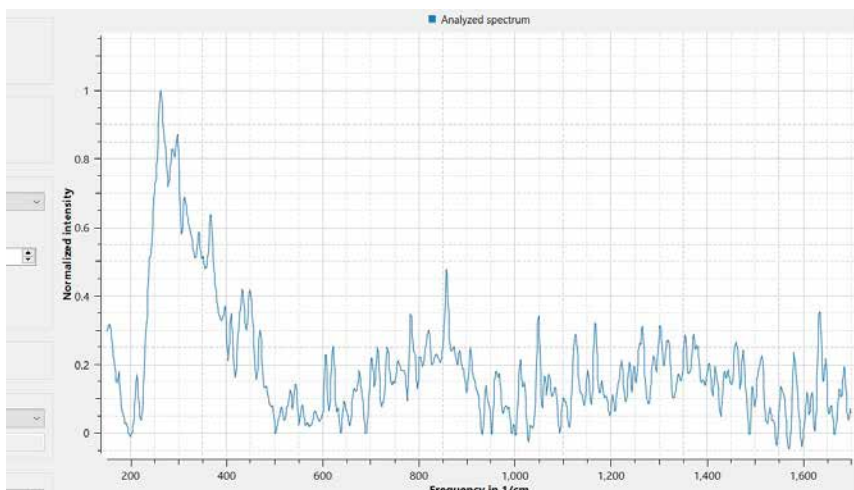
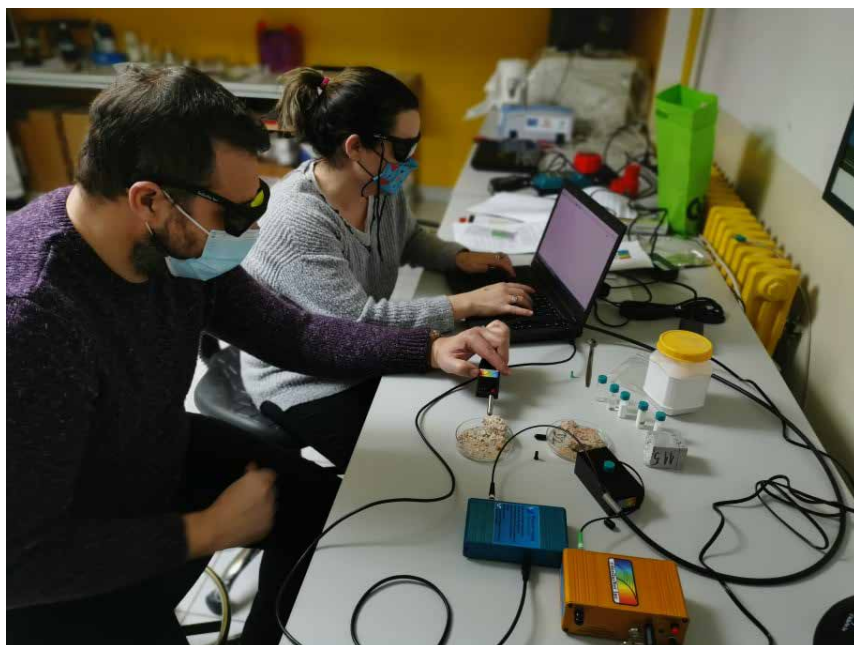
Spektroskopske tehnike molekularne analize (ili određivanja molekularnog sastava) zasnovane su na procesima apsorpcije infracrvenog zračenja i Ramanovog rasejanja. Donose nam podatke o hemijskim strukturama i fizičkim formama, identifikaciju supstanci iz karakterističnog spektra, i određuju kvantitativno ili semikvantitativno količinu supstance u uzorku. Njima se mogu ispitati čvrsta tela, tečnosti ili gasovi, kao hladni ili vrući, kao celi uzorci, mikroskopske čestice, ili samo njihovi površinski slojevi (Smyth, Dent 2005: 1).

Godine 1923. A. Smekal (A. Smekal, 1895–1959) teorijski je postavio fenomen – efekat neelastičnog rasejavanja svetlosti po materiji (Smyth, Dent 2005: 2). Eksperimentalna potvrda je sprovedena na kristalima 1928. godine, a odmah zatim i na molekulima. Ovu drugu izveli su Č. V. Raman (C. V. Raman, 1888–1970) (po kome je tehnika dobila ime) i K. S. Krišnan (K. S. Krishnan, 1898–1961), koji su za svoj naučni doprinos 1930. godine dobili Nobelovu nagradu iz fizike (Лазаревић 2019: 15). Eksperiment je izveden uz upotrebu fokusirane sunčeve svetlosti i filtera i bio je zasnovan na vizuelnom osmatranju promena boja u rasejanoj svetlosti. Tek šezdesetih godina XX veka, nakon razvoja komercijalnih lasera – izvora monohro-

matske svetlosti sa kontinualnim režimom rada, upotreba tehnike se izuzetno povećava (Gardiner 1989: 1–2).

Kada foton vidljive svetlosti, suviše male energije da pobudi elektronski prelaz, reaguje sa molekulom, može biti rasejan na tri načina: elastično – uz očuvanje svoje energije, i neelastično – predavanjem energije molekulu ili oduzimanjem energije od molekula (Gardiner 1989: 2). Kroz analizu neelastične komponente svetlosti saznajemo vibracionu strukturu materijala, a daljom interpretacijom vibracionih spektara identifikujemo strukturu i dobijamo podatke o osobinama ispitivanog materijala (Lazarević 2019: 15). Tipičan ramanski spektrometar se sastoji od izvora zračenja – lasera, filtera koji propušta rasejano zračenje, difrakcione rešetke, detektora za beleženje signala i njegov prenos na računar, gde se dalje dekodira (Erić 2019: 19) (**Slika 50**).

Upotrebom ramanske spektroskopije možemo identifikovati faze i analizirati strukturu materijala (Erić 2019: 18). Njom se mogu ispitivati neorganski materijali kao i oni koji sadrže organske komponente, a predstavlja jednu od retkih tehnika koja identifikuje i elemente i molekule (Smyth, Dent 2005: 135). U oblasti umetnosti i arheologije, ramanska spektroskopija je važna, jer se može vršiti na mikrouzorcima, ili čak na samim objektima bez uzorkovanja (u zavisnosti od vrste instrumenta koji se koristi). Identifikuje vrste neorganskih materijala, njihove fizičke forme, upotrebu boja, pigmenata, smola i može pomoći prilikom hronološkog određivanja, odnosno starosti uzorka, razlikovanja originala od restauracije ili kopije i dr. (Smyth, Dent 2005: 143). Ramanska spektroskopija je veoma brza tehnika i nema destrukcije uzorka. Njen nedostatak je, kao i kod IR ispitivanja, otežana identifikacija heterogenih sistema (Erić 2019: 19).



Slika 50. Snimanje uzorka maltera ramanskim spektrometrom i spektar uzorka sa karakterističnom trakom mineralnih faza

2.4 FIZIČKA I MEHANIČKA SVOJSTVA MALTERA

Podaci dobijeni na osnovu ispitivanja fizičkih i mehaničkih svojstava istorijskih maltera važni su prilikom pripreme maltera za konzervaciju, jer su upravo ona među najvažnijim kod provere međusobne kompatibilnosti istorijskih i novopripremljenih maltera.

Ograničenje većine analiza fizičkih i mehaničkih svojstava materijala je u tome da je, uglavnom, potrebna prilično velika količina uzorka, što nije uvek moguće u slučaju onih istorijskih. Zapravo, gotovo je nemoguće dobiti uzorak istorijskog maltera koji bi po veličini bio blizak standardnom uzorku za ispitivanje čvrstoće na pritisak ili savijanje pripremljenom u laboratoriji (SRPS EN 1015-11: 2019). Ovo se posebno odnosi na ispitivanje čvrstoće maltera na savijanje za koje je prema standardu potreban uzorak koji čine tri prizme dimenzija 160 mm × 40 mm × 40 mm. Zbog varijabilnosti samog materijala, nepravilnosti uzoraka ili njihovog opšteg stanja, ponekad se može dovesti u pitanje i sam smisao dobijenih vrednosti (Válek, Veiga 2005: 365–366). Standard za karakterizaciju maltera koji se koriste u kulturnom nasleđu poručuje da u slučaju ispitivanja mehaničkih svojstava uzoraka za koje možemo pripremiti manje od tri tela za ispitivanje i/ili tela koja nemaju napred navedene standardne dimenzije (SRPS EN 1015-11: 2019), ili se uzorci ispituju nekim alternativnim metodama, podaci dobijeni prilikom ispitivanja mogu se uzeti samo kao okvirni pokazatelji svojstava, ali ne i kao apsolutne vrednosti (SRPS EN 17187: 2021).

U fizičko-mehaničke osobine koje se ispituju kod istorijskih maltera, kao i kod malternih mešavina pripremljenih za konzervaciju, spadaju, između ostalih: zapreminska masa, poroznost, kapilarno upijanje vode, čvrstoća na pritisak i savijanje, kao i adhezija za podlogu. Usled napred navedenih razloga, retko se dešava da se sve ove osobine mogu ispitati kod jednog uzorka.

Zapreminska masa

Standard za ispitivanje zapreminske mase materijala razlikuje prividnu i stvarnu zapreminsku masu. Prividna zapreminska masa predstavlja odnos između mase suvog uzorka i njegove prividne zapremine koja uključuje zapreminu čestica, zapreminu šupljina i zapreminu unutrašnjih pora. Stvarna zapreminska masa (zapreminska masa bez pora i šupljina) predstavlja odnos između mase suvog uzorka i zapremine njegovog čvrstog dela (SRPS EN 1936:2009).

Za određivanje stvarne zapreminske mase neophodno je da uzorci budu sprašeni, dok bi uzorci za ispitivanje prividne zapreminske mase trebalo da imaju oblik valjka, kocke ili prizme, koji se dobijaju sečenjem dijamantskom testerom ili jezgrovanjem. Zahtevana prividna zapremina uzorka koji se testiraju trebalo bi da bude najmanje 60 ml (SRPS EN 1936:2009). Kako kod istorijskih materijala ove uslove najčešće nije moguće ispuniti, ispitivanja prividne zapreminske mase se obavljaju i na uzorcima nepravilnog oblika i značajno manje prividne zapremine.

Prividna zapremina se može odrediti na dva načina. Prvi način podrazumeva uklanjanje vazduha iz uzorka i njegovo potapanje u vodu. Naime, nakon merenja mase uzorka osušenog do konstantne mase, on se stavlja u sud za evakuaciju vazduha (**Slika 51**) u kome se postepeno smanjuje pritisak. Nakon uklanjanja vazduha iz otvorenih pora u sud se lagano dovodi demineralizovana voda. Uzorak se potpuno potapa, u vodi odležava ne manje od 15 min., a zatim se pritisak vraća na atmosferski i uzorak ponovo ostavlja u vodi 24 (± 2) h. Uzorku se zatim meri masa kada je zasićen vodom i masa kada je pod vodom. Količnik razlike prve i druge vrednosti i gustine vode daje vrednost prividne zapremine uzorka. Drugi, alternativni način dobijanja prividne zapremine uzorka podrazumeva jednostavnu geometrijsku operaciju merenja njegovih dimenzija (SRPS EN 1936: 2009).

Kada podelimo vrednosti mase suvog uzorka i prividne zapremine, dobijamo prividnu zapreminsku masu. Jedinica prividne zapreminske mase je kg/m^3 (SRPS EN 1936: 2009).

91

Za određivanje stvarne zapreminske mase mogu se koristiti dve metode, metoda sa piknometrom i metoda sa Le Šateljeovim (H. L. Le Chatelier, 1850–1936) volumenometrom.

Obe metode zahtevaju sprašivanje uzorka na veličinu zrna manju od $63 \mu\text{m}$, a zatim ispitivanje ovako pripremljenog uzorka pomoću piknometra, odnosno Le Šateljeovog volumenometra i dejonizovane vode, koja se uvodi u jedan ili drugi, da bi im se potom postepeno dodao sprašeni uzorak (**Slika 51**). Metoda sa piknometrom zahteva i korišćenje vakuuma, kojim se postiže potpuna eliminacija mehurića vazduha, nakon čega se piknometar ostavlja da se uzorak istaloži dok voda iznad njega ne ostane čista. Metoda sa Le Šateljeovim volumenometrom je manje precizna, i zahteva samo očitavanje zapremine tečnosti koju je istisnula masa izdrobljenog uzorka. Stvarna zapreminska masa se izračunava kao odnos mase suvog uzorka prema zapremini tečnosti koju je istisnuo, a uz pomoć odgovarajućih jednačina. Jedinica stvarne zapreminske mase je kg/m^3 (SRPS EN 1936: 2009).



Slika 51. Sud za evakuaciju vazduha (levo); dodavanje sprašenog uzorka u sud sa dejonizovanom vodom (desno)

Poroznost istorijskog maltera je izuzetno važna, jer utiče na njegova mehanička svojstva, transport vlage/vode ili rastvora, trajnost i kompatibilnost sa zidanom strukturom kao celinom (Thomson *et al.* 2007: 77). Na konačnu strukturu pora utiču međusobni odnos komponenata maltera, distribucija veličine zrna agregata, uslovi očvršćavanja, brzina hidratacije/karbonatizacije, podloga, kao i majstorski rad tokom primene maltera (Divya Rani, Rahul, Santhanam 2021: 1).

Poroznost u strukturi maltera obuhvata okrugle (ili približno okrugle) pore različitih veličina i izdužene pukotine. Prema jednom od klasifikacionih sistema (Union of Pure and Applied Chemistry – IUPAC 1972) pore se prema veličini dele na mikropore, mezopore i makropore (Stefanidou 2010: 2572; Papayianni, Stefanidou 2001 u Stefanidou 2010: 2572).

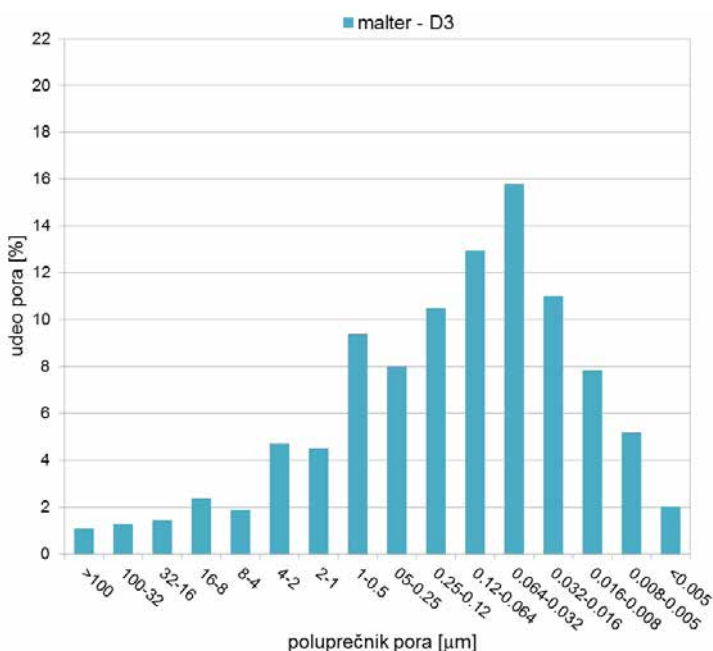
Najveći deo pora predstavljaju primarne kapilarne pore i one igraju veliku ulogu u propustljivosti maltera. Ova poroznost se razvija u prvoj fazi tokom procesa sušenja i hidratacije maltera, a u drugoj fazi je pod uticajem procesa karbonatizacije i tokom vremena se može smanjiti. Veličina primarnih kapilarnih pora varira u granicama od oko 0,1 μm do 100 μm i one se nalaze unutar veziva i na kontaktu agregat-vezivo. Primarne pore veće od 100 μm , dimenzija do nekoliko milimetara, uglavnom su posledica zarobljenog ili uvučenog vazduha i nastaju tokom procesa mešanja maltera. Mogu se naći na kontaktu sa agregatom ili unutar veziva, a u nekima od njih se razvijaju pukotine kroz koje izlazi vazduh ili tečnost. Sekundarna poroznost nastaje kao posledica različitih pukotina i hemijskih promena nastalih usled delovanja okoline na malter. Pore udružene sa pukotinama imaju veliki uticaj na čvrstoću i trajnost maltera (Thomson *et al.* 2007: 78–79; Stefanidou 2010: 2572).

Poroznost i pore uzorka nekog poroznog materijala mogu se sagledati na osnovu vrednosti ukupne (apsolutne) poroznosti, raspodele veličine pora i specifične površine. Ukupna poroznost je deo ukupne zapremine uzorka zauzet porama. Deli se na otvorenu i zatvorenu poroznost. Otvorene pore

su međusobno povezane, dok su suprotno njima, zatvorene pore međusobno nepovezane. Veličine pora se mogu ispitati direktnim ili indirektnim metodama. U direktne metode spadaju vizuelna procena, mikroskopija i analiza pomoću digitalne slike, dok indirektne metode obuhvataju potapanje, živinu porozimetriju, metodu adsorpcije/desorpcije azota (Thomson *et al.* 2007: 87–96, 100). Položaj pora i veličina pora sagledani upotrebom mikroskopa povezuju poroznost sa stanjem samog maltera. Skenirajuća elektronska mikroskopija može dati najpotpunije rezultate, uz napomenu da, kao i kod svake druge mikroskopske metode, u slučaju ispitivanja poliranih uzoraka može doći do oštećenja njihove *mekane* strukture tokom pripreme (Stefanidou 2010: 2577). SEM kod oštećenih materijala pokazuje rastresitu mikrostrukturu, baš kao što dokazuje uniformnu i gustu mikrostrukturu kod trajnih materijala (Stefanidou, Pavlidou 2018: 3).

Metoda imerzije, tj. metoda potapanja u vodu prethodno je opisana kod dobijanja prividne zapreminske mase, pa se vrednosti otvorene poroznosti izračunavaju upravo iz podataka dobijenih u sklopu ispitivanja zapreminske mase. Zapremina otvorenih pora je količnik razlike mase zasićenog uzorka i mase suvog uzorka i gustine vode. Otvorena poroznost predstavlja odnos zapremine otvorenih pora i prividne zapremine uzorka, i takođe je izražena u % (SRPS EN 1936: 2009). Metoda potapanja u vodu nije prikladna za ispitivanje maltera na bazi gline i maltera sa opekom, jer oni apsorbuju više vode, pa se preporučuje upotreba organske tečnosti. Takođe, kod maltera niskih vrednosti čvrstoća (<1 MPa) može doći do razaranja kada je apsorpcija pod vakuumom (Stefanidou 2010: 2573–2577). Ukupna poroznost je odnos zapremine svih pora i prividne zapremine uzorka, izračunava se kada se od broja 1 oduzme količnik prividne i stvarne zapreminske mase i izražava se u % (SRPS EN 1936:2009).

Metodom živine porozimetrije se određuju raspodela pora po veličini (**Slika 52**), poroznost, prividna i stvarna zapreminska masa, kao i specifična površina uzorka. Izvođenje metode je veoma brzo, a njenom primenom se mogu odrediti pore između 500 μm i 3,5 nm, s tim što se uzorci moraju prethodno pripremiti tako da su im uklonjene eventualna apsorbirana voda ili



Slika 52. Raspedela veličine pora uzorka istorijskog maltera određena metodom živine porozimetrije

druga jedinjenja (Giesche 2006: 9–11). Živa se pod visokim pritiscima utiskuje u pore uzorka zatvorenog u komori, pri čemu se meri njena zapremina, a na osnovu priraštaja pritiska i zapremine utisnute žive može se odrediti raspodela veličine pora. Test je brz, traži mali uzorak i može se ponoviti. Međutim, metoda može dati pogrešnu vrednost raspodele kada veliki prostori pora moraju biti ispunjeni živom kroz uske kanale koji ih povezuju, što nazivamo *inkbottle-pore effect* (Thomson *et al.* 2007: 93). Metodom se meri najveći ulaz pore, ali ne i stvarni unutrašnji prečnik pore. Ne može se koristiti za analizu zatvorenih pora, jer živa ne može ući u njih. Najmanja veličina pore koja može biti ispunjena živom ograničena je maksimalnim pritiskom koji se može postići upotrebom instrumenta. Uzorci koji su slabo vezani usled pritiska mogu biti sabijeni pre nego što živa prodre u pore, što može dovesti do greške u rezultatu. Ovi problemi se rešavaju interpretacijom i ocenom uz upotrebu različitih softvera, međutim, usled pritiska se mogu desiti i različite strukturne promene kod visokoporoznih ili *mekanih* materijala (Giesche 2006: 9, 17), što se odnosi i na

krečne maltere nižih vrednosti čvrstoća (<2–2,5 MPa) (Stefanidou 2010: 2577).

Metoda adsorpcije/desorpcije azota daje podatke o otvorenoj poroznosti i raspodeli veličine pora. Primena metode je ograničena kod ispitivanja poroznosti istorijskih maltera, jer su tokom vršenja metode mikropore i mezopore zasićene azotom, a najveći udeo u poroznosti ovih maltera čine pore većih dimenzija (Thomson *et al.* 2007: 93–94; Stefanidou 2010: 2575).

Pošto ispitivanje poroznosti može oštetiti krečne maltere i dati nedovoljno pouzdane rezultate, preporučuje se ispitivanje prirode i čvrstoće uzoraka pre odabira metode ispitivanja poroznosti, a odabir takođe mora biti u skladu sa obimom informacija koji želimo dobiti (Stefanidou 2010: 2577). Takođe, složenost strukture pora istorijskih maltera otežava tumačenje dobijenih vrednosti poroznosti, s obzirom na to da se malter sastoji od poroznog veziva i agregata različitih poroznosti i drugačijih struktura pora (Thomson *et al.* 2007: 100).

Istraživanja poroznosti maltera mogu kombinovati postojeće metode sa drugim savremenim laboratorijskim tehnikama, pa kao međusobno komplementarne autori predlažu živinu porozimetriju i kompjuterizovanu mikrotomografiju (μ CT) (Brunello *et al.* 2021). Kompjuterizovanom tomografijom (CT) se inače, kao nedestruktivnom tehnikom, posmatra unutrašnjost, odnosno mikrostruktura materijala, što nije moguće izvesti tradicionalnim radiografskim metodama (Miljević *et al.* 2022: 159–160).

Kapilarno upijanje vode

Ispitivanje kapilarnog upijanja vode kod istorijskih maltera predstavlja jednu od standardizovanih metoda ispitivanja materijala koje se koriste u kulturnom nasleđu. Njome se određuju količina i stepen kapilarnog upijanja vode (kapilarne adsorpcije) preko dela površine uzorka koji se ispituje, a u kontaktu sa vodom koja difunduje kroz uzorak putem kapilarnih pora, odozdo nagore, ne poštujući zakone sile teže. Namenjena je merenju kapilarnog upijanja vode kod poroznih neorganskih materijala koji se koriste za građenje i čine deo

kulturnog dobra, kao što su prirodni kamen, malter, opeka, gips i dr. (SRPS EN 15801: 2012).

Kako standard navodi, ispitivanje kapilarnog upijanja vode kod istorijskih maltera se sprovodi na uzorcima pravilnog oblika, na kockama ili valjcima, dimenzija najmanje 10 mm. Broj i dimenzije uzoraka zavise od heterogenosti materijala. Svaka serija mora da se sastoji od najmanje tri uzorka. Kod anizotropije, svaka serija uzoraka se ispituje prema istovetnoj orijentaciji, ako takva postoji. Kod heterogenih materijala, kakvi su uzorci maltera sa krupnozrnim agregatom, uzorci moraju biti najmanje tri, a poželjno pet puta veći od najkrupnijeg zrna u uzorku. Na uzorku se prvo odredi površina za ispitivanje, poravna se, očisti ili opere i osuši. Zatim se ispitni uzorak stavlja u sud sa vodom, u određenim vremenskim intervalima vadi iz vode, briše vlažnom krpom i meri mu se masa. Vremenski intervali između merenja mase uzorka zavise od brzine upijanja vode, pri čemu se prva merenja obavljaju u vrlo kratkim intervalima. Rezultati izvršenih merenja predstavljaju se grafički u funkciji kvadratnog korena vremena izraženog u sekundama. Koeficijent kapilarnog upijanja vode dobija se kao nagib linearnog dela krive prema kvadratnom korenu vremena. Dobijena kriva naziva se kriva kapilarnog upijanja vode (SRPS EN 15801: 2012).

Čvrstoće pri pritisku i savijanju

Ispitivanje čvrstoće na pritisak predstavlja razarajuću deformaciju tela izazvanu delovanjem dve sile koje teže da približe svoje dejstvo, a sama vrednost izražava maksimalnu kompresiju koju materijal može da izdrži pre loma (Bilbija, Matović 2009: 117). U slučaju istorijskih maltera podaci o čvrstoći na pritisak se mogu dobiti direktno, odnosno ispitivanjem opitnih tela u presi, ili indirektno, upotrebom tehnike merenja otpornosti prema bušenju (tehnika DRMS). Ostale indirektno metode su upotreba Mosove skale tvrdoće (za maltere na bazi portland cementa i hidratisanog vazdušnog kreča); Šmitovog čekića (sklerometra); Rusak sistema i dr. (Henry, Stewart 2011: 216).

Kao što je prethodno pomenuto, vrlo retko se dešava da se može sprovesti ispitivanje čvrstoće na savijanje istorijskih maltera. Uzorci maltera su uglavnom dimenzija nedovoljnih za ovu vrstu ispitivanja. Ipak, ono se može sprovesti kada za to postoje uslovi i biće opisano u poglavljima ispitivanja očvrslih maltera za konzervaciju, kada se za ovu vrstu ispitivanja mehaničkih karakteristika maltera pripremaju uzorci adekvatnih dimenzija izlivanjem u kalupe standardizovane za određenu vrstu ispitivanja.

Ispitivanje opitnih tela na pritisak. Ispitivanje uzoraka istorijskih maltera na pritisak se vrši prema modifikovanoj metodologiji definisanoj za prirodni kamen i opisanoj u standardu (SRPS EN 1926: 2010). Sprovodi se na presama za ispitivanje čvrstoće na pritisak opitnih tela pripremljenih mašinom za sečenje (**Slika 43**). Standard zahteva dimenzije primerene uzorcima od kamena, koje se u slučaju ispitivanja istorijskih maltera modifikuju u skladu sa dostupnom količinom materijala. Opitna tela se suše na temperaturi $70 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ do konstantne mase, zatim se čuvaju na temperaturi od $20 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ do dostizanja termičke ravnoteže, nakon čega se u roku od 24 h testiraju. Nakon merenja dimenzija uzorka (**Slika 53**), on se postavlja u presu (uzorak i ploče prese kojom se primenjuje sila moraju biti čisti) i ravnomerno opterećuje kontrolisanim prirastom sile sa obe strane opitnog tela, do njegovog loma, kada se registruje sila loma (F) (**Slika 54**). Navedeni standard definiše prirast sile primeren ispitivanju kamena, ali se i ovde vrši prilagođavanje materijalu koji se ispituje, odnosno višestruko se smanjuje brzina prirasta sile. Pritisna čvrstoća uzorka se izračunava kao količnik sile loma i površine preseka probnog tela i izražava u N/mm^2 , odnosno MPa.

S obzirom na destruktivnu prirodu metode i veličine potrebnih uzoraka, uzorkovanje maltera u svrhu ispitivanja čvrstoće na pritisak uz upotrebu prese mora se izvesti vrlo pažljivo i samo sa onih mesta na istorijskoj građevini gde se to smatra opravdanim. Kako je navedeni standard vezan za ispitivanje prirodnog kamena, propisan broj i veličinu opitnih tela za ispitivanje u slučaju ispitivanja maltera uglavnom nije moguće ispuniti. Ukoliko je moguće, u cilju dobijanja validnih rezultata ispitivanja, prema iskustvu Laboratorije za kamen

98



Slika 53. Pripremljena opitna tela istorijskog maltera (levo) i merenje njihovih dimenzija (desno)



Slika 54. Ispitivanje čvrstoće na pritisak istorijskog maltera u presi

i agregat Instituta IMS, dimenzije opitnog tela maltera ne bi trebalo da budu manje od $30 \times 30 \times 30$ mm, s obzirom na uobičajenu veličinu zrna agregata u istorijskim malterima, ali se ispitivanja generalno mogu vršiti i na kockama manjih dimenzija u zavisnosti od konkretnog uzorka maltera (**Slika 55**).

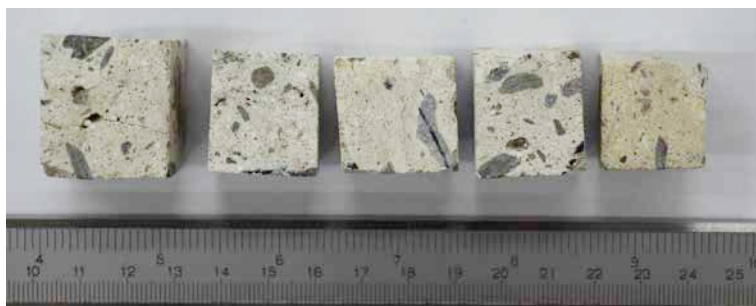


Slika 55. Opitna tela uzorka istorijskog maltera pre (gore) i nakon ispitivanja čvrstoće na pritisak (dole) u presi

Navedeni problem nedovoljne veličine opitnog tela nastaje najpre kod ispitivanja maltera čiji uzorci, bez obzira na dostupnost uzorkovanja, ne mogu nikako imati standardne dimenzije, kao što su na primer malteri za zidanje između dve opeke, jer debljina spojnice često ne dostiže ni 30 mm. Istraživači stoga razvijaju i nestandardne metode za ispitivanje čvrstoće na pritisak i savijanje uzoraka istorijskih maltera nepravilnih i veoma malih dimenzija pomoću izlivanja čvršćeg

dopunskog maltera, odnosno onog cementnog kojim se dobijaju standardni oblik i dimenzije, a sam uzorak istorijskog maltera se koristi u obliku u kom je uzorkovan, bez sečenja. Ovi rezultati mogu biti samo indikativni jer se ovakav uzorak ponaša kao kompozit istorijskog i dopunskog maltera veće čvrstoće od istorijskog maltera, odnosno predstavljaju pomoć u kombinaciji sa drugim testovima ispitivanja fizičko-mehaničkih svojstava istorijskih maltera (Válek, Veiga 2005), uz čiju se pomoć međusobno mogu uporediti čvrstoće dva uzorka. S druge strane ova metoda je u prednosti u odnosu na standardnu, jer se svakim sečenjem istorijskih uzoraka utiče na njihovu strukturu i smanjuje im se čvrstoća (Drdácký, Slížková 2008: 21). Generalno, rezultati koje dobijamo na osnovu ispitivanja uzoraka maltera na pritisak nisu značajni u smislu ocenjivanja njihovog stanja ili sigurnosti strukture u kojoj se nalaze, jer malter u presi nije izložen pritisku na isti način kao što je to slučaj u samoj građenoj strukturi, pa istraživači predlažu i druge metode ispitivanja, prilikom kojih se uzorci u laboratoriji izlažu uslovima sličnijim onim u građevini (triaksijalna kompresija) (Drdácký, Slížková 2008: 21).

Vrednosti čvrstoća na pritisak krečnih nehidrauličnih maltera su obično u granicama od 0,5 MPa do 3,0 MPa. Ukoliko je za izradu maltera korišćen hidraulični kreč ili je nehidrauličnom kreču dodat neki materijal sa pucolanskim svojstvima, u zavisnosti od količine hidraulične komponente i njene reaktivnosti očekuje se da vrednost čvrstoće na pritisak ovih maltera bude uvek iznad 1,5 MPa (Válek, Veiga 2005: 365–366). Maksimalna vrednost čvrstoće na pritisak izmerena na uzorcima koji poseduju reaktivnu hidrauličnu komponentu u okviru projekta *MoDeCo2000* bila je 15,70 MPa (Delić-Nikolić *et al.* u štampi), na jednom izuzetno očuvanom i kompaktnom uzorku (**Slika 56**). Vrednost čvrstoće ispitanih uzoraka maltera za zidanje tokom projekta *MoDeCo2000*, ocenjenih kao nehidrauličnih, kreće se u napred navedenim granicama.

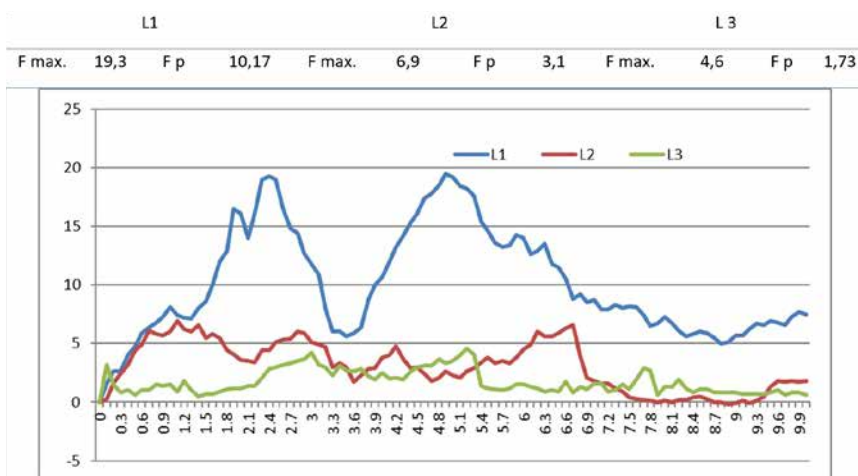
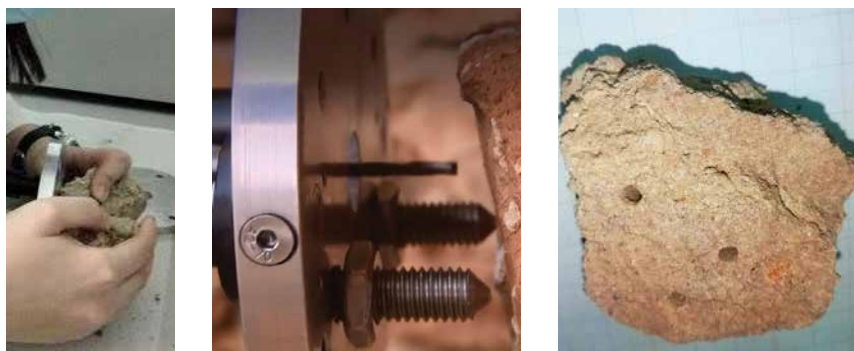


Slika 56. Opitna tela kompaktnog istorijskog maltera visoke čvrstoće na pritisak pre ispitivanja u presi

Sistem merenja otpornosti bušenju (eng. Drilling Resistance Measurement System, DRMS). Primenom metode određivanja otpornosti bušenju na indirektan način se može odrediti čvrstoća maltera na pritisak. Metoda je razvijena za potrebe ispitivanja kamena i drveta (Tiano *et al.* 2000: 137–138; Theodoridou, Dagrain, Ioannou 2015; Pamplona *et al.* 2007), ali se sve više koristi za ispitivanje maltera (Costa, Magalhães, Roário Veiga 2012; Del Monte, Boschi, Vignoli 2020: 2; Nogueira *et al.* 2014). Obuhvaćena je kroz preporuku organizacije RILEM za ispitivanje hidrauličnih cementnih maltera (RILEM TC-177 MDT 2004: 485–487).

DRMS tehnika pripada mikroinvanzivnim tehnikama (Dumitrescu, Pesce, Ball 2017: 1), pouzdana je, osetljiva, brza i može se vršiti u laboratoriji, kao i na terenu (Pamplona *et al.* 2007: 668). Ispitivanja se vrše uglavnom prenosivom bušilicom, pri čemu burgija tokom prodiranja nailazi na promene u materijalu, tako pružajući podatke o njegovim mehaničkim karakteristikama (Dumitrescu, Pesce, Ball 2017: 1) (**Slika 57**). Princip metode se sastoji u merenju vremena, linearne sile, obrtnog momenta ili energije potrebne za postizanje željene dubine prodiranja burgije, uz konstantan pritisak i konstantnu brzinu rotacije (Pamplona *et al.* 2007: 667). Kod savremenih prenosivih uređaja maksimalna dubina bušenja je 50 mm, prečnik burgije varira između 3 mm i 10 mm, brzina rotacije je u opsegu 20–1000 rpm (obrta/minut), brzina prodiranja 1–80 mm/min, dok je maksimalna dostignuta sila 100 N (Del Monte, Boschi, Vignoli 2020: 2).

Prema preporuci RILEM-a, merenje se vrši na deset nasumično odabranih tačaka na površini koja se ispituje, ali



Slika 57. Bušenje uzorka pomoću DRMS tehnike (gore levo i sredina – Arhiva Laboratorije za ispitivanje materijala u kulturnom nasleđu Tehnološkog fakulteta Univerziteta u Novom Sadu); uzorak na kome se vide tri tačke – mesta bušenja (gore desno); dijagram profila sile sa podacima o prosečnoj, minimalnoj i maksimalnoj vrednosti sile dat za tri uzorka maltera u cilju njihovog poređenja (dole)

približno ravnomerno raspoređenih na njoj, uz pokušaj izbegavanja inkluzija, velikih zrna agregata ili drugih nereprezentativnih delova. Ukoliko je potrebna veća preciznost ili je malter promenljivog kvaliteta, broj merenja mora biti veći. Rezultat ispitivanja predstavlja srednja vrednost izvršenih merenja ukoliko se podaci koriste za određivanje varijacija u kvalitetu, prate promene tokom očvršćavanja ili ako se vrše testovi trajnosti na atmosferske uticaje. Ako su potrebne apsolutne indikacije za vrednosti čvrstoće, onda se podaci moraju kori-

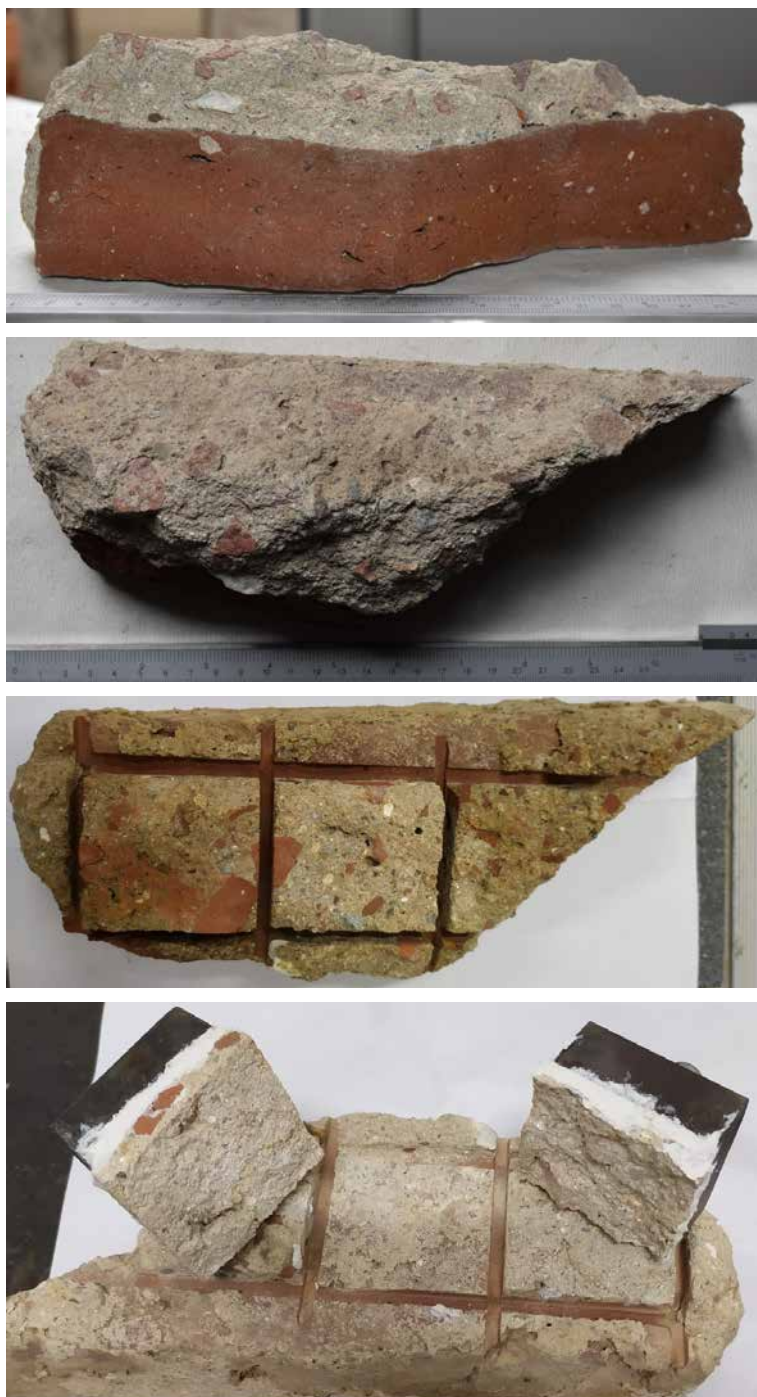
govati uz upotrebu kalibracione krive (RILEM TC-177 2004: 486–487).

Od nedostataka DRMS tehnike treba napomenuti njenu zavisnost od oblika vrha burgije, habanja reznog alata, akumulacije prašine u rupi tokom bušenja, kao i to što se njom samo indirektno porede vrednosti otpornosti bušenjem sa vrednostima čvrstoće (Pamplona 2007: 668). Postupci za što pouzdaniju procenu pritiskne čvrstoće istorijskih maltera upotrebom ove metode teme su istraživanja više autora (Del Monte, Boschi, Vignoli 2020; Nogueira *et al.* 2014). Kod heterogenih materijala kao što su malteri, način upotrebe ove tehnike ipak još uvek nije potpuno jasno uspostavljen, zbog nepravilnosti u dobijenim profilima bušenja (Del Monte, Boschi, Vignoli 2020: 2). Posebna evaluacija se mora vršiti i zbog visokog sadržaja kvarca u malteru (Costa, Magalhães, do Rosário Veiga 2012: 414). Tehnika se može koristiti za opseg vrednosti čvrstoće maltera od 1 MPa do 20 MPa, ali gubi tačnost na krajevima opsega. Nije pogodna za maltere čija je debljina manja od dvostrukog prečnika burgije. Takođe, smatra se nedovoljno pouzdanom za ispitivanje maltera koji sadrže značajan udeo zrna agregata krupnijih od 1 mm, posebno ukoliko su ta zrna većih tvrdoća, zbog njihove moguće blokade prilikom bušenja. Još jedan problem sa upotrebom tehnike kod istorijskih maltera jeste da ona zbog njihovih degradiranih površina može dati lažne podatke, pa se podaci kao pouzdani mogu uzeti samo ako je testiran malter kroz veći deo svoje debljine (RILEM TC-177 2004: 485–486).

Čvrstoća prijanjanja – adhezija za podlogu

Čvrstoća prijanjanja maltera za podlogu je prema standardu za ispitivanje novih maltera za spoljašnje i unutrašnje malterisanje određena kao maksimalna sila zatezanja primenjena direktnim opterećenjem upravno na površinu maltera na podlozi (SRPS EN 1015-12: 2016). Adhezija maltera za podlogu prema standardu predstavlja meru prionjivosti već očvrsllog maltera na podlogu, koja može biti beton, opeka, kamen i dr. Ispitna metoda je poznata pod imenom *pull-off* ili metoda pečatnika. Ona se u skladu sa pomenutim standardom može primeniti i

104



Slika 58. Ispitivanje adhezije maltera za opeku *pull-off* metodom
- lom se desio u malteru

kod ispitivanja adhezije istorijskih zidarskih maltera za ravnu podlogu koju mogu predstavljati opeka ili kameni blok. Za ova ispitivanja je potrebno da kontaktna zona bude potpuno neoštećena, ali se zahteva i relativno veliki uzorak maltera i podloge, što se kod ispitivanja istorijskih maltera teško može postići.

Postupak ispitivanja adhezije maltera za podlogu sprovodi se kroz nekoliko koraka, a prema navedenom standardu. Prvo se sprovodi zasecanje maltera do podloge (odnosno do dubine od oko 2 mm unutar podloge), najčešće kružnom testetrom prečnika 50 mm. Na tako zasečen malter se lepi pečatnik epoksidnim lepkom sa inertnim puniocem da bi se dobio lepak dovoljne gustine u cilju sprečavanja penetracije epoksida kroz porozni sloj maltera, što bi moglo dati lažnu sliku o čvrstoći maltera. Zatim se nakon očvršćavanja epoksidnog lepka primenom *pull-off* uređaja nanosi opterećenje zatezanjem upravno na ispitnu površinu, do prekida u nekom od ispitivanih materijala, malteru ili podlozi (**Slika 58**).

Kod ovog ispitivanja je potrebno zabeležiti silu pri prekidu i vrstu prekida – loma, kako bi se na osnovu analiza rezultata moglo doći do više podataka o stanju maltera ili podloge. Adhezija se izražava u jedinici sile po jedinici površine maltera koji se ispituje, to jest u N/mm^2 ili MPa. Metoda može biti primenjena i direktnim ispitivanjem na samoj građevini ukoliko za to postoje uslovi.

2.5 HEMIJSKI SASTAV MALTERA

Hemijska analiza istorijskih maltera je jedan od neophodnih koraka u identifikaciji njegovog sastava, koji u kombinaciji sa drugim metodama, pre svega mineraloško-petrografskim ispitivanjima, može dati veliki broj podataka o komponentama maltera i njihovom međusobnom odnosu. Analize i tumačenje dobijenih rezultata zahtevaju stručne kvalifikacije i iskustvo onih koji ih sprovode (Middendorf *et al.* 2005b: 771).

U svrhu ispitivanja hemijskog sastava maltera najviše se koriste klasična hemijska analiza i instrumentalne tehnike: rendgensko-fluorescentna spektrometrija (XRF) i optičko-emisiona spektroskopija sa indukovano spregnutom plazmom

(ICP-OES). Kod svih se vrši kvalitativna i kvantitativna identifikacija glavnih elemenata i elemenata u tragovima kod uzorka, ali je kod instrumentalnih tehnika za kvantitativnu analizu neophodno korišćenje kalibracionih dijagrama koji nastaju na osnovu poređenja sa sertifikovanim referentnim materijalima i standardima (Mijatović 2021: 23–24).

Klasična hemijska analiza (mokra hemija)

Do perioda sedamdesetih i osamdesetih godina XX veka karakterizacija istorijskih maltera je uglavnom vršena upotrebom klasične hemijske analize (tzv. mokre hemije, eng. *wet chemical analysis*), čije je rezultate bilo teško interpretirati bez dodatnih znanja o različitim komponentama maltera. Nakon toga je proces ispitivanja istorijskih maltera okrenut ka optičkoj mikroskopiji i XRD metodi, odnosno mineraloško-petrografskim analizama kao prvim koracima u identifikaciji komponenata (posebno određivanju prirode agregata i veziva, usled čega se može dalje preporučiti metoda njihovog međusobnog razdvajanja), posle kojih se pristupalo hemijskim analizama (Elsen 2008: 1417; Middendorf *et al.* 2005b: 772). Podrazumeva se da hemičari znanjem i iskustvom mogu dati smernice mineralogu i petrografu tokom interpretacije rezultata, odnosno da bi ovaj proces trebalo uvek vršiti uz međusobnu saradnju različitih struka koje se bave ispitivanjem materijala.

Klasična hemijska analiza se sve ređe koristi za kvantitativnu analizu materijala, usled trajanja, potrebe za brojnim reagensima i hemikalijama, kao i toga da se elementi moraju nezavisno odrediti, pa se češće koriste instrumentalne tehnike. Međutim, kod selektivnog rastvaranja i ekstrakcije uzoraka različitim rastvaračima ona je i dalje nezamenjiva u ispitivanju materijala (**Slika 59**), što je upravo ono što je potrebno prilikom razdvajanja veziva i agregata u malterima, čime se ove komponente pripremaju za dalje individualno analiziranje instrumentalnim tehnikama. Važan rezultat klasične hemijske analize je procena odnosa vezivo–agregat, koji, međutim, može biti „kompromitovan” prirodom agregata, odnosno nemogućnošću njegovog adekvatnog odvajanja od veziva (Casadio, Chiari, Simon 2005: 687).

107

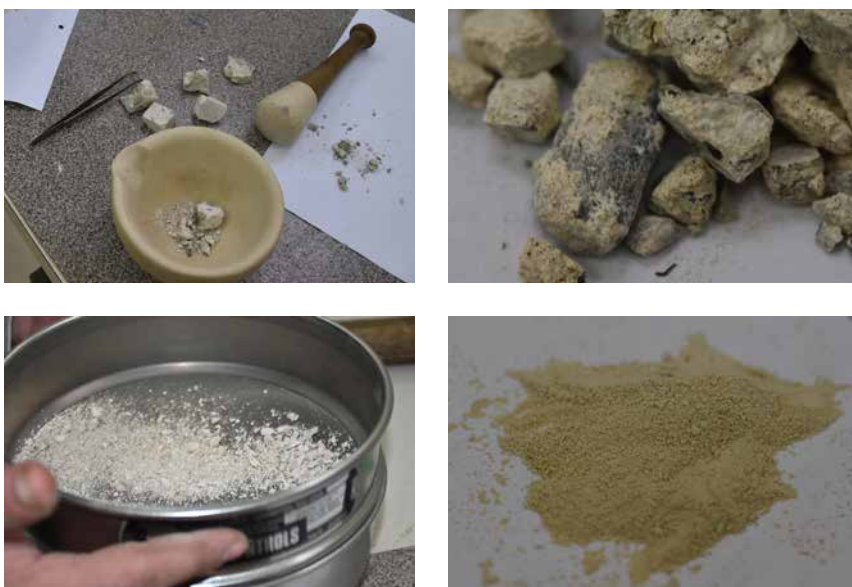
Naime, odvajanje veziva od agregata i određivanje njegovog hemijskog sastava zavisi od rastvorljivosti veziva u kiselinama. Princip se zasniva na tome da se karbonatne komponente iz maltera mogu rastvoriti razblaženim kiselinama (npr. HCl), u kontrolisanim temperaturnim uslovima, dok silikatni deo uzorka ostaje nerastvoran, ali samo u slučaju kada je agregat isključivo silikatnog sastava (Middendorf *et al.* 2005b: 772–774). Malter se nakon sušenja i merenja mase usitnjava, a zatim drobi na fragmente maksimalnih dimenzija 2–3 mm. Razblažena HCl se dodaje dok se ne završi reakcija, a zatim se uzorak filtrira, suši i meri mu se masa. Nakon poređenja sa početnom masom računa se odnos veziva i agregata (Odgers, Henry 2012: 131).



Slika 59. Izgled hemijske laboratorije za vršenje klasičnih hemijskih analiza

Ukoliko je za pripremu krečnog maltera korišćen agregat rastvorljiv u kiselini, odnosno karbonatni agregat, razdvajanje se ne može vršiti na prethodno opisan način, jer će HCl rastvoriti vezivo, ali i agregat. Razdvajanje veziva od agregata u tom slučaju može se vršiti mehaničkim putem, kada se uzorak drobi ručno u avanu, uz oprez kako se ne bi usitnio agregat i bio greškom dalje posmatran kao frakcija veziva. Naime,

nakon drobljenja maltera, njegovim prosejavanjem kroz niz sita dobija se najsitnija frakcija, koja se dalje hemijski analizira kao vezivo pomoću neke od tehnika. Ono što prođe kroz 63 μm sito smatra se da je obogaćenije vezivom, dok je ono što ostaje obogaćenije agregatom (**Slika 60**).



Slika 60. Mehaničko razdvajanje agregata od veziva

Osim ove metode, a nakon mehaničkog čišćenja, uzorak maltera se može u vodi izložiti ultrazvučnim talasima, kako bi se očistila zrna agregata od veziva, i dalje prosejavala na navedeni način kroz niz sita, ali je važno znati da se upotrebom ultrazvučnih talasa mogu neželjeno razbiti zrna agregata (Middendorf *et al.* 2005b: 772–773, 777; Casadio *et al.* 2005: 672). Izuzetno je važno sprovesti i petrografska ispitivanja na ovim uzorcima, kojima se karbonatni agregat i vizuelno odvaja od krečnog veziva, kako bi se i na ovaj način dala procena odnosa veziva i agregata. Problem nastaje kada se analizira malter koji je degradirao, jer je moguće da je jedan deo veziva kroz istoriju rastvoren i izlužen, pa ova procena ne može biti pouzdana (Henry, Stewart 2011: 208–209).

Na osnovu klasične hemijske analize se može odrediti rastvorljivi silicijum-dioksid, koji se odnosi na hidratizovane kalci-

jum-silikate u vezivu, a samim tim i na osobinu hidrauličnosti veziva (Middendorf *et al.* 2005b: 771). Silicijum se najčešće uklanja fluorovodoničnom kiselinom. Mana ove metode je ekstremna toksičnost kiseline, što zahteva izuzetan oprez. Druga metoda podrazumeva upotrebu jakih baza, odnosno natrijum-hidroksida ili kalijum-hidroksida (McCartney, Gharaibeh, Shank 2017: 236). Na kiselom filtratu se može izvršiti određivanje rastvorljivih oksida Fe, Al, Ca, Mg, S, Na i K (Middendorf *et al.* 2005b: 771). Nekim organskim rastvaračem mogu se izdvojiti eventualno prisutna organska jedinjenja kako bi se dalje mogla identifikovati prikladnom tehnikom (Rampazzi *et al.* 2016; Middendorf *et al.* 2005b: 778). Kvalitativna detekcija proteina u malteru se može izvršiti upotrebom alkoholnog rastvora ninhidrina do određene granične koncentracije organskih supstanci (Middendorf *et al.* 2005b: 778), pri čemu dolazi do promene boje. Jedna od metoda podrazumeva upotrebu tzv. Kjeldahl analize, prilikom koje se amino-grupe iz proteina transformišu (prevode) u amonijak, a koji se dalje analizira, a mogu se koristiti i one zasnovane na imunološkim metodama, kao što je ELISA. Kroz dodatni mikroskopski pregled prisustvo proteina se može pretpostaviti u slučaju visokog sadržaja malih zaobljenih šupljina (TC 203-RHM 2009: 858).

Vrlo bitan parametar kod ispitivanja istorijskih maltera, s obzirom na to da njihov uticaj na same maltere može biti veoma destruktivan, jeste sadržaj rastvorljivih soli, koje mogu poticati iz spoljašnje sredine ili biti posledica prethodnih intervencija (Henry, Stewart 2011: 147; Aškrabić *et al.* 2019a: 129–130; Vučetić 2017). U ove soli spadaju karbonati, sulfati, hloridi ili nitrati. Hloridi mogu poticati od uticaja mora u blizini i upotrebe soli za odmrzavanje, dok nitrati često mogu poticati iz bioloških izvora. Indikacija prisustva određene vrste soli se može dobiti na terenu upotrebom reagens traka, ali se njen sadržaj ovim putem može samo generalno proceniti (**Slika 61**), dok se precizni podaci o sadržaju mogu dobiti u laboratorijskim uslovima primenom više tehnika i metoda (Odgers, Henry 2012: 132–133), među kojima su mikroskopija, kvalitativna i semikvantativna hemijska analiza, XRD metoda, spektroskopske tehnike (atomska apsorpciona spektroskopija, pla-



Slika 61. Ispitivanje rastvorljivih soli pomoću reagens traka

mena fotometrija, ICP, atomska emisiona spektroskopija i dr.), jonska hromatografija i dr. (SRPS EN 16455: 2015).

Prema standardu (SRPS EN 16455: 2015) fragment maltera se usitnjava do čestica dimenzija manjih od 0,106 mm, meri i suši na temperaturi od $50 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ tokom $24 (\pm 1)$ h do dostizanja konstantne mase, i ponovo meri. Zatim mu se dodaje ultračista voda poznate specifične provodljivosti, zatvara se u odgovarajuću posudu, izlaže potresima tokom $24 (\pm 0,2)$ h na sobnoj temperaturi $25 (\pm 5) ^\circ\text{C}$, i ostavlja do sleganja nerastvorljive materije u periodu od minimum 2 h. Meri se provodljivost bistrog rastvora i poredi sa onom kod ultračiste vode. Zatim se rastvor filtrira i jednom od navedenih metoda i tehnika određuje se koncentracija jona dobijenih rastvaranjem soli. Rezultati ispitivanja daju specifičnu provodljivost i procenat svakog pojedinačnog jona u suvoj masi uzorka.

Rendgensko-fluorescentna spektrometrija (XRF)

Rendgensko-fluorescentna spektrometrija (XRF – *X-ray fluorescence spectrometry*) nedestruktivna je analitička tehnika. Koristi se za kvalitativnu i kvantitativnu analizu, tj. određivanje elementalnog sadržaja nekog uzorka. Materijal koji se ispituje tehnikom rendgensko-fluorescentne spektrometrije može biti u čvrstom ili tečnom agregatnom stanju (Mijatović 2021: 17). Ovom tehnikom se mogu analizirati već razdvojeni agregat i vezivo uzorka maltera, kao i ceo uzorak.

Rendgenske zrake je otkrio fizičar V. Rendgen (W. K. Röntgen, 1845–1923). Za ovo otkriće je 1901. godine dobio Nobelovu nagradu. Iako se rendgenski zraci koriste za komercijalne elementalne analize od pedesetih godina XX veka, sama rendgenska spektroskopija datira još iz 1909. godine kada je Č. G. Barkla (C. G. Barkla, 1877–1944) povezo rendgenske zrake koje emituje uzorak sa njegovom atomskom masom. H. G. J. Mozli (H. G. J. Moseley, 1887–1915) 1913. godine uređuje elemente u periodnom sistemu uz upotrebu rendgenskih zraka, a uspostavljanjem veze između frekvencije (energije) i atomskog broja elementa postavlja osnovu rendgenske spektrometrije (Shackley 2011: 7–8).

Standardna hemijska analiza maltera XRF tehnikom se sprovodi kroz nekoliko koraka u laboratoriji:

- usitnjavanje i mlevenje uzoraka radi postizanja što bolje homogenizacije (**Slika 62**);
- mešanje uzorka sa vezivnim sredstvima (na primer, vosak) za lakše formiranje tablete i postavljanje u kalup (**Slika 62**; **Slika 63**);
- presovanje tablete u presi (**Slika 62**; **Slika 63**);
- analiza na XRF uređaju (IAEA 1997: 17–19; Takahashi 2015: 26–28; Brouwer 2010: 40; Schram 2016: 74–77) (**Slika 64**).

Pored tehnike presovanja, priprema tablete za analizu može se vršiti i tehnikom topljenja, pri čemu se uzorak topi sa litijum-tetraboratom, čime se dobija tableta na kojoj je delimično eliminisan uticaj matriksa i samim tim, daleko precizniji re-

112

zultati ispitivanja (Mijatović 2021: 43, Mijatović *et al.* 2023). Međutim ova tehnika, zahteva i dodatnu opremu za topljenje uzoraka i produžava vreme analize.



Slika 62. Priprema uzorka za ispitivanje XRF tehnikom (mlin za pripremu uzorka; merenje uzorka; homogenizacija uzorka; postavljanje tablete za ispitivanje u element prese; pokretanje prese za pripremu presovane tablete; tableta nakon izrade

Uređaj kojim se izvodi analiza naziva se XRF spektrometar (**Slika 64**). Njegove osnovne komponente su izvor rendgenskog zračenja (uglavnom rendgenska cev), uzorak, detektor i prenosnik detektovanog zračenja (Erić 2019: 7).



Slika 63. Sprašeni uzorci maltera (gore) i presovani uzorci pripremljeni za XRF analizu (dole)

U zavisnosti od ugrađenog optičkog i detekcionog sistema, razlikujemo energetske disperzivni spektrometar (EDXRF) i talasno disperzivni spektrometar (WDXRF). Princip rada kod oba uređaja je isti, odnosno zasniva se na prolazu X-zraka od rendgenske cevi kroz uzorak. Na ovaj način vrši se eks-citacija hemijskih elemenata koji emituju spektre X-zraka karakterističnih talasnih dužina i sa intenzitetima proporcionalnim sadržaju prisutnih elemenata u uzorku. Razlika između dva uređaja je u načinu padanja X-zraka na detektor. Kod EDXRF uređaja zrak pada direktno na detektor, dok se kod WDXRF zrak difrakuje na detektor sa druge komponente uređaja (Mijatović 2021: 19–20). Na osnovu poređenja talasnih dužina dobijenog spektra (**Slika 64**) sa standardima za pojedinačne elemente mogu se identifikovati ti elementi u ispitivanom uzorku (Marković 2021: 33). Performanse ovih uređaja su slične kada se radi o teškim elementima, dok WDXRF ima nešto veću osetljivost za analizu lakih elemenata (Brouwer 2010: 28).

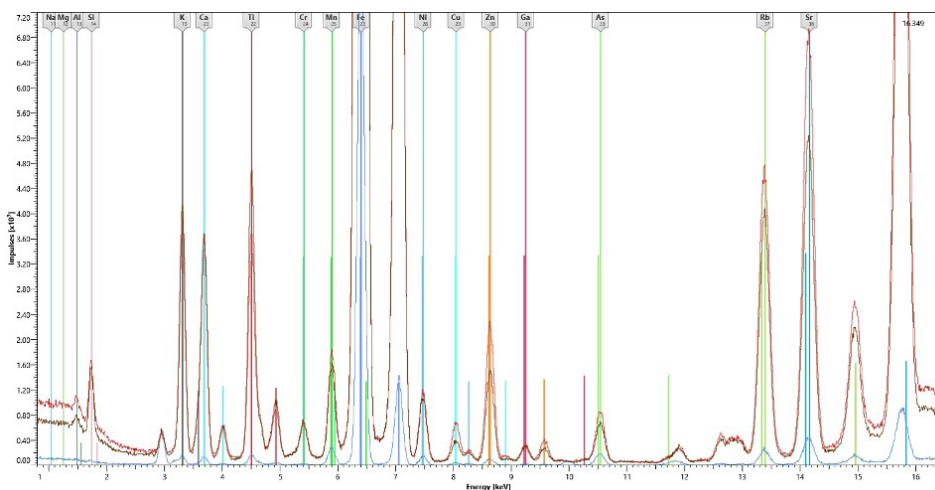
Opseg elemenata koji se mogu analizirati upotrebom EDXRF kreće se od natrijuma do uranijuma, dok je kod WDXRF širi i uključuje elemente od berilijuma do uranijuma. Opseg koncentracije elemenata se kreće u okviru sub (ppm) procenata do 100 %. Generalno, elementi sa visokim atomskim brojevima su bolje detektovani nego oni lakši (Brouwer 2010: 8). Zbog velike osetljivosti i mogućnosti određivanja brojnih komponenti XRF tehnika je zastupljena u svim oblastima nauke i industrije, a XRF uređaji su danas neizostavni deo mnogih ispitivanja kako u laboratoriji, tako i na samom terenu (Mijatović 2021: 17, 21–22, 25).

Nakon razvoja spektrometara, do ranih sedamdesetih godina XX veka, EDXRF postaje dostupan, a upravo nešto pre ovog perioda se uvodi u velikoj meri i u arheologiju. Ova tehnika je i danas vodeća za nedestruktivnu analizu arheoloških predmeta (Shackley 2011: 10–11).

Za ispitivanje istorijskih maltera, XRF je izuzetno brza tehnika, prilikom koje se mogu koristiti različite metodologije kvantifikacije elemenata, među kojima su empirijska kalibracija i metoda zasnovana na osnovnim parametrima. Ispitivanja su pokazala da je druga korisnija kod kvalitativne procene ele-

115

menata u nepoznatom matriksu materijala, dok prva navedena daje bolje rezultate kod kvantitativnog određivanja elemenata (Mijatović *et al.* 2022: 49–51).



Slika 64. Ispitivanje uzorka maltera u EDXRF spektrometru i izlazni dijagram sa kvalitativnim prikazom elementalnog sastava uzorka

U današnje vreme postoji i veliki broj mobilnih uređaja kojima je moguća analiza hemijskog sastava materijala u okviru neke strukture bez ikakve pripreme uzorka i potpuno nedestruktivno. Među njima je mobilni XRF uređaj, odnosno pXRF (Rogić, Gajić-Kvašćev, Andrić 2012; Gajić-Kvašćev, Andrić 2013). Prvi pokretni XRF uređaji su bili razvijani uglavnom za potrebe vojske i rudarstva, a u literaturi se prikazuju od šezdesetih godina prošlog veka (Vandenabeele, Donais 2016: 32). Komercijalni pokretni XRF uređaji nisu bili projektovani da zamene laboratorijske uređaje, već da pruže pomoć

naučnicima, ali i onima koji to nisu, da identifikuju opasne materijale, teške metale, izvrše kontrole kvaliteta ili sprovedu specijalizovane studije gde uzorkovanje ili prenos materijala u laboratoriju nisu mogući (Hunt, Speakman 2015: 637–638). Iako pružaju veliku pomoć u arheološkim istraživanjima i jednostavno se koriste, važno je znati njihova ograničenja, a prilikom interpretacije dobijenih rezultata, imati veliku dozu opreza i u nju uključiti istraživača kome je tehnika XRF bliska (Hunt, Speakman 2015: 626, 638). Nedostatak snimanja mobilnim XRF analizatorom je znatno manja preciznost analize od one koju pruža laboratorijska oprema i uslovljena je kompromisima načinjenim tokom izrade samog instrumenta i pripremom uzorka radi dobijanja mobilnosti. Ipak, uz pažnju na samom terenu tokom procedura snimanja i odabira uzoraka, mogu se dobiti dragoceni podaci i izbeći velike greške (Laperche, Lemièrè 2020: 23). S obzirom na dinamičnost ovog postupka, odnosno mogućnosti izbora uzoraka i donošenja različitih odluka na licu mesta, reprezentativnost uzoraka je povećana (Adams *et al.* 2020 u Laperche, Lemièrè 2021: 23).

Kao i svaka druga instrumentalna tehnika i XRF ima svoje prednosti i mane. Među prednostima su brza priprema uzorka čija količina je mala, velika brzina rada uređaja, činjenica da nema potrebe za rastvaranjem uzorka, određivanje velikog raspona koncentracija u isto vreme i mogućnost ispitivanja na terenu (u slučaju pXRF uređaja). Takođe, ako se skladište u eksikatorima, presovane tablete se mogu više puta koristiti za ispitivanje (Mijatović 2021: 21, 39). Međutim, tu su i nedostaci vezani za potrebu kalibracije referentnim materijalima po hemijskom sastavu sličnom uzorku i slabiju osetljivost za lake elemente i veliki troškovi – od nabavke samog uređaja, preko cene referentnih materijala, do velike potrošnje azota (za hlađenje, u slučaju da nemaju sistem za hlađenje) (Mijatović 2021: 21).

Optičko-emisiona spektrometrija sa indukovano spregnutom plazmom (ICP-OES)

Optičko emisiona spektrometrija sa indukovano spregnutom plazmom (ICP-OES) analitička je metoda koja se koristi za

određivanje sadržaja većine hemijskih elemenata u visokim i niskim koncentracijama iz rastvora (Mijatović 2021: 22). Indukovano spregnuta plazma u optičkoj emisionoj spektrometriji se koristi od sredine šezdesetih godina XX veka, a prvi komercijalni uređaj postao je dostupan 1974. godine (Hou *et al.* 2016: 2; Ohls, Bogdajn 2016: 23, 26).

Kod ICP-OES tehnike, atomi iz uzorka primaju energiju plazme argona i pobuđuju se, a kada se vrate u osnovno stanje, emituju elektromagnetno zračenje, čija je talasna dužina određena i karakteristična za određeni element. Tako se podaci dobijaju na osnovu specifičnosti emitovanog zračenja i njegovog intenziteta. Intenzitet svetlosti koja se emituje proporcionalan je broju pobuđenih atoma, odnosno koncentraciji elementa (Onjia 2007: 80; Stalović, Đorđević 2013: 055). Uzorak se u instrument uvodi aspiracijom u tečnom stanju, a elementi se određuju simultano (Onjia 2007: 80). Uvođenje tečnog uzorka se vrši upumpavanjem pomoću peristaltičke pumpe, i to u nebulajzer, uređaj koji uzorak u tečnom stanju pretvara u aerosol čestice. Uz njega u pumpu ulazi i argon, koji ima višestruku ulogu: stvaranje plazme, unošenje uzorka u plazmu i hlađenje plazma plamenika (Stalović, Đorđević 2013: 055; Mijatović 2021: 22–23). Sprej komora uklanja velike kapi, a male kapi (1–5 % od ukupnog rastvora) nošene strujom gasa idu u plazma plamenik. Prolazak struje kroz kalem indukuje magnetno polje, ono dalje indukuje električno, a zatim se formira plazma iz koje se emituje zračenje. Iz emitovanog spektra spektrometar izdvaja talasne dužine koje detektor „čita”, dajući podatke za kvantitativnu i kvalitativnu analizu (Mijatović 2021: 22–23) (**Slika 65**).

Među prednostima tehnike su njena multielementalna priroda, mogućnost velikog broja analiza sa određivanjem širokog raspona koncentracija istovremeno, velika osetljivost i brzina, kao i potreba za veoma malom količinom uzorka, jer detektuje i izuzetno male koncentracije elemenata (mg/L, µg/L) (Onjia 2007: 81; Stalović, Đorđević 2013: 055; Mijatović 2021: 24). Nedostacima se smatraju mogućnost spektralnih smetnji (koje se pak mogu otkloniti), cena instrumenta, velika potrošnja argona, kao i potreba za pripremom uzoraka (rastvaranje) (Onjia 2007: 81; Mijatović 2021: 24).



Slika 65. Ispitivanje uzorka istorijskog maltera u ICP-OES uređaju

2.6 TERMIČKE ANALIZE MALTERA

U procesu karakterizacije istorijskih maltera koriste se i mnoge druge metode i tehnike osim napred opisanih. Među njima su i termička ispitivanja. Ona koja mere promenu u masi

tokom kontrolisanog zagrevanja na određenoj temperaturi i u peći sa kontrolisanim uslovima, kao što su gubitak žarenjem i termička analiza pod imenom termogravimetrija (TGA) (Wayne, White 2019: 3167), često se koriste za određivanje količine organske supstance i karbonata u uzorcima sedimenta (Bensharada *et al.* 2022: 191). Ove dve metode se koriste u geologiji prilikom procene ukupne količine isparljivih materija u mineralima, stenama, i rudama. Njihova osnovna međusobna razlika je u tome da se kod gubitka žarenjem masa uzorka meri pre i nakon zagrevanja, a promena mase se na kraju procesa izjednačava sa gubitkom vode, ugljen-dioksida i ugljovodonika, dok se kod termogravimetrije promena mase uzorka kontinuirano prati tokom zagrevanja (ili hlađenja) (Wayne, White 2019: 3167).

U analizi geoloških materijala koriste se i dve druge osnovne termičke analize – diferencijalna termička analiza (DTA) i diferencijalna skenirajuća kalorimetrija (DSC). Svaka od pomenutih termičkih metoda zasniva se na fizičkim transformacijama jedinjenja prilikom zagrevanja u kontrolisanim uslovima i mada imaju svoje posebne karakteristike, daju uglavnom iste informacije (Middendorf *et al.* 2005a: 766).

Gubitak žarenjem

Metoda određivanja gubitka žarenjem se zasniva na principu da uzorak nekog materijala zagrevanjem na tačno određenim temperaturama gubi na svojoj masi, što je povezano sa gubitkom određenih komponenata (Bensharada *et al.* 2022: 191–192). Metoda je jeftina i jednostavna (Bensharada *et al.* 2022: 191) i zahteva malu laboratorijsku pećnicu (**Slika 66**), skromnu prateću opremu i kontrolor sa softverom (Wayne, White 2019: 3168). Njene mane su potreba postojanja velike količine uzorka (obično 3–5 g,) dugotrajnost, mogućnost greške operatera tokom merenja mase, kao i mogućnost dobijanja informacija samo za unapred određene temperature (Bensharada *et al.* 2022: 191–192). Pre žarenja, potrebno je uzorak osušiti (**Slika 66**), i spraišiti.



Slika 66. Postavljanje uzoraka u sušnicu (gore); spraseni uzorak u pećnici i zatvorena sušnica (dole)

Termogravimetrija

Termogravimetrijska analiza (TGA) precizna je i efikasna metoda koja meri masu uzorka u funkciji vremena i temperature (Bensharada *et al.* 2022: 192). Instrument pod imenom termogravimetrijski analizator sastoji se od posude za uzorke postavljene na mikrovagu i peći (Wayne, White 2019: 3167–3168). Mana metode je visoka cena instrumenta, dok se njene prednosti ogledaju u relativno brzom procesu, po-

trebi za malim uzorokom, smanjenoj učestalosti greške jer se masa meri automatski i onome što je najvažnije – mogućnosti praćenja promene mase uzorka kontinuirano sve vreme tokom analize (Bensharada *et al.* 2022: 192).

Diferencijalna termalna analiza i diferencijalna skenirajuća kalorimetrija

Diferencijalna termalna analiza (DTA) i diferencijalna skenirajuća kalorimetrija (DSC) najkorisnije su i najviše primenjivane metode termalne analize (Middendorf *et al.* 2005a: 766).

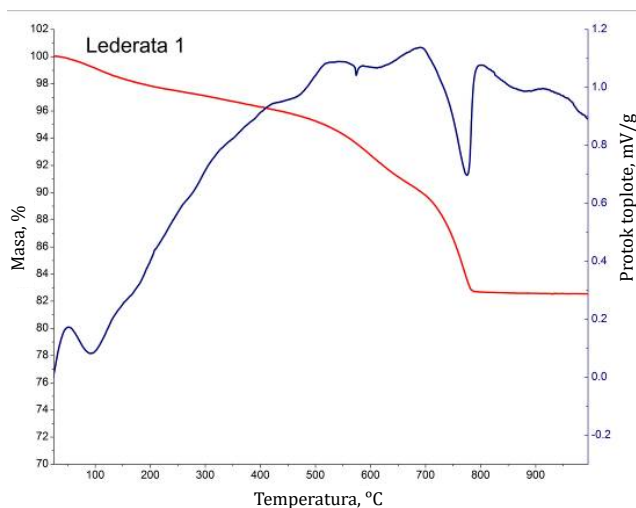
Kod diferencijalne termalne analize, u procesu se prati razlika u temperaturi između uzorka i inertnog standarda (obično Al_2O_3) tokom njihovog istovremenog zagrevanja i kontinuirano se crta grafik (Middendorf *et al.* 2005a: 766). Ovom metodom se kod maltera otkrivaju termalne promene, egzotermne ili endotermne, uključujući dehidrataciju, dehidroksilaciju, oksidaciju i dekompoziciju, a u kombinaciji sa TGA metodom gubitak mase uzoraka se sagledava u funkciji temperature. Primera radi, gips počinje da pokazuje endotermne efekte između $120\text{ }^\circ\text{C}$ i $200\text{ }^\circ\text{C}$, voda vezana za aluminosilikate se detektuje preko endotermnih pikova dehidratacije između $200\text{ }^\circ\text{C}$ i $650\text{ }^\circ\text{C}$, dehidratacija $\text{Ca}(\text{OH})_2$ detektuje se između $400\text{ }^\circ\text{C}$ i $520\text{ }^\circ\text{C}$, najčešći minerali gline (kaolinit, ilit, smektit) imaju relativno jake endotermne efekte na temperaturama od $500\text{ }^\circ\text{C}$ do $650\text{ }^\circ\text{C}$, dok kalcit pokazuje endotermne pikove na oko $840\text{ }^\circ\text{C}$ (Moropoulou, Bakolas, Bisbikou 1995: 780–781).

Metoda DSC prati isti osnovni princip kao DTA. Međutim, dok se kod DTA metode mere temperaturne razlike, DSC metodom se registruje energija potrebna za održavanje nulte temperaturne razlike između ispitivanog uzorka i referentnog materijala (Al_2O_3). Primenom DTA i DSC metoda mogu se razrešiti polimorfne transformacije u jedinjenjima, koja ne uključuju gubitak mase (Middendorf *et al.* 2005a: 766).

* * *

U cilju merenja različitih svojstava u isto vreme, mogu se kombinovati različite metode termalnih analiza, a simultana

ispitivanja svojstava materijala putem TGA i DTA metode, ili TGA i DSC metode, upotrebom kombinovanog instrumenta, čest su slučaj kada su u pitanju istorijski malteri (Arizzi, Cultrone 2021: 8–9) (**Slika 67**).



Slika 67. DTA/TGA dijagram uzorka maltera sa pikovima koji prikazuju promene u uzorku na određenoj temperaturi (Ilić *et al.* u pripremi)

Iako je identifikacija mineralnih faza u malterima uglavnom direktna, dešava se dvoznačnost u slučaju da se neke od njih razgrađuju ili menjaju na sličnim temperaturama, usled čega ona primenom termičkih analiza još uvek ne daje u potpunosti sigurne rezultate. Zato je veoma važno identifikaciju potvrditi drugim komplementarnim analizama (Middendorf *et al.* 2005a: 766).

Među istraživačima istorijskih krečnih maltera termička metoda se koristi za preliminarno utvrđivanje njihove hidrauličnosti (Rizzo, Megna 2008: 174; Elsen, van Balen, Mertens 2012, 132–133; Bakolas *et al.* 1998: 153–154). Prema dobijenim vrednostima se dalje određuje hidrauličnost, o čemu će detaljnije biti reči u nastavku teksta.

2.7 HIDRAULIČNOST MALTERA

Karakteristike krečnjaka koji se koriste za proizvodnju kreča, uz način pripreme samog maltera, direktno utiču na hidraulična, mehanička i mikrostrukturalna svojstva maltera (Şerifaki, Uğurlu Sağın, Böke 2020: 999). Hidraulična svojstva kreča se određuju na osnovu poznavanja njegovog sastava i izračunavanja indeksa hidrauličnosti (HI) (1) i indeksa cementacije (CI) (2) (Eckel 1922: 172–176; Vicat 1818 u Elsen, van Balen, Mertens 2012: 127; Boynton 1966 u SRPS EN 16572: 2016) prema sledećim jednačinama:

$$HI = \frac{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}{\%CaO} \quad (1)$$

$$CI = \frac{2,8\%SiO_2 + 1,1\%Al_2O_3 + 0,7\%Fe_2O_3}{\%CaO + 1,4\%MgO} \quad (2)$$

Kod hidrauličnog kreča prema vrednosti HI izdvajamo slabo hidraulični kreč (0,1–0,2), umereno hidraulični kreč (0,2–0,4) i izrazito hidraulični kreč (>0,4), a istu podelu vršimo i prema vrednosti indeksa cementacije CI. Ona varira kod istraživanja, ali se uglavnom koriste opsezi 0,3–0,5; 0,5–0,7; i 0,7–1,1 za napred navedene tipove hidrauličnog kreča. Vrednosti indeksa hidrauličnosti i cementacije za nehidraulični kreč su bliže nuli (HI<0.1; CI<0.2) (Boynton 1966: 274–275; Böke *et al.* 2008: 869–870; Figueireido, Lawrence, Ball 2016: 1294–1295; Henry, Stewart 2011: 47). Međutim, obračun indeksa hidrauličnosti ima svoje nedostatke, jer ne uzima u obzir sadržaj oksida magnezijuma i gvožđa, a pretpostavlja da oksidi silicijuma i aluminijuma imaju isti uticaj na osobine hidrauličnosti ako su prisutni u istom procentu. Zato je mnogo zastupljeniji obračun indeksa cementacije, iako zaključci o hidrauličnosti materijala (ovde spadaju kreč i cementi) ne mogu biti oslonjeni samo na njegov hemijski sastav, već i način proizvodnje, odnosno temperaturu pečenja (Eckel 1922: 173–175). Indeks cementacije je primereniji savremenim hidrauličnim vezivima, dok je

obračun indeksa hidrauličnosti uglavnom vezan za period početka industrijske proizvodnje hidrauličnog kreča (SRPS EN 16572: 2016).

Isti obračuni se mogu primeniti i na karbonatno vezivo iz maltera kako bi se odredila njegova priroda, odnosno hidrauličnost. U tu svrhu je potrebno hemijski (rastvaranjem u HCl) ili mehanički, odvojiti vezivo od agregata. Što su dobijeni indeksi veći, to vezivo poseduje bolja hidraulična svojstva. U slučaju postojanja krečnih grudvica u malteru, koje potiču od veziva, može se uraditi i njihova hemijska analiza (Böke *et al.* 2008: 871). Ovi proračuni svakako ne mogu sigurno odrediti da je vezivo u malterima hidraulične prirode, jer SiO₂ može poticati iz dodataka sa pucolanskim svojstvima, a ne iz hidrauličnog kreča (Elsen, van Balen, Mertens 2012: 132).

Hidrauličnost istorijskog maltera je mogla biti postignuta na više načina: upotrebom peska sa većom količinom gline kao agregata (inertni agregat sa reaktivnim komponentama), prirodno hidrauličnog kreča (nastalog kalcinacijom nečistog krečnjaka) ili veštački hidrauličnog kreča (rezultat kalcinacije krečnjaka uz ubacivanje nečistoća u peć pre ili tokom kalcinacije) kao veziva, ili upotrebom prirodnih ili veštačkih materijala sa pucolanskim svojstvima (mehanički ili termički obrađeni – i aktivirani – prirodni materijali) kao zamene ili dodatka agregatu (reaktivni agregat). Kao što je napred pomenuto, često je tokom ispitivanja istorijskog maltera teško odrediti poreklo eventualne hidrauličnosti – da li dolazi kao posledica hidrauličnog kreča ili dodavanja materijala sa pucolanskim svojstvima (Elsen, van Balen, Mertens 2012: 133). Reakcije kreča i dodataka posebno su interesantne tokom upotrebe živog kreča, odnosno njegovog gašenja na licu mesta u sklopu mešanja sa agregatom, kada i slučajno uvođenje određenih dodataka sa pucolanskim svojstvima može dovesti do njihove pucolanske reakcije sa krečom (Moropolou, Bakolas, Bisbikou 1995).

Hidrauličnost maltera se može proceniti i upotrebom termogravimetrijske metode, kada je potrebno uzorke maltera osušiti u laboratorijskim uslovima i podvrgnuti termičkom tretmanu. Uzorci se pripremaju tako što se samelju u prah, uključujući i vezivo i agregat (Rizzo, Megna 2008: 174). Me-

renje gubitka mase kod istorijskih maltera se vrši u četiri uza-stopna temperaturna raspona:

- 30–120°C gubitak higroskopne vode;
- 120–200°C gubitak vode iz hidratiranih soli;
- 200–600 °C gubitak vode strukturno vezane za hidraulične komponente;
- >600 °C gubitak ugljen-dioksida iz razgradnje karbo-nata (Rizzo, Megna 2008: 174; Elsen, van Balen, Mer-tens 2012, 132–133; Bakolas *et al.* 1998: 153–154).

Iako ovakva oštra podela gubitaka mase u tačno određenim temperaturnim opsezima predstavlja samo pretpostavku, ona je široko prihvaćena kod istraživača (Rizzo, Megna 2008: 174). Hidrauličnost maltera se često obračunava iz odnosa gubitka ugljen-dioksida i strukturno vezane vode, odnosno odnosa vrednosti gubitka mase na temperaturi >600 °C i temperatu-ri 200–600 °C, i prikazuje se kroz formulu $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ (Bakolas *et al.* 1998: 155–156; Moropolou, Bakolas, Bisbikou 2000: 45–58), koja predstavlja Hr (*ratio of hydraulicity*) (Moropo-lou, Bakolas, Bisbikou 1995: 794). Uzorci sa visokim vredno-stima gubitka strukturno vezane vode i proporcionalno niskim vrednostima gubitka ugljen-dioksida smatraju se hidrauličnim (Elsen, van Balen, Mertens 2012: 133). Prihvaćeno je od više autora da se malteri sa vrednošću odnosa $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ većom od 10 mogu smatrati nehidrauličnim, dok oni kod kojih je ova vrednost između 4 i 10 hidrauličnost duguju hidrauličnom vezivu. Malteri sa vrednošću ispod 3 pripadaju malterima sa dodacima pucolanskih svojstava (Böke *et al.* 2008: 871–873; Corti *et al.* 2013: 79). Neki autori predlažu da vrednosti ispod 3 predstavljaju maltere sa jakim hidrauličnim karakterom (prisustvo prirodnog dodatka sa pucolanskim svojstvima ili materijala na bazi cementa), malteri sa vrednostima između 3 i 6 predstavljaju maltere umerenog hidrauličnog karaktera (npr. prisustvo pečene opeke), vrednosti između 4 i 9 ukazuju na slabiji hidraulični karakter, dok se vrednosti iznad 10 povezuju sa malterima na bazi vazdušnog kreča (Marques *et al.* 2006: 1900). Istraživanja su pokazala i da vrednost gu-bitka mase maltera na temperaturi 30–120 °C može pomoći

u njihovom grupisanju prema stepenu hidrauličnosti, jer se sposobnost apsorbovanja vlage iz spoljne sredine povećava sa hidrauličnošću veziva (Rizzo, Megna 2008: 178).

Potrebno je naglasiti da navedene metode ne daju precizne rezultate ako je agregat koji je korišćen za pripremu maltera karbonatnog porekla, jer on takođe doprinosi vrednosti sadržaja CO₂ (Rizzo, Megna 2008: 175–176; Marques *et al.* 2006: 1900). Međutim, analiza se koristi i u ovim slučajevima, a primer je istraživanje više istorijskih maltera sa ostrva Rodos u Grčkoj, koji potiču od helenističkog perioda do devetnaestog veka, ali i savremenog maltera sa cementom upotrebljenog za restauraciju između dva svetska rata, čiji se agregati uglavnom sastoje od kalcita. Ovo istraživanje prepoznaje tipične krečne maltere (Hr>10) i hidraulične maltere (Hr<6) sa dve podgrupe: malteri sa prirodnim dodacima pucolanskih svojstava, odnosno naprednije hidrauličnosti (Hr<3,5) i maltere sa opekom ili hidrauličnim krečom, koji su umerene hidrauličnosti (Hr=3,5–6), dok savremene cementne maltere izdvaja van grupa (viši nivo hidrauličnosti, sa Hr<3,5 kao kod prve grupe) (Moropolou, Bakolas, Bisbikou 2000: 46, 50–53).

2.8 ODREĐIVANJE STAROSTI MALTERA

Određivanje starosti maltera se može izvršiti relativnim metodama, koje su vezane za vizuelni pregled neke strukture. Tom prilikom se vremenske faze razdvajaju prema uočenim građevinskim intervencijama ili stratigrafiji, degradaciji materijala, tehnikama građenja i obrade materijala, ili prepoznavanjem onih materijala koji su nedvosmisleno vremenski ili prostorno određeni (Henry, Stewart 2011: 217–218). Određivanje apsolutne starosti maltera se vrši primenom metode merenja radioaktivnog ugljenika ¹⁴C (radiokarbon metoda) (savremena tehnika ove metode je akceleratoraska masena spektrometrija – AMS) i termoluminiscencije.

Prvi pokušaji apsolutnog datovanja maltera ovim metodama su izvršeni još šezdesetih godina XX veka (Ringbom *et al.* 2014: 619), a danas se ovim analizama bavi više specijalizovanih laboratorija (Hajdas *et al.* 2018). Najnovija istraživanja datovanja maltera skreću nam pažnju na važnost multidisciplinarnosti i

karakterizacije maltera pre procesa datovanja uz detektovanje kontaminacija, kao presudne u pravilnom odabiru uzoraka za datovanje (Ricci *et al.* 2022). Metoda radioaktivnog ugljenika se primenjuje direktno na krečno vezivo, određujući vreme početka njegove karbonatizacije, odnosno apsorpcije CO₂ iz vazduha, što predstavlja vreme pripreme maltera (Henry, Stewart 2011: 218), jer CO₂ koji se uvodi u strukturu čuva informaciju o aktivnosti ¹⁴C u atmosferi u vreme početka karbonatizacije (Sironić 2022: 95). Radioaktivni izotop ugljenika ¹⁴C nastaje u Zemljinoj atmosferi u reakciji neutrona kosmičkih zraka sa jezgriom ¹⁴N (Krajcar-Bronić *et al.* 2010: 491).

Međutim, nisu svi krečni malteri pogodni za datovanje. Kao nepouzdana smatraju se malteri sa dodatkom prirodnih materijala sa pucolanskim svojstvima koji su primenjeni i očvršćavaju pod vodom, pa stoga nemaju neposredan kontakt sa atmosferom. Ali, i kada su u kontaktu sa vazduhom i očvršćavaju na vazduhu, baš kao i kod maltera sa dodatkom opeke, javljaju se problemi u njihovom datovanju, s obzirom na to da su obe vrste maltera slabo propustljive za vazduh, pa dolazi do njihovog zakasnelog očvršćavanja, i posledično novijih datuma u analizi. Otežavajuća okolnost je i da malteri sa prirodnim pucolanskim materijalima ostaju hemijski aktivni i duže te rekristališu nove karbonate, a sami vulkanski materijali u njima mogu sadržati u sebi „mrtav“ ugljenik ili mehuriće bogate CO₂ (Daugbjerg *et al.* 2020: 1125–1126, 1131).

Prema tome, najpogodniji za datovanje jesu nehidraulični malteri, dok se kod hidrauličnih maltera datuju krečne grudvice ukoliko postoje, uz oprez prilikom njihovog odabira (Lindroos *et al.* 2018: 875–879). Naime, uzorci koji sadrže zrna karbonatnih minerala u agregatu, kao i oni koji sadrže grudvice kao fragmente delimično pečenog krečnjaka računaju se kao kontaminirani, jer su izvor „mrtvog“ ugljenika. Njihov nastanak je vezan za period pre nastanka maltera, pa se ovaj materijal mora precizno odvojiti uz prethodnu mikroskopsku identifikaciju (Daugbjerg *et al.* 2020: 1130–1131; Sironić *et al.* 2020: 96). Na kraju, može se desiti ponovna aktivacija delimično karbonatizovanog veziva tokom nekog kasnijeg požara u istoriji i tako dati lažne podatke o periodu nastanka maltera (Lindroos *et al.* 2020a: 565). Datovanje inkluzija organskog porekla u malte-

ru, s obzirom na to da potiču iz perioda pre nastanka maltera, može biti irelevantno (Henry, Stewart 2011: 218), mada one koje su kratkog veka mogu biti pouzdani tragovi (Daugbjerg *et al.* 2020: 1130).

Za datovanje su najmanje pouzdani uzorci maltera koji su bili izloženi podzemnoj vodi, kiši, ili drugim vodama, kada se može desiti rastvaranje već nastalog CaCO_3 , a zatim i ponovna reakcija sa CO_2 iz vazduha i rekristalizacija. Ovde spadaju i uzorci iz dubine zida, s obzirom na to da očvršćavanje kreće od površine ka unutra, pa se može desiti da oni u unutrašnjosti karbonatizuju i više decenija ili vekova nakon pripreme maltera. Ovakvi uzorci mogu reagovati sa CO_2 iz vazduha kada ih uzorkujemo, što se može proveriti na osnovu reakcije sa rastvorom fenolftaleina, kada vezivo postane ružičasto usled reakcije, pa su pouzdani samo oni koje ne poprimaju boju (Daugbjerg *et al.* 2020: 1127–1129). Čak i spoljni slojevi maltera mogu imati čestice kreča koje nisu karbonatizovale, ili one koje jesu, ali vekovima nakon primene maltera, zarobljavajući mlađi ^{14}C (Lindroos *et al.* 2020a: 565). Zato se uzorci moraju uzeti sa dubine od nekoliko centimetara i pritom treba izbegavati površinu gde se mogla desiti rekristalizacija, dubinu gde postoji zakasnelo očvršćavanje te zaklonjena i suva mesta, iznad zemlje (Daugbjerg *et al.* 2020: 1127–1128, 1130).

Keramički fragmenti u malterima se mogu datovati termoluminiscencijom, prilikom koje se meri svetlost koja se emituje tokom zagrevanja materijala, što dalje određuje nivo prirodne radioaktivnosti koju je keramika pečena na temperaturi iznad $500\text{ }^\circ\text{C}$ primila od trenutka pečenja, pa i taj trenutak. Međutim, nisu svi mineralni fragmenti termoluminiscentni, a keramički fragmenti mogu biti znatno stariji od samog maltera, pa se ovom metodom može odrediti samo maksimalna, ali ne i precizna starost maltera (Henry, Stewart 2011: 218).

Metode datovanja maltera uključuju i optički stimulisano luminiscenciju koja se primenjuje na agregat unutar maltera, a kojom se određuje poslednje izlaganje svetlu minerala kvarca ili feldspata, pa samim tim i nastanak maltera (Goedicke 2011; Stella *et al.* 2013; Urbanová, Boaretto, Artioli 2020; Guibert *et al.* 2020). Istraživanja iz ove oblasti se neprestano unapređuju primenom novih tehnika.

Datovanje maltera je metoda koja pokazuje značaj ispitivanja ovog građevinskog materijala za donošenje važnih zaključaka o hronologiji nastanka i života neke građevine (neki od primera u: Hale *et al.* 2003; Urbanová *et al.* 2018; Lindroos *et al.* 2020b; Sironić *et al.* 2019; Tirelli *et al.* 2021; Daugbjerg *et al.* 2022), a posebno u slučajevima kada ne postoje drugi arheološki tragovi koji bi na to upućivali, ili kada su oni nedovoljni za pouzdanu interpretaciju.



III KOMPONENTE ISTORIJSKIH MALTERA

Tokom istorije je za nastanak građevina različitih namena korišćen širok spektar minerala i stena. Među njima, veoma značajno mesto zauzimaju geološki građevinski materijali, nastali u dugačkom vremenskom rasponu, od paleozoika do kvartara (Bilbija, Matović 2009: 360).

Građevinski geološki materijali su neorganske mineralne sirovine koje potiču iz Zemljine kore i koje se nakon odgovarajuće obrade koriste u građevinarstvu, a nalaze se među prvim mineralnim sirovinama koje su koristili ljudi. Ovi mineralni resursi su pomogli i u razvoju različitih čovekovih veština, počev od toga da ih je najpre bilo potrebno pronaći, potom izdvojiti i obraditi, a zatim iskoristiti na odgovarajući način (Příkryl *et al.* 2016: 1). Ipak, u najvećem broju slučajeva to su bile lako dostupne sirovine, eksploatisane u velikim količinama (Delić-Nikolić *et al.* 2022: 44).

Tradicionalno korišćeni kao osnovni materijali u graditeljstvu, u modernom dobu su, nakon tehnološkog unapređenja, geološki materijali dobili još više na značaju. O tome govori i podatak da danas, u ukupnoj količini mineralnih sirovina eksploatisanih na godišnjem nivou u svetu, kojima se zadovoljavaju ogromne materijalne potrebe savremenog društva, a koje uključuju rude metala, sirovine za građevinske materijale, različite industrijske minerale i stene, fosilna goriva i uran kao izvore energije (Rogich 1996; Baccini, Brunner 2012 u Příkryl *et al.* 2016: 1), najveći deo čine sirovine za građevinske potrebe, što građevinsku industriju čini najvećim potrošačem mineralnih izvora (Příkryl *et al.* 2016: 1–3).

Tokom poslednjih decenija postavlja se pitanje održivosti korišćenja prirodnih sirovina u svetu, posebno onih eksploatisanih u veoma velikim količinama, kao što je slučaj sa geomaterijalima. Postoji izuzetno velika potreba za smanjenjem emisije štetnih materija u atmosferu i uticaja na prirodne sisteme, a samim tim i za smanjenjem eksploatacije geomaterijala. Jedan od načina za postizanje ovog cilja jeste upotreba sekundarnih materijala nastalih tokom prerade primarnih sirovina, ali i ponovna upotreba i recikliranje materijala. Dalje, interesova-

nje za proučavanje tradicionalnih građevinskih materijala sve više raste usled potrebe za zaštitom i održavanjem istorijskih struktura izgrađenih od njih, pa bi veštine njihovog korišćenja i obrade trebalo sačuvati za buduće generacije, kako bi njihova upotreba doprinela očuvanju ovih struktura u uslovima savremene životne sredine (Příkryl *et al.* 2016: 1–4).

Kao geološke građevinske materijale, čovek koristi sve tri vrste stena: magmatske, sedimentne i metamorfne. Od magmatskih stena najčešće su kroz istoriju korišćene i još uvek se koriste: graniti, gabrovi, daciti, andeziti i bazalti. Na osnovu dijagenetskih karakteristika (stepena litifikacije) sedimentne stene se dele na vezane, poluvezane i nevezane (Đorđević, Đorđević, Milovanović 1991: 153; Jevremović 1997: 1). Tako se od sedimentnih vezanih stena koriste: krečnjaci, dolomiti, peščari, breče, konglomerati i travertini, od sedimentnih poluvezanih – različite gline, a od nevezanih: šljunak i pesak. Od metamorfnih stena najčešće se srećemo sa mermerom, kvarcitom i različitim vrstama škriljaca. Mogućnosti i način korišćenja stena kao građevinskih materijala zavise od njihovog mineraloško-petrografskog sastava, strukture i teksture, zatim od fizičko-mehaničkih i tehničko-tehnoloških svojstava i vremenske trajnosti. Među najznačajnija fizička svojstva spadaju: boja, specifična i zapreminska masa, poroznost, vlažnost, upijanje vode, vodopropustljivost, kapilarnost i dr. Bitna mehanička svojstva stena su: čvrstoća (na pritisak, savijanje, smicanje i zatezanje), tvrdoća, žilavost, habanje, deformabilnost, plastičnost i dr. Kod nevezanih stena, šljunka i peska, od presudnog je značaja veličina zrna, odnosno njihov granulometrijski sastav. Značajna tehnička svojstva za upotrebu stena kao materijala za građenje jesu: toplotna svojstva, otpornost prema vatri, propustljivost svetlosti, akustičnost, električna i magnetna svojstva, radioaktivnost i dr. U savremenom dobu veoma su bitna i brojna tehnološka svojstva, kao što su na primer, za prirodni kamen suštinski važni otpornost prema bušenju, razorivost eksplozivom, otpornost prema rezanju ili drobljenju i dr. (Bilbija, Matović 2009: 21–213; Jevremović 1997: 10–114).

Kao geološki građevinski materijali stoga se koriste genetski i funkcionalno raznovrsni materijali različitog sastava

i svojstava, a to su najčešće: kamen za građenje i kao sirovina za proizvodnju drobljenog kamenog agregata; stene za proizvodnju veziva (cement i kreč); gline za izradu opekarskih proizvoda i veziva; i šljunak i pesak kao agregati.

U istorijskim malterima kao kompozitnim materijalima koji se sastoje od više lokalnih geoloških materijala oslikava se geološka građa određenog predela (Balksten 2010: 1). Raznovrsnost upotrebljenih komponenti pokazuje koliko je graditelj poznao svoje lokalno okruženje i koristio njegove potencijale, to jest geološke resurse za svoje potrebe. Ponekad, prilikom karakterizacije sirovina upotrebljivanih za izradu maltera, mogu se dobiti dragoceni podaci o nekadašnjim majdanima koji danas više nisu vidljivi.

Prilikom istraživanja maltera u okviru projekta *MoDeCo2000*, među važnim podacima potrebnim za karakterizaciju uzorkovanih maltera bili su i oni u vezi sa poreklom upotrebljenih sirovina i njihovim povezivanjem sa sirovinama prisutnim na lokalnoj teritoriji – na određenom prostoru ili delu prostora Srbije. Raznovrsnost geološkog sastava, složena geološka aktivnost na teritoriji Srbije i prisustvo stena različitog načina nastanka, starosti i porekla prikazani su na geološkoj karti (**Slika 68**).

Svojstva agregata, veziva ili dodataka korišćenih u istorijskim malterima koja će biti izložena nadalje u tekstu ispituju se u okviru karakterizacije maltera, kako bi se odredila njihova uloga u samim malterima i međusobni odnos, i dobile različite informacije o njihovom poreklu i eksploataciji. Na osnovu ovih podataka definišu se željena svojstva komponenata ove vrste za savremenu upotrebu u konzervatorskim modelima maltera. Komponente se odabiraju (poželjno je da budu skoro u potpunosti lokalnog porekla), a zatim se testiraju njihova svojstva kao i kod onih istorijskih, kako bi se utvrdilo da li zadovoljavaju potrebne sličnosti sa njima, ali i standarde, sve u cilju nastanka kompatibilnih i trajnih maltera koji će se dalje koristiti za konzervaciju.

Osim geoloških građevinskih materijala koji predstavljaju osnovnu sirovinu za izradu i istorijskih i savremenih maltera, ovde će biti pomenuta još jedna komponenta neophodna za pripremu maltera, odnosno voda. Voda je neophodna za hi-

Kvalitet vode doprinosi čvrstoći maltera, a voda usled nečistoća i sadržaja određenih minerala može agresivno uticati na komponente, a onda i svojstva maltera koji one čine. Kišnica sadrži gasove, malo rastvornih soli, prašinu, čađ i dr. Rečna voda ima manje rastvornih soli od same izvorske vode, ali često sadrži visok procenat organskih jedinjenja, primese minerala iz grupe glina i dr. Ustajala voda, kao što je barska, usled truljenja organskih materija sadrži štetne sastojke. Podzemne vode i pored većeg sadržaja rastvornih soli nisu agresivne, osim u slučaju kada su mineralizovane, i one se generalno ne koriste za izradu materijala. Otpadne vode se ne smeju koristiti zbog različitih primesa, posebno organskih komponenti. To znači da je tokom pripreme maltera za konzervaciju važno koristiti čistu, najbolje pijaću vodu, koja se, pored one rečne, najčešće i koristi u izradi građevinskih materijala (Tufegdžić 1979: 16–18).

Kvalitet vode se može ispitati na osnovu hemijskih laboratorijskih analiza, ali i na osnovu poređenja mehaničkih svojstava maltera izrađenog korišćenjem vode koja se ispituje i maltera u kome je kao komponenta upotrebljena čista pijaća voda. Uslov za korišćenje određene vode je da malter za koji je ona upotrebljena postigne vrednost čvrstoće višu od 90 % vrednosti čvrstoće dobijene na malteru pripremljenom sa vodom za piće (Muravljev 1995: 233).

Morska voda sadrži mnogo rastvornih minerala, a najviše NaCl, pa njena upotreba u malteru povlači pojavu eflorescencije. Iako je, po pravilu, ne bi trebalo koristiti kao komponentu maltera, ona ne utiče na smanjivanje mehaničkih svojstava materijala (Tufegdžić 1979: 16–17). Može se koristiti i uz savremene portland cimente, ali samo ako u strukturi nema čelika (Oleson 2014: 19, 108). Međutim, upotreba savremenih betona u morskim sredinama (izloženost betona morskoj vodi) poseban je problem vezan za složene hemijske i fizičke procese u materijalima (Jackson 2014: 167).

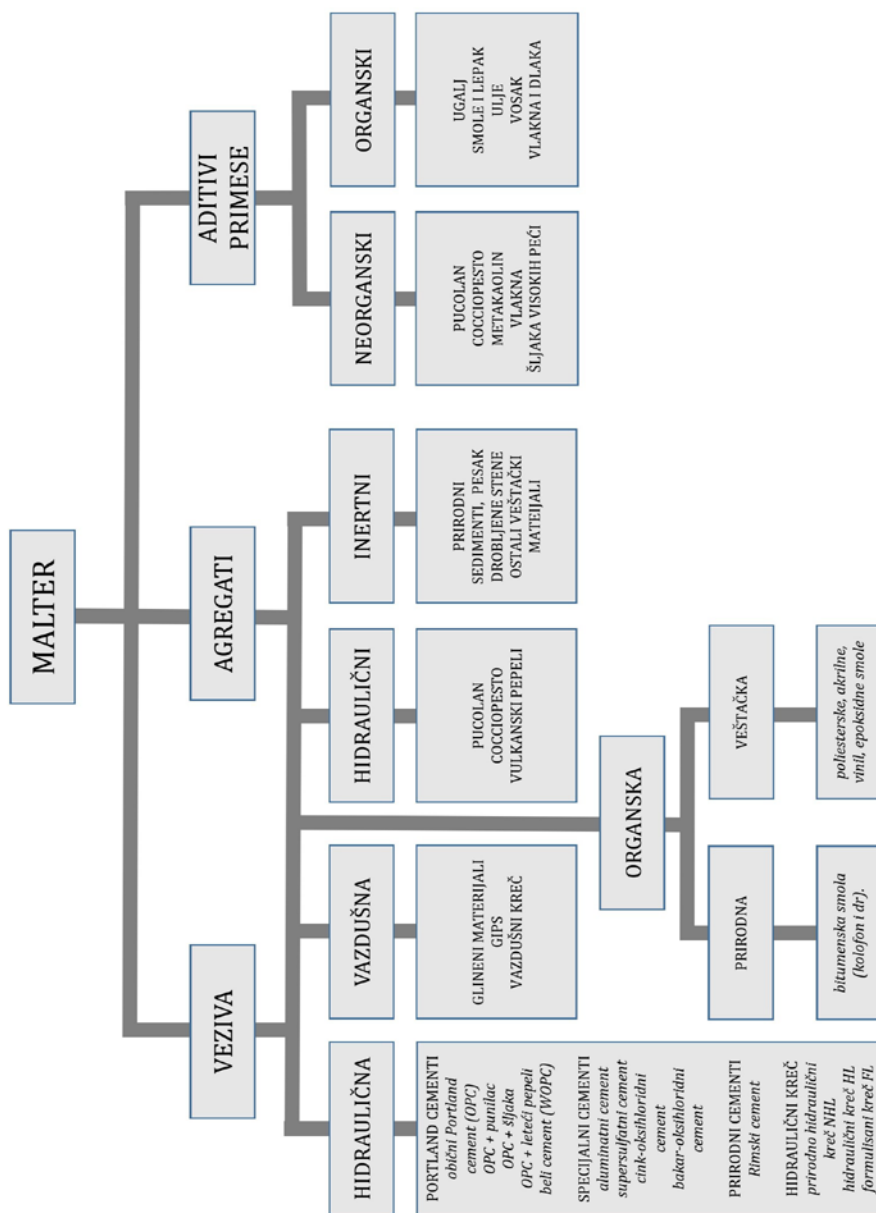
Antički pisci ne daju posebna uputstva u vezi sa mogućnosti upotrebe morske vode u spravljanju rimskog betona ili maltera, niti se kroz njihove tekstove može zaključiti da je morska voda predstavljala bilo kakvu smetnju u pripremi ovih materijala. Obezbeđivanje velike količine slatke vode na gradilištu u

slučaju zidanja struktura u samom moru (luka) predstavljalo bi izuzetno ozbiljan problem. Morska voda bi u svakom slučaju dospela do maltera s obzirom na položaj struktura (Oleson 2014: 19, 27, 108). Savremena istraživanja rimskih betona građevina podizanih na morskim obalama i u moru pokazala su da je morska voda zaista i upotrebljavana kao njihova komponenta (Oleson 2014: 19). Hidraulični malteri nastali od vulkanskog pepela, kreča i morske vode korišćeni su za nastanak betonskih struktura rimskih luka na Mediteranu (Jackson 2014; Jackson *et al.* 2012), a istraživači su pokazali da su rezultati reakcija koji nastaju u ovim betonima tokom izloženosti morskoj vodi drugačiji od onih kod savremenih betona, usled upotrebe vulkanskog pepela umesto portland cementa, to jest da kod rimskih betona nastaju izuzetno stabilna jedinjenja (Jackson 2014: 166). Tokom izrade savremenih replika rimskih betona u moru takođe je upotrebljavana morska voda, uz oprez da ne sadrži prosuto ulje ili benzin, kao ni organski ili plastični otpad (Oleson 2014: 104, 108).

Kako bismo razumeli međusobne odnose komponenta koje čine istorijske maltere, neophodno je prethodno napraviti njihov pregled. Sledeća šema prikazuje raznovrsnost (**Slika 69**) mogućih komponenti. Pošto se zna da se one u cilju izrade maltera međusobno kombinuju, teško je zamisliti koliko različitih kompozicija može nastati na ovaj način. Ovo pokazuje koliko je interpretacija sastava istorijskih maltera složen proces. U daljem tekstu osnovne komponente istorijskih maltera su prikazane kroz njihova osnovna svojstva i načine njihovog ispitivanja.

3.1 AGREGATI

Agregat je nevezani materijal koji može biti prirodni, proizveden ili recikliran, i koji se koristi u građevinarstvu (SRPS EN 13139: 2007). Najveći deo građevinskih agregata pripada prirodnom agregatu, koji se dobija drobljenjem stena iz kamenoloma ili iz prirodno nastalih depozita peska i šljunka (Smith, Collis 2001: 6).



Slika 69. Tipologija maltera i vrste komponenti (šema nacrtana na osnovu SRPS EN 17187:2021)

Prirodni agregat potiče iz mineralnih izvora i izložen je isključivo mehaničkoj obradi, dok proizvedeni agregat, takođe mineralnog porekla, nastaje industrijskom obradom koja uključuje toplotne i druge modifikacije (SRPS EN 13139: 2007), odnosno obuhvata otpad iz određenog industrijskog postupka, pa ga stoga možemo nazvati veštačkim. Primera radi, u veštački agregat spadaju: šljake visokih peći, ekspanzirana glina, kalcinirani boksit, leteći pepeo, ili čak kompletno sintetički proizvodi, kao što su kuglice polistirena (Smith, Collis 2001: 2).

Reciklirani agregat nastaje obradom mineralnih materijala prethodno upotrebljenih u građevinarstvu (SRPS EN 13139: 2007). U savremenom dobu reciklirani agregat uglavnom vodi poreklo od betona (Malešev, Radonjanin, Marinković 2010; Pacheco *et al.* 2023), ali to mogu biti i drobljena opeka ili drobljeno staklo (SRPS EN 13139: 2007). Upotreba otpadnog materijala nastalog nakon građevinskih i rudarskih aktivnosti kao agregata u betonima je aktuelna već više decenija, ali je istovremeno još uvek predmet istraživanja (Příkryl 2021: 8832–8833). Kroz proces reciklaže tokom istorije, kao agregat su korišćeni i drobljeni stari malteri koji su usled svoje poroznosti uvlačili vodu i CO₂ iz atmosfere u novi malter i tako pomagali proces karbonatizacije (Henry, Stewart 2011: 58).

Prema standardu za tehničke termine za maltere koji se koriste u kulturnom nasleđu, agregati su „čestice prirodnih sedimentata ili drobljenih stena sa širokim opsegom veličina”. Kao agregat su u standardu prepoznati prirodni sedimenti (pesak i dr.), drobljene stene (kalcitske, dolomitične, silikatne i dr.), i veštački materijali (SRPS EN 17187: 2021), ali i laki agregati, kao što su ekspanzirane gline, vermikulit i perlit (SRPS EN 16572: 2016). Među lakim agregatima čija se upotreba ispituje u savremenim malterima za konzervaciju spomenika jeste plovućac (Pavlík *et al.* 2023).

Stena je prirodni materijal sačinjen od mineralnih asocijacija određenog hemijskog sastava i određene strukture, koji gradi Zemljinu koru. Šljunak i pesak predstavljaju klastične sedimentne stene, koje nastaju prilikom raspadanja stenskih masa otkrivenih na površini Zemlje pod uticajem egzogenih činilaca (Bilbija, Matović 2009: 365), odnosno prilikom trans-

porta i sedimentacije ostataka raspadanja ili mehaničkog detritusa (Đorđević, Đorđević, Milovanović 1991: 154).

Peskom se naziva rastresiti sitnoklastični ili psamitski sediment⁴ (Đorđević, Đorđević, Milovanović 1991: 163; Jevremović 1997: 7) koji je sastavljen od zaobljenih odlomaka minerala i stena, kod kojeg se sa smanjenjem veličine zrna povećava sadržaj mineralnih zrna. Uglavnom je heterogenog sastava, ali se neretko sreću i monomineralne vrste peska (**Slika 70**).



Slika 70. Pesak: prirodni, heterogenog mineralnog sastava (levo); monomineralni (kvarcni) pesak (desno) – poreklom iz Srbije

Postoje različite klasifikacije peska u zavisnosti od veličine zrna. Prema jednoj od njih, krupnozrnim peskom se smatra pesak veličine zrna od 0,5 mm do 2 mm, srednjezrnim od 0,25 mm do 0,5 mm i sitnozrnim od 0,05 mm do 0,25 mm (Đorđević, Đorđević, Milovanović 1991: 163). Druga podela, krupnozrnim peskom smatra pesak veličine zrna do 4 mm, srednjezrnim do 2 mm i sitnozrnim do 1 mm (Bilbija, Matović 2009: 366). Standard za identifikaciju i klasifikaciju tla (SRPS EN 14688-1: 2018) pak kao krupnozrni pesak definiše materijal veličine od 0,63 mm do 2 mm, kao srednjezrni materijal između 0,2 mm i 0,63 mm i kao sitni pesak zrna od 0,063 mm do 0,2 mm. Prema napred pomenutom standardu tehničkih termina za maltere koji se koriste u kulturnom nasleđu, peskom se naziva „fini agregat za malter koji se obično sastoji od kvarca i silicijuma

⁴ Psamitska struktura podrazumeva veličine zrna od 0,05 mm do 2 mm.

ili silikata/karbonata, sa česticama u opsegu od 4 mm do 0,063 mm" (SRPS EN 16572: 2016).

Šljunak se može definisati kao krupnoklastični ili psefitski sediment sa veličinom zrna od 2 mm do 125 mm (Đorđević, Đorđević, Milovanović 1991: 159; Jevremović 1997: 7), odnosno od 4 mm do 125 mm (Bilbija, Matović 2009: 366). Izgrađen je od zaobljenih odlomaka stena, povremeno i zrna minerala (**Slika 71**), pri čemu veličina valutica, oblik zrna i stepen zaobljenosti veoma variraju. Ovo variranje je uslovljeno dužinom transporta od mesta raspadanja matične stene i vrstom materijala. Tokom transporta dezintegrirani materijal se usitnjava trenjem zrna jedno o drugo, udarima krupnijih fragmenata o sitne, drobljenjem manjih zrna pod pritiskom onih većih i sl. Na veličinu klastičnih sastojaka utiču i sredina taloženja i njena dinamika (Протић 1984: 48). Postoji više klasifikacija šljunka u zavisnosti od veličine zrna. Prema nekim autorima (Đorđević, Đorđević, Milovanović 1991: 159) krupnim šljunkom se smatra materijal veličine zrna 25 mm do 100 mm, šljunkom srednjeg



Slika 71. Tipični rečni šljunak – poreklom iz Dunava u Srbiji

zrna materijal veličine 10 mm do 25 mm i sitnim šljunkom materijal od 2 mm do 10 mm. Drugi autori (Bilbija i Matović 2009: 366) navode da se krupnozrnim šljunkom naziva onaj sa veličinom zrna 32 mm do 125 mm, srednje krupnim materijal veličine od 8 mm do 32 mm, a sitnim od 4 mm do 8 mm. Standard (SRPS EN 14688-1: 2018) navodi da krupnozrnim šljunku pripadaju zrna veličine od 20 mm do 63 mm, srednjezrnim od 6,3 mm do 20 mm i sitnom šljunku od 2 mm do 6,3 mm. Prema standardu tehničkih termina za maltere koji su deo struktura kulturnog nasleđa (SRPS EN 16572: 2016), šljunak se definiše kao „prirodni agregat nastao aluvijalnim ili glacijalnim procesima, koji ima krupna, glatka, zaobljena ili sferična zrna dominantnih dimenzija preko 4 mm”. Prema stepenu zaobljenosti, zrna šljunka se dele na vrlo uglasta, uglasta, subuglasta, subzaobljena, zaobljena i dobro zaobljena, prema obliku zrna na kubična, pljosnata i izdužena, i prema teksturi površine na hrapava i glatka (SRPS EN 14688-1: 2018).

Područje primene prirodnog peska i šljunka nije previše široko, ali su količine koje se koriste izuzetno velike. Najviše se koriste u građevinskoj industriji, uglavnom su lako dostupni, ne zahtevaju složen proizvodni proces, pa su stoga i jeftini. Oko polovine proizvodnje agregata u svetu koristi se za proizvodnju betona, u čijoj masi agregati čine 75–85 %. U poslednjim decenijama se, zbog velikih potreba za prirodnim sedimentima, ali i potrebe za umanjnjem uticaja na rečne i morske ekosisteme u kojima se eksploatacija vrši, sve više pribegava njihovoj zameni drobljenim kamenom, mada to nije izvodljivo u svim slučajevima. Jedan od njih je malter, gde se uglavnom mora koristiti rečni pesak usled potrebne morfologije čestica i granulometrijskog sastava⁵. Ipak, delimična zamena peska i šljunka posebno proizvedenim finim česticama drobljenog kamena, u betonima, pa i u malterima može se vršiti (Příkryl 2021: 8831–8832, 8834, 8840).

Zbog potrebe proučavanja literature na stranim jezicima koja se bavi ispitivanjem istorijskih maltera važno je pomenuti i termine za agregate na engleskom jeziku. Tako *coarse aggregate* prema opštem standardu za agregate maltera (SRPS EN 13139: 2007) obuhvata agregat dimenzija većih od 4 mm,

⁵ I u značajno manjoj meri šljunak, veličine zrna uglavnom do 30 mm.

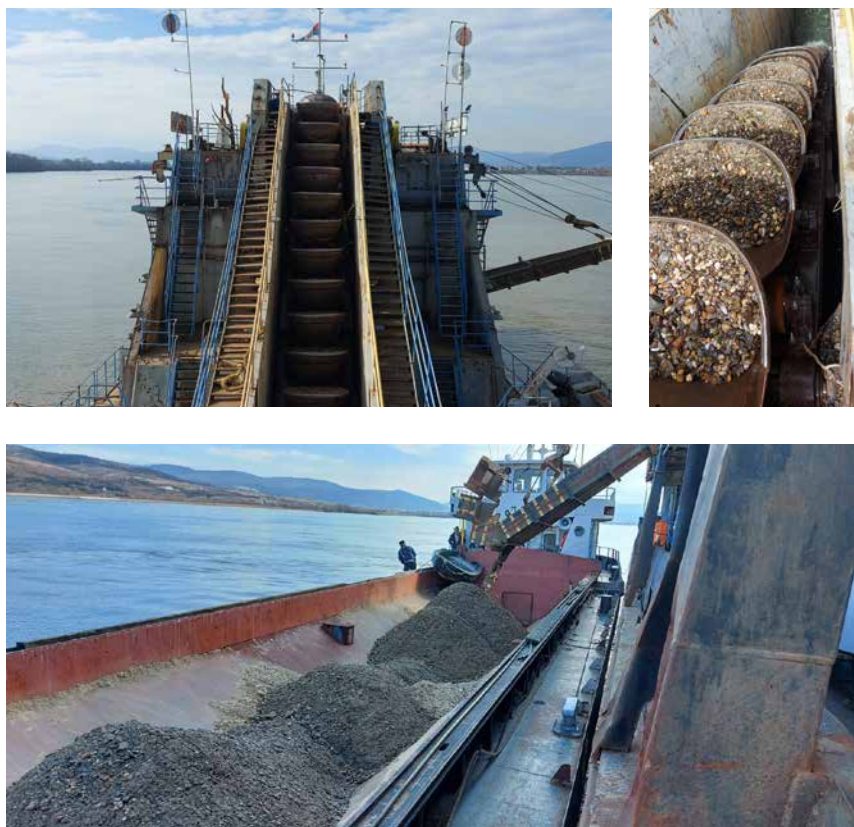
odnosno ono što nazivamo krupnim agregatom; *fine aggregate* predstavlja agregat veličine do 4 mm, odnosno sitan agregat; dok *fines* označava sitne čestice, odnosno čestice veličine do 0,063 mm. Standard za istorijske maltere (SRPS EN 16572: 2016) kao *coarse aggregate* prepoznaje prirodni šljunak i drobljeni kamen (sa zrnima dimenzija >4 mm), pesak predstavlja *fine aggregate* (sa dimenzijama zrna od 0,063 mm do 4 mm), dok su fine prirodne čestice označene kao silt (dimenzije zrna od 0,002 mm do 0,063 mm) i glina (najmanje dimenzije), što je sve u skladu sa terminima datim u opštem standardu za agregat maltera.

Vrste agregata istorijskih maltera

Priroda agregata u istorijskim malterima je vrlo raznolika. Najčešće je korišćen prirodni agregat, i to rečni pesak, nešto ređe su korišćeni rečni šljunak, majdanski agregat i drobljeni kameni agregat, ali i morski pesak i šljunak, što je sve zavisilo od njegove dostupnosti. Netradicionalnim agregatima maltera pripadaju ekspanzirani materijali (kao što su vermikulit, perlit, plovućac, ekspanzirana glina), drvenasti delovi konoplje i drobljeno staklo (Henry, Stewart 2011: 255).

Najviše eksploatisane i korišćene mineralne sirovine za agregate maltera kroz istorijske periode na teritoriji današnje Srbije predstavljaju aluvijalni nanosi lokalnih vodotokova, odnosno pesak i šljunak, nastali mehaničkom akumulacijom klastičnog materijala stvorenog raspadanjem matičnih stena (Delić-Nikolić *et al.* 2022: 45) (**Slika 72; Slika 73**). Ove dve mineralne sirovine se u prirodi najčešće javljaju udružene. Obično su heterogenog mineraloško-petrografskog sastava, uslovljenog hidrogeološkim režimom i geološkom građom određenog predela (Delić-Nikolić *et al.* 2022: 45; Delić-Nikolić *et al.* u štampi). Najčešće se sastoje od različito zaobljenih valutaka kvarca, rožnaca, kvarcita, škriljaca, granitoida, peščara, krečnjaka i dr., a sa smanjenjem veličine zrna ovih nevezanih stena povećava se učešće samostalnih minerala (Delić-Nikolić *et al.* 2022: 45). Primera radi, šljunak i pesak poreklom iz Dunava pretežno se sastoje od zrna kvarca, rožnaca, magmatskih stena i gnajsa. Sličnog je sastava materijal iz Velike Morave.

143



Slika 72. Savremena eksploatacija šljunka i peska iz Dunava
(Arhiva Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS)

Aluvijalni sedimenti Nišave sadrže značajne količine krečnjaka i peščara (Jevremović 1997: 242), a oni iz Južne Morave imaju znatno učešće metamornih stena (na osnovu iskustva Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS). U drinskom šljunku zastupljenost krečnjačkih zrna, naročito u krupnijim frakcijama, veća je nego u bilo kojem drugom šljunku iz Srbije (Marčeta i dr. 2007: 156).

Osim peska i šljunka, kao agregat u istorijskim malterima na teritoriji današnje Srbije povremeno je korišćen i agregat dobijen drobljenjem lokalnog kamena (Delić-Nikolić *et al.* 2022: 45). Tako se (prema iskustvu Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS), zavisno od geološke građe određenog područja, u istorijskim malterima građevina današnje Srbije nalaze zrna škriljca, krečnjaka, travertina, mermera i sl. (**Slika 73**).

144

Jedan od najviše citiranih istorijskih zapisa o malterima, u kome su odnosi agregata sa krečom vezani upravo za vrstu agregata, ostavio je Vitruvije, prema kome su Rimljani upotrebljavali tri vrste peska: majdanski – vulkanski materijal iz provincije Lacij (*harenae fossiciae*), rečni (*harenae fluviaticae*) i morski (*harenae marinae*), kao i vulkanski pepeo iz okoline Kume, Baje i Vezuva (*pulvis*), zajedno sa krečom, u pripremi maltera (Vitruvije 1951: II.4, 6, V.12; Oleson, Marra, Deocampo 2007; Oleson, Jackson 2014: 2; Oleson 2014: 34; D'Ambrosio *et al.* 2015; Dilaria *et al.* 2023). Za svaki od ovih agregata (inertnih ili reaktivnih) Vitruvije daje preporuke razmere mešanja kod maltera za zidanje: u odnosu 1:3 za kreč i majdanski pesak; 1:2 za kreč i rečni ili morski pesak; 1:2 za kreč i *pulvis* (kod izrade struktura pod vodom); kao i predlog unapređenja mešavine kreča sa rečnim ili morskim peskom, kada uz dodatak drobljenih i mlevenih keramičkih materijala dobijamo odnos 1:2:1 (Vitruvije 1951: II.5, V.12).



Slika 73. Agregati različitih granulacija, prirodni i drobljeni- poreklom iz Srbije

Emilijan Josimović (1823–1897), inženjer, profesor matematike, geodezije, arhitekture i građenja puteva na Liceju,

kasnije Velikoj školi, kao i na Artiljerijskoj školi u Beogradu (Vuksanović-Macura, Jevtić-Novaković 2020: 73), piše u svom udžbeniku *Građanska arhitektura i građenje putova* 1860. godine između ostalog i o građevinskim materijalima. Pišući o malterima, razmatra dve vrste peska, „rečni” (sa obala i ostrva reka) i „zemni” (iz zemlje), kazujući da je prvi zaobljenijeg i ujednačenijeg zrna, i tako bolji za pripremu maltera za malterisanje, dok je onaj drugi, koji je neophodno prethodno ispirati od zemlje, oštrij i bolji za upotrebu u malteru za zidanje. Prema njegovom mišljenju, „pesak od belutka”, koji je najčešći, ujedno je i najbolji, ali autor ne isključuje ni „krečni pesak” ako je od tvrdog kamena. Ne zaboravlja „glinasti pesak” (od „glinastog kamena”), koji ima svojstva pucolana i trasa te daje dobar hidraulični malter. Takođe navodi da „masniji” kreč traži više peska, a „mršaviji” manje, i da nikada zapremina dobijenog maltera ne treba da bude jednaka zbiru zapremina upotrebljenog peska i kreča, već uvek manja, jer kreč mora ispuniti šupljine između zrna agregata (Юсимовићъ 1860: 42–43).

Karakteristike agregata utiču na svojstva svežih ili očvrsljih maltera na mnogo načina (Balksten 2007: 15). Agregat se uglavnom smatra inertnom komponentom maltera, koja se ne menja tokom procesa mešanja i očvršćavanja maltera i ne reaguje sa drugim komponentama, iako ponekad može doći do reakcije između veziva i određenih vrsta agregata. Ova, tzv. alkalno-silikatna reakcija (Schnabel 2008: 1) zavisi od mineralnog sastava agregata. Agregat služi kao „noseći skelet” u strukturi očvrsljog maltera, umanjujući efekat pucanja veziva pri očvršćavanju (Balksten 2007: 15; Schnabel 2008: 1). Drugim rečima, umanjuje zapreminske promene, omogućava ravnomernije vezivanje, često daje i veću čvrstoću malteru, i najzad, smanjuje cenu samog maltera (Tufegdžić 1979: 126). Doprinosi poroznosti, propustljivosti i trajnosti maltera. Takođe, povećava otpornost na habanje, jer je uglavnom čvršći od očvrsljog krečnog veziva, a posebno je to slučaj sa vrstama kvarcnog peska. Ima najveći uticaj na prionljivost i radne sposobnosti maltera, i igra važnu ulogu u određivanju njegove boje i teksture (Henry, Stewart 2011: 254).

Karakterizacija agregata korišćenog u istorijskom malteru veoma je bitna, jer se tokom odabira komponenti za konzervatorski malter najčešće zahtevaju ista vrsta i poreklo agregata, odnosno adekvatna sličnost svojstava novog agregata sa onim iz originalnog maltera, kako bi se ispunili kriterijumi različitih vidova kompatibilnosti.

Ispitivanja agregata

Kvalitet agregata za upotrebu u malterima definisan je na osnovu standarda (SRPS EN 13139: 2007) kojim su obuhvaćena njegova geometrijska, fizička i hemijska svojstva, a među njima su:

- veličina i raspodela zrna (granulometrijski sastav) (ispituje se u skladu sa SRPS EN 933-1: 2013);
- sadržaj i kvalitet tzv. sitnih čestica (čestica manjih od 0,063) (ispituju se u skladu sa SRPS EN 933-1: 2013; SRPS EN 933-8: 2016; SRPS EN 933-9: 2023);
- oblik zrna kod krupnozrnog agregata, tj. agregata >4 mm (ispituje se u skladu sa SRPS EN 933-3: 2013; SRPS EN 933-4: 2010) i udeo ljuštura u njemu (ispituje se u skladu sa SRPS EN 933-7: 2007);
- prisustvo organske materije (ispituje se u skladu sa SRPS EN 1744-1: 2014);
- i postojanost na mraz, odnosno toplotne i vremenske uticaje (ispituje se u skladu sa SRPS EN 1367-1: 2010; SRPS EN 1367-2: 2010).

Osim ovih svojstava, standard navodi da se kod prirodnog agregata za malter ispituju i neka druga svojstva, u skladu sa odgovarajućim standardizovanim metodama ispitivanja. Reč je o zapreminskoj masi (prema SRPS EN 1097-6: 2016); petrografskim svojstvima (prema SRPS EN 932-3: 2023); prisustvu hlorida (prema SRPS EN 1744-1: 2014); prisustvu jedinjenja koja sadrže sumpor (prema SRPS EN 1744-1: 2014); prisustvu komponenata koje menjaju svojstva vezivanja maltera i brzinu njegovog očvršćavanja (među kojima su i navedene organske materije) (prema SRPS EN 1744-1: 2014); i upijanju vode

(prema SRPS EN 1097-6: 2016). Isti standard (SRPS EN 13139: 2007) za industrijske agregate propisuje i dodatna ispitivanja, a prema drugim standardizovanim metodama: prisustvo materija rastvorljivih u vodi (prema SRPS EN 1744-1: 2014) ili gubitak žarenjem (prema SRPS EN 1744-1: 2014; SRPS EN 450-1: 2014).

Sadržaj štetnih materija u agregatu može dovesti do određenih negativnih posledica u malteru. Tako, prisustvo rastvorljivih soli (hlorida) unosi u malter štetne komponente (npr. higroskopni natrijum-hlorid u neopranoj morskoj pesku uvodi vlagu, usled čega kod ciklusa kvašenja i sušenja dolazi do rasta kristala soli koji uništavaju strukturu maltera); prisustvo gline oslabljuje vezu između agregata i veziva, a neke mineralne vrste iz grupe glina (smektit) mogu bubriti u vlažnim uslovima; reaktivni SiO_2 reaguje sa jakim alkalijama u cementu (odnosno kada su u pitanju cementni malter, cementno-krečni malter ili beton) dovodeći do pomenute alkalno-silikatne reakcije; pepeo poreklom iz uglja može sadržati štetni sumpor; neke vrste peska sadrže zrna minerala gvožđa ili organsku materiju, koji mogu izazvati mrlje na malteru, što je posebno važno kod malterisanja (Henry, Stewart 2011: 128–129).

Potrebu za tzv. čistim agregatom prepoznali su i antički graditelji, pa je Vitruvije pisao da bi agregat trebalo da bude čist, odnosno bez zemlje (Vitruvije 1951: II.5, V.12). Emilijan Josimović slično piše – „pesak za dobar malter treba da bude sasvim čist, a ne sa zemljom pomešan“, a da čistoću proveravamo „među prstima kada on mora biti oštar i da ih ne prlja, kao što ne prlja čistu vodu u koju ga sipamo“ (Юсимовић 1860: 42).

U cilju detaljnog ispitivanja svojstava agregata u samom istorijskom malteru i odabira odgovarajućih sirovina za konzervatorske modele, može se analizirati i njegov kompletan hemijski sastav. U **Tabeli 2** prikazan je hemijski sastav dva uzorka agregata, peska veličine zrna 0–4 mm poreklom iz Dunava sa teritorije Srbije, koji je kroz istoriju korišćen kao jedna od osnovnih sirovina za pripremu maltera građevinskih struktura na njegovim obalama ili u neposrednoj blizini.

Granulometrijski sastav, odnosno distribucija veličine zrna agregata ima ogroman uticaj na osnovne karakteristike

148

maltera, kao što su obradivost, sposobnost zadržavanja vode, čvrstoća i trajnost. Upotreba dobro graduisanog peska smanjuje sadržaj šupljina, i ujedno omogućava da ih vezivo adekvatno ispuni (Smith, Collis 2001: 234–235). Dobra obradivost maltera takođe zahteva dobro graduisan agregat, sa različitim opsegom veličina zrna. Kod pripreme agregata za izradu maltera kompatibilnih sa istorijskim, važno je istaći da raspodela veličine čestica utiče i na boju maltera, a najveći uticaj imaju najfinije frakcije (<0,15 mm) (Henry. Stewart 2011: 256, 265).

	veličina zrna	gubitak žarenjem na 1000 °C, %	SiO ₂ '	Al ₂ O ₃ ' %	Fe ₂ O ₃ ' %	CaO, %	MgO, %	Na ₂ O, %	K ₂ O, %
uzorak 1	0–4 mm	2,80	75,98	7,78	2,57	4,76	2,30	1,52	1,25
uzorak 2	0–4 mm	4,45	72,96	7,59	1,95	6,60	2,77	1,44	1,24

Tabela 2. Hemijski sastav dva uzorka agregata granulacije 0–4 mm poreklom iz Dunava sa teritorije Srbije (Arhiva Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS)

Ispitivanje granulometrijskog sastava agregata vrši se prema standardu (SRPS EN 933-1: 2013), prosejavanjem kroz seriju sita, pri čemu se meri masa ostala na pojedinim sitima. Za ispitivanje su potrebne vaga, garnitura sita (**Slika 74**) i uređaj za sušenje.



Slika 74. Garnitura sita i pribor za prosejavanje agregata

Uzorak se stavi u sud, doda se voda toliko da pokrije uzorak, a zatim se meša dok se sitna zrna potpuno ne odvoje i istalože. Uzorak se zatim pere kroz sito veličine otvora 0,063 mm sve dok voda koja prolazi kroz njega ne postane potpuno bistra. Ostatak zadržan na situ se osuši do konstantne mase. Tako opran i osušen materijal sipa se na set sita, koji obuhvata više sita uklopljenih jedno u drugo i poređanih po opadajućoj veličini otvora od vrha ka dnu. Prilikom sejanja, garnitura mora biti snabdevena dnom i poklopcem. Sejanje se vrši mehanički ili ručnim pomeranjima garniture sita. Ručno sejanje se vrši naizmeničnim pokretima levo i desno, napred i nazad, ukrug najpre u jednom a potom u obrnutom smeru, kako bi se obezbedilo što potpunije prosejavanje. Zatim se sita skidaju jedno po jedno, počevši od sita sa najvećim otvorom. Ručno se protresa svako sito, ali se vodi računa o tome da se materijal ne izgubi – na primer, korišćenjem dna i poklopca. Sav materijal koji prolazi kroz sito prebaci se na sledeće sito u nizu pre nastavka rada sa tim nižim sitom. Masa svakog ostatka na situ meri se na vagi odgovarajuće tačnosti. Rezultat prosejavanja je količina agregata koja je prošla kroz sito izražena u kumulativnim procentima (**Tabela 3**). Granulometrijski sastav agregata se grafički prikazuje prema standardu (SRPS EN 933-1:2013).

granulometrijski sastav		4,00 mm	2,00 mm	1,00 mm	0,71 mm	0,50 mm	0,315 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
rezultati ispitivanja; kumulativni prolaz kroz sito u %	uzorak 1	100	99,9	99,8	99,8	99,6	90,5	23,3	1,3	0,9
	uzorak 2	100	96,8	93,8	90,5	79,5	51,0	22,4	3,8	1,3
	uzorak 3	100	100	99,8	99,6	99,4	65,8	53,8	2,8	0,5

Tabela 3. Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava agregata 0–4 mm poreklom iz Dunava sa teritorije Srbije (Arhiva Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS)

Kod istorijskog maltera ispitivanje granulometrijskog sastava agregata se primenjuje nakon razdvajanja agregata odveziva nekom od metoda o kojima će biti reči u daljem tekstu. Grafički se prikazuje granulometrijskom krivom kojom se daje kumulativni procenat materijala koji prolazi kroz različita sita, ili histogramom, koji pokazuje procenat materijala koji ostaje

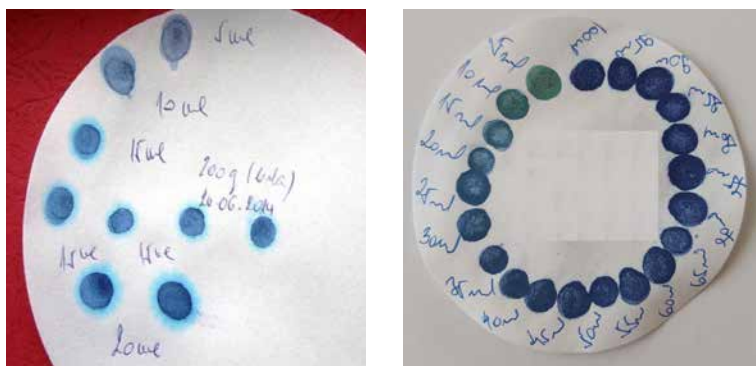
na sitima. Smatra se da je dobro graduisan agregat onaj kod koga tokom sejanja ne ostaje više od 30 % od ukupne mase na jednom od sita (Henry, Stewart 2011: 260–261). Rezultati ispitivanja granulometrijskog sastava agregata u istorijskom malteru važni su ne samo za njegovu karakterizaciju već i za dalju pripremu konzervatorskih maltera (Middendorf *et al.* 2005: 776–777).

Sadržaj i kvalitet sitnih čestica je propisan standardom. Sitnim česticama smatraju se zrna manja od 0,063 mm (eng. *fines*) koja se nalaze u agregatu (SRPS EN 13139: 2007). Prema ovom standardu sadržaj sitnih čestica za upotrebu u malterima treba da bude u granicama do 3 %, pri čemu ova granica nije striktna, već zavisi i od važećih odredbi u mestu korišćenja agregata. U slučaju da je sadržaj sitnih čestica veći, upotrebljivost tog agregata se dokazuje na osnovu dodatnih ispitivanja. Povećan sadržaj sitnih čestica, prvenstveno glinovitih, utiče na fizičko-mehanička svojstva i vremensku trajnost maltera. Na kvalitet sitnih čestica utiču parametri kao što su vrsta prisutne gline u agregatu i odnos glinovite i prašinaste frakcije.

Određivanje sadržaja sitnih čestica obuhvaćeno je ispitivanjem granulometrijskog sastava (SRPS EN 933-1: 2013).

Ispitivanje kvaliteta sitnih čestica određuje se dvema metodama – metodom ekvivalenta peska (SE) i metodom metilen-plavog (MB). Metoda ekvivalenta peska se sprovodi na sledeći način: ispitivani uzorak agregata, uz malu količinu rastvora za pranje i flokulaciju, sipa se u merni cilindar i meša dok se glinovite čestice ne odvoje od onih krupnijih. Posle određenog vremena, mere se visina sedimenta i visina suspenzije u cilindru, a zatim se računa vrednost ekvivalenta peska kao odnos vrednosti ova dva parametra i izražava u procentima (SRPS EN 933-8: 2016). Dobijena vrednost predstavlja relativan odnos peskovite frakcije i ostalih frakcija u agregatu (glinovite, prašinasto glinovite i prašinaste), a veća vrednost znači veću količinu peska od količine glinovitih čestica. Ovo nije mera sadržaja gline, već pokazatelj količine i plastičnosti sitnih čestica (Nikolić Ivanović i dr. 2018: 210). Metodom metilen-plavog (MB) (SRPS EN 933-9: 2023) određuje se prisustvo gline i drugih ekspandirajućih materijala u agregatima koji negativno utiču na kvalitet maltera. Ispitivanje se vrši na

suspenciji ispitivanog materijala i destilovane vode u uređaju sa magnetnim mešanjem. Ova suspenzija se titrira rastvorom metilen-plavog, sve dok kap tako nastale smeše ne pokaže plavi aureol na filter papiru na koji se nanosi (**Slika 75**). Kada se potvrdi prisustvo ove boje, izračunava se vrednost metilen-plavog i izražava kao masa adsorbovane boje u g po kg ispitane frakcije. Ova vrednost je zapravo mera količine adsorbovanog reagensa i proporcionalna je količini prisutne gline.



Slika 75. Titracija suspenzije agregata sa različitim sadržajima gline rastvorom metilen-plavog (MB) (Arhiva laboratorije za veziva, hemiju i maltere Instituta IMS)

Oblik zrna agregata manjeg od 4 mm obično nije relevantan za ponašanje maltera. Za agregat veličine iznad 4 mm oblik zrna se određuje prema standardu (SRPS EN 933-3: 2013) kao indeks pljosnatosti agregata. Ispitivanje obuhvata dva postupka prosejavanja. Najpre se ispitnim sitima uzorak razdvoji na odgovarajuće frakcije, a zatim se svaka frakcija definisane granulacije prosejava na rešetkastim sitima sa paralelnim otvorima, širine upola manje od gornje granične krupnoće ispitivane frakcije. Indeks pljosnatosti se izračunava kao ukupna masa čestica koja prolazi kroz rešetkasta sita, što je izraženo kao procenat ukupne suve mase ispitivanih zrna. Ispitivanje oblika zrna može se vršiti i metodom tzv. 3:1, gde se odgovarajućim agregatom smatra onaj kod koga je odnos najveće (dužina) prema najmanjoj dimenziji zrna (debljina) manji od 3:1 (SRPS EN 933-4: 2010). Ispitivanje se obavlja na agregatu pomoću kljunastog merila, pri čemu se izdvajaju sva zrna sa neodgovarajućim odnosom dimenzija. Ona se klasifi-

kuju kao nekubična, a njihov udeo se izražava u procentima u odnosu na ukupnu masu ispitanih zrna u suvom stanju.

Udeo ljuštura u agregatu takođe određuje njegovu čistoću (SRPS EN 13139: 2007). Određivanje udela ljuštura školjki vrši se na agregatima veličine iznad 4 mm, prema metodi iz standarda SRPS EN 933-7: 2007. Primjenjuje se na šljunak ili mešani agregat (mešavinu prirodnog drobljenog agregata i šljunka). Ispitni uzorak se pripremi postupkom prosejavanja i osuši, a zatim razastre na ravnu površinu, nakon čega se ručno sortiraju ljušture i fragmenti ljuštura iz uzorka. Njihov udeo se određuje u odnosu na masu ispitnog uzorka i izražava u procentima.

Hemijska ispitivanja agregata vrše se prema standardu (SRPS EN 1744-1: 2014), čime se utvrđuje prisustvo određenih hemijskih supstanci koje se smatraju štetnim za malter i beton. Ovde spadaju jedinjenja koja utiču na površinu maltera ili betona, odnosno izazivaju fleke i/ili eflorescenciju, ali i lake čestice, kao što su čestice uglja koje, osim fleka, mogu dovesti do pojave tzv. kokica.

Organske materije, biljnog ili životinjskog porekla, i u malim količinama mogu delovati štetno na maltere (Tufegdžić 1979: 109). Njihovo prisustvo se najčešće ispituje poređenjem boje rastvora uzorka sa rastvorom standardne boje (SRPS EN 1744-1: 2014), dok im se štetnost određuje prema opadanju vrednosti čvrstoće maltera (Tufegdžić 1979, 109). Ova ispitivanja se obavljaju ukoliko se agregat koristi za pripremu maltera sa cementom, jer kod cementnih maltera fulvo kiseline kao komponente huminskih kiselina (iz humusa) znatno usporavaju hidrataciju ili dovode do njegovog ekspanzivnog oštećenja (SRPS EN 1744-1: 2014).

Metoda određivanja prisustva humusa prema standardu (SRPS EN 1744-1: 2014) zasniva se na činjenici da organske materije u reakciji sa NaOH razvijaju tamnu boju. Uzorak agregata se stavlja u bezbojnu staklenu bocu sa 3 % rastvorom NaOH, koja se nakon protresanja ostavlja da stoji 24 časa u zamračenoj prostoriji, nakon čega se boja tečnosti iznad agregata poredi sa rastvorom standardne boje pripremljenim u sličnoj staklenoj boci (rastvor gvožđe(III)hlorid-heksahidrata i kobalt(II)hlorid-heksahidrata u vodi sa koncentrovanom HCl).

153

Intenzitet boje zavisi od sadržaja humusa. Ukoliko agregat ne sadrži velike količine humusa, rastvor neće biti ili će biti vrlo slabo obojen, a ukoliko je rastvor sa ispitivanim uzorkom tamniji od rastvora za poređenje, smatra se da je u agregatu prisutna organska materija (**Slika 76**). Prisustvo fulvo kiselina u humusu se određuje upotrebom HCl u kojoj se one rastvaraju i daju žutu boju (SRPS EN 1744-1: 2014).



Slika 76. Rastvor standardne boje (u skladu sa SRPS EN 1744-1: 2014) u poređenju sa peskom sa sadržajem organske materije (gore) i peskom bez sadržaja organske materije (dole)

Ispitivanje toplotnih i vremenskih uticaja na svojstva agregata vrši se prema standardu (SRPS EN 1367-1: 2010). U skladu sa njim, agregat veličine zrna >4 mm potapa se u vodu pod atmosferskim pritiskom i izlaže zamrzavanju i odmrzavanju tokom deset ciklusa, što podrazumeva hlađenje do $-17,5$ °C pod vodom i odmrzavanje u vodenoj kupci na temperaturi od oko 20 °C. Nakon poslednjeg ciklusa ispituju se eventualne promene agregata, kao što su nastanak pukotina, gubitak mase

ili promene u čvrstoći. Agregat se prema standardu za ispitivanje toplotnih i vremenskih uticaja na svojstva agregata (SRPS EN 1367-2: 2010), uglavnom zrna dimenzija 10–14 mm, ali i manjih, odnosno većih dimenzija ispituje pomoću testa tokom koga se uzorak u mrežastim korpicama od nerđajućeg čelika (**Slika 77**) potapa u zasićeni rastvor magnezijum-sulfata u pet ciklusa, a zatim suši u pećnici na temperaturi $110 (\pm 5) ^\circ\text{C}$, čime se izlaže efektima ponovljene kristalizacije magnezijum-sulfata unutar pora. Rezultat ispitivanja predstavlja maseni procenat degradiranog materijala u odnosu na početnu masu.



Slika 77. Mrežaste korpice od nerđajućeg čelika za potapanje uzoraka u rastvor magnezijum-sulfata

3.2 VEZIVA

Vezivo nosi ključne informacije potrebne za karakterizaciju istorijskih maltera. Upravo po vrsti ili tipu upotrebljenog veziva malteri i dobijaju imena (Weber, Köberle, Pintér 2019: 21). Prema standardu za tehničke termine za maltere koji se koriste u kulturnom nasleđu, vezivo predstavlja materijal sa vezivnim i prijanjajućim svojstvima koja mu omogućavaju povezivanje agregata u konzistentnu i celovitu masu (SRPS EN 16572: 2016).

Tokom istorije građevinarstva upotrebljavane su različite vrste veziva za pripremu maltera, pojedinačno ili u kombinaciji sa drugim vezivom. Veziva su retko korišćena bez upot-

rebe agregata, uglavnom inertnog materijala čija je, kako je napred pisano, uloga bila da smanji promene zapremine tokom očvršćavanja i što više spreči pucanje maltera usled sušenja (Artioli, Secco, Addis 2019: 161).

Vrste veziva istorijskih maltera

U najčešće korišćena veziva maltera kroz istoriju spadaju zemlja (glina), kreč, gips, prirodni i veštački cementi, prirodna ulja, vosak i smole (Henry, Stewart 2011: 27). Slično, prema standardu za karakterizaciju maltera koji se koriste u kulturnom nasleđu (SRPS EN 17187: 2021), veziva su podeljena u glinene materijale, gips, vazdušni kreč, prirodno hidraulični kreč (NHL), prirodni cement (rimski cement, Parkerov cement, i dr.), obični portland cement (OPC), i organska veziva. Upravo u zavisnosti od vrste upotrebljenog veziva, do očvršćavanja maltera može doći pod vodom, u vlažnoj sredini ili na vazduhu, pa se prema nameni maltera vrši i izbor njegove vezivne komponente (SRPS EN 16572: 2016).

Kroz dalji tekst će biti opisana većina napred pomenutih veziva (uz kratak prikaz cementnih maltera), ali će fokus biti na kreču kao predmetu istraživanja projekta *MoDeCo2000*, čije će vrste biti detaljno prikazane.

Zemlja (glina). Zemlja predstavlja najstarije korišćeno vezivo. Najraniji primeri datiraju čak iz paleolita sa prostora Afrike (Dilaria, Secco 2022: 114). U građevinarstvu čitavog sveta korišćena je za potrebe izrade maltera za zidanje (**Slika 78**) i malterisanje, izradu podova, davanje vodonepropusnosti krovovima od organskih materijala, izradu opeka, rad u tehnikama pletera i nabijene zemlje, izradu savremenih blokova za građenje zidova ili njihovu ispunu (Artioli, Secco, Addis 2019: 152; Fabbri *et al.* 2021: 149). Malteri sa glinom se razvijaju u neolitu, Mesopotamiji, Persiji i Anadoliji, kada su intenzivno korišćeni za oblaganje zidova i podova (Dilaria, Secco 2022: 114; Artioli, Secco, Addis 2019; Hobbs, Siddall 2011; Hodder 2006 u Dilaria, Secco 2022: 114).

Čak i onde gde je kreč bio dostupan, mnogo građevina je kroz istoriju nastalo upotrebom zemlje (Henry, Stewart 2011: 27). Zemlja je tako jedan od najviše korišćenih građevinskih

materijala širom sveta. Međutim, s obzirom na to da upija vodu, nije otporna na mraz i rastvara se u vodi (Tufegdžić 1979:334) te predstavlja jedan od najosetljivijih materijala na spoljašnje uticaje (Gomes, Faria, Gonçalves 2018: 2402). Veliki broj građevina od zemlje stoga je spolja imao završni



Slika 78. Blatni malteri antičkih građevina na dunavskom limesu u Srbiji

sloj od krečnog maltera koji je štutio zidove (Curtis 2015: 2) (**Slika 79**). Međutim, malteri od zemlje nisu nužno lošiji izbor za upotrebu unutar struktura zidova od krečnih maltera, i kada se adekvatno održavaju i čuvaju suvim, otporni su i trajni. Oni se smatraju materijalima nižeg kvaliteta, jer imaju slabe karakteristike vezane za zatezanje i otpornost na vodu, međutim, kao malteri, u ulozi maltera za zidanje uglavnom imaju dovoljnu čvrstoću na pritisak (Curtis 2015: 2, 4, 7).

Zemlja je građevinski materijal koji obuhvata akumulaciju produkata raspadanja matične stene i produkata propadanja biološkog materijala (Fabbri *et al.* 2021: 149). Priprema tradicionalnih blatnih maltera obuhvata mešanje zemlje sa vodom, a adekvatna pasta bi trebalo da se lako oblikuje, ne sme biti lepljiva ili peskovita, i ujedno bi trebalo da se rasprostire bez raspadanja kada se nabacuje na površinu. Prilikom pripreme, zemlja se meša po potrebi sa peskom, a količina vode zavisi

157

od osobina same gline (Fernandes 2008: 22). Tokom istorije, graditelji su, nakon velikog broja pokušaja, odredili razmere mešavina koje su koristili (Kojičić, Kojičić 2015: 28).

Svaka zemlja bi danas pre upotrebe trebalo da bude testirana kako bi se utvrdilo da li je adekvatna za određenu primenu. Ovi testovi mogu biti terenski (posmatranje – identifikacija kamena i krupnih frakcija peska; dodir – identifikacija sitne frakcije peska; ispiranje vodom – kako bi ostali samo glina i mulj; miris – za određivanje prisustva organskih materija, u čijem slučaju zemlju ne treba koristiti; test pranja ruku – potvrda prisustva gline i mulja; i test pločice – ispitivanje otpornosti suvog uzorka na lom i procenta skupljanja) ili laboratorijski



Slika 79. Blatni malteri kuće u jednom od današnjih sela na dunavskom limesu, koji su opstali skoro jedan i po vek, ali usled napuštanja kuće i posledičnih oštećenja, nestaju zajedno sa njom (privatna arhiva: Emilija Nikolić).

(prosejavanje, sedimentacija, plastičnost, stišljivost i kohezija) (Kojičić, Kojičić 2015: 29).

Kod blatnih maltera, glina predstavlja vezivo, a za hemijsku stabilizaciju se danas uglavnom koriste kreč i cement, koji im poboljšavaju svojstva (među kojima su čvrstoća i trajnost), mada upotrebu cementa za ove maltere više autora karakteriše kao pogrešnu ako je reč o građevinama koje su i izgrađene od zemlje (Gomes, Faria, Gonçalves 2018: 2402). Osim hemijski, potrebno je i mehanički i fizički stabilizovati zemlju. Pored kreča i cementa, u stabilizatore spadaju pesak i biljna vlakna, a primenjuju se i mnogi drugi tradicionalni i sintetički proizvodi (izmet, krv, dlaka i koža životinja, životinjska ulja, kazein, jaja, vosak, pepeo, termitnjaci, biljne masti i ulja, tanin, biljni sokovi, kiseline, soli, silikati, sintetički lepkovi, sapuni, gips) (Kojičić, Kojičić 2015: 32). Komponente se u malter uvode i u zavisnosti od njegove funkcije. Na primer, 10 % gline daje zemlji kohezivna svojstva i plastičnost, pa je za zidarske maltere potrebna peskovita zemlja sa krupnijim frakcijama peska, dok je za maltere za malterisanje poželjnija peskovito-glinovita zemlja sa sitnijim frakcijama peska (Fernandes 2008: 22).

Upotreba zemlje u savremenom građevinarstvu predstavlja jedan od doprinosa očuvanju životne sredine, kroz promociju izgradnje energetski efikasnih građevina i veze čoveka sa prirodom. Korišćenje zemlje u građevinarstvu ne zahteva veliku energiju, ima male nivoe emisije CO₂, zemlja se može ponovo koristiti i reciklirati (posebno ako nije hemijski stabilizovana) i uglavnom je lokalno dostupna (Gomes, Faria, Gonçalves 2018: 2401) (iako često postoje problemi sa pronalaskom adekvatne zemlje – Кожичић 2014: 207). Nažalost, gradnja zemljom se uglavnom smatra tradicionalnim *neinženjerskim* oblikom konstrukcije (Schroeder 2018: 113), a na zemlju se gleda kao na materijal koji koriste zajednice nižeg ekonomskog kapaciteta (Santos, Faria 2020: 152). U poređenju sa ostalim građevinskim materijalima, za materijale od zemlje postoji nedostatak specijalizovanih standarda. Prisutni su nacionalni standardi ili normativni dokumenti, i to u državama regiona u kojima se nalazi veliki broj građevina od zemlje (u nekoliko država Južne i Severne Amerike, Azije, Afrike, u Australiji i na Novom Zelandu, a na teritoriji Evrope oni postoje u Nemačkoj,

Švajcarskoj, Francuskoj, Španiji, Turskoj) (Schroeder 2018: 113–114). Zahtevi i metode ispitivanja blatnih maltera za zidanje i unutrašnje malterisanje u Nemačkoj su definisani na osnovu standarda (DIN 18946: 2018-12; DIN 18947: 2018-12), ali se oni odnose na fabrički proizvedene blatne maltere. Ispitivanje blatnih maltera nije dovoljno prisutno ni kod istraživača istorijskih maltera.

Gips. Upotreba gipsa u građevinarstvu se prati od kasnog epipaleolita Levanta odnosno od perioda XI–IX milenijuma pre nove ere (BelAnzué, Elert 2021: 1; Kingery, Vandiver, Prickett 1988 u BelAnzué, Elert 2021: 1). Predstavlja osnovno vezivo korišćeno u starom Egiptu (Rodríguez-Navarro 2012: 92; Lea 1970 i Lucas, Harris 1962 u Rodríguez-Navarro 2012: 92), zahvaljujući dostupnosti sirovine, odnosno gipsnog kamena, i to uglavnom za malterisanje (Secco, Dilaria 2022: 115).

Građevinski gips nastaje pečenjem gipsnog kamena (sadre) i sastoji se uglavnom od minerala gipsa (kalcijum-sulfat-dihidrat – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) i primesa kao što su pesak, glina, krečnjak, oksidi gvožđa i dr. Termičkom obradom (dehidratacijom) mineral gipsa gubi jedan deo kristalne vode i postaje gips-hemihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), koji zatim u dodiru sa vodom prelazi u kalcijum-sulfat dihidrat, odnosno očvršćava (Tufegdžić 1979: 272, 283; Muravljov 1995: 177).

Danas su metode ispitivanja i zahtevi za veziva na bazi gipsa definisani na osnovu standarda (SRPS EN 13279-1: 2009; SRPS EN 13279-2: 2015).

Gipsni malteri su se kroz istoriju koristili za zidanje i malterisanje, izradu podova i plafona. Osobine gipsa, među kojima su velika dostupnost sirovine i laka eksploatacija, manja temperatura procesa pečenja nego kod kreča i brže vezivanje samog maltera, kao i otpornost na požar, učinili su ga veoma pogodnim za upotrebu (Mileto, Vegas, La Spina 2011: 1302). Njegov nedostatak je nepostojanost u vodi i vlažnoj sredini (Tufegdžić 1979: 338). Zato su gipsni malteri za zidanje i spoljašnje malterisanje kroz istoriju najviše upotrebljavani u regionima sa suvom klimom, dok im je primena u unutrašnjim prostorima široko rasprostranjena (Mileto, Vegas, La Spina 2011: 1302). Postoji mnogo vrsta gipsa namenjenih različitim radovima, kao

što su štuk-gips, gips za maltere, gips za košuljice i podloge, visokovredni gips i dr. (Tufegdžić 1979: 276–279).

Gipsni malteri se najčešće spravljaју od gipsa i vode, i odmah upotrebljavaju, ali se ovoj mešavini mogu dodati i kreč, pesak, mermer, boje, usporivači vezivanja i dr, u zavisnosti od potrebnih osobina maltera, odnosno vrste radova za koje se pripremaju. Ovi dodaci produžuju vezivanje i daju plastičnost, ali utiču i na smanjenje mehaničkih osobina gipsnih maltera. Takođe, odnos vode i gipsa u smeši, koji se naziva vodogipsni faktor, utiče na svojstva gipsne kaše, kao i očvrstlog gipsa, pa se sa više vode produžava vreme vezivanja, ali se smanjuju tvrdoća i čvrstoća gipsnog maltera (Tufegdžić 1979: 281–282, 291, 338).

Kreč. Najraniji dokaz pripreme maltera na bazi kreča dolazi iz Izraela, i smešta se u XI milenijum pre nove ere, dok su kasniji primeri iz VIII i VII milenijuma pre nove ere i dolaze sa Bliskog i Srednjeg istoka. Ovi malteri su korišćeni kao obloge podova i zidova (Dilaria, Secco 2022: 114; Kingery, Vandiver, Pricket 1988 u Dilaria, Secco 2022: 114). Tehnologija pravljenja kreča je veoma rano bila poznata i na Dunavu, a podovi kuća Lepenskog Vira u Srbiji su bili izrađeni od crvenog krečnjaka (Срејовић 1969: 150), odnosno omalterisani crvenkasto-rozikastom krečnjačkom mešavinom (Borić 2019:44), što uz analogije sa krečnim malterima pronađenim na neolitskim nalazištima u Trakiji i Kefaloniji, može ukazati na prenošenje tehnologije izrade maltera iz Levanta na Balkan i Dunav, iako se ne može isključiti da malteri podova kuća Lepenskog Vira predstavljaju izolovano, nezavisno graditeljsko iskustvo zajednica na Dunavu (Dilaria, Secco 2022: 114). Još ranih osamdesetih godina XX veka vršene su XRD analize uzoraka ovih maltera iz Lepenskog Vira, a rezultati su pokazali da se sastoji od kreča i kvarcnih inkluzija (Tuesen, Gwozdz 1982: 100).

Reč kreč je opšti termin, koji se koristi i za kalcitni i za dolomitni kreč. Obe vrste kreča su proizvod koji nastaje preradom karbonatnih stena: kalcijum-karbonata – CaCO_3 (kalcita ili aragonita), odnosno kalcijum-magnezijum-karbonata – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) (Kudlacz 2013: 13).

Za dobijanje kreča su se kroz istoriju, pa i danas, koristile razne vrste krečnjaka, mermeri, bigar i travertin (Делић-

161

-Николић 2014: 25). Кречњаци се, с обзиром на веома велик број могућности коришћења, сматрају уједно и најкориснијим седиментним стенама (Делић-Николић 2014: 25; Делић-Николић *et al.* у штампи) (**Слика 80**). У Србији, најчешће припада-



Слика 80. Површински коп кречњака и материјал припремљен за транспорт, Србија

ju mezozojskim sedimentima: trijaskim, jurskim i krednim i veoma su zastupljeni (Делић-Николић 2014: 27–28)

Kako bi nastao kvalitetan kalcitni kreč, bitno je da stene budu visoke čistoće, odnosno da procenat sadržanih primesa bude nizak, što bi trebalo da znači da sadržaj CaCO_3 u njima iznosi 95–96 % (Tabela 4).

ležište	Suvo Do, Jelen Do	Nepričava, Lajkovac	Bučevski Potok, Mali Zvornik	Kaona, Kučevo
gubitak žarenjem, %	43,83	42,95	43,80	42,52
SiO_2 , %	0,24	0,65	0,29	1,46
Al_2O_3 , %	0,01	0,34	0,10	0,05
Fe_2O_3 , %	0,06	0,25		0,08
CaO , %	54,19	55,72	55,12	55,36
MgO , %	1,68	0,01	0,47	0,12
Na_2O , %	0,03	0,00	-	0,01
K_2O , %	0,01	0,00	-	0,04
CaCO_3 , %	95,89	99,45	98,39	98,82
MgCO_3 , %	3,51	0,02	0,98	0,25

Tabela 4. Hemijski sastav krečnjaka koji su se koristili ili se još uvek koriste za proizvodnju kreča na prostoru Srbije (Arhiva Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS)

Hemijski čisti krečnjaci bi trebalo da sadrže samo kalcit ili aragonit uz CO_2 , bez bilo kakvih primesa, tj. 56 % CaO i 44 % CO_2 . Međutim, ovakvi krečnjaci su u prirodi veoma retki, i tada su beli ili bledosivi. Zato najčešće srećemo obojene krečnjake, monohromatske ili polihromatske, odnosno sive, crne, sivoplavičaste, oker, mrke, crvene, zelenkaste, zaviso od zastupljene primese, koja može biti kvarc, feldspat, jedinjenje gvožđa, mangana, minerali glina, organska materija i dr. Takođe, mogu biti jednolično, uniformno obojeni, ali i sa neujednačenom pigmentacijom. Prema sadržaju primesa, prepoznavamo glinovite krečnjake (do 5 % gline) obično sive ili sivobele boje; laporovite (sa 5–25 % gline) mahom sive boje; gvoždevite (sa sadržajem oksida gvožđa), koji stenu boje u crvenkasto ili žuto; dolomitične (sa do 40 % MgCO_3);

siliciozne (sa sadržajem SiO_2 istaloženim u vreme stvaranja krečnjaka); peskovite (sa peskovitim komponentama prinetim u vreme stvaranja krečnjaka); bituminozne (sa sadržajem organske materije) crne ili gotovo crne boje (Đorđević, Đorđević, Milovanović 1991: 170, Делић-Николић 2014: 25–26).

Mermeri su uglavnom izgrađeni od kalcita i mogu imati sadržaj CaCO_3 viši i od 98 %. Nastaju metamorfozom karbonatnih stena. U Srbiji su vezani za starije geološke formacije, odnosno paleozoik. Bigar i travertin su sedimentne stene izgrađene od kalcita ili aragonita. Njihovo prisustvo u Srbiji je relativno malo (Делић-Николић 2014: 29–30). Ako se vratimo u istoriju, mnogo rimskih skulptura, dekorativnih mermera i travertina monumentalnih građevina nestalo je u krečnim pećima kasnijih perioda (van Balen 2003b: 2047; Bonnie 2016; De Laine 2021; Munro 2011). U savremeno doba, kako bi se zaštitila životna sredina, istražuju se različite mogućnosti upotrebe otpadnog mermernog materijala za maltere, kao što je delimična zamena hidratisanog kreča mermernim prahom u krečno-cementnim malterima (Teixeira Marvila *et al.* 2019).

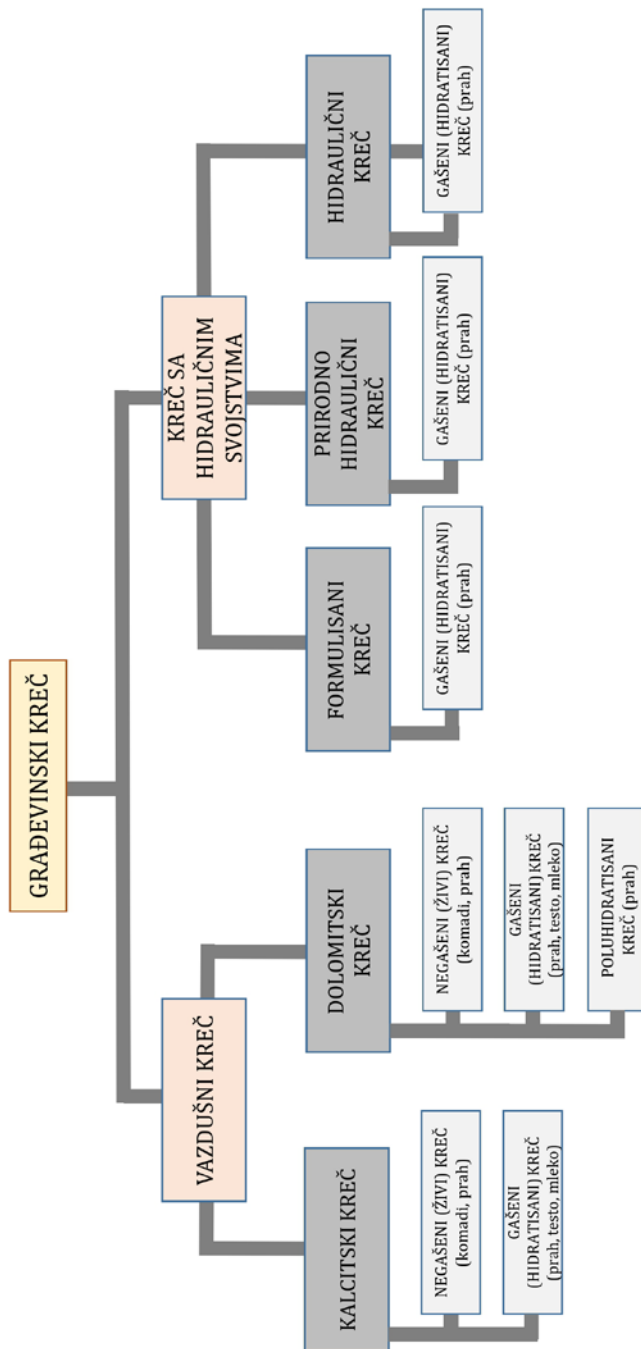
U nedostatku karbonatnih stena za spravljanje kreča su kroz istoriju, ali i u tradicionalnoj izgradnji u savremenom dobu, korišćeni i drugi izvori karbonata. Poznato je da su u ovu svrhu upotrebljavane i ljuštore školjki (Thacker, Hughes, Odling 2019), a mogućnosti njihove šire upotrebe za proizvodnju hidratisanog kreča se i dalje istražuju (Nair, Tom 2022; Ferraz *et al.* 2019).

Idealan sastav dolomita je od 30,4 % CaO , 21,8 % MgO i 47,8 % CO_2 (odnosno CaCO_3 i MgCO_3 u teoretskom odnosu 54,3:45,7), ali se sa ovim odnosom ne srećemo u prirodi (Ptáček, Šoukal, Opravil 2021: 1). Čistim dolomitima smatramo one sa >90 % dolomita, kao što i čisti krečnjaci sadrže >90 % kalcita. U prelazne stene spadaju krečnjački dolomit sa sadržajem dolomita od 50 % do 90 %, i dolomitični krečnjak u kome je dolomit zastupljen od 10 % do 50 % (Smith 1999: 46, Fig. 2.41). Dolomiti ne reaguju burno sa razblaženim rastvorom HCl , pa je ovo najznačajnija metoda za njegovo razlikovanje od krečnjaka, na terenu i u laboratoriji (Delić-Nikolić, Kurešević, Vušović 2017: 464).

Kreč se, osim u građevinarstvu, koristi u više grana industrije, zaštiti životne sredine, kao i u poljoprivredi. Karakteristike kreča za potrebe građevinarstva (građevinskog kreča) definisane su na osnovu standarda koji obuhvata definicije, specifikacije i kriterijume usaglašenosti (SRPS EN 459-1: 2016). Standard se primenjuje za kreč koji se koristi za malter, proizvodnju građevinskih proizvoda, ali i druge primene u građevinarstvu. Ovaj standard definiše kreč kao „kalcijum-oksidi i/ili hidroksidi i kalcijum-magnezijum-oksidi i/ili hidroksidi proizvedeni toplotnom dekompozicijom (kalcinacijom) prirodnog kalcijum-karbonata (npr. krečnjaka, krede, školjki) ili prirodnog kalcijum-magnezijum-karbonata (npr. dolomitičnih krečnjaka, dolomita)”. Odredbe istog standarda definišu građevinski kreč kao grupu proizvoda koji se koriste kao materijali u visokogradnji i niskogradnji. Građevinski kreč prema istom standardu obuhvata (**Slika 81**):

- vazdušni kreč (CL) ne poseduje hidraulična svojstva: u njegovom sastavu su kalcijum-hidroksid (kalcitni kreč) ili kalcijum-magnezijum-hidroksid (dolomitni kreč); očvršćava kada reaguje sa ugljen-dioksidom iz vazduha; nabavlja se u oblicima negašenog (živog; u komadima ili kao prah) i gašenog kreča (u prahu, kao testo ili kao mleko); dolomitni kreč se proizvodi i kao poluhidratirani kreč;
- kreč sa hidrauličnim svojstvima: osim kalcijum-hidroksida, u njegovom sastavu su kalcijum-silikati i kalcijum-aluminati, a očvršćava kada se meša sa vodom i/ili u vodi, uz dodatnu reakciju sa ugljen-dioksidom iz vazduha; može biti prirodno hidraulični kreč (NHL), formulirani kreč (FL) i hidraulični kreč (HL); nabavlja se u vidu gašenog kreča u prahu.

Ova podela je zasnovana na savremenim proizvodima u građevinarstvu. Međutim, upotreba kreča kroz istoriju (ali i danas kod tradicionalne pripreme maltera) podrazumevala je njegovu prvenstvenu upotrebu u obliku živog kreča i krečnog testa, bez obzira na osobine hidrauličnosti samog kreča. O tome svedoče i rezultati različitih hemijskih reakcija između



Slika 81. Podela građevinskog kreča
(šema nacrtana na osnovu SRPS EN 459-1:2016)

agregata i veziva vidljivi tokom ispitivanja mikrostrukture istorijskih krečnih maltera u laboratoriji (Pavia *et al.* 2023: 10).

Cement. Krečnjak pečenjem može dati različita veziva u zavisnosti od količine gline ili drugih primesa uz kalcijum-karbonat, ali i od temperature pečenja. Među njima su već napred opisani vazdušni kreč nastao pečenjem čistog krečnjaka i kreč sa hidrauličnim svojstvima kao rezultat pečenja krečnjaka sa primesama gline (Tufegdžić 1979: 15). U grupu veziva nastalih od kalcijum-karbonata spada i cement, mada je izdvojen kao poseban proizvod u odnosu na kreč.

Cemente delimo na prirodne i veštačke. Prirodni cementi nastaju od prirodnog krečnjaka sa glinama na temperaturi od 900 °C do 1400 °C, njegovim mlevenjem i prosejavanjem. Usled neujednačenosti sirovine, cementi mogu imati promenjive osobine (Tufegdžić 1979: 229). Tokom istorije, nakon pečenja, ovi proizvodi su se mleli i skladištili. Posle dodavanja vode, vezivali su veoma brzo (15–30 minuta) i razvijali toplotu, imali minimalan stepen skupljanja, a njihov odnos sa agregatom je bio najčešće 1:1. Uspešno su upotrebljavani za maltere za tunele, građevinske radove pored mora, a koristili su se i za konzervaciju kamena, gde su se, međutim, često pokazali kao previše čvrsti i nepropustljivi (Henry, Stewart 2011: 43–44). Veštački cementi nastaju od krečnjaka, gline, oksida gvožđa i dr., ali su sve sirovine unapred ispitane i sastav im je poznat, s obzirom na to da ih kombinuje čovek. Postoji mnogo vrsta veštačkih cementa, koji se mogu se svrstati u dve grupe: portland cementi, koji se međusobno razlikuju po načinu očvršćavanja; i specijalni cementi, većinom na bazi portland cementa sa različitim dodacima. Portland cement nastaje mlevenjem klinkera portland cementa uz dodatak sirovog gipsa ili anhidrita i vode. Ovaj klinker se dobija pečenjem sirovina koje sadrže CaO (krečnjak), SiO₂ (gline, glineni škriljci, kvarcit, kvarcni pesak), Al₂O₃ (gline, glineni škriljci, boksit, kaolin) i Fe₂O₃ (gline, glineni škriljci, pirit) (Tufegdžić 1979: 229–232).

Pečenje sirovina za veštačke cemente se obavlja na temperaturama višim od 1400 °C. Nakon hlađenja, sinterovana masa od kamena, glina i dr. postaje čvrsti klinker. Pošto inicijalno vezivanje veštačkog cementa počinje za 15 minuta, u cilju usporavanja vezivanja dodaje mu se gips, koji tako produžava

rad sa cementom. Veštački cementi očvršćavaju pod vodom, imaju visoke čvrstoće na pritisak i skoro su nepropustljivi nakon vezivanja (Henry, Stewart 2011: 44). U specijalne cemente spadaju cementi sa zgurom, cementi sa pucolanskim materijalom, beli cementi, ekspanzivni i boksitni cementi (Tufegdžić 1979: 241–250).

Cement se razlikuje od kreča jer nakon pečenja sirovine skoro da ne postoji slobodan kreč, već se sve sjedinjuje sa oksidima silicijuma i aluminijuma, pri čemu nastaju kalcijum-silikati i kalcijum-aluminati. Materijal se stoga ne gasi, već se melje i skladišti kao suvi prah. Kod upotrebe, dodaje se voda, koja hidrira silikate i aluminate i započinje izuzetno brz proces vezivanja. Pečenjem cementne sirovine, odnosno sjedinjavanjem CaO i SiO_2 formiraju se glavne klinker faze: dikalcijum-silikat, to jest belit ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) i trikalcijum-silikat, to jest alit ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). Alit nastaje na temperaturi iznad 1260°C , a belit na nižim temperaturama (Henry, Stewart 2011: 41). Visoka čvrstoća kod cementa se dostiže mnogo brže nego kod hidrauličnog kreča (Henry, Stewart 2011: 41). Alit relativno brzo reaguje sa vodom i u cementu je najvažniji za razvoj njegove rane inicijalne čvrstoće (do 28 dana). Belit reaguje sporije sa vodom, i malo doprinosi ranoj čvrstoći, ali izuzetno doprinosi onoj koja se razvija kasnije (Taylor 1997: 1).

Istorija cementa (Tufegdžić 1979: 227–228) mnogo nam je više poznata nego istorija kreča a njegovi stvaraoci su za sobom ostavili i patente sa opisanim metodama proizvodnje. Ona započinje polovinom XVIII veka kada Dž. Smiton (J. Smeaton, 1724–1792) istražuje krečnjake sa visokim procentom gline (20–25 %) i zapaža njihovu osobinu da očvršćavaju u vodi nakon pečenja dajući proizvode, prema njemu, tvrde kao kamen iz Portlanda. Krajem istog veka Dž. Parker (J. Parker) počinje da proizvodi „rimski cement” od ovakvog krečnjaka, odnosno „prirodni cement”, patentirajući ga. Sledi rad L. Vikata (L. Vicat, 1786–1861), koji početkom XIX veka naučno objašnjava značaj SiO_2 i Al_2O_3 iz gline na hidrauličnost kreča za sjedinjavanje sa CaO , uvodi hidraulični modul i tako započinje razvoj industrije hidrauličnog kreča. Godine 1824. Dž. Aspdin (J. Aspdin 1778–1855) patentira „Portland” hidraulično vezivo

i započinje proizvodnju. Na kraju, 1854. godine A. Džonson (I. Johnson, 1811–1911), proizvođač cementa, daje uputstva za razmeru mešanja krečnjaka sa glinom, kao i da se mešavina mora peći do temperature sinterovanja (Tufegdžić 1979: 227–228). Od ovog trenutka započinje život pravog veštačkog cementa, jer su svi pre njega bili mnogo bliži izuzetno hidrauličnom kreću. S obzirom na povišenje temperature pečenja, glavna hidraulična komponenta postaje alit, umesto dotadašnjeg belita (Henry, Stewart 2011: 45–46).

Proizvodnja „rinskog cementa” na teritoriji današnje Srbije započela je u Beočinu još 1838. godine (Tufegdžić 1979: 228). Zapis Emilijana Josimovića iz 1860. godine za pripremu dobrog maltera preporučuje kreč koji sadrži „belutka, gline i neke metalne okside, osobito gvožđa”, kazujući da se ove komponente pri gašenju hemijski sjedinjavaju sa ostalim u kreću, pa se polako otpušta voda u vidu pare, a sporije uvlači ugljen-dioksid, i tako cela masa ujednačenije i bolje stvrdnjava, u čemu on vidi razlog zašto je malter u „starim zidinama” velike tvrdoće. Po njemu, sasvim čist, odnosno mastan kreč ne daje dobar malter, ali se može „popraviti” tako što mu dodamo glinu nakon gašenja, osušimo, a zatim i ponovo ispečemo, pa ugasi-mo (ЮСИМОВИЋ 1860: 41).

Cementni malter je mešavina cementa, peska i vode. U savremenom građevinarstvu se koristi za zidanje i malterisanje zidova, izradu slojeva podova i podloga, za injektiranje i dr., kao veoma postojan i trajan materijal. Njegove čvrstoće su znatno viših vrednosti nego kod krečnih maltera (Muravljov 1995: 244–245). Međutim, njegove osobine nisu u skladu sa onim kod tradicionalnih građevinskih materijala, odnosno poroznog kamena i onog nižih čvrstoća, opeke i krečnih ili blatnih maltera. Upravo zbog nedostatka kompatibilnosti sa istorijskim materijalima, upotreba portland cementa u konzervaciji, koja je tokom većeg dela dvadesetog veka nekritički vršena, smatra se štetnom.

U okviru Šeste generalne skupštine ICOMOS-a 1981. godine u Rimu, na temu *Nema budućnosti bez prošlosti*, postavljene su četiri glavne teme koje su održane kroz simpozijume u četiri italijanska grada. Firenca je bila domaćin teme o materijalima, a neke od preporuka sa sastanka koje je izneo Bernard

Filden (Bernard Fielden, 1919–2008) odnosile su se upravo na upotrebu maltera u konzervaciji. U okviru potrebe povezivanja teorije i prakse, skrenuta je pažnja na potrebu prethodnog naučnog istraživanja pre konzervacije, pri čemu se originalni materijali moraju sačuvati, tradicionalni materijali primeniti što je više moguće, a novi biti prihvaćeni kada ovi prethodni ne zadovoljavaju potrebe. Takođe, već je tada upozoravano na negativne efekte cementa na spomenike, te je preporučeno generalno vraćanje malterima na bazi kreča i dodataka sa purolanskim svojstvima, a upotreba cementa je ograničena samo na mesta gde je to neophodno iz statičkih razloga. I na kraju, od država se tražilo da preduzmu mere za očuvanje aktivnog znanja o starim tehnikama i zabeleže ih, s obzirom na zanemarivanje tradicionalnih zanata (ICOMOS 1981: 28–29; Вученовић 2004: 187).

Veliki broj primera upotrebe cementnih maltera u istorijskim zidovima pokazao je da njihova trajnost može biti i manja nego kod originalnih maltera, i da za kratko vreme mogu oštetiti izuzetno stare zidove (Hansen, Rodríguez-Navarro, van Balen 2008: 9). Nedostatak kompatibilnosti cementnih maltera sa tradicionalnim građevinskim materijalima posledica je, između ostalog, visokog koeficijenta toplotnog širenja, visokog sadržaja soli, prekomerne čvrstoće i niske poroznosti i propustljivosti ovih maltera. Niska poroznost ometa kretanje vode u zidu, uzrokuje akumulaciju vlage iza sebe, uz kontakt sa istorijskim materijalom; kao i isparavanje i taloženje soli (neke potiču iz samog cementa) u susjednom kamenu ili opeci, što dovodi do oštećenja zidova, koji se stoga često krune, ljušte ili mrve. Termička dilatacija cementnih maltera je veća nego kod opeke ili kamena (kod krečnih maltera je obrnuto) i indukuje, odnosno prenosi smičuće napone na njih, što takođe uzrokuje njihova oštećenja (Elert, *et al.* 2022: 63; Hansen, Rodríguez-Navarro, van Balen 2008: 9). Niska plastičnost cementnih maltera smanjuje njihovu mogućnost prihvatanja pomeranja usled sleganja strukture bez pukotina, a usled sleganja i vibracija (Henry, Stewart 2011: 244) **(Slika 82)**.

U procesima arhitektonske konzervacije upotreba cementa je izuzetno limitirana. Međutim, beli cement je proizvod koji se često i dalje koristi za ove potrebe. Kao vrsta portland cementa

170

(specijalni cement), razlikuje se od običnog portland cementa po tome što je u njegovim sirovinama sadržaj oksida gvožđa < 1 %. Da bi se dobila bela boja, koriste se kaolin, bela glina i što čistiji krečnjak. Dostiže iste čvrstoće i može se koristiti za sve radove kao i običan portland cement (Tufegdžić 1979: 247). Zbog bele boje često se koristi za izradu konzervatorskih maltera, ali se zaboravlja da su mu osobine skoro identične osobinama običnog portland cementa, odnosno da su ovakvi malteri potpuno drugačiji od tradicionalnih krečnih maltera (Henry, Stewart 2011: 48). Postoje situacije kada je u cilju ozbiljnih statičkih sanacija istorijskih građevina, potrebno izvesti savremene betonske konstrukcije, ali i malterne mešavine uz upotrebu običnog portland cementa. Tada je neophodno voditi računa o kontaktu novih i starih materijala i pažljivo ispitati prirodu onih istorijskih materijala sa kojima će cement biti u kontaktu, kako bi se izbegla oštećenja istorijskog tkiva. U pitanju su najpre ojačanja temeljnih zona, čime se obezbeđuje dodatna sposobnost nošenja opterećenja. Konsolidacija zidova se vrši injektiranjem, a u slučaju ozbiljno narušene stabilnosti strukture, vrši se podbetoniranje starih temelja. Ove interven-



Slika 82. Nekompatibilnost cementnog maltera sa elementima za zidanje, konzervacija izvedena pre više decenija

cije se vrše i mikrobušenjima uz upotrebu čeličnih cevi, kojima se međusobno povezuju nadzemni deo istorijske strukture, njeni temelji i tlo (Odgers, Henry 2012: 163).

Cement je jedan od veštačkih materijala koji je nemerljivo unapredio svetsko građevinarstvo, utičući na razvoj betona, danas najviše upotrebljavanog građevinskog materijala, bez koga teško možemo zamisliti savremeni svet. Međutim, procenjeno je da upotreba betona stvara od oko 5 do 8 % celokupne emisije ugljen-dioksida u svetu. Ovde se računa emisija tokom sagorevanja fosilnih goriva i kalcinacije sirovina, ali se prilikom proračuna zagađenja mora uzeti u obzir i karbonatizacija betona, jer oko 50–60 % emisije ugljen-dioksida koja dolazi iz proizvodnje cementa, potiče od sirovina, i ima potencijal da se ponovo apsorbuje karbonatizacijom betona, delimično tokom upotrebe betona, a delimično na kraju njegovog životnog ciklusa i sekundarne upotrebe (Strippel *et al.* 2021: 9). Takođe, istraživači, inženjeri i proizvođači materijala, uz pomoć svetskih organizacija među kojima su i Ujedinjene nacije, nude različita rešenja unapređenja proizvodnje cementa kako bi se štetna emisija smanjila, kao i ponovne upotrebe i reciklaže betona, s obzirom na to da je zamenu betonu za savremene inženjerske konstrukcije, ali i oblikovanje u arhitekturi, teško pronaći (UN Environment *et al.* 2018; Miller *et al.* 2018). Cement kao materijal nema veći negativan uticaj na životnu sredinu od drugih građevinskih materijala, ali je njegova proizvodnja i potreba za njim tolika, da povećanje proizvodnje ostalih materijala koji bi upotrebu cementa (betona) bar umanjili, nažalost, ne može biti toliko da bi smanjenje njegove proizvodnje bilo uopšte značajno za umanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu (UN Environment *et al.* 2018: 3).

Nehidraulični – vazdušni kreč

Nekadašnji nacionalni standard (SRPS B.C1.020: 1981; povučen 2012. godine) definisao je građevinski kreč kao nehidraulično mineralno vezivo koje se pretežno sastoji od kalcijum-oksida (CaO) ili kalcijum-hidroksida (Ca(OH)₂), koji se dobija iz krečnjaka odgovarajućeg hemijskog sastava. Stan-

dard je obuhvatao samo kalcitni vazdušni kreč. Kao oblici ovog kreča u standardu su navedeni:

- negašeni (živi) kreč koji se sastoji pretežno od kalcijum-oksida (CaO), i gde se razlikuju: *negašeni (živi) kreč u komadima*, koji se dobija pečenjem krečnjaka na temperaturi ispod tačke sinterovanja (**Slika 83**; **Slika 84**); *negašeni (živi) mleveni kreč*, dobijen mlevenjem kreča u komadima do utvrđene finoće i
- gašeni (hidratisani) kreč, koji se sastoji pretežno od kalcijum-hidroksida (Ca(OH)_2), gde se razlikuju: *gašeni kreč u prahu*, dobijen gašenjem živog kreča sa dovoljno vode i radi zadovoljenja njegovog hemijskog afiniteta prema vodi tokom hidratacije; *krečno testo – gašeni kreč plastične konzistencije*, dobijen gašenjem živog kreča u komadu ili mlevenog, sa količinom vode dovoljnom da se postigne ova konzistencija (**Slika 85**).

Živi kreč se u odnosu na sadržaj oksida kalcijuma i magnezijuma može podeliti na visoko kalcitni kreč (>90 % CaO); kalcitni kreč (85-90 % CaO); magnezijski (dolomitni) kreč (10–25 % MgO); i visoko magnezijski (dolomitni) kreč (>25 % MgO , odnosno do maksimalno 45 % MgO , ako je u pitanju čist dolomit) (Bilbija, Matović 2009: 276). Kalcitni kreč ima daleko veću primenu od magnezijuskog, odnosno dolomitnog. Građevinski kreč mora sadržati najmanje 85 % CaO i MgO oksida, ali maksimalno 8 % MgO , pa se onaj koji sadrži više od ovoga, mora označiti kao dolomitni (SRPS B.C1.020: 1981).

Performanse i obradivost maltera spravljenih od gašenog vazdušnog kreča u obliku testa sve su bolje kako kreč duže sazreva pre upotrebe (Odgers, Henry 2012: 296). Zato se gašeni kreč uglavnom ostavlja da prođe kroz proces odležavanja ili starenja. Još uvek ne postoji idealna preporuka za dužinu procesa, ali se zna da se u periodu od dva do deset meseci od gašenja poboljšavaju osobine kreča. Tokom tog procesa se smanjuje veličina kristala portlandita (Ca(OH)_2), njegove submikrometerske čestice se talože i tako povećavaju površinu, reaktivnost, dinamički viskozitet i plastičnost kreča (Јеликић 2014: 45;



Slika 83. Peć za pečenje kreča u selima Mala Vrbica i Veliki Šenj, Kragujevac: otvor peći za loženje i slog komada krečnjaka (gore); loženje peći i pečenje kreča u peći (pokrov) (sredina); pečeni (živi) kreč u procesu vađenja iz peći (dole)



Slika 84. Živi kreč u komadima



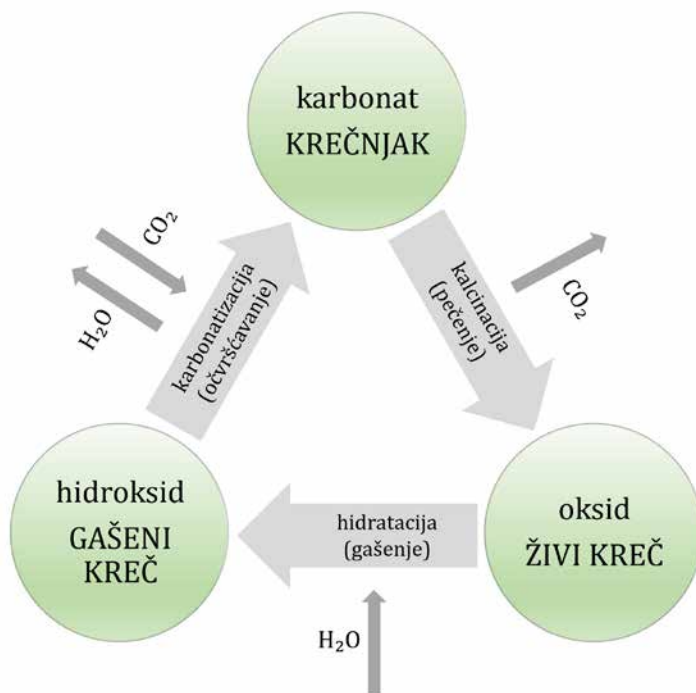
Slika 85. Gašeni kreč kao krečno testo

Николић 2014: 50). Kristali se tokom sušenja ukрупnjavaju, a stajanjem u vodi se mogu dalje menjati i tokom dužeg perioda, što dalje utiče na obradivost i gustinu. Kod gašenog kreča u prahu (industrijski suvi prah), ova svojstva se ne vraćaju u potpunosti nakon naknadnog dodavanja vode kao kod krečnog testa. Kristali utiču i na karbonatizaciju, razvoj poroznosti i pritisnu čvrstoću maltera (Hansen, Rodríguez-Navarro, van Balen 2008: 9).

Takozvani krečni ciklus započinje odabirom odgovarajuće sirovine – karbonata (kalcit, dolomit), i obuhvata tri osnovna koraka: kalcinaciju – termalnu dekompoziciju (odnosno pečenje), hidrataciju (odnosno gašenje) i na kraju karbonatizaciju (odnosno očvršćavanje), i tako biva zaokružen. Ipak, ovaj proces nije tako jednostavan u praksi, jer kreč nije uniformnog kvaliteta i njegovi proizvodi se razlikuju po osobinama u svim dobijenim jedinjenjima (Јеликић 2014: 41–42). Ovi procesi su daleko bolje istraženi kod kalcitnog kreča, dok kod dolomitnog kreča i dalje postoje nejasnoće (Kudlacz 2013: 14–16). Krečni ciklus kalcita se prikazuje kroz sledeće reakcije (Јеликић 2014: 42–46) (**Slika 86**):

- kalcinacija: reakcija $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (disocijacija kalcijum-karbonata CaCO_3 na kalcijum-oxid CaO (tzv. živi kreč) i ugljen-dioksid na temperaturi od oko 900 °C (898 °C); endotermna reakcija);
- hidratacija: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ (reakcija živog kreča sa vodom uz dobijanje kalcijum-hidroksida Ca(OH)_2 (gašeni kreč); egzotermna reakcija);
- karbonatizacija: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (reakcija gašenog kreča sa ugljen-dioksidom iz vazduha i oslobađanje vode uz dobijanje kalcijum-karbonata; egzotermna reakcija).

Kalcinacija dolomitnog, ili kroz istoriju nazivanog, magnezijuskog krečnjaka, započinje na mnogo nižim temperaturama nego što je slučaj kod kalcitnog kreča, odnosno započinje na temperaturama između 510 °C i 750 °C. Ukoliko temperature pređu 900 °C, dolomit postaje *prepečen* i teško se gasi prilikom mešanja sa vodom, pa je i za sazrevanje kreča u obliku krečnog



Slika 86. Šematski prikaz krečnog ciklusa vazdušnog kreča (šema nacrtana prema Henry, Stewart 2011: 32)

testa potrebno duže vreme, kako bi se i ovakav materijal ugasio. Istraživači mu pridaju svojstva blage hidrauličnosti ili pak mogućnost nastanka maltera koji imaju čvrstoće na pritisak slične onima pripremljenim sa blago hidrauličnim kalcitnim krečom (Henry, Stewart 2011: 35).

Kao jedan od oblika nehidrauličnog kreča, potrebno je pomenuti i nanokreč, razvijen šezdesetih godina XX veka za potrebe konsolidacije zidnih slika (Odgers 2017: 5). Njegova upotreba u konzervaciji slikarstva, ali u poslednje dve decenije i kamena u okviru građevina ili kao pojedinačnih umetničkih dela, veoma je zastupljena. Kod nanokreča, jednog od oblika $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dimenzije kristala portlandita su 50–250 nm, što je oko sto puta manje od iste veličine kristala kod standardnog hidratisanog kreča. Inače, kada bi krečno testo dovoljno dugo bilo čuvano (verovatno 20 godina) kristali bi se rastvarali i ponovo kristalisali u manje čestice, dok ne bi dostigli nano veličinu (Odgers 2017: 6). Nanokreč je na tržištu dostupan kao kolo-

idna disperzija u alkoholu, pri čemu nakon aplikacije alkohol isparava, dok kreč karbonatizuje (Henry, Stewart 2011: 34).

Dosadašnja primena nanokreča je generalno dala uspešne rezultate u poboljšavanju ili vraćanju izgubljenih svojstava materijala na koje deluje i potvrdila njegovu kompatibilnost sa njima. Najveći nedostatak upotrebe nanokreča je dubina deponovanja i penetracije, koja nije uvek zadovoljavajuća. Zabeleženi su i njegovi uticaji na izmenu boje podloge, njenog pornog sistema, transporta vode i dr., pa su ispitivanja unapređenja njegove primene i dalje aktuelna (Franković 2022: 2, 43; Taglieri *et al.* 2019; Odgers 2017: 8; Massi, Sassoni 2021). Kod krečnih maltera nanokreč se upotrebljava kao konsolidant, kao vezivo injekcionih smeša za odvojene slojeve maltera za malterisanje i ispunu pukotina, kao i za manje sanacije malterom (Henry, Stewart 2011: 34).

Kreč sa hidrauličnim svojstvima

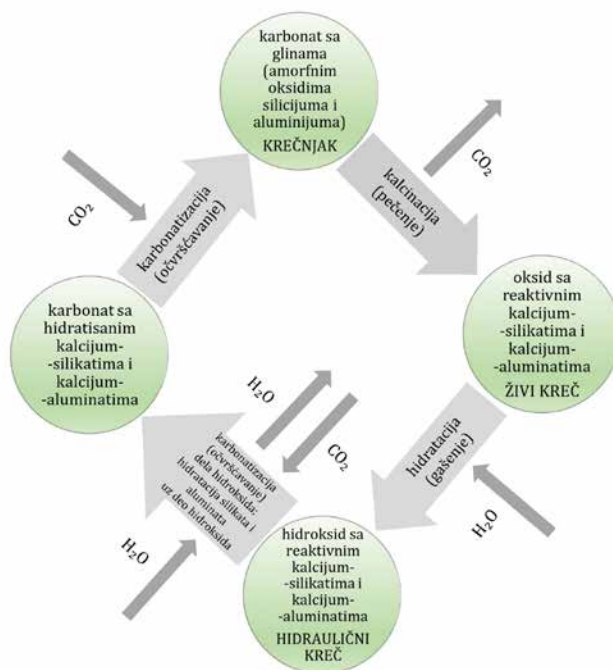
Kreč sa hidrauličnim svojstvima, u skladu sa standardom (SRPS EN 459-1: 2016), obuhvata sledeće industrijske proizvode: prirodno hidraulični kreč, hidraulični kreč i formulisani kreč. Prema ovom standardu, prirodno hidraulični kreč nastaje pečenjem krečnjaka sa manje ili više gline ili silicijuma, bez bilo kakvih dodataka; hidraulični kreč sadrži kreč i druge dodatne materijale, kao što su cement, šljaka visokih peći, leteći pepeo, fileri krečnjaka i dr.; formulisani kreč se sastoji od vazdušnog kreča i/ili prirodno hidrauličnog kreča, sa dodatkom hidrauličnih materijala i/ili materijala sa pucolanskim svojstvima.

Prirodno hidraulični kreč se dobija pečenjem krečnjaka koji sadrže veći procenat gline (6–20 %). Veća količina gline u sirovini dobijeno vezivo približava cementu, a veće učešće čistog krečnjaka vezivo približava masnom kreču (Tufegdžić 1979: 218; Muravljev 1995: 176, 187). Temperatura pečenja je viša nego kod nehidrauličnog – vazdušnog kreča, zavisi od same sirovine i kreće se u rasponu od 950 do 1250 °C (Alvarez *et al.* 2021: 63). U procesu pečenja kalcitnog kreča jedan deo CaO stvara jedinjenja sa oksidima iz glina, uglavnom sa SiO₂, Al₂O₃

(kao i Fe_2O_3), odnosno silikate, aluminate (i ferite) kalcijuma, koja mogu očvršćavati u vazduhu i vodi (Muravljev 1995: 187).

Razlikujemo prirodno hidraulični kreč sa slabo izraženom hidrauličnošću i prirodno hidraulični kreč sa veoma izraženom hidrauličnošću (sposobnošću vezivanja pod vodom). Ova osobina se izražava kroz hidraulični modul (h_m), koji predstavlja odnos sadržaja CaO prema sadržaju ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$), pa kod prvog on iznosi od 4,5 do 9, dok je kod drugog modul u rasponu od 1,7 do 4,5. Kod kreča sa neznatnim sadržajem gline (odnosno kod nehidrauličnog kreča) modul iznosi preko 9 (Muravljev 1995: 176–177, 187). Prema procentu gline, odnosno reaktivnih nečistoća, britanski autori kreč dele na nehidraulični ($\geq 94\%$ CaCO_3 , odnosno $\leq 6\%$ nečistoća) i hidraulični ($> 6\%$ – $\leq 25\%$ nečistoća), a dalje, kao i standard SRPS EN 16572: 2016, hidraulični kreč svrstavaju u tri grupe: slabo hidraulični ($> 6\%$ – $< 12\%$), srednje hidraulični ($\geq 12\%$ – $< 18\%$) i izuzetno hidraulični ($\geq 18\%$ – $\leq 25\%$) (Henry, Stewart 2011: 28).

Krečni ciklus prirodno hidrauličnog kreča (prema Henry, Stewart 2011: 36–37) obuhvata iste procese kao kod vazdušnog kreča, s tim što su u proces uključeni i oksidi iz sastava gline, koji postaju reaktivni tokom kalcinacije (**Slika 87**). Jedan njihov deo reaguje sa kalcijum-oksidiom dajući kalcijum-silikate i kalcijum-aluminate, a drugi ostaje u obliku reaktivnih oksida. Tokom hidratacije, i silikati i aluminati hidratiraju kao kalcijum-oksidi, stvarajući kalcijum-silikat hidrate i aluminijum-silikat hidrate, pri čemu prvo dolazi do gašenja kalcijum-oksida, a zatim do nastanka navedenih hidrata (uz prisustvo dovoljne količine vode). Zato se hidraulični kreč može čuvati u suvim uslovima bez rizika od očvršćavanja, odnosno može se prvo dobiti kalcijum-hidroksid, a kasnije sa dodatkom vode inicirati hidraulični proces hidrata (vezivanje), koji započinje nekoliko sati nakon hidratacije. Zbog ovog procesa hidraulični kreč dobija inicijalnu čvrstoću brže od vazdušnog. Dalje povišenje vrednosti čvrstoće hidrauličnog kreča nastaje u kasnijem periodu od više godina, usled nastavka hidratacije hidrauličnih komponenti i spore karbonatizacije kalcijum-hidroksida (Henry, Stewart 2011: 36–37).



Slika 87. Šematski prikaz krečnog ciklusa prirodno hidrauličnog kreča (NHL) (šema nacrtana prema Henry, Stewart 2011: 37)

Pri mešanju sa vodom ispečenog laporovitog krečnjaka, odnosno prirodno hidrauličnog kreča, dolazi do njegovog gašenja, ali ono nije burno kao kod vazdušnog kreča (Tufegdžić 1979: 218). Količina hidraulički aktivnog materijala određuje brzinu očvršćavanja i konačnu čvrstoću maltera, dok udeo slobodnog kalcijum-oksida utiče na njegovu plastičnost i obradivost, pa prirodno hidraulični kreč daje manje plastične maltere nego vazdušni kreč, ali brže i ravnomernije očvršćava i dobija veće čvrstoće (Muravljov 1995: 187). Dalje, što su malteri više hidraulični, to im je niža poroznost i propustljivost, i obratno (Henry, Stewart 2011: 36).

Nije utvrđeno da su antički graditelji sa namerom pekli nečisti krečnjak ili mu dodavali komponente tokom pečenja kako bi dobili kreč sa hidrauličnim svojstvima, jer je čist krečnjak, prema izvorima, smatran najboljim za izradu kreča. Vitruvije piše da kreč nastaje pečenjem belog (čistog) kamena, ali takođe i da je kamen sa zatvorenom strukturom, gušći i tvrdi, bolji za građenje, dok je porozniji i šupljikaviji bolji za

malterisanje (Vitruvije 1951: II.5). Više istraživača je u Vitruvijevom delu, ali i onom koje je ostavio Plinije Stariji (*Gaius Plinius Secundus Maior*, 23. g. pre nove ere – 79. g.), u delu *Naturalis Historiae (Poznavanje prirode)*, pokušavalo da pronađe pomen kamena koji bi u rimskom graditeljstvu mogao bio upotrebljavan za dobijanje hidrauličnog kreča, što bi moglo biti dokaz da je ovaj kreč upotrebljavan u malteru. Među ovim sirovinama je Plinijev *silex*, koji on pak ne odobrava za upotrebu (Плиније Старији 2011: 36.53; Copsey 2022: 203). Ovaj latinski termin ima više značenja, ali uglavnom je to „tvrd kamen”, pa bi u kontekstu pripreme kreča trebalo da predstavlja „tvrd, kompaktn krečnjak” (Oleson 2014: 16).

Kao verovatna zvuči pretpostavka da je za potrebe izrade kreča u antici korišćen i nečist krečnjak kada čist nije bio dostupan, ili čak usled njegovog neprepoznavanja tokom eksploatacije čistog krečnjaka (Nikolić, Rogić 2018: 43), čime je nastajao prirodno hidraulični kreč bez namere graditelja. Hidrauličnost maltera u antici je sa namerom nastajala kada su različiti dodaci sa pucolanskim svojstvima mešani sa vazdušnim krečom (Elsen, van Balen, Mertens 2012: 127–130). Međutim, sigurno je da je kreč sa blagim hidrauličnim svojstvima u antici uvođenjem dodataka mogao nastati i slučajno, usled prisustva različitih nečistoća blagih pucolanskih svojstava tokom pripreme kreča ili samog maltera (Nikolić, Rogić 2018: 43). Prirodno hidraulični kreč se od srednjeg veka koristi za izradu maltera, uporedo sa dodacima sa pucolanskim svojstvima (Elsen, van Balen, Mertens 2012: 130).

Industrijski prirodno hidraulični kreč, odnosno NHL (eng. *Natural Hydraulic Lime*), pripremljen je od krečnjaka sa oko 5–20 % minerala gline, koji je ispečen na odgovarajućoj temperaturi, a zatim ugašen i fino samleven. NHL je na tržištu dostupan u tri različita tipa, a za svaki od njih standard (SRPS EN 459-1: 2016) propisuje određene zahteve u pogledu sadržaja SO_3 , kao i fizičko-mehaničkih svojstava, među kojima je i najniža čvrstoća na pritisak koju dobija standardni malter pripremljen sa ovim krečom (prema standardu SRPS EN 459-2: 2021) nakon 28 dana i prema kojoj se i klasifikuje u tipove. Prema tome, nakon 28 dana, malter pripremljen sa krečom sa oznakom NHL 2 dostiže čvrstoću od ≥ 2 do ≤ 7 MPa, čvrstoća

maltera sa krečom označenim kao NHL 3.5 varira od $\geq 3,5$ do ≤ 10 MPa, dok malter sa upotrebljenim krečom sa oznakom NHL 5 može imati čvrstoću u opsegu od ≥ 5 do ≤ 15 MPa. (SRPS EN 459-1: 2016)

Prema proizvođačkim specifikacijama, NHL proizvodi su prilagođeni svojstvima materijala uz koje se koriste, kao i uslovima spoljašnje sredine. Međutim, vidljivo je da se opsezi vrednosti čvrstoća različitih tipova preklapaju, kao i da veoma variraju u okviru jednog tipa. Istraživači su pokazali da kreč iste oznake (tipa) koji potiče od različitih proizvođača može imati potpuno drugačije vrednosti čvrstoće. Na primer, čvrstoća jednog uzorka kreča sa oznakom NHL 5 imala je skoro tri puta veću vrednost čvrstoće drugog uzorka iste oznake kod drugog proizvođača. Takođe, desilo se i da uzorak kreča oznake NHL 3.5 ima 1,5 puta veću vrednost čvrstoće od uzorka uzorka istog proizvođača koji nosi oznaku NHL 5. Svojstva NHL proizvoda zavise od mineralogije same matične stene, kao i temperature i trajanja njene kalcinacije, pa su različita svojstva kreča očekivana. Problem kod upotrebe ovog kreča u konzervaciji nastaje i usled toga što oznake njegovih tipova predstavljaju vrednosti čvrstoće koju kreč dostiže nakon 28 dana, ali one i dalje rastu, do 90 dana, uglavnom uz veliku varijabilnost, odnosno nekonzistentnost (Jun Oh 2020: 48–50).

Ispitivanja kreča

Metode ispitivanja građevinskog kreča i vrednovanja njegove usaglašenosti definisane su na osnovu standarda. Standardi obuhvataju metode ispitivanja hemijskih i fizičkih svojstava kreča (SRPS EN 459-2: 2021), kao i šeme za atestiranje i verifikaciju stalnosti performansi (SRPS EN 459-3: 2016). Preko dobijenih vrednosti hemijskih i fizičkih osobina kreča vrši se njegova klasifikacija (SRPS EN 459-1: 2016).

Ispitivanja određenih svojstava kreča se vrše na standardnom malteru određene konzistencije. Standardni malter definisan na osnovu standarda SRPS EN 196-1: 2017 predstavlja malter pripremljen od kreča, standardnog peska i vode u količini potrebnoj za postizanje definisane vrednosti konzistencije i penetracije. Merenja vrednosti penetracije,

zadržavanja vode i sadržaja vazduha kao osobina građevinskog kreča, a prema standardu SRPS EN 459-2: 2021, zahtevaju pripremu standardnog maltera prečnika rasprostiranja 165 (± 3) mm (za hidratizirani kreč, hidratizirani dolomitni kreč, NHL 2, NHL 3.5, FL 2 i FL 3.5, odnosno 185 (± 3) mm za NHL 5, FL 5, HL 2, HL 3.5, i HL 5), izmereno na potresnom stolu za određivanje konzistencije. Vodokrečni faktor predstavlja odnos količine vode i količine kreča, potrebnih za dobijanje standardnog krečnog testa. On se izračunava nakon pripreme testa, a njegove potrebne vrednosti su određene u zavisnosti od vrste kreča (Tufegdžić 1979: 221).

Hemijska svojstva kreča. Hemijske analize kreča započinju rastvaranjem kreča u hlorovodoničnoj kiselini kako bi se odredio sadržaj CaO, MgO, i SO₃, dok se za određivanje CO₂ kreč rastvara u fosfornoj kiselini. Dalje se sadržaj CaO, MgO i SO₃ određuje hemijskim testovima uz pomoć različitih rastvora (SRPS EN 459-2: 2021). Sadržaj slobodne vode se određuje zagrevanjem uzorka na temperaturi 105 (± 5) °C (u slučaju hidratiziranog kreča i kreča sa hidrauličnim svojstvima) ili 150 (± 5) °C (u slučaju krečnog testa ili krečnog mleka) i merenjem gubitka mase. Gubitak mase predstavlja vlažnost kod kreča u prahu i kreča sa hidrauličnim svojstvima, dok je u slučaju krečnog mleka ili testa to sadržaj vode u suspenziji. Izražava se u masenim procentima (SRPS EN 459-2: 2021).

Gubitak žarenjem kreča se vrši zagrevanjem u pećnici do temperature od 1050 (± 25) °C (SRPS EN 459-2: 2021). Ovim žarenjem se gube mehanički i hemijski vezana voda, CO₂ (iz nedovoljno pečenog kamena ili naknadno vezanog iz vazduha), kao i organske materije koje će sagoreti (Tufegdžić 1979: 223). Kod pripreme maltera za konzervaciju, na osnovu rezultata ispitivanja sadržaja slobodne vode kod gašenog kreča, vrši se proračun optimalne količine vode za izradu maltera, da bi se dobio malter potrebne konzistencije i obradivosti.

Utvrđivanje sadržaja raspoloživog kreča se vrši njegovim rastvaranjem u rastvoru saharoze, prilikom čega se formira kompleks kalcijum-hidroksida i saharoze, koja se zatim određuje titracijom hlorovodoničnom kiselinom, uz upotrebu fenolftaleina kao indikatora, do obezbojavanja. Na osnovu zapremine upotrebljene HCl i mase ispitanog uzorka, obračunom

se dobijaju sadržaji raspoloživog kreča. Kod gašenog kreča (hidratisani kreč, krečno testo, mleko i kreč sa hidrauličnim svojstvima) to je raspoloživ $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a kod negašenog kreča je u pitanju raspoloživ CaO (SRPS EN 459-2: 2021). U slučaju ispitivanja živog kreča, da bi se obezbedilo potpuno rastvaranje kreča velike reaktivnosti ($t_u < 2$ min) sklonog stvaranju grudvica kalcijum-hidroksida, pri postupku tihog gašenja, potrebno je nakvasiti uzorak metanolom pre rastvaranja u vodi. Na osnovu sadržaja CaO , MgO , SO_3 , CO_2 , slobodne vode i gubitka žarenjem, može se dobiti sadržaj slobodnog CaO i MgO raspoloživog za reakciju u malteru (SRPS B.C8.040: 1980).

Fizička svojstva kreča. Analize fizičkih svojstava kreča obuhvataju ispitivanje raspodele veličine čestica; određivanje zapreminske mase; stalnosti zapremine; vremena vezivanja (samo za kreč sa hidrauličnim svojstvima); reaktivnosti (samo kod negašenog kreča); izdašnosti (samo kod negašenog kreča); penetracije, zadržavanja vode i sadržaja vazduha (samo za vazdušni gašeni kreč u prah u i kreč sa hidrauličnim svojstvima) (SRPS EN 459-2: 2021). Tako je prilikom odabira kvalitetnog živog kreča potrebno voditi računa da kreč poseduje visoku reaktivnost i izdašnost, ali i postojanu zapreminu, odnosno nizak sadržaj neugašenih (slobodni CaO) ili prepečenih čestica koje mogu dovesti do pojave „kokica” ili mikropukotina u malteru nakon očvršćavanja. Sadržaj neugašenih čestica se može utvrditi nakon gašenja živog kreča, njegovog hlađenja, ispiranja i pranja kroz sito dok ne ostanu samo grube čestice, a zatim njihovog sušenja i merenja. Rezultat ispitivanja predstavlja procenat tog ostatka u odnosu na prvobitnu masu kreča i trebalo bi da iznosi najviše 10 % (Muravljov 1995: 188).

Određivanje finoće mliva kod komadnog živog kreča se ne vrši. Kod mlevenog živog kreča, hidratisanog kreča, hidratisanog dolomitnog kreča i kreča sa hidrauličnim svojstvima prosejavanje se vrši upotrebom sita za ispitivanje sa otvorima od 0,2 mm i 0,09 mm (SRPS EN 459-2: 2021). Pored ove metode, može se koristiti i mašinska „er-džet” (eng. *air-jet*) metoda prosejavanja.

Zapreminska masa kreča se meri tako što se meri njegova masa u posudi od 1 litra (SRPS EN-459 2: 2021). Određivanje stalnosti zapremine, zbog razlika u njihovim hemijskim i

fizičkim svojstvima, ne vrši se kod svih tipova i oblika kreča na isti način. Ispitivanje hidratisanog kalcitnog kreča i svih tipova kreča sa hidrauličnim svojstvima prema standardu se (SRPS EN-459 2: 2021) može vršiti preko dve metode. Prema referentnoj metodi, vrši se po principu verovatnoće da je gašenje kreča bilo nepotpuno, i da dejstvo vodene pare (u parnoj komori) dovodi do hidratacije zaostalog kalcijum-oksida (CaO) prisutnog u uzorku, što dalje uzrokuje širenje i povećanje dimenzija uzorka u obliku diska koji se meri. Prema drugoj, alternativnoj metodi, ispitivanje stalnosti zapremine kreča se vrši u skladu sa standardom za ispitivanje cementa (SRPS EN 196-3: 2017) koje podrazumeva upotrebu Le Šateljevog prstena sa iglama, sa modifikacijama u temperaturi i vlažnosti negovanja uzoraka i dr., i to pre ispitivanja, a u zavisnosti od vrste kreča. Za negašeni kreč, krečno testo, dolomitni kreč i hidratisani dolomitni kreč ispitivanje stalnosti zapremine se sprovodi na kolačima prečnika od 50 mm do 70 mm i debljine približno 10 mm, koji se prave sipanjem paste ugašenog kreča na porozne apsorpcione ploče, koje se zatim stavljaju u vrelu komoru. U slučaju nepostojane zapremine, usled širenja, dolazi do pojave naprslina na kolačima, koje se vizuelno ispituju. Posebno se vrše ispitivanja hidrauličnog kreča sa sadržajem SO_3 od 3 do 7 %, kao i hidratisanog kalcitnog kreča, krečnog testa i hidratisanog dolomitnog kreča koji sadrže čestice veće od 0,2 mm (SRPS EN 459-2: 2021).

Vreme vezivanja maltera se određuje preko penetracije igle u krečno testo standardne konzistencije dok ona ne dobije specifičnu vrednost. Ispituju se vreme inicijalnog vezivanja i vreme konačnog vezivanja. Kod konačnog vezivanja igla prodire u testo samo 0,5 mm (SRPS EN-459-2: 2021).

Sposobnost zadržavanja vode kod svežeg standardnog maltera koji se priprema prema standardu izražava se kao procenat vode koji ostaje u malteru nakon kratkog vremena upijanja na filter-papiru (SRPS EN 459-2: 2021). Ovo svojstvo nam govori o „masnoći” kreča (Muravljev 1995: 190).

Sadržaj vazduha u svežem malteru meri se prema standardu (SRPS EN 459-2: 2021) metodom pritiska pomoću prethodno postavljenog aparata za uvučeni vazduh, odnosno porozimetra i posude za merenje, kapaciteta 1 dm^3 ili $0,75 \text{ dm}^3$. Posuda za

merenje se napuni malterom, dobro zatvori, a zatim se prostor iznad površine maltera ispuni vodom dok se ne izbaci sav vazduh iznad uzorka. Nakon toga se upumpava vazduh dok pritisak u komori ne dobije početnu vrednost. Sadržaj vazduha u malteru se očitava na uređaju.

Reaktivnost kreča predstavlja brzinu gašenja živog kreča. Negašeni kreč se ispituje u pogledu reaktivnosti na lagano gašenje merenjem povećanja temperature koja se javlja u reakciji sa vodom, u funkciji vremena tokom kog se reakcija odvija, prema standardu (SRPS EN-459-2: 2021). U sud sa mešalicom se sipa definisana količina destilovane vode, zatim se dodaje uzorak kreča koji je prethodno usitnjen na određenu granulaciju, posuda se odmah zatvori i započne se sa merenjem temperature u funkciji vremena. Nakon postizanja potpunog gašenja, kada temperatura prestane da raste, konstruiše se kriva gašenja. Rezultat merenja se izražava kao vreme t potrebno za dostizanje tražene temperature (SRPS EN-459-2: 2021).

Kriva gašenja predstavlja promenu temperature kroz vreme, a očitavanje temperature se vrši na svakih 30 s. Ispitivanje je završeno kada se dostigne maksimalna temperatura (Muravljev 1995: 188). Brzina gašenja ili reaktivnost (R) živog kreča se izračunava prema sledećoj jednačini:

$$R = \frac{60 - 20}{t_{60}} \text{ (}^{\circ}\text{C/min)} \quad (1)$$

ako se temperatura od 60 °C prilikom gašenja postiže u roku od 10 min, od početka reakcije hidratacije (1), odnosno:

$$R = \frac{T_{10} - 20}{10} \text{ (}^{\circ}\text{C/min)} \quad (2)$$

kada se pri gašenju kreča temperatura od 60 °C postiže nakon 10 min od početka reakcije hidratacije (2) (Muravljev 1995: 188).

Živi kreč se prema reaktivnosti deli na brzogasivi ili visokoreaktivni (meko pečeni, $R > 20$ °C/min), srednjegasivi

ili srednjereaktivni (srednje pečeni, $R = 2 - 20$ °C/min), i sporogasivi ili spororeaktivni (tvrdo pečeni, $R < 2$ °C/min) kreč (Muravljev 1995: 188).

Izdašnost kreča predstavlja meru promene zapremine kreča prilikom gašenja određene mase živog kreča. Posuda za gašenje kreča u kojoj se određuje izdašnost cilindrična je posuda sa duplim zidom, prečnika dna 155 mm i visine 160 mm, napravljena od metala koji ne reaguje na kreč (nerđajući čelik), dok je između zidova toplotna izolacija. Posuda mora da bude zatvorena poklopcem tokom ispitivanja. U nju se stavlja voda, a zatim živi kreč, kao i dodatna voda po potrebi. Nakon 24 h od gašenja, skida se poklopac i obračunava se izdašnost. Meri se visina ugašenog kreča (testa), a svaka 2 mm visine (dubine posude) odgovara izdašnosti od 1 dm^3 za 10 kg živog kreča (SRPS EN-459-2: 2021).

Čvrstoća pri savijanju i čvrstoća pri pritisku se ispituju kod kreča sa hidrauličnim svojstvima, i to prema standardu za cement (SRPS EN 196-1: 2017), ali sa modifikacijama (SRPS EN-459-2: 2021). Osnovni princip metode je mešanje kreča, standardnog peska i vode u odnosu 1: 3 : 0,5 (450 (± 2) g kreča; 1350 (± 5) g peska; i 225 (± 2) ml – 292,5 (± 2) ml vode u zavisnosti od tipa kreča), i izlivanje u trodelni kalup za uzorke dimenzija $40 \times 40 \times 160$ mm. Uzorci se čuvaju 24 h u vlažnom prostoru, na vlažnosti od minimum 90 %, (odnosno 60 %, zavisno od tipa kreča) i temperaturi 20 (± 1) °C, a zatim se vade iz kalupa i neguju do 28 dana u vodi temperature 20 (± 1) °C. Čvrstoće se mere nakon definisanih vremenskih intervala (24 h, 48 h, 72 h, 7 dana i 28 dana). Čvrstoća pri savijanju se izračunava kao prosečna vrednost tri rezultata. Čvrstoća pri pritisku se ispituje na svih šest polovina prizmi i izražava se kao prosečna vrednost šest rezultata (SRPS EN 459-2: 2021). Ukoliko se zahteva ispitivanje čvrstoća na pritisak i savijanje na vazdušnom kreču, razlika u ispitivanju je u negovanju uzoraka nakon vađenja iz kalupa, koje se sprovodi u standardnim laboratorijskim uslovima sa vlažnošću iznad 50 %, odnosno 60 %, i na temperaturi 20 (± 2) °C (SRPS B.C8.040: 1980, SRPS EN 998-1: 2017, SRPS EN 1015-11: 2019).

3.3 MATERIJALI SA PUCOLANSKIM SVOJSTVIMA

Nakon uvođenja portland cementa u građevinarstvo tokom XIX veka, i njegove masovne upotrebe nakon toga, već u drugoj polovini XX veka, usled ekonomskih, ali i energetske razloga (a danas sve više ekoloških potreba koje zahtevaju iznalaženje održivijih rešenja u oblasti proizvodnje građevinskih materijala, ali bez žrtvovanja njihovih mehaničkih svojstava i trajnosti), započela je upotreba dodatnih materijala tokom njegove proizvodnje, u cilju zamene dela klinkera (Snellings, Mertens, Elsen 2012: 211–213). Ove materijale nazivamo dopunskim cementnim materijalima (SCM) i oni predstavljaju dodatke prirodnog ili veštačkog porekla koji se koriste kao zamena dela klinkera u cementu, ali i samog cementa u malterima ili betonima (Mitrović i dr. 2005: 48; Snellings, Mertens, Elsen 2012; Terzić i dr. 2018). Obuhvataju materijale koji pokazuju bilo hidrauličku, bilo pucolansku aktivnost. Prvi reaguju u kontaktu sa vodom, dok drugi reaguju sa krečom u prisustvu vode (Snellings, Mertens, Elsen 2012: 214).

Prema standardu za nemetalne mineralne sirovine za proizvodnju cementa (SRPS B.C1.018: 2015) ovi materijali pucolanskih svojstava obuhvataju *pucolanske materijale*, koji predstavljaju prirodne supstance u okviru kojih prepoznajemo *prirodne* („materijali vulkanskog porekla ili sedimentne stene sa pogodnim hemijskim i mineralnim sastavom”) i *prirodno kalcinisane pucolane* („materijali vulkanskog porekla, gline, škriljci ili sedimentne stene, aktivirani termičkim postupkom”) i leteći pepeo, odnosno materijal koji jednostavno *poseduje pucolanska svojstva*.

Reč *pucolan* potiče od imena mesta u blizini Napulja, na obali Sredozemnog mora u Italiji. Okolni predeo današnjeg Pucolija (lat. *Puteoli*), odnosno Flegrejanska polja, predstavljaju mesto odakle potiče prvi vulkanski pepeo korišćen u rimskim malterima (Oleson, Jackson 2014: 1–3). Početak upotrebe prirodnih pucolana za dobijanje trajnijih građevinskih materijala nalazimo još u minojskoj civilizaciji, najveći dometi su dostignuti tokom rimskog perioda, a nakon vekova retke upotrebe ovih materijala (Artioli, Secco, Addis 2019: 166, 174–175),

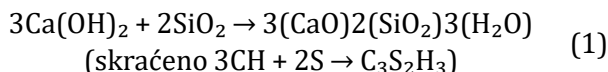
njihova savremena uloga kao dopunskih cementnih materijala (Snellings, Mertens, Elsen 2012: 211) ponovo je pokazala njihov značaj u građevinarstvu.

Osobine materijala sa pucolanskim svojstvima

Pucolanski materijali se sastoje uglavnom od amorfnog ili reaktivnog silicijum-dioksida (SiO_2) i aluminijum-oksida (Al_2O_3), dok ostatak čine manje količine gvožđe-oksida (Fe_2O_3) i drugi oksidi (SRPS B.C1.018: 2015). Oni ne očvršćavaju sami po sebi pri mešanju sa vodom, ali kao fino samleveni, na ambijentalnoj temperaturi, hemijski reaguju sa rastvorenim krečom, odnosno sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pa tako nastaju jedinjenja hidrauličnih (cementnih) svojstava (Tufegdžić 1979: 130; SRPS B.C1.018: 2015; ACI CT-13: 2013).

Materijal koji *poseduje pucolanska svojstva*, odnosno leteći pepeo (eng. *fly ash*) predstavlja fini prah nastao sagorevanjem sprasenog uglja i sastoji se uglavnom od SiO_2 i Al_2O_3 . Može biti silikatni i kalcijumski, gde prvi sadrži reaktivni SiO_2 uz Al_2O_3 , dok sastav drugog čine reaktivni CaO , reaktivni SiO_2 i Al_2O_3 . U oba slučaja, ostatak čine Fe_2O_3 i druga jedinjenja (SRPS B.C1.018: 2015). Leteći pepeo pripada materijalima sa pucolanskim svojstvima, ali može spadati i u hidraulički aktivne materijale, kao i šljaka visokih peći (Snellings, Mertens, Elsen 2012: 215, fig. 2). Tako silikatni leteći pepeo ima samo pucolanska svojstva, dok kalcijumski može posedovati oba svojstva ili samo pucolansko.

Reakcija materijala sa pucolanskim svojstvima sa krečom u prisustvu vode naziva se pucolanska reakcija. Proizvodi reakcije mogu biti kalcijum-silikat hidrat (C-S-H; $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), kalcijum-alumo-hidrat (C-A-H; $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$) ili kalcijum-alumosilikat-hidrat (C-A-S-H; $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) (Snellings, Mertens, Elsen 2012: 241–259). Sledeća jednačina (1) prikazuje reakciju dobijanja prvog od navedena tri hidrata.



Da se pucolanska reakcija zaista i desila u istorijskim malterima, uglavnom se utvrđuje merenjem mehaničkih svojstava

maltera (čvrstoća na pritisak) koja su viša kod ovih maltera nego kod nehidrauličnih maltera; izračunavanjem parametara na osnovu hemijskih ispitivanja, kao što su indeks hidrauličnosti i cementacije; ali i karakterizacijom mineraloških faza u vezivu koje su rezultat reakcije (Artioli, Secco, Addis, 2019: 175).

Upotreba dopunskih cementnih materijala, odnosno materijala sa pucolanskim svojstvima, povećava trajnost veziva, njegovu čvrstoću i hemijsku otpornost na agresivne uticaje, sulfate i hloride, a razlog za ove karakteristike je upravo pucolanska reakcija kojom nastaju navedeni hidrati (Snellings, Mertens, Elsen 2012: 261–266).

Vrste materijala sa pucolanskim svojstvima

U oblastima ispitivanja istorijskih maltera i konzervacije, često se srećemo sa jednostavnom podelom SCM materijala na *prirodne i veštačke materijale sa pucolanskim svojstvima*, koje klasifikujemo prema tome da li su nastali prirodno ili ulogom čoveka kroz termičku ili mehaničku aktivaciju onih prirodnih. Prirodni obuhvataju piroklastične (vulkanske) stene koje podrazumevaju neizmenjene, nekoherentne stene (*pozzolana* iz Italije, santorinska zemlja – plovuac i pepeo) i izmenjene, koherentne stene (zeolitizirani tuf – tras); klastične (sedimentne) stene koje se dele na one organskog porekla (di-jatomejska zemlja) i one nastale mehaničkim deponovanjem (prirodno kalcinisanе gline); i izmenjene stene mešovitog porekla. U veštačke materijale sa pucolanskim svojstvima spadaju termički aktivirani prirodni materijali (kalcinisanе gline i škriljci) i nusprodukti (silikatna prašina, otpadno staklo, leteći pepeo, šljaka visokih peći, pepeo organskih ostataka – npr. pirinčane ljuske, i dr.) (tabele prikazane u Snellings, Mertens, Elsen 2012: 215, fig. 2, prema Massazza 2001; u McCarthy, Dyer 2019: 364 prema Massazza 1976; i u Tokyay 2016: 6 prema Massazza 1988).

Prirodni materijali. Za vreme eksplozivnih vulkanskih erupcija izbacuje se materijal koji se jednim imenom naziva tefra (Cvetković, Šarić 2022: 65). Onaj krupniji, koji se polako hladi ili nije potpuno rastopljen, ima kristalasto stanje i ostaje inertan, dok se sitniji materijal u vidu čestica naglo hladi i

tako ostaje u staklastom, amorfnom stanju i aktivnom obliku. Ovi aktivni materijali predstavljaju prirodne materijale sa pucolanskim svojstvima upotrebljavane u istorijskim malterima (Tufegdžić 1919: 127). Tufovi se sastoje od vulkanske prašine i pepela, odnosno čestica prečnika manjeg od 2 mm. Uglavnom sadrže ekspanzirano vulkansko staklo – plovuće (>90 %), ali mogu sadržati i guste klaste. Sekundarne faze su zastupljene zeolitima, hloritima i glinama, a nastaju devitrifikacijom vulkanskog stakla i/ili izmenom primarnih minerala. Upravo su one zaslužne za pucolanska svojstva koja tufovi imaju (Cvetković, Šarić 2022: 65). *Pucolani* iz Italije i santorinska zemlja su slabo konsolidovani depoziti, dok rajnski tras u Nemačkoj predstavlja tuf (Taylor 1997: 280).

Savremeni istraživači rimskih maltera u cilju jasnijeg određivanja materijala sa ovim svojstvima samo u određenim slučajevima koriste termin *pucolan* kada se pozivaju na vulkanski pepeo u rimskom graditeljstvu, jer na neki način određuje isključivo poreklo ove vrste materijala, koje u stvari nije vezano samo za užu oblast Pocuolija, po kojoj ga nazivamo (Oleson, Jackson 2014: 1). Ovaj predeo kao isključivo mesto porekla vulkanskog pepela striktno nisu odredili ni latinski pisci; Vitruvije ovaj materijal naziva jednostavno *pulvis* (prah ili prašina) (Vitruvije 1951: II.6. u Oleson, Jackson 2014: 2). Međutim, najverovatnije su prvi eksperimenti sa ovim materijalima za konstrukcije na morskim obalama započeli upravo u Pocuoliju, koji je u III i II veku pre nove ere bio jedina važna luka u blizini velikog depozita ove vrste materijala, odnosno pored vulkanske oblasti Flegejanskih polja, ali i najvažnija luka Rima. Ako čitamo Senekine spise u kojima opisuje kako „praškasta zemlja Pocuolija postaje stena kada dodirne vodu” (lat. *puteolanus pulvis*) možemo pretpostaviti da su rimski graditelji upravo na ovaj način i na ovom mestu i shvatili kako ovaj materijal mogu koristiti u malterima (Oleson 2014: 24, 26). Kao problematičan termin u opisima materijala upotrebljivanih u ove svrhe u istorijskim malterima, autori navode i termin *pucolanski dodatak*, jer je on vezan za savremene tehnologije u proizvodnji cementa (Oleson, Jackson 2014: 1). U ovoj monografiji stoga koristimo opšti termin *materijal sa pucolanskim svojstvima*.

Ležišta prirodnih materijala sa pucolanskim svojstvima nalaze se širom sveta. Međutim, vulkansko poreklo neke stene ne znači nužno da ona ima pucolanska svojstva (Day 1990: 12). Uobičajene aktivne komponente kod ovakvih stena su staklaste faze sa visokim procentom silicijuma, često veoma porozne, ili su to zeoliti, ili pak, oboje (Taylor 1997: 280). Zeolitizacija može nastati u različitim geološkim sredinama – najviše procesa se odvija usled cirkulacije slano-alkalnih jezerskih voda, alkalnih podzemnih voda ili voda hidrotermalnih izvora, ili usled metamorfizma niskog stepena kod sedimenata na velikim dubinama (Hay, Sheppard 2001: 261–275 u Snellings, Mertens, Elsen 2019: 220). S druge strane, nisu svi prirodni materijali sa pucolanskim svojstvima vulkanskog porekla, već ova svojstva mogu imati i oni sedimentnog porekla (Day 1990: 16), o čemu piše i standard SRPS B.C1.018:2015.

Osim vulkanskih materijala na teritoriji Apeninskog poluostrva (u više vulkanskih oblasti u Italiji) (**Slika 88**), u ostatku teritorije Evrope se nalaze drugi vulkanski materijali sa pucolanskim svojstvima, kao što su pomenuti rajnski tras iz Nemačke ili santorinska zemlja sa ostrva Santorini (**Slika 89**) (Artioli, Secco, Addis 2019: 151–202; Elsen 2006: 1419; Day 1990: 22–23). Sedimentni materijali sa pucolanskim svojstvima nastaju od stena ili zemlje koji sadrže opal. U njih spadaju dijatomejska zemlja (npr. sa ostrva Danske - Elsen 2006: 1419; 367) (Sharma, Sharma, kr Verma 2020; Pavliková *et al.* 2022; Sierra *et al.* 2010) i opalit (npr. opalit, odnosno opalska breča u Severnoj Makedoniji) (Day 1990: 28; Krstev i dr. 1993; Spasovski, Spasovski 2012: 92–93).

Prirodni zeoliti su hidratisani alumosilikati alkalnih i zemnoalkalnih metala koji se uglavnom javljaju u izmenjenim vulkanskim tufovima. Ovi zeoliti su najčešće u asocijaciji sa glinama, feldspatima i staklom (Mertens *et al.* 2009: 233). Na našim prostorima kao prirodni materijali sa pucolanskim svojstvima (Vakanjac 1992: 215–216), a tokom savremene proizvodnje građevinskih materijala, najčešće su eksploatisani upravo zeolitski, kao i vulkanski tufovi u ležištu Zlatokop kod Vranjske Banje. Danas se jedini aktivni kop zeolitskog tufa u Srbiji nalazi u mestu Igroš, nedaleko od Brusa (**Slika 90**). Ležišta zeolitskog tufa u Srbiji se nalaze i na potezu Velikog Sela

192



Slika 88. Vulkanski materijali u podnožju Vezuva
(privatna arhiva: Emilija Nikolić)



Slika 89. Vulkanski materijali sa ostrva Santorini
(privatna arhiva: Emilija Nikolić)



Slika 90. Zeolitski tuf iz ležišta u Igrošu (Brus), Srbija

i Slanaca pored Beograda, kod sela Toponica pored Kosovske Kamenice, na terenima Jablanice i Fruške gore (Стојановић 1968; Simić 1999; Križak, Maksimović, Vojnović 2014; Кашић 2017; Kašić *et al.* 2017; Kašić *et al.* 2018).

U prirodne materijale sa pucolanskim svojstvima spada i već pomenuta dijatomejska zemlja, čija se ležišta u Srbiji nalaze na prostoru Kolubarskog ugljenog basena (Filipović, Rodin 1976, 10, 13, 39; Knežević i dr. 1984; Obradović, Hein, Đurđević 1994: 209–217), kao i na prostoru Vranja (Križak 2003, 72–74). Dijatomejska zemlja ili dijatomit je meka sedimentna stena koja se sastoji od skeleta mikroorganizama – jednoćelijskih biljaka dijatoma. Uglavnom sadrži 90 % amorfnog SiO_2 , i male količine Al_2O_3 i Fe_2O_3 (Sierra *et al.* 2010: 3406). To je slabo vezana, trošna, porozna i laka stena, sa finim česticama (Reka *et al.* 2021: 451). U oblasti Vranja nalazi se i ležište opalske breče (Katalenac) (Monthel *et al.* 2002: 46). Za sada nije potvrđeno da su rimski graditelji na teritoriji današnje Srbije eksploatisali bilo koji od ovih materijala u svrhu izrade maltera.

Potrebno je pomenuti i materijal nastao nakon samozaljenja ležišta uglja, pri čemu je došlo do izmene povlatnih slojeva i jalovinskih proslojaka glinenih sedimenata usled povišene temperature, čime je uslovno rečeno, formirana *prirodna opeka*. Ovaj materijal se može posmatrati kao prirodni materijal sedimentnog porekla sa pucolanskim svojstvima, a na teritoriji Srbije se pojavljuje na području Kostolačkog i Kolubarskog ugljenog basena, u vidu ispucalih karakterističnih slojeva i sočivaca crvene ili crvenkaste boje. Sličan materijal

se nalazi na više lokacija u svetu, a dobija različite nazive: klinker, prirodni klinker, porcelanit, pseudoskorija i dr. Koristi se za savremene građevinske radove (završni sloj lokalnih i industrijskih puteva), a njegova upotreba je zabeležena i u praistoriji (za izradu oruđa i oružja). Tokom rimskog perioda, prema istraženoj literaturi, u Srbiji je njegova upotreba za sada zabeležena u Viminacijumu i Margumu (za izradu blokova za zidanje, ispunu jezgra zidova i izradu slojeva podova), dok su u Engleskoj i Velsu pronađene dekorativne obloge podova i zidova nastale od sličnog materijala (materijal nastao, između ostalog, samozapaljenjem sedimentnih stena usled prisustva organskih supstanci u njima) (Nikolić *et al.* 2023: 8–11, sa referencama⁶).

Ispitivanjima ovog materijala lokalno nazvanog *crvenka* u regionu Kostolca (**Slika 91a; Slika 91b**), utvrđeno je da on poseduje pucolanska svojstva, pa može biti opravdana pretpostavka da je kao drobljen ili mleven mogao biti dodavan krečnim malterima Viminacijuma, kako bi im poboljšao određena svojstva, odnosno da fragmenti crvene boje u malterima za koje se uobičajeno prihvata da su pečena opeka možda nekada predstavljaju upravo fragmente crvenke. Ove pretpostavke zahtevaju dalja istraživanja iz više naučnih oblasti u budućnosti (Nikolić *et al.* 2023: 19–20; Kekanović, Čeh, Karaman 2011 u Nikolić *et al.* 2023: 20).

Veštački materijali – aktivirani prirodni materijali. Aktivirani materijali se dobijaju tretmanom prirodnih materijala, koji, potom, usled razaranja kristalne strukture minerala i formiranja amorfnе mešavine SiO_2 i Al_2O_3 , dobijaju pucolanska svojstva i mogu da reaguju sa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Day 1990: 33). U ove prirodne materijale spadaju gline: kaolinske, montmo-

⁶ Николић 2018; Nikolić, Roter-Blagojević 2018; Nikolić, Tapavički-Ilić, Delić-Nikolić 2020; Gonzales 2010; Rakić 1979; Marić 1951; Vapnik 2013; Allen, Fullford 2004; Allen, Fulford, Todd 2007; Allen, Todd 2010; Nikolić, Rogić, Milovanović 2015; Le Blanc 1991; Kristensen *et al.* 2019; Estes *et al.* 2010; Heffern *et al.* 2007; Antonović 2022; Janačković, Radovanović, Dimitrijević 2002; Hoffman 1996; Langer 2011; Pasquini, Bonechi, Dini 2021; Rogers 1917; Cosca *et al.* 1989; Quintero *et al.* 2009; Grapes, Zhang, Peng 2009; Žáček, Skála, Dvořák 2010; Favreau, Meisser, Chiappero 2010; Grapes *et al.* 2011; Ribeiro *et al.* 2013; Rădan, Rădan 2013; Novikova *et al.* 2015; Martinelli *et al.* 2015; Laita, Bauluz, Yuste 2019; Chen *et al.* 2020; Filipović, Rodin 1980).



Slika 91a. Crvenka u ležištu, selo Kostolac, okolina Viminacijuma (Nikolić *et al.* 2023: 12, fig. 5)



Slika 91b. Uzorci crvenke iz ležišta, selo Kostolac (Nikolić *et al.* 2023: 13, fig. 7)

rionitske, različite opekarske i dr. Tretman može biti termički (zagrevanje) i mehanički (ustinjavanje) (Vujović *et al.* 2014: 725–726). Tokom termičkog tretmana, odnosno zagrevanjem gline, na temperaturama između 400 °C i 900 °C zavisno od vrste gline (s tim da se glavne promene dešavaju između 600 °C i 800 °C) (Hanein *et al.* 2022; 6–7), hemijske i strukturne promene u materijalima mogu delovati pozitivno, ali i negativno na njihovu reaktivnost sa krečom, odnosno njihova pu-colanska svojstva. Stoga, ukupni rezultat termičkog tretmana zavisi od prirode materijala, temperature i dužine zagrevanja (McCarthy, Dyer 2019: 375; Costa, Massaza 1977 u McCarthy, Dyer 2019: 375).

Korišćenje metakaolina kao materijala za izradu maltera za konzervaciju predmet je velikog broja savremenih istraživanja. Metakaolin (MK) je aktivirani materijal dobijen postupkom zagrevanja, odnosno kalcinacije kaolinskih glina, tokom koga se iz minerala kaolinita izdvaja voda, razara se kristalna struktura materijala (dehidroksilacija) i nastaje amorfnu aluminosilikat. Na ovaj proces utiču parametri zagrevanja i kasnijeg hlađenja (Ilić, Mitrović, Miličić 2010: 351). Iako je često upotrebljavan u savremenoj konzervaciji, istraživači i konzervatori upozoravaju da je prilikom upotrebe metakaolina veoma važno pažljivo odrediti sadržaj samog metakaolina, kako bi se održala trajnost ovih maltera (Groot *et al.* 2022: 12). I pored visoke reaktivnosti metakaolina sa krečom, dokazano je da ovi malteri godinama kasnije mogu izgubiti na čvrstoći, iako je u prvih nekoliko meseci stanje maltera zadovoljavajuće. Kod maltera sa odnosom MK : kreč = 1:2 – 1:4 zabeleženi su nestabilni kalcijum-aluminijum-hidrati (metakaolin sadrži visok sadržaj aluminijuma). Dalje, kod odnosa MK : kreč > 1:2, reakcija metakaolina je često tokom istraživanja bila nekompletna, jer je mali sadržaj kalcijum-hidroksida već bio potrošen tokom karbonatizacije. Odnos MK : kreč ~ 1:2 pokazao se kao najadekvatniji, iako su u nekim slučajevima i odnosi MK: kreč < 1:2 dali dobre rezultate. Takođe, da bi se dobili uslovi za kompletnu reakciju, pokazano je da zapreminski odnos (MK+kreč): agregat ne bi trebalo da bude manji od 1:2 (Groot *et al.* 2022: 12; Gameiro *et al.* 2012, Gameiro *et al.* 2014 i Silva *et al.* 2014 u Groot *et al.* 2022: 12).

Montmorionitske gline koje su osnovni sastojak bentonita takođe mogu imati pucolanska svojstva nakon termičke aktivacije (Fernandez, Martirena, Scrivener 2011: 121; Tironi *et al.* 2013).

Aktiviranje kaolinskih glina mehaničkim tretmanima (Mitrović, Zdujić 2013; Mitrović, Zdujić 2014) vrši se postupkom mlevenja gline, tokom kojeg se dešava amorfizacija, poremećaj strukture i narušavanje oblika čestica. Na taj način, ovaj tretman zapravo postaje mehanohemijski. Aktivacija zavisi od vremena i brzine mlevenja, medija u kome se vrši (mokro u vodi ili alkoholu, ili suvo mlevenje), odnosa medijuma i materijala koji se melje, odnosa kugli u mlinu i materijala (Tole 2019: 23, 38, 63).

Na teritoriji Srbije najznačajnija ležišta kaolinskih glina se nalaze u oblastima Valjeva, Arandjelovca i Mladenovca (Mitrović, Komljenović, Ilić 2009: 107; Mitrović, Zdujić 2013: 580). Ležišta bentonitskih glina (koje mogu biti sedimentnog ili vulkanogeno-sedimentnog tipa) u Srbiji se nalaze u oblasti Paraćina, Vlasotinca, Bogovine, Svrljiga i Kostolca (Drmno) (Simić, Uhlík 2006: 111; Simić, Đurić, Životić 1997).

Najpoznatiji veštački materijal sa pucolanskim svojstvima upotrebljavan u malterima kroz istoriju nastao je kalcinacijom opekarskih glina. To je drobljena, odnosno mlevena opeka. Međutim, za ove potrebe su korišćeni i drugi keramički materijali – crep, drugi građevinski elementi, ali i fragmenti posuda (Nikolić, Rogić, Milovanović 2015: 73) (**Slika 92**).

Upotreba pečene opeke u tradicionalnim malterima je poznata u celom svetu, pa se na Bliskom istoku ovaj malter zove *homra*, u Indiji *surkhi*, u Turskoj *horasan*, dok je u rene-



Slika 92. Mlevena opeka i različite granulacije drobljene rimske opeke iz Viminacijuma

sansnoj Italiji ovaj malter nosio ime *cocciopiesto*. Istraživači pretpostavljaju da najraniji primer upotrebe termičke aktivacije glina za dobijanje hidrauličnih reakcija potiče iz drevne Persije, gde su blokovi spravljani od mešavina glina, balege i vode, sušeni na suncu, a zatim pečeni, mleveni i mešani sa krečom za dobijanje vodonepropusnih maltera. U Rimskom carstvu tehnologija upotrebe drobljenih keramičkih proizvoda u nadzemnim strukturama kojima je bila potrebna otpornost na vodu nazivala se *opus signinum* i nastala je na osnovu grčkih uzora (Artioli, Secco, Addis 2019: 173, 175).

Iako je opeka prvobitno korišćena u malterima za oblaganje struktura u cilju dostizanja vodonepropusnosti, Rimljani su verovatno, videvši dobra mehanička svojstva ovih maltera, shvatili da bi opeku mogli koristiti i kao dodatak malterima za zidanje, ali i da drobljeni keramički proizvodi i prirodni materijali sa pucolanskim svojstvima imaju slične karakteristike. Međutim, iako postoje primeri kombinovane upotrebe opeke i prirodnih materijala sa pucolanskim svojstvima u istorijskim malterima, keramički proizvodi nisu masovno upotrebljavani u malterima za zidanje. S druge strane, prirodni materijali sa pucolanskim svojstvima nikada nisu zamenili keramičke proizvode u malterima kojima je bila potrebna vodonepropusnost (Mogetta 2015: 32).

Osobine pečene opeke zavise od minerala gline i količine karbonata prisutnih u opekarskoj sirovini i temperature njenog pečenja (Arsenović *et al.* 2014: 29). Tokom pečenja, dešavaju se hemijske i strukturne promene mineralnog sastava gline. Efekti zagrevanja na strukturu gline se detektuju infracrvenom spektroskopijom, pa se upotrebom ove tehnike mogu utvrditi maksimalne temperature pečenja keramičkih proizvoda, odnosno materijala koji sadrže silikate, i to unutar opsega od 200 °C (Stojanović *et al.* 2019: 560- 561).

Pucolanska svojstva opeke dobijaju na temperaturama pečenja u opsegu 450–900 °C (s tim što su ona bolja što je temperatura viša) (Elsen 2006: 1419; Böke, *et al.* 2006: 1115; Nežerka *et al.* 2014: 18; Tekín, Kurügol 2011: 960; Nikolić, Rogić, Milovanović 2015: 74; Rapp 2009: 267), nakon čega opadaju, dok opeka ne izgubi reaktivnost (Lancaster 2015: 25). Ovo *pravilo* ima i svoje i izuzetke, jer su istraživanja savremenih

199

opeka pečenih na višim temperaturama (do 1100 °C) pokazala i da ona imaju pucolanska svojstva (Wild *et al.* 1997: 171, 174 u Nikolić *et al.* 2023: 25 i Nikolić, Rogić, Milovanović 2015: 74). Većina rimskih keramičkih proizvoda pripremana je od gline, koja je reaktivna sa krečom kada je pečena na temperaturama 600–1000 °C, sa početkom gubitka reaktivnosti na temperaturi od oko 930 °C i konačnim gubitkom na temperaturi oko 1050 °C (Lancaster 2015: 25). Rimske opeke su pečene uglavnom na temperaturama 800 – 900 °C (Ozkaya, Böke 2009: 997; Badica *et al.* 2022: 19), a isto su pokazala i istraživanja opeka iz rimskog perioda na teritoriji današnje Srbije (800 °C – Radivojević, Kurtović-Folić 2006: 697). Najnovije istraživanje velikog broja viminacijumskih opeka je potvrdilo prethodna saznanja, odnosno donelo podatak da ova temperatura uglavnom nije bila viša od 800 (850) °C (Jevtović 2023: 312).

Tokom istraživanja maltera građevina dunavskog limesa u Srbiji, u okviru projekta *MoDeCo2000*, ispitan je veliki broj uzoraka maltera sa dodatkom drobljene ili mlevene pečene opeke (**Slika 93**) kojima je bila potrebna otpornost na vodu i vlagu (malteri za pod, unutrašnje i spoljašnje malterisanje).



Slika 93. Rimski malteri sa opekom za podove i malterisanje: Viminacijum (gore), Dijana (dole)

Iako je upotreba opeke uglavnom bila vezana za malterne obloge izložene vodi i vlazi, ona je, svakako u mnogo manjoj meri, kao što je napred pomenuto, našla svoju upotrebu i u malterima za zidanje tokom rimskog perioda (Nikolić *et al.* 2023: 25; Teutonico *et al.* 1993: 34). Njena povećana upotreba u ovim malterima vidljiva je u strukturama iz VI veka, gde je prisutna u obliku praha (i postaje reaktivni pucolanski materijal), ali i fragmenata (kada ima ulogu poroznog lakog agregata) (Nikolić *et al.* 2023: 25).

Jedan od najpoznatijih primera upotrebe opeke u zidarskim malterima je Sveta Sofija u Istanbulu, čiji malter sa lakim agregatom od opeke, istraživači porede sa betonom (Livingston 1992; Livingston 1993; Moropolou *et al.* 2002 u Nikolić *et al.* 2023: 25). Primeri ove upotrebe su zabeleženi i kroz projekat *MoDeCo2000* u zidanim strukturama datovanim u isti period, odnosno period VI veka (**Slika 94**).



Slika 94. Malter za zidanje iz perioda VI veka sa fragmentima opeke

Veštački materijali – nusprodukti. Kao veštačke materijale sa pucolanskim svojstvima, graditelji su tokom rimskog perioda koristili i ćumur i pepeo nastao sagorevanjem organskih materija korišćenih na nekoj lokalnoj teritoriji, čak i paralelno sa upotrebom uvoznog vulkanskog pepela kao prirodnog materijala sa pucolanskim svojstvima, ili lokalnim keramičkim materijalima. Primena ovih materijala je bila na-

menski sprovedena u zavisnosti od funkcije maltera, odnosno sredine u kojoj se primenjuje (Secco *et al.* 2020; Secco *et al.* 2022). Savremeni veštački materijal sa pucolanskim svojstvima koji nastaje kao industrijski nusprodukt jeste leteći pepeo.

Ispitivanja materijala sa pucolanskim svojstvima

Reaktivnost materijala sa pucolanskim svojstvima sa krečom u malteru zavisi od njihovog hemijskog i mineraloškog sastava, tipa i odnosa aktivnih faza, specifične površine čestica, proporcionalnog odnosa sa samim krečom, sadržaja vode, vremena negovanja krečnog maltera i temperature (Massazza 2007 u Walker, Pavia 2011: 1140). Tokom ispitivanja prirodnih materijala sa pucolanskim svojstvima, pokazano je da je sadržaj reaktivnih SiO_2 i Al_2O_3 važan za kasnije procese, a da su za dostizanje inicijalne pucolanske reakcije zaslužne fine čestice, odnosno veća specifična površina (Mertens *et al.* 239; Costa, Massazza 1974). Istraživanja veštačkih materijala su pokazala da amorfnost određuje njihovu reaktivnost više od drugih svojstava. Potreba za vodom u mešavini najviše je određena njihovom specifičnom površinom. Čvrstoća na pritisak zavisi od više faktora, ali je najpre određuju amorfnost i veličina čestica. Sva ova svojstva mnogo više utiču na razvoj čvrstoće nego hemijski sastav (Walker, Pavia 2011: 1148).

Ispitivanje pucolanske aktivnosti materijala vrši se prema testovima propisanim u različitim nacionalnim i međunarodnim standardima (Kasaniya, Thomas, Moffatt 2019; Donatello, Drdácý 2010; Thorstensen, Fidjestol 2015). S obzirom na to da svaki test ima svoje nedostatke, istraživači i eksperti pokušavaju da razviju i nove testove, među kojima su RILEM-ov test zasnovan na tzv. R^3 modelu (*rapid, relevant, reliable*) (Avet *et al.* 2022; Londono-Zuluaga *et al.* 2022), ali i drugi testovi (Kasaniya, Thomas, Moffatt 2019; Kasaniya *et al.* 2022).

Prema nacionalnom standardu kojim se daju klasifikacija i zahtevi za pucolanske materijale koji se upotrebljavaju za proizvodnju cementa (SRPS B.C1.018: 2015) potrebno je ispitati hemijska svojstva (prema SRPS EN 196-2: 2015; SRPS EN 196-3: 2017; SRPS EN 196-5: 2012; SRPS EN 451-1: 2017) (**Tabela 5**), kao i fizičko-mehanička svojstva (prema SRPS EN

196-1: 2017; SRPS EN 196-7: 2010) samog materijala za koji se utvrđuju pucolanska svojstva. Od hemijskih svojstava materijala, u zavisnosti od njegove vrste, određuju se sadržaj reaktivnog SiO₂, sadržaj reaktivnog i slobodnog CaO, ekspanzija, kao i gubitak žarenjem i pucolanska aktivnost. Pucolanska aktivnost se ispituje poređenjem količine Ca(OH)₂ prisutnog u vodenom rastvoru u kontaktu sa hidratisanim cementom nakon tačno određenog vremena, sa količinom Ca(OH)₂ sposobnog za zasićenje rastvora iste baznosti. Ako je koncentracija Ca(OH)₂ u vodenom rastvoru manja nego u zasićenom rastvoru, test je pozitivan (SRPS EN 196-5: 2012).

	opalit, Češinovo, Severna Makedonija*	vulkanski tuf, Strmoš, Severna Makedonija*	vulkanski tuf, Zlatokop, Vranjska Banja, Srbija*	zeolitski tuf, Zlatokop, Vranjska Banja, Srbija**	zeolitski tuf, Igroš, Brus, Srbija***	zeolitski tuf, Jablanica, Srbija****	crvenka, selo Kostolac, Srbija****
gubitak žarenjem (1000 °C), %	6,98	5,13	5,11	13,30	14,03	10,15	1,23
SiO ₂ , %	82,65	80,52	63,32	64,88	60,70	63,58	61,97
Al ₂ O ₃ , %	3,19	8,87	14,28	12,99	14,48	13,39	19,36
Fe ₂ O ₃ , %	3,88	2,22	4,66	2,00	0,25	2,58	8,19
CaO, %	0,23	0,18	3,58	3,26	4,27	3,56	1,70
MgO, %	0,05	0,04	1,22	1,07	2,58	2,33	3,01
Na ₂ O, %	0,04	0,10	1,32	0,95	0,94	0,91	0,46
K ₂ O, %	0,41	0,28	2,27	0,89	0,66	2,70	2,18
SO ₃ , %	0,26	0,13	-	-	-	0,13	0,06
P ₂ O ₅ , %	0,52	0,50	-	-	0,005	0,21	0,17
TiO ₂ , %	0,83	0,73	0,26	-	0,29	0,07	0,97
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	89,72	91,61	82,26	79,87	75,43	79,55	89,52

Tabela 5. Hemijski sastav uzoraka prirodnih materijala sa pucolanskim svojstvima na teritoriji Srbije i u bližem regionu (*Arhiva laboratorije za veziva, hemiju i maltere Instituta IMS; **lična kom.; ***Geološki institut Srbije 2009; ****Križak, Maksimović, Vojnović 2014: 229; *****Nikolić *et al.* 2023:18)

Ispitivanja mehaničkih svojstava pucolanskih materijala podrazumevaju ispitivanje čvrstoće pri pritisku nakon 7 dana (SRPS B.C1.018: 2015). U dodatna ispitivanja hemijskih svojstava pucolanskih materijala, a prema navedenom standardu (SRPS B.C1.018: 2015) spadaju ispitivanja sadržaja SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 , MnO , Na_2O , K_2O , CO_2 , nerastvornog ostatka u $\text{HCl}/\text{Na}_2\text{CO}_3$ i HCl/KOH , dok se od fizičkih i mehaničkih svojstava dodatno ispituju gustina, specifična površina, finoća mliva i čvrstoća ispitnog maltera nakon 28 dana (mešavina se priprema od 50 % masenog udela pucolanskog materijala i 50 % masenog udela referentnog cementa za ispitivanje), a prema pojedinačnim standardima (SRPS EN 196-1: 2015; SRPS EN 196-2: 2015; SRPS EN 196-6: 2019; SRPS EN 451-2: 2017).

Čvrstoća na pritisak maltera nakon 7 dana, pripremljenog od kreča i materijala čija se pucolanska svojstva ispituju, određuje se prema metodi opisanoj u standardu (SRPS B.C1.018: 2015; ispitivanje je blisko testovima za reaktivnost sa krečom prema nekim međunarodnim standardima – indijski IS 1727: 1967 i kanadski A3004-E1: 2018 standardi). Komponente za pripremu maltera su hidratizani kreč, samleveni materijal sa pucolanskim svojstvima, pesak i voda, u odnosu 1:2:9:2 – u slučaju pripreme sa prirodnim, i u odnosu 1:2:9:1,8 – kod pripreme maltera sa veštačkim materijalima (prirodno kalcinirani materijali i leteći pepeo). Mešavina maltera se pravi za tri epruvete i prema standardu (SRPS B.C1.018:2015) sastoji se od:

- 150 g \pm 1 g standardnog hidratisanog kreča,
- 300 g \pm 1 g pucolanskog materijala,
- 1350 g \pm 5 g peska po CEN standardu SRPS EN 196-1: 2017, i
- 300 cm³ \pm 1 cm³ vode (za prirodne materijale) ili
- 270 cm³ \pm 1cm³ vode (za veštačke materijale).

Mešavina se priprema tako što se ručno mešaju hidratizani kreč i materijal sa pucolanskim svojstvima dok ona ne dobije jednoličnu boju. Nakon toga se mešavina stavlja u posudu mešalice sa vodom i meša prema standardu (SRPS EN 196-1: 2017). Malteri (epruvete) postavljaju se u kalupe (40 mm \times 40

mm × 160 mm), pa u hermetički zatvorenu limenu kutiju, ili se zatvore u deblju plastičnu foliju, a zatim ostaju 24 sata ± 15 min na temperaturi od 20 (± 2) °C. Nakon toga kalupi se ubacuju u komoru (zagrejanu na 55 (± 2 °C)), u kojoj stoje 5 dana + 20 h. Od izrade kalupa do ispitivanja mora da prođe 7 dana. Pola sata do jedan sat pre ispitivanja malteri se vade iz kalupa, meri im se masa, a zatim se ostavljaju u prostoru minimalne relativne vlažnosti 90 % i temperature 20 (± 2) °C. Nakon toga im se ispituju čvrstoća pri savijanju (na sve tri prizme) i čvrstoća pri pritisku (na svih šest polovina prizmi dobijenih nakon ispitivanja savijanja). Rezultati ispitivanja su aritmetička sredina vrednosti dobijenih kod ispitanih uzoraka. Čvrstoća pri pritisku materijala sa pucolanskim svojstvima, ispitana na ovaj način, ne sme biti manja od 5,0 MPa (SRPS B.C1.018: 2015).

O napred navedenim nedostacima standarda govori i sledeći primer. U američkom ASTM standardu propisano je da suma $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ kod prirodnih i prirodno kalciniranih materijala sa pucolanskim svojstvima mora biti minimalno 70 % u sastavu maltera, a date su i referentne vrednosti za tzv. indeks aktivnosti (SAI) (odnos između pritiskne čvrstoće maltera kod koga se 20 % mase veziva menja materijalom koji se ispituje, i prosečne čvrstoće referentnog cementnog maltera – ASTM C311/C311M-22) (ASTM C 618-23e1). Kako su brojna istraživanja pokazala, ispunjavanje zahteva iz ASTM standarda, vezana za navedenu ukupnu sumu oksida kao i indeks aktivnosti, ne znači da neki materijal zaista i poseduje pucolanska svojstva, odnosno ne znači da se pucolanska reakcija zaista i dogodila (Al-Hammood, Frayyeh, Abbas 2021: 5–6).

Ispitivanje pucolanskih svojstava crvenke kao prirodnog materijala tokom projekta *MoDeCo2000* pokazalo je da i pored ukupne sume oksida više od 70 %, dostignute čvrstoće maltera na pritisak nisu postigle minimalnu čvrstoću prema nacionalnom standardu kod svih uzoraka (Nikolić *et al.* 2023: 19). Ovo pokazuje kompleksnost pucolanske aktivnosti, odnosno njenu zavisnost od velikog broja faktora, uključujući specifičnu površinu, veličinu čestica, hemijski sastav i amorfnost, koji dalje određuju potrebu za vodom i utiču na mehanička svojstva i reaktivnost (Walker, Pavia 2011: 1149).

3.4 DODACI

Još od davnina, kroz iskustvo graditelja i majstora, ali i umetnika, uočeno je da dodavanje malih količina određenih supstanci malterskoj mešavini znatno poboljšava njena fizička i mehanička svojstva, obradivost i ugradljivost, ubrzava proces vezivanja i dr. Ove supstance svojim fizičkim, hemijskim i/ili kombinovanim delovanjem uticale su na promenu određenih svojstava maltera, i to u svežem stanju, tokom prelaska iz svežeg u očvrslu stanje, ili u očvrslom stanju (Миличић 2014б: 89). Već smo u ranijem tekstu, tokom predstavljanja metoda karakterizacije istorijskih maltera, prepoznali neke od ovih dodataka.

Danas se u malterima u iste svrhe koriste različiti savremeni dodaci, ali uz naučno dokazane razloge za njihovo određeno dejstvo. Procenat savremenih, odnosno hemijskih dodataka u odnosu na malternu smešu, mnogo je manji nego što je to slučaj sa tradicionalnim, mineralnim dodacima (Миличић 2014б: 89). Upotreba savremenih dodataka može biti veoma dragocena ne samo kod današnjih maltera za izgradnju, već i kod maltera za konzervaciju i intervencije na istorijskim malterima. Međutim, ona je opravdana samo kada su komponente maltera pravilno odabrane i međusobno kombinovane, pa mešavini ovi dodaci mogu pružiti određeno poboljšanje. Bitno je znati da se od njihove upotrebe ne sme očekivati *popravka* maltera koji nije zadovoljio osnovne zahteve kvaliteta (Миличић 2014б: 92).

Prema standardu za tehničke termine za maltere koji se koriste u kulturnom nasleđu (SRPS EN 16572: 2016), dodaci malterima razlikuju aditive (eng. *additive*) i primese (eng. *admixture*). Aditivi su prema ovom standardu komponente koje se obično u maloj količini dodaju vezivu tokom ili nakon njegove proizvodnje kako bi se modifikovao proces njegovog nastanka ili njegovih osobina. U aditive spadaju ubrzivači vezivanja (akceleratori), plastifikatori, sredstva za uvlačenje vazduha (aeranti), hidrofobi i dr. Primese su supstance koje se dodaju mešavini maltera u količini od najmanje 1 % w/w kako bi izmijenili njegove osobine. Među njima su pigmenti, materijali sa pucolanskim svojstvima (ako se dodaju u malim količinama, a ne

kao latentno vezivo) kao i različita vlakna. Međutim, ova podela nije uvek isto prikazana u različitim dokumentima, mada je u rečniku Američkog instituta za beton veoma slična podeli u pomenutom standardu, pa su prema ovom rečniku aditivi supstance koje se dodaju u relativno malim količinama kako bi poboljšali željene karakteristike ili potisnuli one neželjene, a primese materijali koji se dodaju u beton pre ili posle njegovog mešanja kako bi mu modifikovali svojstva (s tim da u ove materijale ne spadaju vlakna) (ACI CT-13 2013).

Prema standardu za karakterizaciju maltera koji se koriste u kulturnom nasleđu, u najviše upotrebljavane neorganske dodatke za konzervaciju, spadaju materijali sa pucolanskim svojstvima – pucolani, mlevena opeka, metakaolin, šljaka visokih peći, dok se od organskih najčešće upotrebljavaju ugali, pepeo, lepkovi i smole (ulja, voskovi) i vlakna (slama, kučina, dlaka) (SRPS EN 17187: 2021).

Dodaci malterima mogu biti prirodnog ili veštačkog porekla, tečni ili praškasti (Миличић 2014б: 89). Laboratorijska ispitivanja dodataka se vrše ispitivanjem samog maltera, odnosno mešavina pripremljenim sa dodacima ili bez njih, i kasnijim poređenjem rezultata. Izvođenjem proba neophodno je odrediti potreban procenat odabranog dodatka, ali i potvrditi njegovu kompatibilnost sa ostalim komponentama (Миличић 2014б: 92). Veliki broj savremenih naučnih istraživanja je usmeren na ispitivanja upotrebe zeolita kao prirodnog dodatka sa pucolanskim svojstvima u krečnim malterima za konzervaciju, ali i keramičkog otpada kao veštačkog materijala sa pucolanskim svojstvima u cilju delimične ili potpune zamene agregata, a ova istraživanja se sprovode i u Srbiji (Pašalić *et al.* 2012; Vujović, *et al.* 2014; Николић 2014; Aškrabić *et al.* 2019b; Aškrabić *et al.* 2019c; Aškrabić *et al.* 2021; Ашкрабић 2021).

Kako bi malter održao određenu plastičnost neophodnu za ugradivost i obradivost smeše, a posebno kada se nanosi u tanjem sloju na porozne materijale, čime gubi vodu i isušuje se, u procesu njegove pripreme se često koriste organski i neorganski dodaci da bi se zadržala voda, odnosno plastifikatori (Muravljov 1979: 233). Pored plastifikatora malterima se veoma često dodaju aeranti, koji u svežem malteru imaju ulogu

plastifikatora, i utiču na smanjenje potrebe za vodom, veštački uvlače vazduh u sveži malter, poboljšavaju ugradivost i obradivost sveže mešavine, a kod očvrsllog maltera povećavaju njegovu otpornost prema dejstvu mraza. Predstavljaju površinski aktivne materijale, a po prirodi su smolasta organska jedinjenja, među kojima su, kroz istoriju, najčešće upotrebljavane životinjske i biljne masti i ulja, njihove masne kiseline, kao i biljne smole koje reaguju sa krečom, a slično je i danas. Hidrofobi ili zaptivači povećavaju vodonepropusnost očvrsllog maltera. Reagujući sa vezivom daju produkte koji zatvaraju kapilarne pore u očvrslom malteru. Veoma je značajna upotreba tzv. akceleratora, koji ubrzavaju proces vezivanja i/ili očvršćavanja i tzv. retardera, koji odlažu vreme vezivanja i time omogućavaju duže vreme za ugradivost i obradivost maltera (Миличих 2014б: 91–92). Kao aditive malterima prepoznajemo i pigmente koji završnim slojevima maltera daju željenu boju, ali koji ne smeju negativno da utiču na očvršćavanje mešavine i čija boja mora biti postojana. (Muravljov 1995: 234).

Tradicionalni dodaci

Osim materijala sa pucolanskim svojstvima, kao važni tradicionalni dodaci se posebno ističu i organski dodaci na bazi proteina, ugljenih hidrata i masnih kiselina, čija je primena bila izuzetno široka i često vezana za određeni prostor. Primera radi, u istorijskim tekstovima u Engleskoj su najčešće pominjani mleko, sir, jaja, krv, životinjska mast i tutkalo, pčelinji vosak, smola, pivo, urin i izmet, zatim slad, ražano brašno, limunska kiselina i dr. Različite smole, protein kazein (iz mleka i sira) i tutkalo poboljšavali su sposobnosti adhezije, limunska kiselina je usporavala vezivanje, vosak je sprečavao skupljanje i davao vodoodbojnost malteru, dok je sveža krv zgušnjavala i verovatno doprinosila dostizanju ranih čvrstoća mešavine (Henry, Stewart 2011: 66), a delovala je i kao aerant (Kuckova *et al.* 2021: 2) i hidrofob, i pomagala u otpornosti na mraz (Fang *et al.* 232–241). Osim u adheziji za podlogu, mlečni protein kazein je bio važan i za plastičnost maltera i čvrstoću na pritisak, dok su jaja usporavala proces karbonatizacije i delovala kao hidrofob (Kuckova *et al.* 2021: 2). Između ostalog maslino-

vo ulje je umanjivalo veličinu i broj pora te poboljšavalo vodonepropusnost, dok je tutkalo poboljšavalo mehanička svojstva (Ventolà *et al.* 2011: 3317). U istočnoj Aziji su tradicionalno upotrebljavani lepljivi pirinač, skrob i morske alge (Hwang *et al.* 2022: 2). Biljni polisaharid amilopektin, koji se nalazi u kaši lepljivog pirinča, identifikovan je u krečnim malterima kojima je zidan Kineski zid, a delovao je kao inhibitor, kontrolišući rast kristala CaCO_3 . Upotreba lepljivog pirinča je poboljšavala fizičko-mehanička svojstva maltera (Yang, Zhang, Ma 2010). Svaka teritorija je imala svoje karakteristične lokalne dodatke, pa je lista onih korišćenih u tradicionalnim malterima kroz istoriju skoro beskonačna. Savremena istraživanja su potvrdila da je pepeo drveta, kao higroskopni materijal, korišćen u tradicionalnim krečnim malterima, apsorbovao vlagu iz zidova, ali i da ovi malteri, iako upijaju više vode, imaju povećanu brzinu sušenja, više vrednosti otvorene poroznosti i paropropustljivosti, što ih preporučuje za sanacije malternih spojnica u konzervaciji, posebno u vlažnim sredinama (Fusade *et al.* 2019: 500–501, 511–512).

Savremena identifikacija organskih dodataka u malteru se vrši na osnovu hemijskih analiza, pa tako istraživači mogu detektovati, na primer, skrob, šećere, krv i dr. (Fang *et al.* 2014). Danas ove organske dodatke ispituju i kao moguće komponente maltera za konzervaciju (Fang *et al.* 2014; Shivakumar, Selvaraj, Dhassaih 2021; Ventolà *et al.* 2011; Fang *et al.* 2015).

U svrhu mikroarmiranja maltera, poboljšanja njegove elastičnosti, smanjenja deformacija usled skupljanja i sprečavanja pojave pukotina, tradicionalno su se koristila prirodna vlakna, biljnog ili životinjskog porekla (Миличих 2014б: 90–91), najčešće slama i životinjske dlake (**Slika 95**), pomenuta napred u odeljku o karakterizaciji istorijskih maltera (2.2 Vizuelni pregled maltera). Primer maltera sa vlaknima, upotrebljavan i u savremenom dobu, jeste takozvani čok-malter, gust i mastan, koji se pravi od kreča i peska u razmeri 1:1 i sa dodatkom životinjske dlake. Dlaka dodata malteru, nabačenom na trsku i poravnatom kao prvi malterni sloj plafona, omogućava jednu vrstu armiranja i „drži” malternu mešavinu na okupu” (Tufegdžić 1979: 334–335).



Slika 95. Vlakna životinjskog porekla u istorijskom malteru za malterisanje starom nekoliko vekova, koja su se održala do danas, prisutan razmernik 0,5 mm (Arhiva Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS)

Upotreba prirodnih vlakana u konzervatorskim malterima tema je kojom se bavi veliki broj istraživača (Drdácký, Michoinová 2003; Stefanidou, Papachristoforou, Kesikidou 201; Kesikidou, Stefanidou 2019; Abbass, Lourenço, Oliveira 2020). Jedan od primera je i upotreba morske trave (Stefanidou *et al.* 2021). Neki od istraživača upozoravaju da upotreba prirodnih vlakana zahteva obazrivost jer mogu nastati mešavine teške obradivosti, što dalje traži dodavanje vode i rezultira slabijim mehaničkim karakteristikama, a problem kohezije vlakana sa matriksom povećava poroznost i kapilarno upijanje vode. Dalje, homogenost rasporeda vlakana tokom proizvodnje maltera teško se dostiže i često se pojavljuju skupine vlakana na određenim mestima (Stefanidou, Papachristoforou, Kesikidou 2016: 423).

Prirodna vlakna su jeftina, dostupna i ekološki prihvatljiva, pa brojna istraživanja uključuju i njihovu upotrebu u savremenim betonima i cementnim malterima kako bi se doprinelo održivosti građevinske industrije (Naiiri *et al.* 2021: 1591; Bui 2021: 4; Kesikidou, Stefanidou, 2019). Među njima

su životinjska – svila, vuna, dlaka; mineralna – staklo, azbest, volastonit, paligorskit; i biljna vlakna – pamuk, juta, slama, trava, lan, konoplja, list banane i ananasa, kokosova vlakna (Laverde *et al.* 2022: 2).

Savremeni dodaci

Leteći pepeo se često koristi kao zamena dela cementa u cementnim malterima. Međutim, s obzirom na to da štetne materije iz pepela mogu biti izlužene iz maltera, pripremaju se u kombinaciji sa nekim drugim materijalima sa pucolanskim svojstvima koji zbog svojih sorptivnih svojstava učestvuju u imobilizaciji ovih materija (kao što su zeolit i bentonit), a ova ispitivanja se vrše i u Srbiji, najpre da bi se u državi koristili nusprodukti i posledično da bi se smanjio uticaj ovog otpada na životnu sredinu (Terzić *et al.* 2018; Mijatović 2021: 1–3; Terzić *et al.* 2019; Terzić, Pavlović, Miličić 2013: 159). Upotreba letećeg pepela, ali i drugih savremenih dodataka nastalih kao produkti industrije, kao što su silikatna prašina i šljaka visokih peći, u krečnim malterima za konzervaciju istorijskih struktura nije česta, ali se njihova upotreba ne isključuje u potpunosti (Groot *et al.* 2022: 4; Young 2021: 12, 31–34, 68–69). Ispitivanja na ovu temu su prisutna u nauci (Nikhil Kumar, Rathish Kumar 2022; Kutlusoy *et al.* 2023), kao i istraživanja potpune zamene cementa drugim materijalima za potrebe izrade savremenih maltera, kroz kombinaciju kreča sa industrijskim nusproduktima (Kang *et al.* 2019).

Osim veštačkih materijala sa pucolanskim svojstvima kakvi su industrijski nusprodukti, u savremene dodatke malterima spadaju i hemijski dodaci, najčešće polimeri, koji menjaju svojstva veziva ili samog maltera (Миличић 2014б: 89).

Kao plastifikatori, u današnje doba se upotrebljavaju neorganski fino samleveni materijali, među kojima su bentonit, elektrofilterski pepeo, ali i materijali sa pucolanskim svojstvima. Kada su ovako okvašeni, njihove čestice oblikom i teksturom smanjuju trenje unutar svežeg maltera i tako mu povećavaju obradivost i ugradivost. Plastifikatori mogu biti i organski materijali, površinski aktivni, obavijati zrna veziva i takođe smanjivati trenje (Muravljov 1995: 233–234; Миличић

20146: 91). Ovi dodaci pomažu u povećanju čvrstoće maltera i otpornosti na pucanje (Alvarez *et al.* 2021: 5). Svojim osobinama omogućavaju smanjenje količine vode u svežem malteru, što dalje poboljšava svojstva očvrslih maltera. U ove vrste plastifikatora spadaju oni zasnovani na masnim kiselinama, naftenskim kiselinama, lignosulfonatima, melaninformaldehidima i dr. Danas se koriste i superplastifikatori (plastifikatori), koji znatno smanjuju količinu vode za izradu maltera, a uglavnom obuhvataju vodene rastvore sulfonovanog melaninformaldehida ili naftalinformaldehida, odnosno modifikovanog lignosulfonata, polikarboksilata i dr. (Миличић 20146: 90–91). Kreč je takođe plastifikator kada se koristi u složenim malterima, odnosno krečno-cementnim ili krečno-gipsnim malterima, jer poboljšava obradivost i ugradivost (Muravljov 1995: 233).

Aeranti su organske supstance kojima se u strukturu maltera tokom njegovog mešanja uvodi kontrolisan broj mehurića vazduha koji u njemu ostaju i nakon očvršćavanja (Alvarez *et al.* 2021: 4). Mehurići su veličine od 0,01 do 0,3 mm, ravnomerno raspoređeni unutar očvrsllog veziva, pri čemu njihova međusobna rastojanja ne prelaze 0,25 mm. Oni prekidaju finu mrežu kapilara u očvrslom malteru, smanjuju kapilarno upijanje vode i prave prostor za nesmetano širenje leda usled zamrzavanja. Ovim se eliminišu unutrašnji naponi koji doprinose destruktivnim promenama maltera i povećava otpornost očvrsllog maltera na dejstvo mraza (Миличић 20146: 91–92). Aeranti povećavaju poroznost maltera, što povežujemo sa umanjem čvrstoće, pa je potrebno voditi računa o količini dodatog aeranta (Maravelaki *et al.* 2023: 4).

Hidrofobi se najčešće pripremaju na bazi masnih kiselina (kaprinske, stearinske i oleinske) (Миличић 20146: 91). Oni daju hidrofobnost i vodoodbojnost malterima. Smanjuju upijanje vode putem kapilarnosti, povećavaju trajnost maltera prema spoljnim uticajima (Maravelaki *et al.* 2023: Martínez-Ramírez *et al.* 2021: 6–7). Antifrizi snižavaju temperature smrzavanja maltera, pa omogućavaju rad i na nižim temperaturama (Muravljov 1995: 234).

Retarderi odlažu vreme vezivanja tako što oko zrna veziva stvaraju opne sprečavajući njegove brze hemijske reakcije sa vodom. U ovu svrhu se koriste dekstrin, razne vrste šećera, gli-

cerin i dr. U akceleratorne, tj. ubrzivače vezivanja ili očvršćavanja maltera, spadaju alkalni silikati, aluminati i trietanolamin (Миличих 2014б: 91). Oni utiču na ubrzanje karbonatizacije i povećavaju mehaničke čvrstoće maltera, ali im je nedostatak mogućnost pojavljivanja pukotina.

Upotreba savremenih hemijskih dodataka (SRPS EN 934-1: 2010) u malterima za zidanje (SRPS EN 934-3: 2014), kao i za betone i injekcione smeše podrazumeva i njihovo testiranje, koje se vrši izradom referentnih maltera, a prema standardu (SRPS EN 480-13: 2015).

U svrhu mikroarmiranja maltera danas se u krečnim (konzervatorskim) malterima mogu koristiti sintetička vlakna, odnosno karbonska, polipropilenska i staklena vlakna, inače razvijena za umanjeње pucanja maltera sa portland cementom (Henry, Stewart 2011: 65; Stefanoidou, Papachristoforou, Kesikidou 2016).

U najsavremenije dodatke malterima na bazi kreča spadaju i modifikatori kristalizacije, koji eliminišu štetu koja nastaje kristalizacijom soli; neorganske nanočestice koje daju mogućnost samočišćenja malterima (najčešće je u pitanju nanosilika) i dr. (Maravelaki *et al.* 2023: 12).



IV PRIPREMA I ISPITIVANJE KREČNIH MALTERA ZA KONZERVACIJU

Procesu arhitektonske konzervacije prethodi ocena stanja čitave građevine. Ona mora obuhvatiti planiranje procesa, prikupljanje informacija o građevini, snimanje stanja, pripremu procene rizika i preporuka, sumiranje istraživanja, i na kraju izveštaj čitavog projekta. U sumiranju izveštaja će biti data preporuka o potrebnim merama zaštite (*bez mera; održavanje i preventivna konzervacija; manja popravka i / ili dalja istraživanja; velike intervencije zasnovane na dijagnozi*) (SRPS EN 16096: 2014).

U intervencije koje nekada mogu biti i većeg obima, u zavisnosti od uslova zaštite i očuvanja same istorijske strukture, spadaju restauracija, anastiloza, i sanacija sa konsolidacijom. Za ove potrebe se uglavnom pripremaju malteri za zidanje i injektiranje, nekada malterisanje, a u slučaju osnovnog održavanja nekada je potrebno obraditi postojeće degradirane spojnice, posebno kada njihovo stanje može narušiti strukturne osobine elementa.

Konzervatorski malteri se tako koriste za zidanje novih elemenata zida od zemlje, kamena ili opeke tokom anastilozе ili restauracije, a dolaze i u kontakt sa istorijskim malterima tokom konsolidacije ili sanacije čitavih struktura, pojedinačnih elemenata, kao i eventualne ponovne obrade spojnica. Jedna od izuzetno važnih funkcija maltera za konzervaciju jeste i zaštita gornjih završnih slojeva zida, što predstavlja veliki izazov kada su u pitanju urušeni ostaci zidova građevina koje su izgubile svoju funkciju, s obzirom na potrebe povećane otpornosti ovih maltera na spoljne uticaje, i istovremenog održavanja tehničke kompatibilnosti sa postojećim istorijskim tkivom.

Tokom ispunjavanja principa međusobne kompatibilnosti starog i novog maltera, posebno je važan vid tehničke kompatibilnosti, o čemu je pisano u uvodu monografije. Međutim, razmatranje procesa izrade konzervatorskih maltera podrazumeva razmatranje svojstava postojeće strukture i maltera, uticaje spoljne sredine, ali i procenjene troškove za nabavku sirovina neophodnih za izvođenje radova i sam proces pripreme i negovanja maltera. Stoga, osim karakteristika istorijskog

maltera, prilikom izrade konzervatorskih maltera, potrebno je znati njegovu funkciju, izloženost spoljašnjim uticajima, kao i prirodu okolnog građevinskog materijala uz koji se ovi malteri primenjuju (van Hees *et al.* 2012: 1299).

Više autora koji se bave istraživanjem načina pripreme maltera za konzervaciju proučavalo je potrebnu metodologiju, odnosno odabir i sled aktivnosti koje treba preduzeti u ovom kompleksnom procesu. Predlog aktivnosti svakako mora nastati na osnovu već proverenih procesa u praksi, ali se svaka već postavljena metodologija mora u nekim segmentima modifikovati i dopunjavati, jer ne postoji jedan propisan tretman za više građevina. Zato su neki autori proučavali nekoliko već sprovedenih projekata pripreme predloga maltera za konzervaciju i njihove primene u praksi, pokušavajući da pronađu sličnosti i razlike među njima (Schueremans *et al.* 2011). Izdvojena su tri zajednička metodološka koraka: detaljno istraživanje uzoraka istorijskih maltera; predlog recepture maltera kao deo tehničke specifikacije koju su dali arhitekta konzervatori i zatim ga primenili na samom spomeniku; i uzorkovanje primenjenih konzervatorskih maltera uz ocenu njihove kompatibilnosti, kroz razgovor sa izvođačima, arhitektama konzervatorima i inženjerima o iskustvu u radu sa datim materijalima. Zaključeno je da dizajn i primena maltera zahtevaju sveobuhvatan rad: istraživanje na terenu i prikupljanje uzoraka istorijskih maltera; karakterizaciju maltera unutar njihovog istorijskog konteksta; analize postojećih oštećenja kako bi se utvrdili razlozi zbog kojih se malter primenjuje; definisanje optimalne strategije intervencija; formulaciju kompozicije maltera zasnovane na donetim zaključcima; i primenu maltera uz adekvatan zanatski rad i tehnologiju.

4.1 TEHNIČKA KOMPATIBILNOST MALTERA

Sistematski pristup postizanja tehničke kompatibilnosti zasnovan je na karakterizaciji samog istorijskog maltera i pripremi konzervatorskih maltera u skladu sa njenim rezultatima. Svaki vid tehničke kompatibilnosti, odnosno estetske, mineraloške, hemijske, mehaničke i fizičke kompatibilnosti

može se vezati za određene analize maltera ili njegovih komponenata (Schueremans *et al.* 2011: 4339–4340).

Za postizanje estetske kompatibilnosti kod istorijskih maltera potrebno je izvršiti analize teksture, boje, veziva, agregata i dodataka sa primesama, kao i pukotina i pora (na osnovu vizuelnog pregleda na licu mesta i uz upotrebu ručne lupe ili stereomikroskopa). Mineraloška kompatibilnost se ispituje na osnovu analize mineraloškog sastava veziva i agregata zasebno (upotrebom XRD metode, FTIR tehnike i TGA/DTA metoda), ali i maltera u celini (upotrebom XRD metode, FTIR tehnike, petrografskih analiza, SEM mikroskopije). Hemijska kompatibilnost se postiže na osnovu analize hemijskog sastava maltera (klasična hemijska analiza i XRF), mehanička na osnovu ispitivanja različitih vidova čvrstoća, dok fizička kompatibilnost obuhvata ispitivanje poroznosti maltera (otvorene i zatvorene poroznosti), specifične površine maltera i raspodele zrna po veličini kod maltera i agregata (prosejavanjem) (Schueremans *et al.* 2011: 4340, Fig, 2, prema Janssens, Serre 2010: 186).

Drugi autori u karakteristike istorijskih maltera na osnovu kojih se dizajnira malter za konzervaciju, koje zapravo ispituje kako bi oni dostigli kompatibilnost, ubrajaju: boju, oblik-profilaciju (u slučaju izrade maltera za ponovnu ispunu spojnicu), raspodelu veličine zrna agregata, sastav maltera i odnos vezivo–agregat, prisustvo oštećenja, poroznost i raspodelu veličine pora maltera i okolnih elemenata od opeke i kamena; zapreminsku masu i ukupnu poroznost maltera, prisustvo soli, upijanje vode i, neka od čvrstoća, ukoliko je moguće obezbediti odgovarajuće uzorke (van Hees *et al.* 2012: 1299).

Dalje, tehnička kompatibilnost se može definisati kao postizanje kompatibilnosti u vidu sledećih zahteva: osobine površine (boja, tekstura, završna obrada); kompozicije (vrsta agregata i veziva, granulometrijski sastav); čvrstoća (pritiska, zatezna i prijanjanje); elastičnosti (modul elastičnosti, deformabilnost); osobine poroznosti (ukupna poroznost, prividna zapreminska masa, raspodela pora, kapilarno upijanje vode, i transport vlage); koeficijenta termičke dilatacije; kao i drugih tehničkih zahteva, vezanih za trajnost (sadržaj rastvornih soli i nečistoća, otpornost na cikluse mržnjenja i odmrzavanja, ob-

radivost, uslovi očvršćavanja, majstorski rad i, na kraju dobar sistem kontrole kvaliteta) (van Balen *et al.* 2005: 784–785).

Potrebno je naglasiti da novi malteri za konzervaciju ne smeju biti trajniji od istorijskih maltera i okolnih istorijskih materijala sa kojima su u dodiru, jer je njihova uloga zaštitna i konačno uloga „žrtve“ (Klisińska-Kopacz *et al.* 2010: 405). Prilikom konzervacije, čuvaju se postojeći elementi za zidanje, odnosno kamen i opeka, dok se malter često menja i tako gubi svoje istorijsko tkivo, što predstavlja neizbežan proces kako bi se sprečila šteta na osnovnim elementima za gradnju. Ovo je upravo najveći razlog potrebe za kompatibilnošću novih maltera sa istorijskim tkivom, jer, u suprotnom, oni ne ispunjavaju svoju osnovnu ulogu. Autentičnost istorijskog maltera se uglavnom žrtvuje da bi se očuvale neke druge vrednosti građevine, posebno kada je u pitanju potreba zaštite stabilnosti čitave strukture i izrada maltera za zidanje ili novih malternih fuga umesto onih postojećih koje su oštećene (Hughes, Válek 2000: 21–22).

Razmera mešanja maltera predstavlja odnos veziva prema agregatu. Za proste maltere razmera se piše na sledeći način: $V : A = 1 : m$, dok je za složene maltere (sa više veziva) razmera $V1 : V2 : A = 1 : m : n$ (primer za dva veziva). Izražava se prema masi, zapremini, ili dr., što je veoma važno navesti kao podatak uz samu propisanu razmeru kako ne bi došlo do pogrešnih odmeravanja prilikom izrade maltera (Tufegdžić 1979: 326).

Prema autorima, maksimalna količina peska u istorijskim mešavinama maltera za zidanje je generalno bila tri puta veća od kreča, tj. odnos vezivo–agregat iznosio je 1:3 (često je korišćen i odnos 1:2), a što pokazuju istorijski tekstovi, ali i zidarska praksa. Međutim, u slučaju upotrebe živog kreča, neophodno je znati da on dobija maksimalno skoro dvostruko na svojoj zapremini tokom gašenja, što odnos mešanja od 1:3 kasnije u analizama kompozicije istorijskih maltera pretvara u odnos 1:1,5 (Copsey 2020: 1019–1020) ili 1:2 (Young 2021: 61) (ekspanzija kreča može biti od 60 % do 100 % – Lynch 2007).

Što je kreč više hidrauličan, manje će dobiti na zapremini tokom gašenja, a to može i objasniti razlog preporuke u jednom istorijskom izvoru prema kojoj bi odnos živog kreča i peska prilikom gašenja na licu mesta uz pesak trebalo da iznosi 1:3

za nehidraulični kreč, 1:2,5 za slabo hidraulični kreč i 1:2 za srednje hidraulični kreč (Young 2021: 61).

Od 1 kg živog kreča se dobija 1,32 kg hidratisanog kreča, pa razmeri mešanja (težinski) maltera sa živim krečom i peskom od $Kž : P = 1 : m$ odgovara odnos $Kh : P = 1 : \frac{3}{4} m$ kod hidratisanog kreča (Tufegdžić 1979: 335).

Analize istorijskih tekstova i njihovih kasnijih interpretacija ukazuju na to da su prilikom određivanja odnosa u malterima njihovi autori mislili na odnos živog kreča i peska te da su navedeni odnosi bili vezani za zidarske maltere (Copsey 2019b: 15–16; Copsey 2019d: 60–61; Lynch 2007). Kod gašenog kreča, zapremina čak i najgušćeg krečnog testa može sadržati i 30 % slobodne vode (Boynton 1980 u Copsey 2020: 1019), pa bi pretpostavljena razmera mešanja od 1:3 u stvari kroz laboratorijske analize pokazala malter odnosa 1:4 (Copsey 2020: 1019).

Minimalna količina veziva za trajan malter jeste ona koja dovoljno obavija svaku česticu agregata i popunjava sve praznine (Henry, Stewart 2011: 130). Dobro graduisani pesak sadrži uglavnom oko 33 % šupljina, odnosno jednu trećinu svoje zapremine, pa bi to tehnički značilo da količina kreča potrebna kako bi se one popunile iznosi jednu trećinu zapremine peska, što nam može objasniti ustaljen odnos kreča i peska od 1:3 (Young 2021: 61). Međutim, ovo se ne može sa sigurnošću prihvatiti kao jedini razlog pomenutog ustaljenog odnosa (Lynch 2007). Iako je dobro graduisan agregat izuzetno značajan za postizanje adekvatnog kontakta sa vezivom, mnogi istorijski malteri nemaju adekvatnu granulaciju, a i dalje su trajni, čime se samo potvrđuje važnost pravilno odabranog odnosa veziva prema agregatu (Henry, Stewart 2011: 130). Loše graduisan pesak sa 40 % šupljina tako će zahtevati odnos 1:2,5, a ako je pesak sitan, potrebno je više kreča, odnos 1:2, 1:1,5, ili čak 1:1 za pesak sa česticama veoma malih dimenzija (Young 2021: 61).

Kod pripreme laboratorijskih modela maltera za konzervaciju količina svake komponente meri se izuzetno precizno, dok se odmeravanje komponenti na samom gradilištu kroz istoriju, nije moglo izvršiti na taj način, što se ne može očekivati ni u budućoj konzervaciji spomenika. Izuzetak predstavljaju manje popravke (posebno kod dekorativnih maltera koje vrši konzer-

vator), kada je relativno jednostavno sve vreme tokom radova zadržati tačan odnos utvrđen prilikom prethodnih ispitivanja. Međutim, kod sanacija zidova ili restauracija koje vrše zidari, teško je očekivati da se odnosi mogu održati tokom celokupnog procesa radova i da će merenje zidarskim alatima uvek dati potpuno isti odnos.

Tokom ispitivanja kompozicije istorijskih maltera koji potiču iz iste građevine, često se sreću međusobno različiti, ali ipak slični odnosi komponenata, pa je potrebno proveriti (u zavisnosti od funkcije maltera) da li se u planiranoj konzervaciji građevine, može usvojiti jedna razmera za više takvih različitih, a sličnih odnosa. Kod pripreme maltera za konzervaciju treba imati u vidu da je razmera komponenti istorijskog maltera prilikom karakterizacije laboratorijskim metodama uvek određena najpribližnije moguće, pa je u cilju dobijanja adekvatnog maltera koji će biti što sličniji originalnom i što pogodniji datoj nameni u procesu konzervacije često potrebno pripremiti više različitih mešavina u kojima odnosi veziva i agregata minimalno variraju, a zatim ih testirati. Ova optimizacija odnosa komponenti je izuzetno važna i za dobijanje kompaktnog maltera u kome će prostor između zrna agregata biti adekvatno ispunjen česticama veziva. Koeficijent kompaktnosti maltera predstavlja odnos apsolutne zapremine veziva i vode prema šupljinama u agregatu (Muravljov 1995: 241), pod uslovom da vezivo nema šupljina. U slučaju da i ove šupljine postoje, obračun je nešto drugačiji, i vrednost koeficijenta ne određuje samu kompaktnost maltera, jer bez izmena količine veziva i agregata on raste sa povećavanjem količine vode (Tufegdžić 1979: 329). Kompaktan malter se postiže upotrebom manje količine vode i boljim sabijanjem maltera tokom ugrađivanja (Muravljov 1995: 241).

4.2 TEHNOLOGIJE PRIPREME KREČNIH MALTERA

Mešavine maltera za konzervaciju na bazi kreča pripremaju se uz upotrebu različitih vrsta kreča i agregata, u različitim međusobnim odnosima i doziranjem različitih granulacija agregata, uz dodavanje manje ili veće količine dodataka. Sve

ovo zavisi od rezultata ispitivanja istorijskog maltera, čvrstoće i stanja materijala uz koji budući malter treba da bude primenjen, kao i od izloženosti te strukture spoljašnjim uticajima (Odgers, Henry 2012: 302).

Za potrebe konzervacije se danas koriste svi oblici kreča, nastali tradicionalnim ili industrijskim procesom pečenja (i gašenja). Ispitivanja prednosti i mana upotrebe različitih oblika kreča u arhitektonskoj konzervaciji u poslednjim decenijama često sprovode ustanove koje se bave zaštitom spomenika kulture u pokušajima da dobiju što kompatibilnije materijale (Copsey 2019d; Figueiredo 2018).

Osobine krečnih maltera

Krečni malter se odlikuje izuzetno dobrom strukturom pora, visokom difuzijom vodene pare, ali i visokim kapilarnim upijanjem vode, pa stoga slabijom otpornošću u građevinama trajno izloženim uticaju vlage ili niskih temperatura. S druge strane, zbog visoke poroznosti i paropropusnosti, krečni malteri doprinose brzom isušivanju zidova, usled otpuštanja viška vlage iz strukture. Zbog niskog modula elastičnosti, ovi malteri poseduju izuzetnu sposobnost prilagođavanja dilatacijama građevine u celini (Groot *et al.* 2022: 9).

Tehnički komitet RILEM TC 277-LHS je kroz svoj izveštaj doneo pregled mehanizama vezivanja i očvršćavanja vezivnih sistema na bazi kreča, odnosno procesa sušenja, hidratacije, pucolanskih reakcija i karbonatizacije. Na sve njih utiču brojni faktori, a tok samih procesa dalje utiče na buduća svojstva maltera. Sušenje, kao kritičan korak tokom očvršćavanja maltera, uslovljeno je kompozicijom maltera (komponentama i njihovim međusobnim odnosima) i spoljnim uslovima njegovog negovanja, kao i veličinom poroznosti materijala sa kojim je malter u kontaktu. Ovaj proces utiče na mikrostrukturu, mehanička i higrička svojstva i trajnost maltera. U njega su uključena dva mehanizma: potrošnja vode za hidraulične reakcije kod maltera sa hidrauličnim fazama, i njeno isparavanje i upijanje od strane porozne podloge. Veća količina vode generalno povećava poroznost maltera, pa i pucanje, a nekada može i da umanja mehaničke osobine. Kod hidrauličnih veziva ili kod

onih kojima su dodati materijali sa pucolanskim svojstvima, veća količina vode favorizuje hidrauličnu reakciju u odnosu na karbonatizaciju, istovremeno povećavajući poroznost i smanjujući čvrstoću. Kod maltera na bazi vazdušnog kreča visoka vrednost odnosa voda-vezivo usporava karbonatizaciju i povećava poroznost (Alvarez *et al.* 2021: 3, 21).

Vazdušni malteri dostižu veću čvrstoću kada se tokom prvih 28 dana neguju u uslovima srednje relativne vlažnosti 70 (± 5) %, dok uslovi visoke vlažnosti ometaju proces karbonatizacije. Karbonatizacija maltera je odgovorna za vezivanje i očvršćavanje i zahteva adekvatnu relativnu vlažnost. Neop-hodni uslovi za karbonatizaciju su od 40 % do 80 %, a optimalni od 70 % do 80 % vlažnosti. Na ovaj proces utiču i brojne karakteristike komponenata maltera, kao i položaj maltera u samoj strukturi (dubina zida ili blizina površini). Da bi došlo do pucolanske reakcije u malterima takođe je potrebna vlažna sredina. NHL malteri i produžni malteri traže veću vlažnost, koja omogućava hidrataciju hidrauličnih komponenti. Sama mineralogija hidrauličnih maltera, uz odgovarajući odnos komponenata, utiče na vezivanje i očvršćavanje, koje se kod ovih maltera ubrzano razvija u periodu do 28 dana, a zatim dalje nastavlja do perioda od 182 do 365 dana. Slično je sa produžnim malterima (Alvarez *et al.* 2021: 3–4, 21–22).

Očvršćavanje hidrauličnog kreča dešava se hidratacijom kalcijum-silikata (uglavnom belita) i kalcijum-aluminata. Ukoliko je slobodni kalcijum-hidroksid raspoloživ u kompoziciji maltera, desiće se karbonatizacija, kao i sekundarna reakcija. Što se tiče maltera koji svoju hidrauličnost dostižu kroz upotrebu materijala sa pucolanskim svojstvima, za njegovo očvršćavanje odgovorne su pucolanska reakcija između ovih materijala i kreča i karbonatizacija preostalog kreča (Cizer, van Balen, Van Gemert 2010: 241).

Krečni malteri sa vazdušnim krečom i dodacima sa pucolanskim svojstvima. Krečni malter sa vazdušnim krečom sporo očvršćava karbonatizacijom na vazduhu, pa se ne sme dozvoliti njegovo brzo isušivanje, kao ni izloženost mrazu i solima dok je u svežem stanju. Potrebno mu je nekoliko godina da dostigne punu čvrstoću, a prosečna čvrstoća na pritisak

posle 28 dana mu je 0,4 MPa. Ne vezuje pod vodom ili u vlažnim uslovima, plastičan je i veoma obradiv, ima dobre adhezione sposobnosti i savojnu čvrstoću, kao i propusnost (Odgers, Henry 2012: 296). S obzirom na niža mehanička svojstva, slabu otpornost na atmosferske uticaje i visoko upijanje vode, njegova primena je pogodna za unutrašnja malterisanja u prostorijama bez vlage, uglavnom u strukturama zaštićenim od spoljašnjih uticaja, zavisno od klimatskih uslova sredine (Miličić *et al.* 2022: 57). Tokom pripreme konzervatorskih maltera sa vazdušnim krečom, koriste se prirodni (uglavnom rečni) i drobljeni agregat, dok se kao dodatak ili čak zamena agregata mogu koristiti materijali sa pucolanskim svojstvima, ali i drugi aditivi i primese (Miličić *et al.* 2022: 56–57).

Dodavanjem materijala sa pucolanskim svojstvima nehidrauličnom kreču nastaju hidraulični malteri koji imaju dobre osobine vazdušnih maltera, ali je kod njih spora karbonatizacija pomognuta i zaštićena hidrauličkim vezom. Ovi malteri se pripremaju tako što se mešaju krečno testo i agregati, a zatim im se neposredno pred upotrebu dodaju materijali sa pucolanskim svojstvima, nakon čega bi malter od tog trenutka trebalo upotrebiti u roku od 2h. Komercijalni proizvodi ovog tipa se prave uz upotrebu kreča u prahu. Međutim, mnogi od njih suviše su jaki za slabe istorijske materijale. Hidraulični malteri nastali dodavanjem pucolanskih materijala vazdušnom kreču otporniji su na spoljašnje uslove od onih nehidrauličnih; razvijaju čvrstoću mnogo brže; vezuju i u vlažnim zidovima; imaju uglavnom smanjenu propustljivost u odnosu na nehidraulične maltere; u zavisnosti od vrste i količine materijala sa pucolanskim svojstvima, mogu se dizajnirati malteri od slabe do jake hidrauličnosti; adekvatniji su za upotrebu od hidrauličnih maltera sa hidrauličnim krečom kada se čvrstoća maltera mora održavati niskom; i uglavnom nisu otporni na jake spoljašnje uticaje, osim u slučaju upotrebe velike količine materijala sa pucolanskim svojstvima (Odgers, Henry 2012: 298; Henry, Stewart 2011: 279).

Krečni malteri sa prirodno hidrauličnim krečom.

Malteri pripremani sa industrijskim prirodno hidrauličnim krečom (NHL) poseduju neke od korisnih karakteristika maltera na bazi vazdušnog kreča, kao što su bolja struktura

pora, povećana difuzija vodene pare i poboljšana sposobnost prilagođavanja pomeranjima kroz fleksibilnost maltera. Za razliku od nehidrauličnih maltera, imaju brže početno vezivanje i sposobnost očvršćavanja u vlažnim uslovima ili pod vodom (Figueiredo, Ball, Lawrence 2016: 1; van Balen *et al.* 2005, Schueremans *et al.* 2011, Henry, Stewart 2011, Cizer *et al.* 2010 i Forsyth 2008 u Figueiredo, Ball, Lawrence 2016: 1).

Rad sa malterom uz upotrebu NHL-a je ubrzan, ali traži negovanje u vlažnim uslovima najmanje sedam dana, dok mu brzina vezivanja zavisi od temperature. Ako se adekvatno neguje, postaje otporan na mraz nakon 28 dana. Dostiže više vrednosti čvrstoća na pritisak i savijanje od nehidrauličnih maltera, kao i niže vrednosti poroznosti i propustljivosti (Odgers, Henry 2012: 300; Henry, Stewart 2011: 280). Kao i u slučaju vazdušnog kreča, postoji formulisani kreč napravljen od NHL-a sa dodatkom pucolanskog materijala (SRPS 459-1: 2016). Hidraulični malteri sa upotrebom NHL-a mogu se nabaviti i kao gotov industrijski proizvod.

Iz ovih razloga je prirodno hidraulični kreč pre skoro tri decenije nakon sagledavanja posledica koje cement ima po fizičko tkivo istorijskih građevina, i velikog broja neuspeha upotrebom nehidrauličnog kreča u nezaštićenim strukturama, postao maltene isključivo upotrebljavano vezivo u konzervaciji (Copsey 2019c: 7). Međutim, čvrstoće maltera postizane sa prirodno hidrauličnom krečom daleko premašuju vrednosti ovog svojstva kod istorijskih hidrauličnih maltera, za čiju pripremu je uglavnom upotrebljavan nehidraulični ili slabo hidraulični kreč. Srednje i izrazito prirodno hidraulični kreč koji se mogu uporediti sa savremenim NHL proizvodima, kroz istoriju su korišćeni samo kod zahteva za izuzetno čvrste maltere građevina posebnih namena, rad pod vodom ili izuzetno vlažne sredine (Henry 2018: 30–31; Copsey 2019c: 4–5). Prirodno hidraulični kreč svoju čvrstoću dostiže u periodu do dve godine, pa je teško konačnu čvrstoću maltera spravljenog sa njim povezati sa klasom koju je dao proizvođač. Dalje, čvrstoće kreča iste klase variraju kod različitih proizvođača (Odgers, Henry 2012: 300; Henry, Stewart 2011: 280). Zato se u međunarodnoj zajednici istraživača i stručnjaka sve više

pojavljuju apeli za umereno korišćenje ovog materijala u konzervaciji.

Laboratorijska ispitivanja krečnih mešavina sa upotrebom NHL-a dokazala su postojanje varijacija u čvrstoćama na pritisak nakon 28 dana, u odnosu na standardne klasifikacije, a u zavisnosti od porekla materijala i načina proizvodnje kreča, kao i da veziva iste klase mogu imati međusobno veoma različite karakteristike, čak i kada je u pitanju isti proizvođač. Reaktivnost veziva ne zavisi samo od hemijskog sastava, već i temperature pečenja sirovine. Malteri sa upotrebom NHL veziva dobijaju na čvrstoći i nakon 28 dana, uglavnom do dve godine, a nekada i do tri godine. Mineraloške osobine veziva utiču na razvoj čvrstoće, dok specifična površina kao fizičko svojstvo utiče na odnos vode i veziva, posledično poroznost, i nešto manje čvrstoću. Kao zaključak ispitivanja navodi se da su malteri sa upotrebom NHL-a pogodni za konzervaciju, ali pod uslovom da su osobine veziva poznate, kako bi se izbegla potencijalna oštećenja usled dobijanja neočekivanih čvrstoća maltera, kao i da se njihovo relativno ponašanje može predvideti kroz vezu hidrauličnih faza, portlandita, specifične površine, odnosa vode i veziva, i odnosa veziva i agregata (Figueiredo 2018: 174–175, 180–181).

Najveći problem kod primene maltera sa NHL vezivom u konzervaciji nastaje zbog toga što je upotreba ovog veziva u konzervaciji često neselektivna, odnosno vrši se na najvećem broju istorijskih građevina bez prethodnih ispitivanja originalnih maltera, što dovodi do tehničke nekompatibilnosti, odnosno do toga da konzervatorski malteri budu čvršći od istorijskih ili od okolnih elemenata sa kojima dolaze u kontakt.

Tehnologije gašenja kreča i pripreme krečnih maltera

Kod upotrebe gašenog kreča u obliku krečnog testa malter se priprema njegovim mešanjem sa agregatom koji se dodaje postepeno, baš kao i kasnije voda. Količina vode se pažljivo optimizuje kako bi se dobio malter željene konzistencije. U slučaju upotrebe hidratisanog kreča u prahu, najpre se pomešaju kreč i pesak, pa se toj smeši dodaje voda, ili se kreč izmeša sa vodom, a zatim se ovoj kaši dodaje agregat. Kod pripreme maltera sa

živim krečom postoji više tradicionalnih načina, ali je svima zajedničko gašenje kreča tokom same pripreme maltera ili nešto pre toga, odnosno prisustvo „vrućeg kreča” na gradilištu (Tufegdžić 1979: 335–336).

Usled oslobađanja velike količine toplote tokom gašenja kreča, malterna mešavina se zagreva, a nakon potpunog gašenja malteru se dodaje još vode do postizanja željene konzistencije za ugradnju. Živi kreč možemo ugasiti odvojeno i pripremiti ga kao suvi hidrat ili krečno testo, zatim ga umešati sa agregatom dok je još uvek vruć, i čim se završi gašenje, dodati vodu kako bismo dobili malter radne konzistencije, ili ovu mešavinu možemo ostaviti za kasnije u čvršćem obliku. Takođe, živi kreč može biti umešan sa vlažnim peskom, čime se započinje gašenje, a uz postepeno dodavanje vode dolazi do kompletnog gašenja – kako bi se dobila adekvatna konzistencija za rad, ili kako bi se dobila manje vlažna masa, koja se ostavlja za kasnije kada se i oblikuje u malter. Dalje, može se napraviti rupa u vlažnom pesku, odnosno formirati *prsten* od peska, zatim komadni živi kreč postaviti u sredinu, potom dodati vodu kako bi se započelo gašenje, prekriti kreč peskom, pa nakon nekog vremena krenuti mešanje kreča i peska, uz dodavanje vode potrebne za dobijanje maltera željene konzistencije (Copsey 2019: 48, 149–152) (**Slika 96**). Prilikom pripreme maltera sa živim krečom koji je u veoma usitnjenom obliku ili prahu može se prvo pripremiti mešavina kreča sa agregatom, a zatim pažljivo dodavati voda pri čemu dolazi do gašenja kreča (Copsey 2022: 200). Takođe, ovo se može izvesti i u mikseru, gde se prvo izmeša agregat, zatim dodaje živi kreč u prahu (ili u komadima), a nakon mešanja se dodaje voda (Copsey 2019: 48: 151).

Postoje i tradicionalni načini dobijanja hidratisanog kreča u prahu, odnosno gašenja kreča koji se zatim u pripremi maltera može mešati sa agregatom. Jedan je podrazumevao punjenje korpe živim krečom i potapanje u bure sa vodom dok ne započne raspadanje kreča. Kada se korpa izvadi i ocedi, kreč se prosipa na gomilu gde se polako zagreva i raspada u prah. Kod drugog načina sloj živog kreča se prelivao malom količinom vode, bez natapanja, zatim se razastirao drugi sloj kreča, ponavljalo polivanje i tako se pravila gomila kreča koji se gasio

225

pod dejstvom vodene pare i toplote razvijene iz nižih slojeva. Prilikom ovih procesa dešava se da je vode ili isuviše ili premalo, da se pojavljuju neugašene čestice, kao i one koje su već prešle u karbonat (Tufegžić 1979: 216).

Jedan od istorijskih zapisa iz prve četvrtine XIX veka, čiji je autor francuski inženjer A. Rokur (A. Raucourt, 1789–1841), donosi tri tradicionalna načina gašenja kreča i izrade maltera.



Slika 96. Izrada maltera sa živim krečom tokom radionice projekta *MoDeCo2000* u Viminacijumu (fotografije nastale iz video-materijala koji je snimio Dragan Beljić)

Kao uobičajeni metod, primenjiv i na vazdušni i na hidraulični kreč, beleži ranije već pomenut metod, odnosno kombinovano gašenje i mešanje maltera, tj. gašenje kreča sa minimalnom količinom vode okruženog peskom, zatim prekrivenog peskom kako bi zadržao toplotu, a onda mešanje u malter odmah nakon završetka gašenja. Ovaj način podrazumeva i izmenjenu metodu kada se kreč gasi u koritu i odmah dok je vruć meša sa peskom. Takođe, podrazumeva i gašenje kreča u suvi hidrat ili krečno testo, sa minimalnom količinom vode i njegovo mešanje sa peskom odmah nakon toga ili malo kasnije. Hidrauličnom kreču je potrebno više vremena da se ugasi i zahteva mešanje peska i živog kreča u prahu pre ili tokom samog gašenja. Sledeći metod se sprovodi potapanjem živog kreča u komadima u vodu na nekoliko sekundi, odnosno dok ne započne gašenje, a zatim vađenje iz nje dok se ne ugasi i postane suvi hidrat, prosejan kako bi se uklonile grudvice ili ubačen u burad kako bi nakon odležavanja postao pasta. Ovakav kreč je mogao da se čuva za buduće upotrebe i uglavnom je korišćen za završne obrade. Treći način obuhvata spontano gašenje kreča na vazduhu, odnosno odlaganje živog kreča u prostor ispod nastrešnice sa strujanjem vazduha, koji tako upija vlagu iz vazduha, što može trajati i godinu dana (Raucort 1828 u Copsy 2019b: 9–10).

Inženjer Emilijan Josimović u odeljku svog udžbenika o kreču daje preporuke za sprovođenje svih faza njegovog nastanka. Tako nam donosi i detaljne opise tri načina gašenja živog kreča. Prema prvom od njih, koji naziva „najobičnijim”, odnosno onim kome većina daje prednost, jer je lakši za „dobro gašenje” i kod koga kreč ne gubi svojstva, živi kreč se pripremljen u drvenim sanducima sa otvorom za isticanje gašenog kreča u krečanu – rupu u zemlji ili ozidanu strukturu ako će duže stajati, polije dovoljnom količinom vode kako bi se sav rastvorio u „skrob”. Nakon isparavanja vode i njenog oticanja u zemlju, krečana se pokriva daskama i ostavlja dok kreč ne počne da puca, a zatim se zatrpa zemljom. Ovako pripremljen kreč može godinama odležavati, bivajući sve bolji, jer će mu se sve čestice ugasiti. Kod ovog načina Josimović skreće pažnju da bi kreč trebalo da bude pečen nedugo pre toga i da se odmah mora sipati dovoljna količina vode za gašenje, jer

će u suprotnom ostati neugašeno „zrnevlje”, a da ta količina iznosi od $\frac{3}{4}$ do $\frac{5}{6}$ mase kreča. Drugi način obuhvata potapanje korpi sa krečom u vodu na nekoliko sekundi, kako bi on uzeo tek toliko vode koliko mu treba da se raspadne u prah. Takođe, preporučuje lomljenje živog kreča u sitne komade kako bi se ovaj ujednačeno gasio, a zatim nakon potapanja u vodu i vađenja iz nje, njegovo stavljanje u zatvorene sanduke ili pokrivanje peskom, kako bi se što duže zadržala toplota potrebna za potpuno rastvaranje. Na kraju, kod trećeg načina, kreč se takođe drobi u manje komade, slaže u gomile, koje se postepeno prskaju malom količinom vode i svaka pokriva peskom za zadržavanje toplote, kako bi se pretvorio u prah (Юсимиовић 1860: 37–40).

U naučnoj i stručnoj zajednici koja se bavi ispitivanjem istorijskih maltera i pripremom njima kompatibilnih materijala, upotreba živog kreča kao veziva sve češće se postavlja kao izazov u konzervaciji. Na ovu temu se organizuju konferencije, demonstracije i radionice (Pesce *et al.* 2021: 2). Maltere pripremljene upotrebom živog kreča, kroz tzv. vruć postupak, uglavnom nazivamo *hot-mixed*, ali i *hot-lime* malterima. Definišemo ih kao mešavinu negašenog, upravo ugašenog kreča ili kreča koji je još uvek u procesu gašenja, i agregata, u cilju pripreme maltera za istovremenu ili kasniju upotrebu, gde je oslobađanje toplote tokom procesa zajednički parametar svih varijanti (Copsey 2019a: 48). Međutim, maltere pripremljene od živog kreča koji se nakon mešanja sa peskom i gašenja uz vlagu iz peska, i dodavanje vode, odmah upotrebljavaju istraživači izdvajaju u posebnu grupu pod imenom *hot applied mortars* (HAM), dok samo maltere koji se pripremaju uz upotrebu kreča i vlažnog peska te nakon spontanog gašenja od više nedelja, kasnije koriste, nazivaju *hot mixed mortars*, ističući prednosti onih prvih u vidu brzine vezivanja za podlogu, prijanjanja i čvrstoće na pritisak (Köberle *et al.* 2019: 614, 625). Istraživanja pokazuju i obrnuto – umanjenje rizika od pucanja usled postepenog gašenja, odnosno smanjenja ekspanzije zapremine i dr. kod maltera koji se koriste kasnije. Ovim malterima, neki autori daju i prednost u odnosu na one pripremljene od krečnog testa, jer iako sporije karbonatizuju, imaju veće čvrstoće i manju ukupnu poroznost od njih. Mana

ovih maltera je manja kontrola nad procesom gašenja i samo vreme gašenja (21–40 dana, kod hidrauličnog kreča) (Pavia *et al.* 2023: 13–14).

Napred navedene metode gašenja živog kreča mogu se generalno podeliti na one koje podrazumevaju *suvo gašenje* (uglavnom za pripremu maltera za malterisanje, kada se iz mešavine mogu izbaciti neugašene čestice, kao i velika zrna agregata) i *mokro gašenje*, a obe su kroz istoriju primenjivane u zavisnosti od planirane namene maltera (Copsey 2022: 202). Gašenje živog kreča uz vlažan pesak kako bi se prvo dobila suva mešavina (u procesu hidratacije), koja se zatim skladišti i polako sama gasi uz vlagu iz vazduha i peska, a koja se nakon gašenja može koristiti odmah uz dodavanje vode ili mnogo kasnije – predstavlja suvo gašenje. Gašenje uz upotrebu vode se naziva vlažno ili mokro gašenje, a tada se pesak i kreč mešaju *na suvo*, nakon čega se dodaje voda i gasi kreč, i zatim malter odmah koristi dok je vruć ili se pak skladišti za kasniju upotrebu. Kada je količina vode prevelika tokom mokrog gašenja, živi kreč prelazi u krečno testo, pa jedino uz upotrebu manje količine vode ovaj metod može proizvesti *hot-lime* maltere, mada se u teoriji jedino gašenje živog kreča sa peskom, odnosno suvo gašenje može povezati sa ovim malterima. Dodavanjem vode, temperatura mešavine opada, pa osim u slučaju da je kreč veoma reaktivan, malter možda neće postati vruć (Pavia *et al.* 2023: 2–3).

Neki istraživači ističu da je promocija upotrebe maltera sa živim krečom u konzervaciji zasnovana na njihovom velikom prisustvu kroz istoriju (Copsey 2019b; Copsey 2019d). Na to upućuju i savremena laboratorijska istraživanja istorijskih maltera za zidanje, ali i malterisanje (Midtgaard, Brajer, Taube 2020; Seymour *et al.* 2023). Već je napred dat prikaz krečnih grudvica u malteru za koje su istraživači uglavnom saglasni da potiču od upotrebe živog kreča prilikom pripreme maltera. S druge strane, istraživači ističu da njihov nedostatak u malteru ne znači da živi kreč nije upotrebljavan za njegovu pripremu. Grudvice mogu biti i izdvojene iz mešavine tokom pripreme samog maltera metodom suvog gašenja, pa tako neće biti prisutne u malteru iako je on nastao *hot-mix* metodom (Pavia *et al.* 2023: 9). Takođe, kod upotrebe već usitnjenog živog kreča,

odnosno kreča u prahu, ove grudvice se neće pojaviti (Copsey 2022: 202). Dokaz da je malter spravljan ovom metodom mora se tražiti u ispitivanjima mikrostrukture maltera, odnosno reakcija sa agregatom koje mogu biti podržane visokim temperaturama (Pavia *et al.* 2023: 9).

Isključiva upotreba ugašenog kreča koji je čuvan neko vreme često se u dosadašnjoj arhitektonskoj konzervaciji, posebno antičkih spomenika, zasnivala na tumačenju preporuka antičkih pisaca, odnosno Vitruvija i Plinija Starijeg. Istraživanje istorijskih tekstova na temu pripreme rimskih maltera ukazuje na to da preporuka upotrebe gašenog kreča koji je star tri godine u konzervatorske svrhe može biti loša interpretacija Plinija, odnosno da je ovo duže čuvanje kreča bilo povezano sa krečom koji se koristio za malterisanje, kako bi se krečne grudvice potpuno ugasile i rastvorile, s obzirom na to da naknadno gašenje grudvica u samom malteru dovodi do pucanja površine maltera u kome se nalaze. S druge strane, pretpostavlja se da je kod zidanja uglavnom bio upotrebljavan malter spravljan od kreča gašenog na licu mesta koji je odmah upotrebljavan ili je stajao kraće vreme (Copsey 2019b: 19–20, 80, 107–108). O upotrebi gašenog kreča za malterisanje koji je odležao piše i Plinije navodeći da je kreč boljeg kvaliteta što je stariji, kao i da „stari zakoni o pravilima koja moraju da se poštuju prilikom gradnje nalažu da nijedan preduzimač ne sme da koristi kreč koji ne bi bio star bar tri meseca, pa se zato premaz maltera na zidovima koje su podizali naši stari nije pucanjem ošteti” (Плиније Старији 2011: 36.55). Slično piše Vitruvije, kada za malterisanje kaže da je dobro „ako se grude najboljeg kreča gase duže vreme, pre nego što se kreč upotrebi”, kako bi se neugašene čestice ugasile. „Jer, kada kreč nije sasvim ugašen, nego se upotrebi i nabaci živ, a u sebi ima tvrdih grumenčića, stvara mehure. Ti grumenčići se na zgradi i dalje gase; to onda rastvara i ruši već poliran malter” (Vitruvije 1951: V.2). On piše da se kreč mora ugasiti za upotrebu u malteru, ali ne preporučuje eksplicitno i starenje krečnog testa (Oleson 2014: 16; Vitruvije 1051: II.5).

O Plinijeva *tri meseca* piše i renesansni arhitekta L. B. Alberti (Leon Battista Alberti, 1404–1472) u svom delu *De Re Aedificatoria* (*O umetnosti građenja*), navodeći da kreč treba da omekša u vodi pre nego što se umeša, a posebno kada se koristi za mal-

terisanje, kako bi se nedovoljno pečene grudvice rastvorile i ne bi nakon gašenja razvile mehurove na sloju maltera. Kreč se, kako piše Alberti, gasi postepeno, prskanjem vodom, ostavlja na vlažnom mestu u senci, prekriven peskom, sve dok ne postane testo, čime se povećava njegov kvalitet. Za kreč koji nije adekvatno ugašen piše da je sigurnije koristiti ga u temeljima nego na nekom drugom mestu, kao i u jezgru zida, pre nego na njegovim licima. Dalje, kreč koji se koristi za fina malterisanja, reljefe i slikarstvo, natapa se čistom vodom i ostavlja da omekša duže vreme u pokrivenom bazenu, a procenjuje se da mu je potrebno tri meseca kako bi dovoljno sazreo (Alberti 1988 u Copsey 2019b: 37–38).

Istraživači ističu da kompozicija maltera sa živim krečom na najbolji način vraća mikrostrukturu i funkciju onih istorijskih, ali i da to ne zavisi samo od sastava maltera, već i od načina pripreme (Wiggins 2018: 23). S druge strane, neki eksperimenti pripreme maltera nisu pokazali značajne razlike između čvrstoća koje malteri dobijaju upotrebom živog i gašenog kreča. Iako je osobina poroznosti bila na strani maltera sa živim krečom, nije bilo značajnih razlika između vrednosti savojne i pritisne čvrstoće, kao i adhezije za podlogu (u slučaju maltera pripremljenih od kreča i peska; kreča, peska i mlevene pečene opeke; kao i kreča, peska i metakaolina) upotrebom jednog ili drugog oblika kreča (Hetherington, Laycock 2020: 309–325). Stoga upotrebi maltera sa živim krečom istraživači ne daju uvek prednost u konzervaciji u odnosu na upotrebu krečnih maltera sa drugim vrstama i oblicima kreča, već se naglašava potreba istraživanja njihove moguće primene u svakom pojedinačnom slučaju, čime se podstiču dalja naučna istraživanja procesa koji se odvijaju u malterima i tako se pomaže njihovom jasnijem uvođenju u zidarsku praksu (Henry 2018: 30–33; Köberle *et al.* 2019: 625; Pesce *et al.* 2021: 15).

Upotrebom tehnologije izrade maltera sa živim krečom, dobijaju se međusobno različiti malteri, s obzirom na to da se proporcije komponenata teže kontrolišu, da ne postoji potpuna kontrola nad procesom gašenja i da malteri često sadrže različite vrste čestica kreča (Válek, Mataš 2013: 270). Međutim, upotreba ovog maltera ima prednosti na samom gradilištu. Kreč se može koristiti odmah nakon proizvodnje,

što podrazumeva kraći period njegovog skladištenja, a priprema maltera je brza (Válek, Mataš 2013: 270)). Ono što je važno, a prema zapisima iz savremene prakse, zidari prihvataju ove maltere, opisujući kao njihove prednosti, između ostalih – lakoću pripreme, obradivost, povećanu trajnost, mogućnost rada u hladnim periodima, kao i niže troškove (Copsey 2019a: 6; Hetherington, Laycock 2020: 309).

Složeni ili produžni malteri

Složeni ili produžni malteri se najčešće sastoje od dve vrste veziva, peska i vode. Kombinacije veziva obuhvataju kreč i cement ili, gips i kreč, u različitim odnosima (Tufegdžić 1979: 339). Produžni malteri od kreča i cementa se koriste za zidanje i malterisanje (spoljno i unutrašnje) u proporcijama cement : kreč : pesak = 1:1:5, 1:2:5, 1:1:6 i 1:2:6 (Muravljev 1995: 244).

U cilju dobijanja viših vrednosti mehaničkih čvrstoća i smanjivanja vremena vezivanja, krečnim malterima se dodaje cement, pa nastaju krečno-cementni malteri (Tufegdžić 1979: 339). Dodatak cementa povećava otpornost maltera na rastvorljive soli i povećava otpornost na mraz (Gulbe, Vitina, Setina 2017: 332). Kada je potrebna veća plastičnost i obradivost cementnih maltera, dodaje im se gašeni kreč, i nastaje cementno-krečni malter (Tufegdžić 1979: 339). Dodatak kreča cementnim malterima povećava obradivost, usporava vezivanje, ali i povećava potrebu za vodom maltera iste konzistencije, skoro proporcionalno sa količinom dodatog kreča, što povećava pucaње maltera. Na vreme vezivanja kod maltera sa krečom utiče količina dodate vode koja se gubi isušivanjem, dok voda koja ostaje u malteru utiče na brzinu karbonatizacije kreča. Dalje, za zadatau plastičnost, što se više kreča dodaje, to je potrebno i više peska, pa dolazi do negativnog uticaja na čvrstoću i obradivost (Johnson 1926: 241, 248, 250–251, 265).

Upotreba produžnih maltera od kreča sa malom količinom cementa, uz pažljivo formulisanje mešavina za dobijanje visoke propustljivosti, nižih čvrstoća i nižih modula elastičnosti, prihvatljiva je za konzervaciju istorijskih građevina nastalih bez upotrebe cementa, ali izloženih ekstremnim spoljnim uticajima, kada ovi malteri mogu imati prednost nad upotrebom

maltera sa hidrauličnim krečom (Pacheco-Torgal, Faria Jalali 2012: 490–491). Prema Komitetu TC LHS-277 iz RILEM klastera za zidane i drvene konstrukcije i kulturno nasleđe koji donosi specifikacije za testiranje i ocenu materijala na bazi kreča za sanaciju istorijskih struktura, produžni malteri za ovu upotrebu trebalo bi da imaju manje od 30 % cementa od mase veziva (Alvarez et al. 2021: 16).

Gipsno-krečni malter priprema se sa dodatkom kreča gipsnom malteru, koji ga čini ugrađivijim i obradivijim (Muravljov 1995: 244), ali mu umanjuje čvrstoće. Ovaj malter nije pogodan za spoljno malterisanje i zidanje zidova izloženih vlazi (Muravljov 1995: 245). Gips se ne meša sa cementom (Tufegdžić 1979: 339).

4.3 ISPITIVANJA SVEŽIH MALTERA

Ispitivanja svojstava konzervatorskih maltera se mogu podeliti na ispitivanja na svežem i na očvrslom malteru, čiji obimi ne zavise od vrste veziva. Međutim, od vrste veziva zavise način pripreme maltera za ispitivanje i uslovi njegovog negovanja do samog ispitivanja (Миличих 2014a: 75). U osnovne osobine malterskih smeša spadaju konzistencija (plastičnost), homogenost, čvrstoće na savijanje i pritisak, sposobnost zadržavanja vode, otpornost prema dejstvu mraza i adhezija (prianjanje) maltera za podlogu (Muravljov 1995: 234–239).

Priprema i ispitivanja maltera za konzervaciju će biti prikazani na primeru aktivnosti sprovedenih tokom projekta *MoDeCo2000*. Proces je zahtevao pažljiv izbor veziva, agregata, aditiva i primesa koji će se koristiti, uz poštovanje principa kompatibilnosti. Recepture pripremljenih modela maltera, odnosno odabir i količina njihovih sirovinskih komponenta bazirani su na rezultatima dobijenim nakon ispitivanja uzoraka istorijskih maltera, odnosno na upotrebi materijala čije je prisustvo utvrđeno tokom karakterizacije prikupljenih uzoraka; mogućnostima primene različitih tehnologija pripreme maltera; ali i uslovima kojima su danas izložene istorijske strukture čija će se konzervacija vršiti. Pre upotrebe u pripremi maltera, sve komponente prepoznate u istorijskim malterima su podvrgnute odgovarajućim ispitivanjima.

Komponente i priprema maltera tokom projekta MoDeCo2000

Nakon pregleda karakteristika uzoraka dunavskog agregata koji se danas eksploatiše duž Dunava, zaključeno je da se oni međusobno minimalno razlikuju, pa upotreba agregata potpuno lokalnog porekla (uz sam lokalitet sa koga malter potiče) nije smatrana neophodnom u pripremi malternih mešavina za specifične lokalitete (Miličić *et al.* u štampi). U procesu je stoga korišćen dunavski agregat poreklom iz oblasti između sela Zatonje i Golupca, u kojoj se nalazi uzorkovani lokalitet Kupe, ali i u čijoj se neposrednoj blizini nalaze druga nalazišta iz kojih su uzorkovani istorijski malteri, odnosno Lederata i Ramska tvrđava, nešto dalje uzvodno i Viminacijum, sa koga potiče najveći broj uzoraka, a nizvodno lokalitet Kastrum Nove (Čezava). Na ovom agregatu su izvršena standardna fizičko-mehanička ispitivanja i ispitivanje hemijskog sastava. Dunavski agregat za konzervatorske modele maltera je pripremljen u skladu sa veličinama zrna utvrđenim prilikom ispitivanja uzoraka istorijskih maltera, tako da su u modelima korišćene različite granulacije: 0–2 mm, 0–4 mm i 0–8 mm (Miličić *et al.* u štampi). Kao vezivo je korišćen kreč – negašeni kreč i gašeni kreč u obliku krečnog testa iz sela Mala Vrbica kod Kragujevca (**Slika 83** i **Slika 84**), čiji je krečnjak poreklom iz kamenoloma u selu Veliki Šenj. Pečenje je izvršeno tradicionalnim postupkom (u zidanim pećima sa drvetom kao gorivom) (**Slika 82**), a gašenje kreča poluindustrijskim postupkom (u električnim mikserima) u domaćinstvima sela Mala Vrbica. Na uzorku negašenog kreča urađeno je ispitivanje reaktivnosti, sadržaja neugasivih čestica i izdašnosti, dok je kod krečnog testa ispitan sadržaj slobodne vode, neugasivih čestica i postojanosti zapremine. Nije upotrebljavan prirodno hidraulični kreč, s obzirom na to da ispitivanja istorijskih maltera dunavskog limesa nisu dokazala njegovo namerno uvođenje u mešavine tokom njihove pripreme.

Odnosi komponenata u malterskim mešavinama varirani su sa istim ciljem – da se dobije optimalni sastav koji će obezbediti najbolju kompatibilnost sa istorijskim uzorkom. Za svaki tipičan odnos veziva i agregata određen nakon ispitiva-

nja istorijskih maltera napravljene su po dve ili tri mešavine komponenti, pri čemu je njihov odnos međusobno variran u malom procentu. Ukoliko je procenjeni zapreminski odnos vezivo–agregat u istorijskom malteru bio 40:60, u pripremljenim modelima je, s obzirom na to da je procena odnosa približna, a ne egzaktna vrednost, ovaj odnos variran, tako da se učešće agregata kretalo od 55 do 65 zapreminskih procenata u odnosu na odgovarajuću količinu veziva. U skladu sa tim, promena odnosa veziva i agregata dala je opseg učešća komponenti od 35:65 do 45:55. Na ovaj način je pokriven veći dijapazon odnosa, što je u skladu sa rezultatima mnogobrojnih ranijih ispitivanja koji pokazuju da uзорci maltera istih funkcija, uzeti iz iste građevine često pokazuju različite, ali veoma slične odnose veziva i agregata, što je očekivano i zavisno od pripreme maltera, kako je već napred pomenuto (Miličić *et al.* u štampi).

Za pripremu maltera korišćeni su i različiti materijali kao zamena ili dopuna dunavskom agregatu ili kao dodaci pucolanskih svojstava, i to u različitim granulacijama (**Slika 97**). Upotrebljene su drobljena i mlevena pečena opeka poreklom iz rimskog perioda sa arheološkog nalazišta Viminacijum (**Slika 92**; **Slika 98**), ali i iz domaće savremene poluindustrijske proizvodnje (različitih boja, sa temperaturom pečenja oko 900 °C) (**Slika 98**), s obzirom na to da se u budućoj konzervaciji ne može očekivati da će rimska opeka biti uvek dostupna za upotrebu u malterima i u dovoljnoj količini (Miličić *et al.* u štampi), kao i mlevena i drobljena prirodno pečena opeka – crvenka iz ležišta u selu Kostolac. Korišćen je i drobljeni škriljac iz ležišta u selima Ram i Zatonje (**Slika 99**), a u manjoj meri i drobljeni i mleveni krečnjak različitog porekla (iz Srbije), odabran kako bi uticao na željenu boju maltera.

Vršene su probe izrade mešavina i sa mehanički aktiviranim glinom iz sela Poljana kod Požarevca (**Slika 100**) i kaolinskom glinom iz sela Garaši kod Arandjelovca, ali i mlevenim zeolitskim tufom sa lokaliteta Igroš kod Brusa (**Slika 101**), koji spadaju u vrste prirodnih materijala sa pucolanskim svojstvima dostupnih u Srbiji. Upotreba uvoznog industrijski dobijenog metakaolina (iz Francuske; u Srbiji ne postoji proizvodnja ovog materijala) (**Slika 101**) izvršena je radi



Slika 97. Priprema tačno određene granulacije određenih komponenata modela konzervatorskih maltera

236

ispitivanja vrednosti čvrstoća koje tradicionalni malteri mogu dobiti uključivanjem ovog dodatka u mešavinu, s obzirom na već pomenuta iskustva istraživača koja ukazuju na povećan oprez prilikom korišćenja ovog dodatka, jer njegova upotreba dovodi do izuzetno visokih, nekada neželjenih vrednosti čvrstoća krečnih maltera.

Osnovni zadatak pomenutih dodataka bio je da masi maltera poboljšaju fizičko-mehanička svojstva, ubrzaju proces vezivanja, ali i daju neka druga svojstva, u koja spadaju i ona vizuelna, kompatibilna sa istorijskim malterima. Na primer, znamo da krupne čestice agregata utiču na ukupan izgled i teksturu, dok sitne utiču na boju. Dalje, na boju mal-



Slika 98. Viminacijumske opeke (gore) i opeke iz domaće poluindustrijske proizvodnje (dole) upotrebljavane kao drobljena ili mlevena sirovina tokom izrade konzervatorskih modela maltera u okviru projekta *MoDeCo2000*



Slika 99. Drobljeni škriljac različitih granulacija iz ležišta u selima Ram i Zatonje, Srbija



Slika 100. Glina nakon eksploatacije (levo) i mlevena glina (desno), selo Poljana kod Požarevca, Srbija



Slika 101. Mleveni zeolitski tuf, Igroš, Brus, Srbija (levo), i uvozni metakaolin (desno) tokom procesa pripreme modela konzervatorskih maltera

tera utiču sve komponente, a u cilju nijansiranja mogu se dodati i pigmenti (premda se upotreba zemljanih pigmenta ne preporučuje, jer mogu migrirati na površinu i dati neočekivanu boju) (Odgers, Henry 2012: 168). Tokom aktivnosti projekta *MoDeCo2000* pigmenti nisu korišćeni.

Na upotrebljenim dodacima su prethodno urađena ispitivanja veličine čestica i zapreminske mase. U cilju procene njihove reaktivnosti sa krečom, na uzorcima mlevene gline, metakaolina, kaolinske gline i crvenke urađeno je i ispitivanje pucolanske aktivnosti. Svi sirovinski materijali za pripremu konzervatorskih modela maltera su zadovoljili kriterijume propisane odgovarajućim standardima.

Količina vode potrebna za izradu maltera zavisi od vrste veziva, vrste i granulometrijskog sastava agregata, poroznosti i vlažnosti agregata i razmere mešanja (Tufegdžić 1979: 328). Ukoliko se kao vezivo koristi krečno testo, potrebno je biti obazriv sa dodavanjem vode, jer vrlo često ovaj kreč sadrži višak vode, pa praktično skoro da i ne zahteva dodatne količine vode prilikom pripreme maltera. Kod upotrebe živog – negašenog kreča, potrebna je pak dodatna količina vode neophodna za njegovo gašenje. Mešavine pripremane sa gašenim krečom u testu u laboratoriji tokom projekta *MoDeCo2000* nastajale su umešavanjem (ručno i mikserom) odmerene količine agregata i dodataka, bez dodavanja vode (**Slika 102**).

Mešavine sa živim krečom su u laboratoriji pripremane tako što su kreč i agregat sa svim ostalim dodacima međusobno mešani *na suvo*, a zatim im je polako, uz neprekidno mešanje, dodavana voda. U toku mešanja dolazilo je do intenzivnog gašenja kreča, što zbog egzotermne reakcije hidratacije dovodi do intenzivnog oslobađanja toplote i podizanja temperature maltera. Voda je, nakon gašenja, dodavana dok se ne dobije malter plastične konzistencije, pogodan za ugradnju u kalupe (**Slika 103**). Mešanje maltera je sprovedeno ručno, zidarskim alatima. Pripremljeni uzorci mešavina su ugrađivani u kalupe dimenzija 50 mm × 50 mm × 50 mm, i u pokrivenim kalupima negovani sedam dana na vazduhu i u standardnim laboratorijskim uslovima. Nakon toga su vađeni iz kalupa i negovani još 28 dana na vazdu-

239

hu u standardnim laboratorijskim uslovima, na rešetkastim nosačima, kako bi sa svih strana bili dostupni cirkulaciji vazduha. Nakon ovog perioda, podvrgnuti su proveri vizuelnog izgleda i boje te ispitivanju zapreminske mase i čvrstoće na pritisak. Određeni uzorci su prošli procese starenja u komorama za veštačko, ubrzano starenje sa simulacijama mogućih atmosferskih uslova.

Prilikom pripreme maltera za konzervaciju neophodno je uzeti u obzir sledeće osnovne osobine svežih maltera: konzistencija, uvučeni vazduh, zapreminska masa, vreme ugra-



Slika 102. Priprema modela krečnog maltera sa gašenim krečom u laboratoriji uz upotrebu miksera

240

divosti i sadržaj hlorida (Миличић 2014а: 75–77), i potrebno ih je ispitati nakon izrade mešavine, kako bi se utvrdila svojstva mešavine koja direktno utiču na njenu eventualnu primenu tokom konzervacije.



Slika 103. Priprema modela krečnog maltera sa živim krečom u laboratoriji uz ručno mešanje

Konzistencija (plastičnost)

Ispitivanje različitih vrsta svežih maltera, s obzirom na veoma heterogen sastav i veliki broj varijacija u vezivu, agregatu i odnosu veziva i agregata, nije moguće sprovesti pod identičnim uslovima. Kako bi se standardizovala metodologija ispitivanja maltera, usvojeno je da se sva svojstva ispituju na malteru određene konzistencije, pa je tako upravo konzistencija prvo svojstvo koje treba ispitati kod svežih maltera (Миличих 2014а: 75).

Konzistencija predstavlja meru fluidnosti i/ili vlažnosti svežeg maltera i pruža vrednost njegove deformabilnosti kada je podvrgnut nekoj vrsti naprezanja. Nije u neposrednoj vezi sa načinom na koji se svež malter ponaša kada se nanosi na podlogu u praktičnoj primeni u građevinarstvu (SRPS EN 1015-3: 2008). Takođe predstavlja stepen povezanosti komponentata u malteru i zavisi od vrste i količine veziva; vrste, količine i granulometrijskog sastava agregata; količine vode; prisustva aditiva; procesa pripreme maltera i dr., ali pre svega od vodovozivnog faktora, odnosno masenog odnosa veziva i vode (Muravljov 1995: 234).

Postoje dve standardne metode za proveru konzistencije maltera: rasprostiranje pomoću potresnog stola i penetracija klipa određenih dimenzija. Između vrednosti dobijenih ovim metodama, odnosno opsega rasprostiranja i dubine penetracije (mereno u skladu sa SRPS EN 1015-4: 2008), javlja se linearna korelacija kada je u pitanju ista vrsta maltera sa rastućim sadržajem vode, dok je nagib prave određene linearnom regresijom parametara različit za različite tipove maltera (SRPS EN 1015-3: 2008). Ispitivanje konzistencije na potresnom stolu najčešće je korišćena metoda. Podrazumeva utvrđivanje mere rasprostiranja maltera ispuštenog iz konusa definisanih dimenzija na ravnu ploču potresnog stola, koja se podiže i otpušta da pada slobodnim padom od 10 mm u pravilnim vremenskim intervalima (jedan potres u sekundi), sa ukupno 15 potresa (SRPS EN 1015-3: 2008) (**Slika 104**).

Konzistencija maltera utiče na njegovu obradivost i posledično na svojstva koja kasnije zadobija kada očvrstne. Prema konzistenciji, malter za zidanje može biti tečan,

242

plastično-tečan i plastičan. Plastičan malter bi trebalo da ima rasprostiranje manje od 140 mm, vrednosti plastično-tečnog maltera su između 140 mm i 200 mm, dok je rasprostiranje kod tečnih maltera veće od 200 mm (Muravljev 1995: 235; slično daje i standard SRPS EN 1015-6: 2008/A1: 2008, koji analožno deli maltere od „krutih“, preko „plastičnih“, do „mekih, a sa istim navedenim vrednostima). Kod višeslojnih maltera za malterisanje svaki sloj bi trebalo da ima određenu konzistenciju (Muravljev 1995: 234–235). Malter za zidanje najčešće treba pripremiti tako da rasprostiranje na potresnom stolu bude u opsegu od 150 mm do 160 mm. Za malterisanje je poželjno da ta vrednost bude oko 180 mm, dok je za injektiranje ili zalivanje pukotina potrebno da rasprostiranje bude preko 200 mm, pa čak i preko 250 mm, u zavisnosti od širine pukotina i dubine do koje malter treba da penetrira.

Količina vode koja se koristi u laboratoriji za spravljanje standardnog maltera drugačija je od one koja se primenju-



Slika 104. Ispitivanje konzistencije svežeg maltera na potresnom stolu

je prilikom rada na gradilištu, jer bi se sa „laboratorijskom“ količinom vode dobio „suviše suv“ malter, koji ne bi bilo lako ugraditi (Tufegdžić 1979: 328). Reči Emilijana Josimovića na jednostavan način nam opisuju potrebu maltera za vodom, jer nikada ne smemo dodati više vode nego „što pri sušenju maltera može u paru opet otići, i što kamen ili cigla može usisati“. Kako on piše, količina vode se ne može „cifrom opredeliti“, već je važno da „sa mistrije ne kaplje, nego u jednome komadu pada“ (Юсимовић 1860: 43–44).

Izdašnost maltera se računa kao odnos zapremine svežeg maltera i zapremine upotrebljenog agregata. Zависи od vrste veziva, svojstava agregata i količine vode. Što je veća količina vode, bez izmene odnosa vezivo–agregat, kao i sa porastom ovog odnosa (više veziva), a bez izmene količine vode, to je veća izdašnost maltera (Tufegdžić 1979: 322–323). Uglavnom su izdašniji malteri ujedno i lakše obradivi. Na samu obradivost utiče i priroda komponenata, pa tako pesak i šljunak imaju zaobljenije klaste od drobljenog kamena, što utiče na bolju obradivost svežeg maltera (Balksten 2007: 15 i Saretok 1957 u Balksten 2007: 15).

Ispitivanje konzistencije je izuzetno značajno kod maltera za injektiranje – maltera za popunjavanje šupljina, ojačanja zidova ili konsolidovanja površina (Pachta *et al.* 2019: 1215), jer će pravilno odabrana konzistencija osim dobre penetracije omogućiti da sve šupljine budu popunjene. Ovo je posebno važno kada je prostor koji se ispunjava ovim malterom vizuelno nedostupan (Armada Brás 2011: 3). Malteri za injektiranje (eng. *grouts*) koriste se za stabilizaciju i konsolidaciju zidova velikih debljina, ukoliko postojeće šupljine statički ugrožavaju strukturu ili dozvoljavaju ulazak vode. Položaj ozbiljnih pukotina za injektiranje se može proveriti nedestruktivnim tehnikama snimanja zidova (**Slika 105**), a nekada se može dozvoliti i uklanjanje manjeg dela lica zida kako bi se izvršile provere odnosno procenila zapremina šupljina. Drugi način provere je uvođenje vode crevima kroz rupe izbušene u spojnicama i beleženje mesta curenja. Iste rupe se mogu koristiti kasnije za injektiranje maltera, a koji se upumpava i kroz dodatne rupe kod kojih je zabeleženo curenje vode. Međutim, uvođenje vode ima i negativne efekte, a to je da voda može pokrenuti kretanje



Slika 105. Ispitivanje istorijskih struktura nedestruktivnim metodama (georadar)

rastvorljivih soli unutar zida ka površini i oštetiti maltere za malterisanje i dekoraciju (Odgers, Henry 2012: 158).

Malteri za injektiranje se pripremaju od jednog ili više veziva dispergovanih u adekvatnom medijumu, mogu imati agregat i/ili punilac i primese, a osim navedenih i nekih od dalje prikazanih karakteristika svežih i očvrsljih maltera, važno je ispitati i stalnost njihove zapremine (Papayianni *et al.* 2023: 2, 11–15). Odnos vode i čvrstog materijala bi trebalo da bude što manji, odnosno 1:3 ili 1:4, kako bi se smanjilo skupljanje tokom vezivanja. Tom prilikom masa može izgubiti i do 40 % od prvobitne zapremine. Upumpavanje se vrši pod niskim pritiskom kako se ne bi oštetila unutrašnja struktura (Odgers, Henry 2012: 158–159).

Homogenost

Homogenost maltera predstavlja jednakost konzistencije i boje po celoj masi smeše i veoma je važna za maltere za malterisanje (Muravljev 1995: 236). Ispitivanje homogenosti se vrši tako što se kalup sa malterskim smešama, koji se sastoji od dva prstena, vibrira, nakon čega se ispituje njihova konzistencija prema standardima (SRPS EN 1015-3: 2008; SRPS EN 1015-4: 2008). Malter se smatra homogenim ako odnos ove dve vrednosti nije veći od 1,2 (Muravljev 1995: 236). Pri laboratorijskim ispitivanjima homogenost maltera se postiže relativno lako. Međutim, prilikom izvođenja u građevini treba voditi računa o tome da se tradicionalnim umešavanjem sastav maltera dobro homogenizuje, a da se pri tome ne dodaje dodatna voda zarad olakšavanja homogenizacije.

Uvučeni vazduh

Sadržaj uvučenog vazduha se određuje prema standardu (SRPS EN 1015-7: 2008), pomoću porozimetra ili upotrebom alkohola. Pripremljenim malterom definisane konzistencije se ispuni posuda aparata, koja se kratko protrese da bi se istisnule velike vazdušne pore zarobljenog vazduha koje ne predstavljaju realno aeriranje maltera. Na gornju površinu maltera se sipa voda, i primenom vazdušnog pritiska (prva metoda) ili rastvora alkohola i vode (druga metoda), voda ulazi u malter tako istiskujući vazdušne pore iz njega. Pad nivoa vode odražava zapreminu uvučenog vazduha. Kod prve metode (primenjuje se za maltere kod kojih je propisan sadržaj vazduha manji od 20 %) u posudu sa nabijenim slojevima maltera voda se ubacuje iznad same površine maltera, a istiskuje se vazduh. Zatim se upumpava vazduh u posudu do stabilnog pritiska i otvara prolaz ka posudi. Nakon dostizanja ravnoteže očitava se rezultat sadržaja vazduha. Kod metode sa upotrebom rastvora etil-alkohola i vode (primenjuje se za maltere kod kojih je propisan sadržaj vazduha jednak ili veći od 20 %), malter se sipa u posudu pazeći da se izbegnu šupljine, a zatim se dodaje rastvor etil-alkohola i vode. Zatvorena posuda se nakon toga 20 puta okrene kako bi se malter kompletno umešao sa rast-

vorom, zatim se pusti da se mešavina maltera i rastvora slegne, i nakon 5 minuta se očitava nivo maltera u posudi. Sadržaj uvučenog vazduha se računa na osnovu formule koja uključuje razlike u vrednosti nivoa maltera pre i posle procesa (razlike zapremine). Prilikom obe metode nivo tečnosti opada, a pad je direktno proporcionalan zapremini istisnutog vazduha iz maltera. Sadržaj se očitava direktno sa aparata, odnosno posude, i izražava u % u odnosu na masu maltera.

Parametar uvučenog vazduha utiče na obradivost svežeg maltera. Količina vazduha je značajna za njegovo ponašanje prilikom nabacivanja na zid kod malterisanja. Direktno je proporcionalna zadržavanju maltera na zidu, čime utiče na smanjenje gubitka. Količina vazduha direktno utiče na otpornost maltera prema mrazu, pri čemu veća količina vazduha umanjuje njegova mehanička svojstva (Миличић 2014a: 76).

Sadržaj hlorida (soli rastvornih u vodi)

Sadržaj hlorida rastvornih u vodi u malterima može se odrediti direktno iz maltera (SRPS EN 1015-17: 2008) ili proračunom na osnovu maksimalnog sadržaja Cl u sastavnim komponentama (prisutan u standardu za taj materijal ili u proizvođačkoj klasifikaciji, ili dobijen kroz analize, a prema standardu SRPS EN 206-1: 2021).

Kod direktnog određivanja, malter za ispitivanje, nakon sušenja na temperaturi od 105 (± 5) °C do konstantne mase, mora biti sprашen, sa veličinom zrna do 0,125 mm. Uzorak se stavlja u polietilensku bocu, dodaje mu se destilovana ili dejonizovana voda, a zatim se zatvorena boca trese 60 min, uz 60 obrtaja u minutu, rotacionom ili magnetnom mešalicom. Boca se čuva od 15 h do 24 h, a zatim se filtrira rastvoreni uzorak i skuplja filtrat u borosilikatnu staklenu menzuru. Filtrat se acidifikuje i zagreva do ključanja. Ključalom rastvoru se dodaje rastvor srebro-nitrata, indikatora, i vrši titracija amonijum-tiocijanatom, proverava se boja rastvora, sve dok se ne dobije bleđa crvenobraonkasta boja, koja se zadržava i nakon mućkanja. Beleži se zapremina rastvora amonijum-tiocijanata. Ista procedura se ponavlja bez uzorka maltera, kao „slepa

proba" (*blank*). Upotrebom dobijenih podataka proračunava se procenat Cl (SRPS EN 1015-17: 2008).

Sadržaj hlorida u malteru se po standardu (SRPS EN 998-2: 2017) ograničava na 0,10 % suve mase maltera. Povećane koncentracije hlorida u malteru utiču na koroziju gvožđa i čelika u slučaju da je on u kontaktu sa ovim materijalima (Миличић 2014: 76). Soli se u krečni malter mogu uneti kroz vezivo, agregat ili dodatke, među kojima su cement, opeka i vulkanski materijali (Kraus, Droll 2005: 207). Međutim, kreč i agregati uglavnom sadrže male količine hlorida, pa samim tim je njihova količina mala i u većini krečnih maltera.

Zapreminska masa

Zapreminska masa svežeg maltera predstavlja odnos mase i zapremine maltera unetog u posudu poznate zapremine, a izražava se u kg/m^3 . Punjenje posude i dostizanje kompaktnosti maltera može se izvršiti na tri načina, u zavisnosti od konzistencije maltera. Jedan od njih (primenjen na plastične i plastično-tečne maltere) jeste vibriranje posude ispunjene malterom dok se ne završi vidljivo sleganje mešavine, uz njeno dodavanje tokom procesa kako bi joj nivo uvek bio u nivou sa samim vrhom posude. Nakon ovoga, meri se masa posude sa malterom, a zatim izračunava zapreminska masa svežeg maltera kroz količnik razlike mase ispunjene posude i prazne posude, te zapremine same posude. Vrše se dva merenja i usvaja srednja vrednost (SRPS EN 1015-6: 2008/A1: 2008).

Zapreminska masa svežeg maltera zavisi od vrste agregata i količine uvučenog vazduha i važan je parametar kod proračuna potrošnje maltera za malterisanje na nekoj površini. S obzirom na to da je potrebno imati samu jednu posudu proverene zapremine i vagu, jednostavne provere se mogu vršiti i na licu mesta tokom građenja (Миличић 2014a: 75).

Vreme ugradivosti

Vreme ugradivosti svežeg maltera opšte namene predstavlja vreme u minutima za koje on postiže definisanu granicu otpora penetraciji standardnog valjka koji se utiskuje u njega

tokom ispitivanja. Kalupi se pune pripremljenim malterom, i skladište u komori na temperaturi od $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti ne manjoj od 95 % u zaptivenoj plastičnoj kesi. U određenim vremenskim intervalima u mešavinu se utiskuje valjak do dužine od 25 mm, tj. do mesta promene prečnika valjka (od $6,175 (\pm 0,025)$ mm do 5 mm). Očitava se mera na aparatu data u kg, i iz te vrednosti se izračunava otpor penetracije a izražava se u N/mm^2 . Određuje se vreme u minutima od pripreme maltera do trenutka kada mešavina pruža otpor penetraciji od $0,5 \text{ N}/\text{mm}^2$. Vreme ugradivosti je srednja vrednost vremena dobijenih na osnovu ispitivanja više mešavina iz kalupa maltera koji se ispituje (SRPS EN 1015-9: 2008).

Poželjno je da vreme ugradivosti svežeg maltera ne bude kraće od 180 minuta, kako bi bilo dovoljno vremena da se ugradi cela količina zamešanog maltera. Duže vreme za ugradnju se može obezbediti upotrebom retardera. Međutim, vreme obradivosti krečnog maltera na bazi vazdušnog kreča uglavnom je duže od 180 minuta.

4.4 ISPITIVANJA OČVRSLIH MALTERA

Osnovne osobine očvrslih maltera koje je neophodno uzeti u obzir u procesu ispitivanja predviđenih modela maltera za konzervaciju jesu čvrstoća pri pritisku i savijanju, adhezija za podlogu, paropropusnost, apsorpcija vode (kapilarno upijanje vode) i toplotna provodljivost (Миличић 2014a: 75–77).

Negovanje uzoraka maltera do termina ispitivanja definisano je pre svega vrstom veziva i propisano standardima (SRPS EN 1015-11: 2019). U procesu optimizacije maltera, za konkretnu građevinu se može odstupiti od navedenih uslova negovanja, kako bi se obezbedili uslovi što približniji onim realnim, pa se malter može izlagati i različitim spoljašnjim uticajima pre ispitivanja.

U cilju ispunjavanja uslova estetske kompatibilnosti istorijskog uzorka i konzervatorskog modela maltera potrebno je izvršiti poređenje boje. Kao što se boja istorijskog maltera beleži na preseku uzorka, i dobijenu boju novog maltera je važno oceniti na preseku njegovog modela (uglavnom nakon ispitivanja čvrstoće modela na pritisak), budući da je ravna

površina modela novog maltera uvek svetlija od samog preseka (površina je u boji veziva) (**Slika 106**).



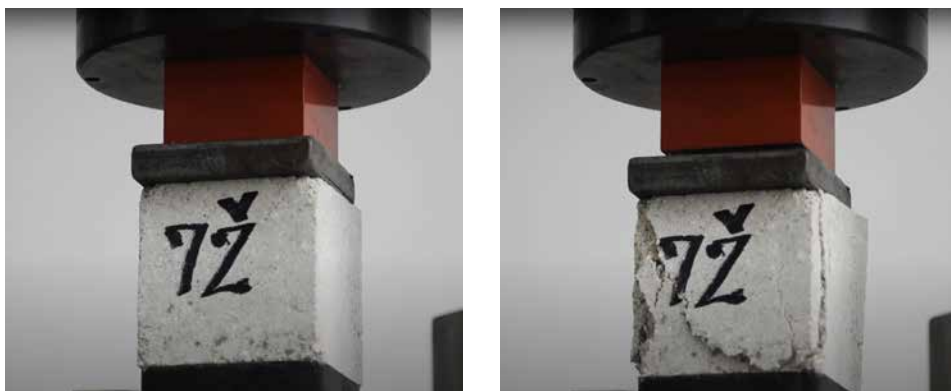
Slika 106. Model maltera nakon ispitivanja čvrstoće na pritisak – vidljiva razlika u boji svežeg preseka i glatke površine

Čvrstoće pri pritisku i savijanju

Čvrstoće maltera pri savijanju i pritisku po standardu bi trebalo da se ispituju na opitnim telima oblika prizme dimenzija 160 mm × 40 mm × 40 mm. Za ispitivanje se pripremaju tri prizme. Nakon ispitivanja čvrstoće prilikom savijanja, na dobijenih šest polovina prizmi ispituje se čvrstoća pri pritisku (SRPS EN 1015-11: 2019; SRPS EN 998-2: 2017). Mogu se pripremiti i kocke ivice 50 mm za samostalno ispitivanje očvrsljih maltera na pritisak (**Slika 107**).

Standardne čvrstoće pri pritisku i savijanju se ispituju kod maltera starosti od 28 dana, nakon boravka u uslovima temperature i vlažnosti određenim prirodom veziva (SRPS EN 1015-11: 2019). One se u zavisnosti od potreba mogu ispitivati i u kraćim i dužim vremenskim intervalima, odnosno, na 1, 2, 3, 7, 56, 90, 180 i 360 dana. Treba uzeti u obzir da je krečnim malterima potrebno znatno duže vreme za postizanje konačne čvrstoće, pa je zato poželjno ispitivati njihovu čvrstoću i nakon 90 dana. Čvrstoća pri pritisku maltera određuje i njegovu klasu, koja se obeležava slovom M i brojem koji predstavlja najnižu

čvrstoću koju malter sme da ima nakon 28 dana. Izražava se u N/mm^2 ili MPa (SRPS EN 998-2: 2017).



Slika 107. Ispitivanje čvrstoće čvrstog modela konzervatorskog maltera na pritisak

Inicijalna čvrstoća pri smicanju strukture sačinjene od elemenata za zidanje i maltera takođe se može ispitivati u svrhu dobijanja podataka o svojstvima strukture koje neki malter gradi, a ne samo o svojstvima samog maltera, i to prema standardu (SRPS EN 1052-3: 2010). Ovo svojstvo neke strukture zavisi od maltera, elemenata za zidanje i majstorskog rada. Pre ispitivanja je potrebno znati čvrstoće na pritisak samih elemenata za zidanje (SRPS EN 772-1: 2016). Struktura se zida sa malternim spojnica debljine od 8 mm do 15 mm ili od 1 mm do 3 mm, u zavisnosti od buduće potrebe. Struktura se mora nivelisati, a višak maltera skinuti mistrijom. Odmah nakon zidanja uniformno se nanosi pretkompresija strukture, nakon čega se uzorci neguju i čuvaju do testiranja. Ako malter nije na bazi kreča, mora se sprečiti isušivanje maltera tokom negovanja, zaštitom plastičnom folijom. Nakon 28 (± 1) dana, osim ako nije drugačije predviđeno za maltere na bazi kreča, struktura se testira na pritisak, kao i sam malter (SRPS EN 1015-11: 2019). Radi se ispitivanje na više uzoraka. Osim proračuna čvrstoće na smicanje, beleži se i tip loma koji može biti: na mestu veze elementa za zidanje i maltera, na samoj površini jednog elementa, ili površinama oba elementa lomom po širini spojnice; u malteru po dužini spojnice; na samom elementu; ili kroz celu strukturu.

Čvrstoća istorijskih maltera na pritisak je značajna kod njihove karakterizacije, ali su (prema Henry, Stewart 2011: 130) čvrstoća na savijanje i plastičnost maltera mnogo važniji za njegovu trajnost, pa i pripremu konzervatorskih maltera. Retko je potrebno dostići visoku čvrstoću na pritisak kod konzervatorskih maltera, a ona ne bi trebalo da premaši vrednosti čvrstoće samih istorijskih maltera. Niža čvrstoća maltera znači veću elastičnost, što omogućava malteru da primi pritiske usled termičkih širenja i skupljanja različitih elemenata u strukturi, pa se frakture javljaju po linijama malternih spojnica. U slučaju kada koristimo malter koji je izuzetno čvrst, ove frakture će se javiti i na okolnom kamenu i opeci (Henry, Stewart 2011: 130).

Čvrstoća prijanjanja – adhezija za podlogu

Čvrstoća prijanjanja maltera za podlogu predstavlja jedan od kriterijuma za merenje kompatibilnosti maltera sa podlogom (Klisińska-Kopacz, Tišlova 2013: 566). Adhezija svežeg maltera za podlogu zavisi od samog maltera (vrsta maltera, konzistencija) i podloge (vrsta podloge, hrapavost, poroznost, vlažnost), kao i od nanošenja maltera (Muravljov 1995, 238; Tufegdžić 1979: 81). Takođe, za istu vrstu maltera desiće se različita adhezija u zavisnosti od razmere mešavine, vrste i veličine zrna agregata. Takođe, kod nanošenja maltera na kamen nije dovoljno samo da malter bude dovoljno plastičan kako bi bila adekvatna adhezija, već je potrebno i da kamen bude vlažan, što dalje nije dovoljno ako je sam malter suv. Kod nanošenja na porozne materijale, tj. one koji upijaju vodu, upravo je konzistencija značajna (Tufegdžić 1979: 81). Kod vrsta kamena koje malo upijaju vodu stvaraju se slabe veze sa malterom, pa je potrebno mehanički ohrapaviti površine kamena kako bi se veza ostvarila, što je posebno važno kod malterisanja i fugovanja (Henry, Stewart 2011: 136). Tradicionalno je graditeljima bilo poznato da „prilepljivost“ maltera za „različita tela“ zavisi od prirodnih svojstava ovih tela, njihovog „hemičnog srodstva“ sa krečom i drugim komponentama maltera“ i stanja njihove površine. Iskustveno je zaključeno da se krečni malter najbolje lepi za ciglu, a najgore za drvo, te

što se tiče kamena najbolju vezu pravi sa krečnim kamenom i „pritom opet sa onima njegovoga roda bolje, koji su šupljikaviji i krupnijeg zrna” (Юсимовић 1860: 48).

Metoda ispitivanja adhezije maltera nakon očvršćavanja prema standardu (SRPS EN 1015-12: 2016) već je opisana ranije u odeljku posvećenom ispitivanju adhezije istorijskih maltera (2.4 Fizička i mehanička svojstva maltera, *Čvrstoća prijanjanja – adhezija za podlogu*). Adhezija maltera je zavisna i od spoljašnje sredine, koja može uticati na neravnomernost širenja maltera i podloge (Tufegdžić 1979: 81). Kod maltera koji se pripremaju za konzervaciju, tokom praćenja njihovog starenja, ova metoda može biti kombinovana sa ispitivanjima drugih karakteristika maltera, odnosno otpornosti prema mrazu, kroz cikluse smrzavanja i odmrzavanja ili zagrevanja i kvašenja, kako bi se kompatibilnost elemenata za zidanje i maltera, kao i sama trajnost maltera, proverile na različite uticaje koji će postojati u budućem životu strukture (SRPS EN 1015-21).

Propustljivost vodene pare

Paropropustljivost maltera se određuje na očvrslom malteru prema standardu (SRPS EN 1015-19: 2008). Uzorak maltera, pripremljen kao cilindar, nakon perioda očvršćavanja u propisanim laboratorijskim uslovima (28 dana podeljenih u dva perioda, dužine zavisne od vrste maltera koji se ispituje), postavlja se u posudu istog prečnika sa zasićenim rastvorom neke soli, kao granica između dve zone sa različitim pritiscima vodene pare. Stopa transfera vlage se određuje iz promene mase posude koja je čuvana u standardnim uslovima (SRPS EN 1015-19: 2008; Миличић 2014: 77). Pritisци se u posudi održavaju konstantnim zahvaljujući jednoj osobini nekih zasićenih rastvora, odnosno tome da je iznad njihove površine parcijalni pritisak pare konstantan (Миличић 2014: 77). Tako, na primer, na 20 °C iznad površine zasićenog rastvora kalijum-nitrata (KNO_3), relativna vlažnost iznosi 93,2 %, a iznad površine zasićenog rastvora litijum-hlorida (LiCl) 12,4 %. Zato se upravo zasićeni rastvor kalijum-nitrata koristi za određivanje gornje granice, dok se zasićeni rastvor

litijum-hlorida koristi za određivanje donje granice paropropustljivosti (SRPS EN 1015-19: 2008).

Paropropustljivost, osim od vrste maltera i njegove poroznosti, zavisi od debljine i površine maltera kroz koju dolazi do difuzije, odnosno može se izraziti preko koeficijenta otpora difuziji vodene pare čija vrednost za krečne maltere iznosi do 6. Pored ovog koeficijenta, za definisanu debljinu sloja maltera u okviru građevine vrlo često se obračunava i debljina vazdušnog sloja izražena u metrima, koja stvara isti otpor difuziji vodene pare kao predmetna debljina maltera. Malter sa nižom vrednosti koeficijenta μ i nižom vrednosti S_d je paropropustljiviji (Миличић 2014: 77). Veća paropropustljivost maltera znači brže propuštanje vodene pare i manje stvaranje kondenza na zidnim površinama, što je poznato kao svojstvo zidova *da lakše dišu*.

Kapilarno upijanje vode

Koeficijent apsorpcije vode usled kapilarnog upijanja se prema standardu (SRPS EN 1015-18:2008) meri na prethodno pripremljenim i negovanim prizmama (tri prizme), pod propisanim uslovima na atmosferskom pritisku, u periodu od dva do pet dana u kalupima, i od 23 do 26 dana nakon vađenja iz kalupa, u zavisnosti od vrste maltera. Malteri sa vazdušnim krečom se neguju pet dana u kalupu, i još 23 dana van njega, dok se malteri sa hidrauličnim vezivima neguju dva dana u kalupu i 26 dana van njega. Nakon toga se lome sve tri prizme na polovine. Posle sušenja do konstantne mase u ventilisanoj pećnici, slomljenom stranom se uroni prvi uzorak u vodu do dubine od 5 mm do 10 mm i vadi za 10 minuta, nakon toga briše suvom krpom ili filter-papirom da se pokupi višak vode na površini koja je bila uronjena u vodu (vodeći računa da se to obavi u što kraćem vremenskom intervalu), a zatim se meri. Ista procedura se ponavlja za drugi uzorak nakon 90 minuta. Ova dva uzorka predstavljaju test-uzorke za maltere koji nisu za sanaciju. Za maltere za sanaciju se ispituje treća prizma. Prilikom testiranja njene dve polovine, uzorak se drži u vodi 24 h, zatim meri, nakon čega se obe polovine dele po dužini i meri se dubina penetracije vode u njima. Vrednost

koeficijenta kapilarnog upijanja vode je proporcionalna brzini upijanja vode i površini preko koje se voda upija i izražava se u $\text{kg}/(\text{m}^2/\text{min}^{0.5})$ za maltere za renoviranje, odnosno kg/m^2 za ostale maltere (SRPS EN 1015-18: 2008). Poželjno je da koeficijent apsorpcije vode bude što niži.

Toplotna provodljivost

Toplotna provodljivost maltera se određuje aparaturom sa pločama između kojih se postavlja uzorak kondicioniran do konstantne mase pre samog testa (SRPS EN 12667: 2008) upotrebom posebne aparature. Ovo svojstvo se zasniva na propuštanju stacionarnog toplotnog protoka usled razlika među temperaturama dveju graničnih površina (Muravljov 1995: 36). Izražava se preko koeficijenta toplotne provodljivosti (λ), koji predstavlja meru brzine kojom se toplota prostire kroz neki materijal u specifičnim uslovima, odnosno količinu toplote koja se kroz sloj nekog materijala debljine 1 m prenese u toku 1 h, preko površine od 1 m^2 , a pri razlici temperature od 1 K. Koeficijent toplotne provodljivosti maltera je direktno proporcionalan njegovoj zapreminskoj masi (Миличић 2014: 77). Malteri nižeg koeficijenta toplotne provodljivosti imaju bolja termoizolaciona svojstva.

U tablicama su dati približni koeficijenti toplotne provodljivosti različitih materijala, pa i više vrsta maltera. Cementni malter ima koeficijent $1,40 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, zatim sledi produžni malter sa vrednošću koeficijenta od $0,87 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, i krečni malter sa koeficijentom $0,85 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ (Muravljov 1995: 37).

4.5 TRAJNOST I STARENJE MALTERA

Malteri za konzervaciju se pripremaju za različite intervencije na istorijskim strukturama, a u sklopu obezbeđenja trajnosti građevina koje mogu biti već narušene konstrukcije usled protoka vremena, prethodnih neadekvatnih intervencija ili iznenadne nepogode i oštećenja, kao i u sklopu redovnog održavanja. Propadanje kao hemijska ili fizička modifikacija svojstava materijala, degradacija u vidu opadanja kvaliteta i gubljenja funkcije, deterioracija u vidu pogoršanja svih tipova

vrednosti, i na kraju svaka vrsta alteracije, odnosno izmene materijala (Anson Cartwright *et al.* 2008: 8), bez obzira na to da li je ona pozitivna ili negativna, namerna ili ne (SRPS EN 15898: 2020), predstavlja neizbežan proces. Zato je veoma važno pratiti stanje svih ugrađenih materijala jedne istorijske građevine, i utvrditi uticaje, odnosno spoljne ili unutrašnje faktore, koji ovaj proces eventualno ubrzavaju, a zatim i planirati načine njihove zaštite i održavanja kako bi se negativni procesi što više umanjili.

Malter koji propada direktno utiče na oštećenja same strukture u kojoj se nalazi, a nestabilnost strukture dalje utiče povratno i na maltere. Karakteristični strukturni problemi nastaju usled sleganja temelja, termičkih pomeranja (različito skupljanje i širenje materijala) i šupljina unutar zida (loše konsolidovan materijal koji s vremenom ispira usled ulaska kišnice kroz različite pukotine ili preko gornje otkrivene površine urušenog zida) (Henry, Stewart 2011: 139–140).

Trajnost istorijskog maltera zavisi od njegovih osobina, odnosno komponenata, načina pripreme i primene, kao i spoljnih faktora, ljudskih ili prirodnih. Kako bi pripremili i primenili adekvatan i trajan malter za konzervaciju, osim ispunjavanja kompatibilnosti sa istorijskim malterom, trebalo bi da budu ispunjeni i drugi zahtevi. Ovde spadaju napred pomenuti ostali tehnički zahtevi ispunjavanja tehničke kompatibilnosti. Malter bi trebalo da poseduje nizak nivo rastvorljivih soli ili nečistoća kako bi se izbegla eflorescencija i šteta usled kristalizacije; da ima prihvatljivu otpornost prema ciklusima mržnjenja i odmrzavanja i kiši; da mu je obradivost prilagođena planiranoj nameni; da očvršćava u adekvatnim uslovima (zavisno od vrste veziva) uz brigu o pojavi pukotina ili dugoročnih deformacija; da bude adekvatno pripremljen i kompaktna (što poboljšava čvrstoću, vezu sa podlogom, kao i homogenost, a posledično trajnost); i da postoji sistem kontrole kvaliteta koji podrazumeva procenu komponenti, procesa izrade i primene na licu mesta, kao i monitoring nakon toga (van Balen *et al.* 2005: 784–785).

Odabir adekvatnih komponenata za konzervatorske maltere izuzetno je važan i ne zavisi samo od karakterizacije istorijskih maltera za koje se pripremaju, već i od same prirode komponenata koje planiramo da koristimo, njihovih međusobnih odnosa i uslova u kojima će biti primenjeni i u kojima će zajedno živeti. Loša specifikacija mešavine i upotreba neadekvatnih materijala, ali i loš majstorski rad (pregled sirovina, priprema podloge i maltera, količina vode, primena maltera, obrada površina, zaštita nakon primene i nega) spadaju u razloge smanjene trajnosti maltera. Dalje, nebriga tokom korišćenja same građevine (npr. veliki broj posetilaca uzrokuje habanje podnih površina, povećanje vlažnosti vazduha), kao i elementarne nepogode (poplave, požari), mogu imati izuzetne posledice po trajnost istorijskih materijala, pa i samih maltera (Henry, Stewart 2011: 154–161).

Tokom realizacije projekta *MoDeCo2000* pripremljeno je i ispitano više desetina modela mineralnih mešavina u okviru laboratorija. Najveći broj mešavina maltera za konzervaciju pripremljen je samo na bazi vazdušnog kreča i agregata u različitim odnosima, kao i sa različitim granulacijama agregata. Za ovakve maltere karakteristična su niža mehanička svojstva, slaba otpornost na atmosferske uticaje, pre svega smrzavanje i odmrzavanje, visoko upijanje vode, ali dobra kompatibilnost sa starim malterima, pa je njihova upotreba pogodna u istorijskim građevinama zaštićenim od spoljašnjih uticaja. Međutim, ispitivanja istorijskih maltera sa većeg broja lokaliteta ukazala su na potrebu pripreme maltera poboljšanih mehaničkih svojstava i veće otpornosti, s obzirom na njihovu današnju izloženost spoljašnjim uticajima. Zbog toga je pripremljen i određen broj prethodno pomenutih mešavina kojima je pored kreča i rečnog peska dodata izvesna količina drobljene ili mlevene pečene opeke, zeolitskog tufa, različitih vrsta drobljenog kamena, kao i mehanički aktivirane lokalne opekarske gline i kaolinske gline (u cilju dobijanja mikrometarskih čestica). Dobijeni su malteri kod kojih su se vrednosti čvrstoće pri pritisku nakon 35 dana kretale u širokom rasponu od $0,5 \text{ N/mm}^2$ (MPa) do $8,7 \text{ N/mm}^2$ (MPa), a upotrebom navedenih dodataka se pored znatnog

poboljšanja mehaničkih svojstava i trajnosti moglo uticati i na boju maltera (Miličić *et al.* 2022: 56–58). Pomenuto je već da su probe maltera uključile i dodavanje metakaolina kako bi se pripremili kompatibilni malteri za karakteristične istorijske uzorke visokih vrednosti čvrstoća, čime su ove vrednosti i postignute (Ilić *et al.* u pripremi).

Henri i Stjuart jasno navode karakteristike i odnose osnovnih komponenata, kao i svojstva maltera koja utiču na njegovu trajnost (Henry, Stewart 2011: 122–134). Priroda i kvalitet kreča direktno utiču na otpornost krečnog maltera na spoljne uticaje. Mraz dovodi do raspadanja, ljuštenja i fragmentacije maltera ako je izbor vrste kreča neadekvatan za uslove u kojima se primenjuje. Neadekvatno čuvanje kreča pre upotrebe, odnosno izloženost vazduhu dovodi do njegove preuranjene karbonatizacije i započinjanja vezivanja hidrauličnih jedinjenja, pa se smanjuje količina aktivnog veziva u malteru, što vezivo čini slabijim; neugašene čestice u kreču nakon pripreme maltera hidratišu i šire se u već primenjenom malteru, tako dovodeći do oštećenja maltera za malterisanje; čestice koje ne prođu karbonatizaciju usled slabog dotoka vazduha (malteri u jezgrima zidova) rastvaraju se nakon oštećenja zidova i prodora kišnice u jezgro, pa dolazi do njihovog ispiranja što dovodi do šupljina u malteru; prepečene čestice dolomitnog kreča mogu dovesti do kasnijih oštećenja jer prepečeni magnezijum-karbonat slabije hidratiše i karbonatizuje nego kalcijumova jedinjenja, pa dolazi do poremećaja vezivanja i posledično dezintegracije maltera. Kod upotrebe cementa, neke rastvorljive soli koje sadrži ili formira tokom hidratacije mogu uzrokovati štete na okolnom materijalu, ali i reagovati sa eventualno prisutnim reaktivnim SiO_2 iz agregata dovodeći do njegove dezintegracije. Gips u spoljnim uslovima, kroz cikluse gubljenja i dobijanja vode slabi, a usled rastvaranja u vlažnim sredinama, kalcijum-sulfat migrira u susedne porozne materijale i kristališe, nakon čega se pojavljuju oštećenja. Neadekvatne osobine agregata koji se koriste za izradu maltera, već pomenute u odeljku o ispitivanju agregata (3.1 Agregati, *Ispitivanja agregata*), takođe mogu uticati na smanjenje trajnosti maltera. Ovde spadaju prisustvo rastvorljivih soli, glina, reaktivnog SiO_2 , sumpora, gvožđa, organskih materija. Na trajnost maltera

utiče i povišen sadržaj finih čestica agregata. Takav agregat traži više vode za dobru obradivost nego adekvatno graduisani agregat. Kasnije, tokom sušenja i starenja maltera, voda isparava i u malteru se javljaju pukotine, kroz koje ulazi voda uzrokujući oštećenja, što predstavlja veliki problem kod maltera za malterisanje (Henry, Stewart 2011: 122–134).

Usled dejstva spoljnih uticaja na građevinske materijale (vlaga i voda, soli, zagađenje vazduha, varijacije temperature, izloženost požaru, dinamička opterećenja, sleganje zemlje, biološki agensi i dr.), samim tim i na maltere, dešavaju se brojna oštećenja. U njih spadaju oštećenja usled mraza, kristalizacije soli, stvaranje i taloženje različitih jedinjenja, rastvaranje, izlučivanje, erozija, stvaranje plihova, ljuštenje, pucanje kao i biološki rast (van Hees *et al.* 2004: 644–645).

Kretanje vlage kroz malter i njegova izloženost uslovima koji mogu uzrokovati oštećenje najvažniji su parametri trajnosti. Karakteristika maltera koja ima odlučujuću ulogu u ovome jeste poroznost (Thomson *et al.* 2007: 102). Malteri koji imaju visok sadržaj veoma malih pora duže će zadržavati vodu od onih koji imaju velike pore, što povećava rizik od štete usled mraza. Niska propustljivost i nizak stepen povezanosti pora uzrokuju zarobljavanje vlage unutar strukture i uvođenje soli u slabije materijale. Najporozniji i najpropustljiviji su nehidraulični krečni malteri, pri čemu vrednosti ovih svojstava opadaju kako hidrauličnost i čvrstoća maltera rastu (Henry, Stewart 2011: 132).

Stoga je struktura pora jedna od najvažnijih karakteristika maltera koja utiče na njihovu vodopropustljivost i paropropustljivost, ali i čvrstoću. Ona je izuzetno važna kod pripreme maltera za konzervaciju. Kompatibilne strukture pora obezbeđuju neometanu razmenu vode između maltera i podloge, smanjujući rizik od stvaranja oštećenja u međuzoni usled nastanka leda ili kristalizacije soli, što dalje utiče na prijanjanje novog maltera za podlogu (Klisińska-Kopacz *et al.* 2010: 405).

Izuzetno loš uticaj na krečne maltere imaju kiše u kojima je rastvoren ugljen-dioksid, jer dolazi do reakcije sa karbonatima i stvaraju se rastvorni bikarbonati, koji se ispiraju, ostavljajući nevezan agregat. Kiše u zagađenim sredinama često sadrže i jedinjenja sumpora koja reaguju sa karbonatom iz veziva

formirajući gips, koji se kod izloženih površina rastvara u vodi, dok u natkrivenim prostorima stvara sulfatne kore. Unutrašnja vlaga u zidovima koja nastaje usled penetriranja ili podizanja vlage ili kondenzacije oštećuje maltere za malterisanje (Henry, Stewart 2011: 141–145).

Otpornost maltera na mraz je posebno važna kod tek ugrađenih maltera koji nisu prošli kroz karbonatizaciju, kao i kod upotrebe neadekvatnih maltera za izradu spojnica (Thomson *et al.* 2007: 103). Ona najpre zavisi od kompaktnosti maltera, njegove strukture, poroznosti, i vrste, količine i odnosa komponenata (Muravljov 1995: 237). Postoji jaka veza između poroznosti maltera, čvrstoće na pritisak i otpornosti na mraz, odnosno slabiji i porozniji malteri su podložniji oštećenjima uslovljenim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja. Posebno su na mraz osetljivi krečni malteri kod kojih još uvek nije završena karbonatizacija (Lanas, Sierra, Alvarez 2006 u Nunes, Slížková 2016: 896; Nunes, Slížková 2016: 896) (**Slika 108**). Usled mraza, voda unutar pora maltera ledi i povećava zapreminu do 9 % zbog rasta kristala leda. Kada je pritisak ovih kristala jači od savojne čvrstoće, pore pucaju i malter se odvaja od podloge. Posebno su ugroženi tek primenjeni i slabi malteri za malterisanje (Henry, Stewart 2011: 141–145). Takođe, veoma je važna homogenost maltera, koja se ostvaruje dobrom ugradnjom, a zavisi i od same obradivosti smeše, jer se negativno



Slika 108. Primer pogubnog uticaja mraza na nezaštićen krečni malter sa vazдушnim krečom koji još nije prošao kroz karbonatizaciju

dejstvo mraza prvo ispoljava upravo na mestima šupljina, pora i kasnije nastalih pukotina (Muravljov 1995: 237).

Soli mogu biti izuzetno štetne za maltere. Posledica su primenjenih komponenti (cement, morski pesak), spoljnih uticaja (morske aerosoli, zagađene kiše i podzemne vode) ili prethodnih intervencija na strukturama. Formiranje i rastvaranje kristala soli u porama maltera, usled naizmeničnih ciklusa vlaženja i sušenja, utiču na razaranje veza u njemu, dovode do drobljenja i mrvljenja, i konačno, pretvaranja maltera u prah. Stalno suva ili stalno vlažna sredina neće inicirati ovakve ponavljajuće procese, pa se najveće štete dešavaju na mestima gde se smenjuju različiti uslovi. Nisu sve rastvorljive soli štetne, u normalnim uslovima neke se retko rastvaraju, a neke retko kristališu. Kada se ovi ciklusi dešavaju sporo ili kada su soli izuzetno rastvorljive, isparavanje i kristalizacija su na površini maltera, pa se javlja eflorescencija, koja je mnogo manje štetna. Brzo isušivanje slabo rastvorljivih soli dovodi do kriptoflorescencije unutar pora maltera, na kontaktima između različitih materijala, ili između slojeva maltera za malterisanje. Ona se teže detektuje, ali je mnogo štetnija, jer dolazi do odvajanja slojeva, gubitka veza unutar maltera, i ubrzanog propadanja čitave malterne površine. Dalje, usled reakcije sulfata iz spoljne sredine (tlo, podzemna voda, morska voda ili zagađenje) ili iz same konstrukcije (neke opeke, agregati, portland cement, gipsni malter) i jedinjenja u samom vezivu maltera, a u zavisnosti od vrste veziva, nastaju različiti minerali, koji utiču na porast zapremine, stres, i na kraju pukotine duž spojnica te ispadanje maltera iz njih, iako sama kohezija maltera ostaje. Uticaj sulfata je vezan za dugotrajno vlaženje maltera, pa su najugroženiji izloženi delovi građevina (Henry, Stewart 2011: 147–151).

Kod analize uticaja bioloških agenasa na istorijske maltere, važno je znati stepen bioreceptivnosti samih maltera, koji bivaju kolonizovani na sličan način kao i sam krečnjak. Ova kolonizacija ne znači nužno i da će doći do procesa biodeterioracije (Субаков-Симић и др. 2014: 93–94). Biološki agensi uključuju mikroorganizme, vegetaciju i insekte. Bakterije i gljive mogu proizvoditi organske kiseline koje razlažu karbonatne materijale. Gljive mogu uticati na maltere i mehanički,

pošto penetriraju nekoliko milimetara unutar poroznih materijala. Generalno, ovi organizmi menjaju površine, pre nego što ih zaista i oštećuju, ali je njihov uticaj na oslikane malterne površine izuzetno štetan (Henry, Stewart 2011: 152). Usled mineralnog sastava i poroznosti samih krečnih maltera koji su mu podloga, ali i organskih dodataka u bojanim slojevima, oslikane površine su izuzetno podložne rastu gljiva (Unković *et al.* 2022: 147).

U određenim uslovima, javljaju se kolonizacije lišajeva i mahovina, koje su gušće na podlogama veće poroznosti ili na grubim površinama koje zadržavaju visok sadržaj vlage. Neki lišajevi mogu penetrirati u materijal nekoliko milimetara, što se dešava tokom protoka više decenija, a neke mahovine to čine i do dubine od više od 1 cm, što fizički oštećuje materijal. Drvenasti koren biljaka može oštetiti strukturu, rastući kroz pukotine u malternim spojnica ili unutar mesta odvajanja maltera za spoljašnje malterisanje od zida. Međutim, neke od ovih biljaka, kao što je bršljan, mogu uticati pozitivno na strukturu štiteći je od ulaska kiše ili od ekstremnih temperatura. U mekim malterima neke pčele kopaju tunele, dok su malteri sa oštećenim vezivom u nižim zonama struktura pod uticajem insekata, ali i beskičmenjaka uopšte, i tako za njih predstavljaju veštačko zemljište (Henry, Stewart 2011: 152).

Tokom projekta *MoDeCo2000* izvršen je pregled stepena infestacije Trajanovog mosta, i rizika za propadanje maltera u kontaktu sa opekom, koja je kao i kamen, intenzivno kolonizovana lišajevima i mahovinom (**Slika 109**) (Unković *et al.* 2023).



Slika 109. Biološki rast na istorijskoj zidanoj strukturi dunavskog limesa – lišajevi i mahovine Trajanovog mosta

Ispitivanje trajnosti maltera

Osim sprovođenja različitih laboratorijskih ispitivanja određenog broja očvrslih uzoraka 28 dana nakon pripreme, potrebno je neke druge očvrsele modele konzervatorskih maltera pre ispitivanja podvrgnuti uslovima standardnog laboratorijskog ciklusa, ali i ciklusima veštačkog (ubrzanog) starenja kako bi se ocenila njihova trajnost. U određenim vremenskim intervalima stanje ovih uzoraka se mora vizuelno proveriti, golim okom, lupom i pod stereomikroskopom, kako bi se zabeležile promene ili eventualna oštećenja na njima. Po završetku ovih tretmana tretirani uzorci se takođe podvrgavaju ispitivanju različitih napred navedenih svojstava. Kod standardnog starenja, uzorci koji se ispituju nakon 7 dana vade se iz metalnih kalupa, a zatim neguju na vazduhu na rešetkastim nosačima kako bi sa svih strana bili dostupni cirkulaciji vazduha (**Slika 110**). Praćenje i ispitivanje se vrši nakon 28 dana, ali i kraće ili duže od tog perioda, zavisno od cilja ispitivanja. Nakon očvršćavanja maltera dešavaju se različite deformacije u zavisnosti od sredine, a bez uticaja bilo kakvih spoljašnjih sila. S obzirom na to da se tokom skupljanja i širenja dešavaju zapreminske promene maltera, i posledično njegovo pucaње i odvajanje od podloge, potrebno je ispitati razmere ovih



Slika 110. Modeli konzervatorskih maltera u procesu standardnog starenja

procesa u različitim sredinama. Merenje promena skupljanja i širenja se vrši nakon 24 h, a zatim nakon 2, 3, 7, 14, 28 i 90 dana. One zavise od komponenti maltera i njihove razmere, a njihova ravnomernost je posebno važna kako ne bi došlo do pojave pukotina (ravnomerno raspoređeno skupljanje se može postići mikroarmiranjem različitim vlaknima), odvajanja od podloga i dr. (Tufegdžić 1979: 263–265, 341).

Kod ubrzanog starenja, uzorci se podvrgavaju cikličnom zamrzavanju i odmrzavanju, izlaganju toplotnom šoku, cikličnom zagrevanju i hlađenju, izlaganju povećanoj vlažnosti, UV zracima, uticaju različitih vrsta soli, i dr. (SRPS EN 13687-1, 2, 3, 4, 5) (**Slika 111**). Koja će od metoda za ovo ispitivanje biti primenjena, zavisi pre svega od vrste veziva korišćenog za pripremu maltera, uslova kojima je građevina u kojoj će malter biti upotrebljen izložena i buduće pozicije samog maltera u građevini. Standardizovane metode za procenu trajnosti maltera vezane su za kompatibilnost maltera i podloge, i termičku kompatibilnost.

Kompatibilnost maltera i podloge. Kompatibilnost maltera i podloge se ispituje kod maltera za spoljašnje malterisanje, a preko parametara adhezije za podlogu i vodopropusnosti nakon izlaganja termalnim ciklusima u skladu sa standardom (SRPS EN 1015-21:2008) i predstavlja ujedno jedan od načina ispitivanja otpornosti maltera na mraz. Ispitivanje se sprovodi



Slika 111. Ubrzano starenje modela konzervatorskih maltera u programabilnoj klimatskoj komori sa simulacijom uslova u kojima će konzervatorski malteri biti primenjeni

tako što se jedna serija pripremljenih uzoraka maltera negovanih najmanje 28 dana pod standardnim laboratorijskim uslovima, nanetih na najmanje dve različite podloge na koje će malteri i biti nanošeni u budućnosti, izlaže na po četiri termalna ciklusa zagrevanja i zamrzavanja, kao i vlaženja i zamrzavanja. Tokom sprovedenih ciklusa beleže se pojave mikroprslina i drugih oštećenja. Zatim se malteri neguju u standardnim laboratorijskim uslovima 48 h, za ispitivanje vodopropusnosti, odnosno minimum 4 dana za ispitivanje adhezije, prema standardima (SRPS EN 1015-21: 2008; SRPS EN 1015-12: 2016).

Uzorci izloženi termalnim ciklusima se ispituju zajedno sa uzorcima paralelno negovanim u standardnim uslovima, bez izlaganja termičkim ciklusima. Proračunava se promena vrednosti čvrstoće ili adhezije za podlogu uzoraka koji su prošli cikluse u odnosu na one koji nisu. Prema najvećem broju standarda definisano je da je malter otporan na mraz ukoliko je čvrstoća dobijena na uzorcima izlaganim ciklusima smrzavanja i odmrzavanja minimalno 75 % od čvrstoće dobijene na uzorcima koji su negovani u standardnim laboratorijskim uslovima.

Pod određenim uslovima, ekspanzivne i rastvorljive soli i mraz mogu izazvati štete na krečnim malterima (Groot *et al.* 2022: 29). Osim karakteristika njegovih komponenata i uslova spoljne sredine, na sadržaj rastvorljivih soli u malteru utiče i podloga. Stoga je pre primene maltera neophodno proveriti vlažnost i sadržaj soli u zidovima i prema tome prilagoditi njegov sastav (Groot *et al.* 2022: 29). Ovo se posebno odnosi na maltere za malterisanje, kod kojih je jedan od osnovnih zahteva otpornost na rastvorljive soli (Groot *et al.* 2012: 1279). Testiranje ove otpornosti nije standardizovano, pa istraživači kombinuju više metoda i tehnika u zavisnosti od karakteristika maltera i brojnih uticajnih faktora (Aškračić *et al.* 2023: 542).

Termička kompatibilnost. Kod metode cikličnog zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u tank sa rastvorom soli za odmrzavanje, temperaturni opseg ciklusa je od 21 (± 2) °C do -15 (± 2) °C, a uključuje i potapanje u zasićeni rastvor soli za odmrzavanje. Ciklus traje ukupno 4 h, a izvodi se ukupno 20, odnosno 50 ciklusa, u zavisnosti od izloženosti uticajima spoljašnjeg maltera (SRPS EN 13687-1:2010; SRPS EN 1504-2: 2004; SRPS EN 1504-3: 2010).

Metodom toplotnog šoka meri se efekat naglog hlađenja maltera sa povišenih temperatura (kao što je pljusak sa grmljavinom nakon visokih temperatura). Sastoji se od cikličnog zagrevanja uzoraka maltera nanetih na podlogu do $60 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ i hlađenja vodom do $12 (\pm 5) ^\circ\text{C}$ u ukupno 10 ciklusa u otvorenoj komori za grejanje i prskanje. Običan krečni malter, koji je slabije otporan na uticaj vlage, može se tretirati toplotnim ciklusima u suvim uslovima (SRPS EN 13687-2: 2010; SRPS EN 1504-2: 2004; SRPS EN 1504-3: 2010).

Termički ciklusi bez delovanja soli za odmrzavanje mogu se vršiti manuelnom metodom upotrebom klimatske komore sa hladnjakom, vodenom kupkom i pećnicom, kao i upotrebom programabilne zatvorene izolovane klimatske komore, a prema standardu (SRPS EN 13687-3: 2010). Kod prve metode, uzorci maltera se ciklično hlade i zagrevaju, u vodi i na vazduhu, u različitim vremenskim intervalima, i opsegu temperature od $-15 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ do $60 (\pm 2) ^\circ\text{C}$. U programabilnoj klimatskoj komori opsezi temperature su isti, ali postoji više ciklusa, od kojih neki imaju i drugačije trajanje. Sprovodi se 20 ciklusa (SRPS EN 1504-2: 2004) i oni praktično simuliraju promene godišnjih doba, te se na taj način malter izlaže svim uticajima spoljašnjeg okruženja kojima bi mogao biti izložen i u svom životnom veku.

Istraživači često tokom ispitivanja primenjuju i ubrzano starenje uzoraka u drugačijim uslovima od standardom propisanih, kada se uzorci u programabilnoj komori podvrgavaju *realnijim* uslovima, odnosno uslovima u kojima se nalazi struktura na kojoj će malteri za konzervaciju, razvijeni na osnovu ispitivanih modela, biti primenjeni (Fusade, Viles 2019: 84) (**Slika 111**). Ispitivanja su pokazala razlike u svojstvima maltera negovanih pod različitim uslovima i izuzetnu važnost provere njihovog starenja u realnim uslovima pre primene (Fusade, Viles 2019: 92; Arizzi, Viles, Cultrone 2012: 817).

Metoda za merenje efekata toplotnih ciklusa u suvim uslovima bez potapanja u rastvor soli za odmrzavanje (SRPS EN 13687-4: 2010), odnosno za uzorke koji se neće koristiti u spoljnim uslovima, sastoji se u cikličnom zagrevanju i hlađenju uzorka u klimatskoj komori na temperaturama između $55 ^\circ\text{C}$ i $-25 ^\circ\text{C}$. Ciklus traje 6 h, a broj ciklusa prema SRPS EN 1504-3: 2010 iznosi 30, pri čemu se na svakih 10 ciklusa obavlja vizuelni pregled uzoraka,

to jest pregled pojave pukotina, ljuštenja, stvaranja mehurića, delaminacije i drugih površinskih defekata. Poslednji vizuelni pregled se obavlja najmanje 16 sati nakon završetka poslednjeg ciklusa mraza. Nakon 30. ciklusa tretirani malter se ispituje *pull-off* metodom prema SRPS EN 1542: 2010.

Ispitivanje mehaničkih (čvrstoća pri pritisku ili adhezija *pull-off* metodom), ali i vizuelnih svojstava (boja i dr.), radi dodatne procene otpornosti na navedene uticaje, vrši se nakon najmanje sedam dana od završetka izlaganja uzoraka ciklusima zagrevanja i hlađenja. Kod metoda sa ciklusima zagrevanja, vlaženja i hlađenja u klima komori, nakon svakih deset ciklusa menja se pozicija uzoraka rotacijom (SRPS EN 13687-1: 2010; SRPS EN 13687-2: 2010; SRPS EN 13687-3: 2020; SRPS EN 13687-4: 2010; SRPS EN 1504-2: 2010; SRPS EN 1504-3: 2010).

Na modelima konzervatorskih maltera pripremljenim u okviru projekta *MoDeCo2000* tokom napred pomenutih metoda ispitivanja termičke kompatibilnosti, odnosno standardnog i ubrzanog starenja, a u cilju ispitivanja pogodnosti primenjene recepture i trajnosti samih maltera nastalih na osnovu nje, uz ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava, praćeni su vizuelni izgled, pojava pukotina, prslina, ljuštenja, promena boje usled isušivanja ili kvašenja.

Karbonatizacija maltera

Završena karbonatizacija je jedan od parametara trajnosti maltera i predstavlja proces pretvaranja kalcijum-hidroksida u kalcijum-karbonat, koji se odvija od površine ka unutrašnjosti maltera (Oliveira *et al.* 2017: 39). Proces može trajati veoma dugo, nekada i vekovima, i zavisi od mnogo faktora, među kojima su relativna vlažnost, temperatura i sadržaj CO₂ (Cultrone, Sebastián, Ortega Huerta 2005: 2278; Moorehead 1986; Dheilly *et al.* 2002 i Martínez Ramírez *et al.* 2003 u Cultrone, Sebastián, Ortega Huerta: 2278).

Sadržaj karbonata u očvrslom malteru može se proceniti na osnovu termičkih ili XRD analiza, dok se procena dubine karbonatizacije vrši optičkom i SEM mikroskopijom, kao i ramanskom spektroskopijom, ali i jednostavnom upotrebom fenolftaleina kao indikatora. Ovaj indikator daje relativne podatke, ali je

značajan jer omogućava poređenje karbonatizacije različitih uzoraka (Oliveira *et al.* 2017: 39). Metoda se sprovodi kapanjem 5 % rastvora fenolftaleina u etanolu na malter, čime se njegova boja može promeniti iz bezbojne u ljubičastu, što pokazuje da je sredina alkalna (boje nema kada je sredina neutralna ili kisela). U slučaju maltera, pojava ljubičaste boje znači da se alkalnost u njemu još uvek nije promenila pod uticajem CO₂, odnosno da alkalni Ca(OH)₂ nije u reakciji sa njim pretvoren u neutralni CaCO₃. U slučaju da nema promene boje, sredina je neutralna i karbonatizacija je završena (**Slika 112**). Test se vrši na svežem preseku maltera, malter mora biti suv, test je jeftin i brz, ali se njim ne razlikuje uvek nekarbonatizovano ili delimično karbonatizovano vezivo, niti se mogu detektovati niske vrednosti Ca(OH)₂. Može se vršiti i na spomeniku bušenjem manje rupe u malteru i nanošenjem rastvora pipetom (Teutonico 1988: 129–134, Odgers, Henry 2012: 132; Henry, Stewart 2011: 214).

Ispitivanje karbonatizacije istorijskih maltera se može vršiti i primenom DRMS metode, a sila potrebna za bušenje koja je u korelaciji sa čvrstoćom na pritisak varira sa različitim dubinama,



Slika 112. Indikacija nekompletne karbonatizacije (u slučaju krečnih grudvica) fenolftaleinom – malter star nešto više od pet vekova

prema stepenu karbonatizacije. Termogravimetrija je takođe korisna za određivanje stepena karbonatizacije maltera kroz njegove analize na različitim dubinama, posebno kod nehidrauličnih maltera sa silikatnim agregatom (Henry, Stewart 2011: 214).

Karbonatizacija maltera pripremljenih za konzervaciju se, prema potrebi ispitivanja, meri u različitim vremenskim intervalima; tokom starenja uzoraka u standardnim laboratorijskim uslovima, u uslovima ubrzanog starenja koji simuliraju realne uslove i/ili tokom starenja maltera primenjenih u spoljnim uslovima ili na samom spomeniku.

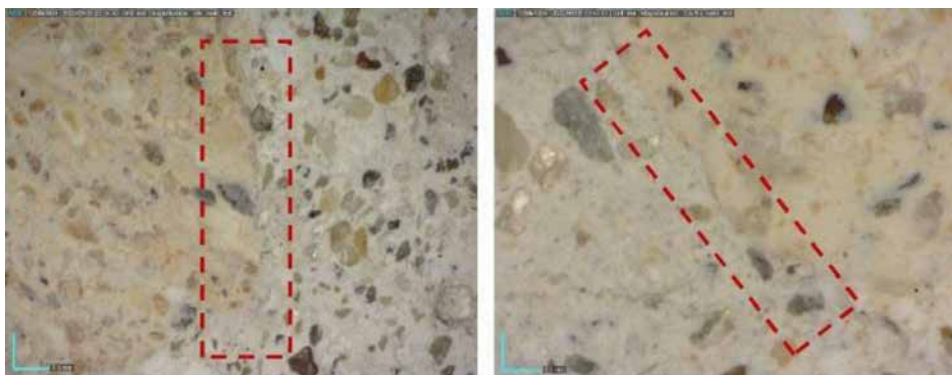
Malteri koji se suviše brzo isuše ne karbonatizuju adekvatno i gube koheziju, a dolazi i do pojave pukotina. Sporo sušenje i starenje u blago vlažnim uslovima optimalno je za karbonatizaciju kreča. Pošto previše vlage sprečava ovaj proces, vazdušni krečni malter u stalno vlažnim ili veoma vlažnim uslovima neće karbonatizovati, ili će to biti veoma sporo. Hidraulični malteri će očvrnuti i pod ovim uslovima, donekle, zavisno od njihove hidrauličnosti. Malteri na većoj visini zida će se ranije isušiti usled brzih vazdušnih struja. Dalje, vlaga iz zemlje može usporiti sušenje donjih slojeva, baš kao što i voda koja dolazi ceđenjem sa viših slojeva drži donje slojeve vlažnim (Henry, Stewart 2011: 135).

Kontakt istorijskog maltera i maltera laboratorijskog modela

U cilju provere kompatibilnosti novog maltera sa istorijskim malterom pripremaju se i modeli u kojima je komad starog maltera utisnut u novopripremljeni malter, dok je ovaj još uvek u svežem stanju (**Slika 113**). Na ovakvim uzorcima se pomoću lupe ili stereomikroskopa dalje prati pojava kontaktne zone između dva maltera tokom zajedničkog starenja (**Slika 114**). Može se izvršiti i provera karbonatizacije oko kontaktne zone upotrebom fenolftaleina (**Slika 115**). Određeni laboratorijski modeli maltera tokom projekta *MoDeCo2000* pripremljeni su upravo uz utiskivanje fragmenta istorijskog maltera u svežu mešavinu, kako bi kasnije bila proverena ostvarenost kontaktne zone.



Slika 113. Fragment istorijskog maltera utisnut u kompatibilni laboratorijski model maltera



Slika 114. Stvaranje kontaktne zone između istorijskog i konzervatorskog maltera na laboratorijskom modelu (Ilić *et al.* u pripremi)



Slika 115. Indikacija procesa karbonatizacije fenolftaleinom kod očvrsllog kompatibilnog modela maltera za konzervaciju u kontaktnoj zoni sa umetnutim fragmentom uzorka istorijskog maltera

Rekristalizacija kalcijum-karbonata (samoizlečenje krečnog maltera)

Istraživači su već odavno uvideli da krečni malter može imati osobine tzv. samoizlečenja (eng. *self-healing*) oštećenja, međutim, tek se u poslednjih nekoliko godina ova osobina krečnih maltera sve više istražuje u cilju izrade savremenih maltera. Autogeno „samoizlečenje” maltera na bazi kreča prepoznato je, verovatno prvi put, 1942. godine, tada ga je F. O. Andereg (F. O. Anderegg) povezao sa deponovanjem kalcita u pukotinama kod maltera sa visokim sadržajem kreča (De Nardi *et al.* 2017: 144).

„Samoizlečenje” krečnih maltera sastoji se od rastvaranja, transporta i ponovnog taloženja kalcijumovih jedinjenja kako bi se „izlečile” pukotine u malteru, a može se definisati kao spontani prirodni proces (ili proces sa malim spoljnim *okidačem*) *in situ* popravke mikrooštećenja koja se javljaju na materijalima kao posledica propadanja ili statičkih deformacija kod preopterećenja. Zapravo, voda (kišnica) dovodi do rastvaranja jedinjenja kalcijuma i transportuje ih iz zone bogate vezivom do šupljina i pukotina u malteru, koje se tako pune rekristalizovanim jedinjenjima. U slučaju da se taloženje vrši unutar pukotina, dešava se „samoizlečenje”, ali ako se zadrži na površini maltera, stvaraju se inkrustacije. Brojni su faktori koji utiču na

pojavu „samoizlečenja” kod određenog maltera, a među njima su količina i priroda raspoloživih kalcijumovih jedinjenja, stepen karbonatizacije maltera, prisustvo ostalih komponenata koje utiču na rastvorljivost jedinjenja, i na kraju, izloženost maltera i spoljašnji uslovi. Problem sa spontanom „samoizlečenjem” jeste taj što rastvorena jedinjenja „leče” određene pukotine, ali dovode do povećane poroznosti mesta koja napuštaju, pa posledično i smanjene trajnosti ovih maltera (Lubelli, Nijland, van Hees 2011: 75–77, 90).

Istraživači rimskih maltera su kroz laboratorijske analize delimično ili potpuno neugašenih krečnih grudvica, koje su najverovatnija posledica pripreme maltera upotrebom *hot mixing* tehnologije, zaključili slično kao i prethodno pomenuti istraživači, odnosno da su krečne grudvice izvor reaktivnog kalcijuma u dužem periodu koji popunjava šupljine i pore i tako obezbeđuje unutrašnji „samoizlečujući” mehanizam, čime se malter bori protiv progresivne degradacije. Izuzetno je značajno to što su ova saznanja, uz već postojeća na ovu temu, iskoristili u unapređenju savremenih materijala i tako pokazali važnost ispitivanja istorijskih materijala kako bi se primenila saznanja za kreiranje novih industrijskih rešenja. Testirajući savremene mešavine betona pripremljenih sa običnim portland cementom, peskom i letećim pepelom, i dodatkom superplastifikatora, kao mešavine koja je industrijski relevantna, ali uz dodatak živog kreča, nakon njihovog lomljenja, a zatim međusobnog spajanja sa ostavljanjem pukotine dimenzija do 0,5 mm širine, posmatrali su proces „samoizlečenja” nastao usled ulaska vode kroz pore i pukotine. Voda je rastvarala krečne grudvice i nastajala je tečnost bogata kalcijum-hidroksidom, koja je, nošena kroz malter, tako ispunjavala pukotinu, što je dovelo do rekristalizacije kalcita. Istraživači napominju da je ovaj proces u rimskim malterima mogao dovesti i do eventualnih zakasnelih pucolanskih reakcija vulkanskih materijala koji nisu reagovali sa krečom tokom inicijalnog vezivanja maltera i same tečnosti (Seymour *et al.* 2023).

Zbog njihove specifičnosti, dodatke malterima koji doprinose njihovom „samoizlečenju” pominjemo u ovom odeljku. To mogu biti hemijska jedinjenja koja su visoko hidrofilna i reaguju sa kalcijum-hidroksidom kako bi dovela do karbona-

tizacije i stvaranja nerastvorljivih jedinjenja koja se deponuju u pukotinama, tako ih popunjavajući (Maravelaki *et al.* 2023: 10). Savremena istraživanja krečnih maltera se bave i predlozima njihovog „izlečenja” uz upotrebu bakterijskih kultura koje svojim potencijalom za biokalcifikaciju indukuju efekat izlečenja, odnosno uključuju pristup izlečenju mikrobiološki indukovanim taloženjem CaCO_3 (Vučetić *et al.* 2023: 2).

Primena i starenje maltera u stvarnim uslovima spomenika

Osim ispitivanja trajnosti dizajniranih modela maltera za konzervaciju u laboratoriji, potrebno je da se ispitivanja izvrše i na malterima primenjenim u stvarnim uslovima, bilo eksperimentalno pored samih istorijskih građevina za koje se projektuju, ili na samim građevinama. Maltere je u prvom slučaju potrebno kombinovati sa predviđenim vrstama elemenata za zidanje koji se nalaze na određenom spomeniku. U slučaju da se malter probno nanosi i na autentične istorijske zidove spomenika, on će biti izložen realnijim uslovima, odnosno postati integralni deo jedinstvene strukture koja traje stotinama, pa čak i hiljadama godina jer će živeti sa njom.

Trajnost ugrađenog konzervatorskog maltera trebalo bi da se prati upotrebom vizuelnog pregleda *in situ*, ali i njegovim pregledom u laboratoriji. To znači da je ponašanje primenjenih maltera potrebno pratiti i ispitati mernim tehnikama na licu mesta, uz posedovanje mobilnih uređaja za ispitivanje, odgovarajuće reagense, pribor i alate, ali i u laboratoriji gde se uzeti uzorci ispituju istim tehnikama kao i istorijski malteri ili očvrslu konzervatorski modeli, u cilju dobijanja rezultata onih parametara za čije ispitivanje ne postoje raspoloživi mobilni uređaji. Na ovim malterima je neophodno pratiti vizuelne promene, pojavu pukotina i prslina, mikrostrukturne promene, promene boje usled spoljašnjih uticaja – pre svega kvašenja i sušenja, proces formiranja kontaktne zone između novog i starog maltera, kao i između novog maltera i elemenata za zidanje. Najčešće primenjivane tehnike na licu mesta su praćenje površinskih promena pomoću mobilnog mikroskopa ili sonde. Na taj način se mogu pratiti pojave pukotina, ljuštenja, soli u

vidu eflorescencije ili drugi površinski defekti. Na probnom polju na terenu mogu se ispitati i mehanička svojstva, odnosno adhezija *pull-off* metodom. Zbog dugotrajnog procesa očvršćavanja krečnih maltera, ali i krečnih maltera kojima su dodati materijali sa pucolanskim svojstvima, poželjno je da proces praćenja svojstava maltera na samoj građevini traje što duže. Povremeno se primenjeni malteri uzorkuju radi daljih ispitivanja u laboratoriji.

Nakon završetka laboratorijskih ispitivanja, odabrane recepture konzervatorskih modela pripremljenih u okviru projekta *MoDeCo2000* primenjene su u spoljašnjim uslovima Arheološkog parka Viminacijum. Modeli maltera su aplicirani izgradnjom manjih zidanih struktura tokom jeseni i izloženi uslovima spoljašnje sredine (**Slika 116**). Ponašanje maltera praćeno je *in situ* vizuelnim putem i mobilnom opremom. Nakon jake zime pokazao se štetan uticaj mraza na trajnost krečnih maltera, koji, osim opeke i mehanički aktivirane lokalne opekarske i kaolinske gline (i to samo u nekoliko slučajeva), nisu imali nikakve druge dodatke sa pucolanskim svojstvima (Miličić *et al.* u štampi). Strukture su negovane i štice tokom početnog perioda očvršćavanja, ali tokom najhladnijeg perioda koji je nastupio oko tri meseca kasnije, nisu imale natkrivnu zaštitu koja bi sprečila ulaz vode, došlo je do ljušpanja i ljuštenja maltera, ali i do gubitka kohezije. Sledeće godine su ozidane eksperimentalne strukture od rimske opeke i zelenog škriljca tokom kasnog proleća uz upotrebu krečnog maltera sa kombinovanim dodacima metakaolina, zeolitskog tufa ili opeke, čije ponašanje je pokazalo bolje rezultate u pogledu trajnosti tokom zime koja je nastupila nakon šest meseci (**Slika 117a; Slika 117b; Slika 117c**) (Ilić *et al.* u pripremi). Tokom proba malternih mešavina u Viminacijumu oba puta je procenjivan kontakt maltera sa elementima za zidanje upotrebom mobilne opreme na licu mesta, a određeni malteri su i uzorkovani te 35 dana nakon primene izvršena su ispitivanja njihovih čvrstoća na pritisak, kao i kolorimetrijska ispitivanja (Ilić *et al.* u pripremi) (**Slika 118**).

Sve primenjene mešavine i dalje zahtevaju optimizaciju. Takođe, preporučuje se i zidanje eksperimentalnih struktura većih dimenzija, odnosno zidova debljina približnijih antičkim,



Slika 116. Izrada i primena konzervatorskih mešavina maltera na zidanim strukturama u Viminacijumu (oktobar)

275

kako bi se što realnije sagledalo ponašanje maltera, odnosno njegovo vezivanje i očvršćivanje na više mestu u zidu. Rezultati istraživanja će biti objavljeni kao deo posebne publikacije.

Takođe, konzervatorski malteri su primenjeni i na određenim istorijskim strukturama tokom ranog letnjeg perioda. Negovani su u spoljašnjim uslovima, uz zaštitu od prekomernog zagrevanja, odnosno isušivanja, kroz kvašenje zaštitnih materijala, tokom dve nedelje. Trajnost krečnog maltera



Slika 117a. Monitoring primenjenih mešavina maltera na zidanim strukturama u Viminacijumu: Struktura 4 – tek ozidano, jun (gore); nakon sedam dana, jun (dole)



Slika 117b. Monitoring primenjenih mešavina maltera na zidanim strukturama u Viminacijumu: Struktura 4 – nakon 35 dana, jul (gore); nakon 128 dana, oktobar (sredina); nakon 255 dana, februar (dole)

277



Slika 117c. Monitoring primenjenih mešavina maltera na zidanim strukturama u Viminacijumu: Struktura 4 – nakon 587 dana, januar (očvrslu malter za zidanje bez oštećenja)

278



Slika 118. Ocena kontakta istorijskih materijala za zidanje i novog maltera na eksperimentalnoj zidanoj strukturi u Viminacijumu mobilnom opremom (gore levo); malter uzorkovan sa jedne od struktura (gore desno i sredina); uzorci uzeti sa više struktura nakon ispitivanja čvrstoće na pritisak (dole)

primenjenog na istorijskim strukturama praćena je upotrebom mobilne opreme na licu mesta. Merenja su vršena vizuelno u prvih nekoliko nedelja, a zatim i opremom nakon šest meseci i nakon nešto više od godinu dana (**Slika 119**). Tom prilikom je vršen pregled stvaranja kontaktne zone primenjenog maltera sa istorijskim malterom i elementima za zidanje, pri čemu su dobijeni dobri rezultati, iako su se na samim površinama maltera pojavile manje pukotine (Vučetić *et al.* 2022b; Vučetić *et al.* 2023).

Tokom međunarodne radionice sa konferencijom *Science for Conservation of the Danube Limes*, koja je održana kao završni događaj projekta *MoDeCo2000* u Arheološkom parku Viminacium krajem juna 2022. godine, pripremljeno je više mešavina upotrebom lokalne gline i živog kreča (uz jednu mešavinu sa gašenim krečom), dunavskog peska granulacije 0–4 mm, drobljene i mlevene rimske opeke i zeolitskog tufa, u vidu demonstracije (**Slika 120**). Mešavine su stavljene u kalupe, iz kojih su izvađene nakon 7 dana, a zatim podvrgnute starenju u standardnim laboratorijskim uslovima još 28 dana, nakon čega je izvršeno testiranje opitnih tela na pritisak (Nikolić *et al.* 2023: 22–23).

Na radionici je, pod vođstvom konzervatora i zidara iz Engleske, Najdžela Kopsija (Nigel Copsey), izgrađena i struktura okvirnih dimenzija 1,2 m × 0,6 m × 0,5 m, uz upotrebu maltera spravljanih metodom vrućeg mešanja – od živog kreča, dunavskog agregata, drobljenog škriljca, drobljene crvenke i zeolitskog tufa, u zavisnosti od funkcije (malter za zidanje, fugovanje ili završni sloj zida) i primene odmah nakon pripreme. Materijal za građenje zida je činilo više vrsta kamena, opeka i crvenka, koji potiču iz ostataka rimskog Viminacijuma. Struktura je negovana dve nedelje kvašenjem i pokrivanjem, a zatim praćena tokom letnjih i jesenjih meseci (**Slika 121**). Proces starenja ovih maltera se i dalje prati. Njihovo stanje je, nakon prvobitnih oštećenja spojnica i maltera gornjeg završnog sloja zida između opeka, a usled izuzetno jakog mraza tokom prve zime (šest meseci nakon primene), dalje ostalo nepromenjeno (osamnaest meseci nakon primene). Tokom proleća 2024. godine će biti ponovo nanet malter za spojnice i gornji završni sloja zida, uz upotrebu delimično optimizovanih mešavina, a njihovo praćenje će se nastaviti u budućnosti.

280



Slika 119. Primena konzervatorskih mešavina maltera na danas oštećenim istorijskim strukturama, pre više decenija delimično restauriranim cementnim malterom: zidanje u junu (gore); nakon 18 dana, jul (sredina); nakon 398 dana, jul (dole); primetna je razlika u boji novog maltera i davno primenjenog cementnog maltera



Slika 120. Izrada mešavina maltera za demonstraciju na radionici u Viminacijumu (foto: Goran Stojić)



Slika 121. Građenje zidane strukture na radionici u Viminacijumu (gore – foto: Goran Stojić); zidana struktura 13 dana nakon nastanka (dole)

V ZAKLJUČAK

Projekat *MoDeCo2000* je svoja istraživanja usmerio na jedan građevinski materijal, upotrebljavan na određenoj teritoriji u određenom periodu istorije – rimski malter građevina dunavskog limesa u Srbiji. Proučavanje maltera je duboko vezano za mnoge druge građevinske materijale i njihov životni ciklus, odnosno eksploataciju sirovina, njihovu preradu i upotrebu kao osnovnih materijala ili komponenata za ovaj kompozitni materijal. Od kompozicije maltera kao jednog od najsloženijih istorijskih građevinskih materijala i njegove primene, često su zavisili životni vek i trajnost jedne građevine. Slično je i danas, kada te građevine pokušavamo da zaštitimo, jer je upravo odabir novog maltera koji se primenjuje tokom konzervacije među najvažnijim faktorima njihovog očuvanja.

Ova monografija je obuhvatila veliki broj metoda i tehnika primenjivanih u karakterizaciji istorijskih maltera i ispitivanju novih, njima kompatibilnih maltera. Njihova primena u praksi je često ograničena tehničkim ili finansijskim mogućnostima istraživanja. U tom slučaju, iskustvo analitičara je izuzetno značajno jer upravo oni mogu pružiti veliki broj podataka o istorijskom malteru i na osnovu vizuelnog pregleda. Nakog toga istraživači sa prikupljenim zajedničkim znanjima iz različitih disciplina opredeljuju se za pogodne i dostupne laboratorijske tehnike čijom kombinacijom mogu dobiti tražene informacije. Upravo nakon vizuelnog pregleda i inicijalne interpretacije podataka retko će se ukazati potreba da se sprovedu sve metode i tehnike ispitivanja prikazane u ovoj publikaciji. Bez veština, znanja i sposobnosti interpretacije rezultata, uprkos broju tehnika kojima se vrši, karakterizacija istorijskih maltera neće doneti sve željene informacije.

Uspešna zaštita i očuvanje jedne građevine nastaju samo kroz multidisciplinarni pristup negovan kroz sve aktivnosti – od otkrivanja građevine, preko njenog istraživanja u svim aspektima i praktične konzervacije, do interpretacije i predstavljanja javnosti. Proces *od karakterizacije* (istraživanja istorijskih maltera) *do konzervacije* (primene konzervatorskih maltera) obuhvata veliki broj aktivnosti kako bi bili ispunjeni mnogobrojni zahtevi koje je unapred postavilo više aktera

uključenih u zaštitu i očuvanje neke istorijske građevine ili njenih ostataka, ali i potrebe same istorijske građevine. Sve aktivnosti i najveći broj laboratorijskih ispitivanja prikazanih u ovoj monografiji sprovedeni su tokom realizacije projekta *MoDeCo2000*. Tokom projekta su uz sam malter istraživane i graditeljske aktivnosti u okviru predela uz Dunav u dužini od 588 km, uz donošenje preliminarnih zaključaka zajedničkih za ceo prostor, a na osnovu ispitivanja pojedinačnih primera. S obzirom na prirodu projekta koji je obuhvatio istraživanje velikog broja različitih uzoraka maltera koji potiču iz mnogobrojnih građevina, opredeljenih u vremenski raspon od šest vekova na jednoj većoj teritoriji, odnosno duž Dunava u Srbiji, njegovi rezultati mogu predstavljati okvir za buduća detaljna istraživanja maltera svakog pojedinačnog spomenika u Srbiji koji pripada ovom vremenskom periodu bez obzira na prostor, ali i ovom prostoru bez obzira na vreme.

5.1 KONTEKST I KARAKTERIZACIJA

Uzorkovanju maltera u cilju njegove karakterizacije mora prethoditi plan koji jasno određuje da li je njen cilj priprema za konzervaciju, ili naučno istraživanje. Pre uzorkovanja, moraju biti prikupljeni različiti podaci o samoj strukturi i obavljen vizuelni pregled sa fotografskim i pisanim zapažanjima. Tokom ovog istraživanja, u obzir se moraju uzeti arhitektonsko-graditeljski i arheološki kontekst, kontekst sredine u kojoj se građevina nalazi, kontekst upotrebe građevine, tehnološki kontekst nastanka maltera, prirodno-geološki kontekst vezan za poreklo sirovina, društveno-ekonomski kontekst nastanka, korišćenja i nestanka upotrebne vrednosti građevine, kao i najširi istorijski kontekst vezan za određen prostor i period kome uzorci, odnosno građevina iz koje potiču, pripadaju.

Tehnike uzorkovanja i alati koji se koriste pri uzimanju uzoraka uvek moraju biti izabrani na osnovu posebnih karakteristika maltera i planiranih analiza. Veličina i opšte stanje uzetog uzorka umnogome određuju obim i kvalitet planiranih ispitivanja. Stoga pri uzorkovanju glavnu pažnju treba usmeriti na uzimanje reprezentativnog uzorka maltera, što predstavlja veoma osetljiv postupak. Kako pišu Hjuze i Kalebaut (Hughes,

Calebaut 2002: 71–72), uzorkovanje istorijskog maltera, u smislu količine i broja uzoraka, kao i samog procesa na građevini zavisi od više faktora. U njih spadaju značaj građevine; konstrukcija i tehnologija izgradnje; uočena oštećenja i problemi; planirani radovi; svojstva maltera i elemenata zida; građevinske faze; prethodne intervencije; kao i troškovi potrebni za uzorkovanje i popravku eventualne štete nakon njega. Kako autori naglašavaju, često je proces uzorkovanja maltera rezultat kompromisa i dogovora. Ovde je veoma važno da osoba koja uzorkuje to čini uz poznavanje potreba ispitivanja, odnosno zahteva određenih laboratorijskih metoda, ali i poznavanje potreba ostalih profesija uključenih u konzervaciju građevine. Potrebno je da bude svesna ograničenja koja joj mogu postaviti arhitekta, konzervatori, oni koji se staraju o objektima ili vlasnici tih objekata, i da u skladu sa njima planira svoje aktivnosti, odnosno metodologiju uzorkovanja, što podrazumeva minimalne intervencije na samim spomenicima, odnosno uzorkovanje samo one količine materijala koja je neophodna za određene laboratorijske metode. Iz toga sledi da je veoma važno pre uzorkovanja istražiti prirodu i stanje upotrebljenih materijala na spomeniku i da odluke o aktivnostima moraju biti donete uz razumevanje potrebe za očuvanjem autentičnosti, dostizanjem kompatibilnosti i ispunjavanjem potrebe za zamenjivošću.

Na uzorku se mogu, u cilju procene njegovih ukupnih performansi, sprovesti vizuelni pregled, mineraloško-petrografska, fizička i mehanička karakterizacija. Makroskopska studija mora biti sprovedena pre priprema uzoraka za njihovo proučavanje u laboratoriji, čime se otkrivaju opšte karakteristike materijala, stratigrafija, prisustvo ostataka pripreme, korišćenja ili prethodnog tretmana, kao i vidljive degradacije. Prvi i verovatno najvažniji zadatak u analizi istorijskog maltera jeste određivanje vrste veziva i agregata, njihovog odnosa, prisustva mineralnih dodataka i teksture maltera, što se ocenjuje na osnovu makroskopskog pregleda, kao i prilikom osnovnog vida mineraloško-petrografske analize maltera. Rezultati ovih ispitivanja će dati osnovnu sliku o sastavu maltera.

Metode i tehnike koje se koriste dalje tokom procesa karakterizacije maltera trebalo bi prilagoditi raspoloživim kapacitetima ispitnih laboratorija i zahtevima koji su postavljeni projektom konzervacije. U najčešće korišćene tehnike za ova ispitivanja spadaju PLM – polarizaciona mikroskopija za propuštenu svetlost, SEM-EDS – skenirajuća elektronska mikroskopija sa energetske-disperzivnom spektrometrijom, XRD – rendgenska difrakcija, XRF – rendgensko-fluorescentna spektroskopija i klasična hemijska analiza uz određivanje gubitka žarenjem. One se mogu vršiti na celom uzroku ili na razdvojenim komponentama maltera – agregatu i vezivu, ili dodacima ako su prisutni. U slučaju potrebe za prikupljanjem dodatnih – detaljnijih podataka o specifičnim svojstvima maltera, kao što su različite inkluzije organskog i neorganskog porekla, specifična zrna agregata, prirodni dodaci sa pucolanskim svojstvima, drobljena pečena opeka i dr., potrebno je dodatno primeniti skenirajuću elektronsku mikroskopiju, ali i ICP-OES – optičko emisionu spektroskopiju sa indukovanom spregnutom plazmom, FTIR – infracrvenu spektroskopiju sa Furijeovom transformacijom i ramansku spektroskopiju, kao i druga termička ispitivanja (TGA, DTA, DSC). Pored navedenih tehnika koje za cilj imaju utvrđivanje sastava uzorka, potrebno je prema mogućnosti i kvalitetu uzorka, ali i funkciji uzorkovanog maltera u građevini, sprovesti određena fizičko-mehanička ispitivanja. Ovim ispitivanjima će se dobiti potrebni podaci o kompaktnosti maltera, njegovoj sposobnosti upijanja vode, poroznosti i čvrstoćama. Kroz analizu rezultata ovih ispitivanja se indirektno mogu potvrditi ili opovrgnuti neke pretpostavke dobijene kroz hemijske i mineraloške analize sastava maltera. Takođe je važno odrediti i boju maltera kao i boju pojedinačnih frakcija agregata nekom od standardnih tehnika za ova ispitivanja (preko Manselovog sistema boja ili kolorimetrijom). Sagledavanjem svih rezultata ispitivanja dobiće se podaci o svojstvima maltera, na osnovu kojih je moguće sklopiti približnu sliku postupka pripreme maltera uz upotrebljene komponente.

Kao što je napred pomenuto, tokom uzorkovanja maltera u okviru projekta *MoDeCo2000* nisu birane lokacije na kojima bi se uzorkovanje vršilo, odnosno uzeti su malteri sa svih do-

stupnih nalazišta. Samo na taj način smo mogli da se približimo relevantnim zaključcima jer je i svako nalazište „samo preživeli uzorak onoga što je nekada postojalo – a ne nužno reprezentativan uzorak” (Green 1990: 10). Naime, danas nam je za istraživanje dostupan samo deo građevina koji potiču iz antičkog perioda. Mnoge od njih su nestale usled dejstva prirode, ali su ljudi takođe odgovorni za mnoga razaranja. Nešto je uništeno jer se nije uklapalo u novu sliku sveta, nešto je ostalo neshvaćeno i zaboravljeno, a nešto je nestalo zbog praktičnih potreba za građevinskim materijalom. Međutim, znamo da, čak i kada su neki elementi ponovo korišćeni u novim zgradama, to nije uvek bila puka reciklaža, već su se često smatrali elementima kulture koje vredi sačuvati. Osim što je uzeto ono što se smatralo korisnim, ono što se smatralo vrednim prenosilo se, a potom primenjivalo u novim kontekstima (Vatum 2020: 59-60). Ovu priču možemo povezati sa konceptom reprezentativnosti uzorka građevinskog materijala koji ispitujuemo, pa i maltera, jer ga tokom prakse možemo primeniti samo na analizu onog što je ostalo od antičkih građevina. Reprezentativnost je uvek subjektivna, jer je selekcija izvršena već tokom istorije, a dodatno je vrši osoba koja uzorkuje materijal kako bi ga analizirala. Odabir uzoraka za ispitivanje zato bismo možda mogli da definišemo kao mešavinu slučajnosti i namere, baš kao što to navodi Matilde Skoje odgovarajući na pitanje šta je iz antike dospelo u savremenu kulturu. Bez obzira na način prenošenja, danas imamo priliku da vidimo ostatke antike, ali je važno uvek imati na umu da oni, kao jedinstvena odabrana celina, svakako nose pečat onih koji su učestvovali u tom procesu selekcije (Skoje 2016: 30-31). Kao što priroda ostavlja tragove na spomenicima, tako i ljudski faktor koji bira spomenike za očuvanje vrši valorizaciju i razdvaja *važnije* od *važnog* i odgovoran je za reprezentativnost spomenika, pa i samih materijala očuvanih do danas, u okviru kojih vršimo uzorkovanje za ispitivanje.

Procese koji su se odvijali u rimskim malterima za vreme njihove pripreme, upotrebe i trajanja, a koje su rimski graditelji iskustveno delimično prepoznavali, nauka ni do danas nije potpuno spoznala, pa se često tokom naučnih istraživanja pojavljuju i neočekivani rezultati. Trajanov most u današnjem selu Kostol na početku projekta *MoDeCo2000* prepoznat je

kao najverovatniji izvor najznačajnijih i najspecifičnijih podataka vezanih za karakterizaciju maltera na dunavskom limesu u Srbiji, pa i mesto upotrebe najtrajnijih maltera usled našeg predubedenja o njihovoj nužnoj vezi sa istorijskim i arheološkim značajem spomenika. Međutim, istraživanje je ovu pretpostavku demantovalo, jer su jednako trajne i čak trajnije maltere pružili neki drugi manje istraženi i u širokoj javnosti manje značajni lokaliteti. Oni su nas naveli na njihovo dublje istraživanje, koje je dalo jednako važne, ali često i važnije zaključke o odabiru sirovina i tehnologija priprema maltera na dunavskom limesu u periodu od I do VI veka nove ere, i ponovo nas vratilo na kompleksnost koncepta reprezentativnosti, povezujući ga sa pojmovima „slučajnosti” i „namere”. Profesor istorije umetnosti i arhitekture na Univerzitetu u Beogradu i dugogodišnji direktor Arheološkog instituta, arhitekta Đurđe Bošković (1904–1990), svojevremeno je rekao da je veoma teško odrediti bilo kakvu hijerarhiju među spomenicima s obzirom na njihov značaj, posebno kada je reč o njihovoj zaštiti, jer veliki broj malih, naizgled nevažnih spomenika igra izuzetno važnu ulogu u pogledu sagledavanja razvoja materijalne i duhovne kulture. Za njega su značajni veliki, monumentalni spomenici, ali to ne isključuje važnost onih manjih i skromnijih jer su oni ipak najbrojniji (Јевтић 2004: 63). Dalje, činjenica da pojedini članovi tima projekta *MoDeCo2000* dobro poznaju određene arheološke lokalitete predstavljala je svojevrsnu prepreku tokom uzorkovanja, jer su nas upravo lokaliteti o čijim smo građevinama imali najviše znanja privukli da ih najdublje analiziramo, odnosno da iz njih potekne najveći broj uzoraka maltera. S druge strane, to je verovatno i bila očekivana aktivnost, jer je omogućavala veću sigurnost u budućoj interdisciplinarnoj interpretaciji rezultata tokom procesa karakterizacije.

Dunavski pesak je dominantan agregat maltera dunavskog limesa. Obilata upotreba drobljenog škriljca kao agregata u malterima za zidanje utvrđenja Lederata u selu Ram predstavlja karakterističan izdvojeni primer koji odstupa od ovoga. Ovo utvrđenje je pravi primer oslanjanja rimskih graditelja na lokalne resurse, kao struktura izrađena upravo od škriljca eksploatiranog iz stene na kojoj je i podignuto

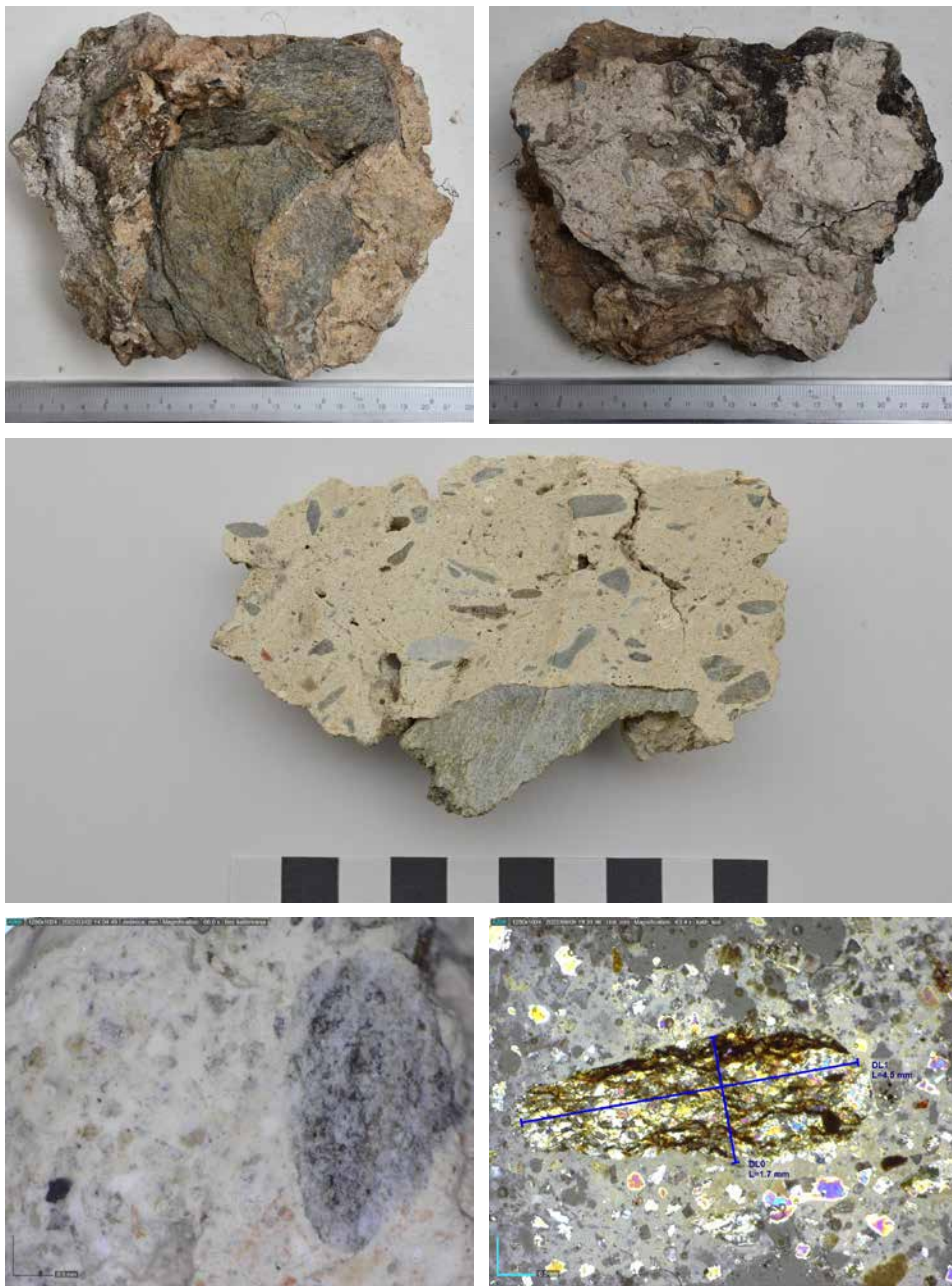
289

(Slika 122; Slika 123). Malter utvrđenja Lederata je projektu *MoDeCo2000* pružio, po svojim izuzetnim fizičko-mehaničkim svojstvima, najkarakterističniji uzorak, a razloge za ova svojstva su delimično otkrila dalja projektna istraživanja iz oblasti mineralogije, petrografije i hemije, približavajući nas priro-



Slika 122. Lederata: stena na kojoj je fundirano utvrđenje (gore) i zidovi utvrđenja od škriljca (sredina i dole)

290

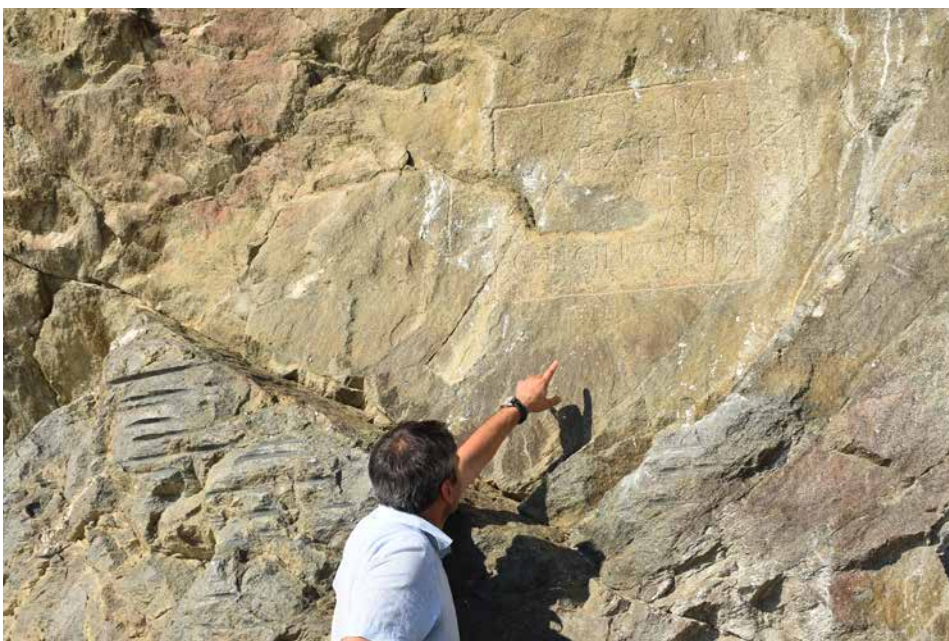


Slika 123. Lederata: škrljac kao element za zidanje sa vezanim malterom (gore);
škrljac kao agregat u malteru (sredina) i mikrosnimci maltera (polirani
presek – dole levo, i petrografski preparat – dole desno; prisutni razmernici 0,5 mm)

291

di njegovih komponenata, što će biti zasebna tema budućih naučnih publikacija u okviru projekta.

Stena ispod Ramske tvrđave u neposrednoj okolini Lederate ponela je i neke tragove drugačijih aktivnosti čija je bila svedok (**Slika 124**). Upravo se u škriljcu nalazi usečen rimski put iznad koga je do danas opstala uklesana tabla jednog legionara. Pripadnik viminacijumske Sedme Klaudijeve legije, verovatno smešten u vojnoj jedinici Lederate, ovu tablu posvetio je Jupiteru. (Симић, Симић 1984: 33).



Slika 124. Tabla rimskog legionara uklesana u stenu od škriljca ispod Ramske tvrđave

Iako je nosilo opšte karakteristike rimskog graditeljstva razvijenog na Apeninskom poluostrvu, rimsko provincijsko graditeljstvo je uvek bilo u skladu sa specifičnim lokalnim prirodnim uslovima kao što su dostupnost sirovina, klima, mogućnost eksploatacije resursa i njihovog transporta, a u slučaju dunavskog limesa, i u okviru društveno-ekonomskih tokova ljudi i robe koji su se uz ovu granicu kretali, na celokupnom prostoru duž koga se prostirao i čije je oblasti reka Dunav međusobno povezivala (Nikolić *et al.* 2023: 1).

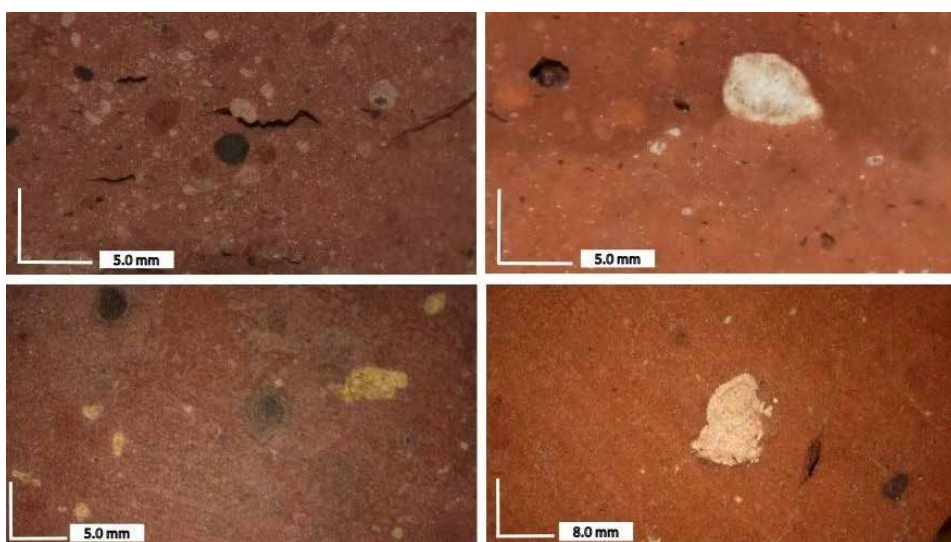
292

Pečena opeka kao dodatak malterima prisutna je u svim lokalitetima dunavskog limesa, a posebno je značajna za različita naučna istraživanja u okvirima predela Viminacijuma (Jevtović *et al.* 2020; Jevtović 2022). Od provincijskog rimskog centra opekarske proizvodnje na Dunavu (Jordović 1994:95; Raičković, Redžić 2006; Jovičić, Milovanović 2017), tradicija izrade opeke se zadržala vekovima u ovom području bogatom glinom (Nikolić *et al.* 2023: 5–6) (**Slika 125**).



Slika 125. Rimski peč iz Viminacijuma (gore levo); peč za tradicionalnu proizvodnju opeke u selu Poljana koja se koristi i danas (gore desno); izrada opeka u radionici u selu Poljana (dole) (privatna arhiva: Emilija Nikolić)

Tokom projekta istraživana je i mogućnost upotrebe crvenke kao specifično lokalnog materijala u malterima Viminacijuma, i jedne vrste prirodnog dodatka sa pucolanskim svojstvima koji je mogao biti korišćen umesto pečene opeke u većim količinama (**Slika 126**). Cilj ovog istraživanja je bilo dobijanje novih saznanja o upotrebi različitih prirodnih materijala u rimskim malterima uopšte, odnosno o načinima na koje su građevinari kroz istoriju prepoznavali svojstva nekarakterističnih materijala koji bi mogli poboljšati karakteristike maltera.



Slika 126. Vizuelne sličnosti između rimskih opeka Viminacijuma (gore) i crvenke (dole) (Nikolić *et al.* 2023: 16, fig. 11)

Nakon završenih laboratorijskih ispitivanja uzoraka istorijskih maltera u okviru projekta *MoDeCo2000* pokazalo se da je naše nenamerno unapred postavljeno *takmičenje* među malterima koji potiču sa različitih lokaliteta (različitog značaja u rimskom periodu) potpuno suprotno onome čemu su rimski graditelji težili u građevinarstvu, posebno kada su u pitanju fortifikacije, kojima pripada većina građevina istraženih tokom projekta. Naime, rimski malteri su uvek spravljani uz veliku ekonomičnost u procesu, uz prethodna planiranja dotoka sirovina, bez *trke za najboljim* materijalima, već uz težnju da se uz lokalno dostupne materijale pripremi najbolja moguća

mešavina kroz prilagođavanje tehnologije izrade, ili, možda bolje rečeno, usavršavanje usvojenih mešavina uz upotrebu različitih lokalno dostupnih sirovina.

5.2 KOMPATIBILNOST I KONZERVACIJA

Jedan od osnovnih aspekata na kojima se zasniva dizajn maltera za konzervaciju jeste njihova kompatibilnost sa istorijskim materijalima, a autori ističu da se ona može postići samo multidisciplinarnim pristupom problemu, kada od valorizacije spomenika do stvarne primene konzervatorskog maltera na licu mesta, svi učesnici svojom stručnošću doprinose proceni potrebnih performansi postavljenih ispred novog maltera. Zajedničkim radom istraživača, arhitekata konzervatora, izvođača i neposrednih izvršilaca radova, kao i predstavnika nadležnih institucija, mora se pristupiti dostizanju kompatibilnosti (Schueremans *et al.* 2011: 4349).

Izrada receptura za konzervatorske maltere kompatibilne onim istorijskim obuhvata više laboratorijskih aktivnosti. Prethodno je potrebno pripremiti osnovne smernice i prioritete na kojima treba bazirati ove recepture, odnosno odrediti opsege u kojima se moraju nalaziti vrednosti različitih svojstava novog maltera. Ovim se opredeljuje izbor veziva, agregata i dodataka malteru, uz stalnu pažnju da su istorijske građevine najčešće nastajale upotrebom lokalnih materijala, odnosno sirovina, a da su u izuzetnim slučajevima povezanim sa funkcijom građevine, ili statusom investitora, materijali dopremani sa udaljenih mesta. Prilagođavanje aktivnosti dostupnim lokalnim sirovinama kroz istoriju građevinarstva svih naroda i u svim regionima sveta predstavljalo je uobičajen način razmišljanja. Da li je na isti način moguće delovati u procesima arhitektonske konzervacije? Do koje *dozvoljene mere* nadogradnje tradicionalnih graditeljskih znanja, pomoću savremene nauke, mogu ići konzervatori kako bi se ovo vredno nematerijalno nasleđe sačuvalo?

Rezultati ispitivanja istorijskih maltera upotrebljivanih uz deo dunavskog limesa u Srbiji, tokom projekta *MoDeCo200*, nakon poređenja sa onima izvršenim na uzorcima koji potiču iz građevina podizanih na drugim teritorijama nekadašnjeg

Rimskog carstva (istraživanjem dostupne literature), pokazali su sličnosti u tehnologiji pripreme maltera, zavisnost odabira sirovina od lokalnih materijala i postojanje modifikacija u skladu sa ovim odabirom (Ilić *et al.* u pripremi). Modeli maltera za konzervaciju su tokom projekta *MoDeCo2000* pripremani uz upotrebu lokalnih sirovina i primenjeni upotrebom tradicionalnih tehnologija. Međutim, rezultati aktivnosti su pokazali da je pored održavanja tradicije tokom konzervacije spomenika potrebno unaprediti i testirati mešavine maltera u skladu sa uslovima konkretne spoljne sredine u cilju njihove trajnosti, ali u skladu sa načinima prezentacije strukture, i tako uticali da se u niz projektnih eksperimenata sa modelima maltera uvedu i materijali koji su kompatibilni istorijskim materijalima, ali nisu tradicionalno upotrebljavani. Međutim, primena ovih materijala u konzervatorskim mešavinama mora biti izvedena uz veliku pažnju, jer često malteri primenjeni kao primereni za konzervaciju u jednom periodu, mogu postati neadekvatni u nekom narednom vremenu tokom trajanja maltera, usled nedovoljno istraženih spoljnih uticaja ili izmene načina upotrebe građevine, posebno zato što nisu u potpunosti naučno spoznati svi procesi koji se tokom protoka vremena dešavaju u malteru i koji se i danas istražuju (Jackson *et al.* 2013; Seymour *et al.* 2021).

Priprema malterskih mešavina zahteva i niz njihovih laboratorijskih ispitivanja u cilju provere da li njihova svojstva zadovoljavaju definisane opsege, da li su kompatibilni sa istorijskim malterom, i kako bi se ocenilo njihovo ponašanje tokom primene, i trajnost nakon nje. Što se tiče primene maltera, potrebno je pripremiti mešavinu zadovoljavajuće obradivosti za predviđenu namenu. Ovo se postiže ispitivanjem konzistencije svežeg maltera i optimizacijom količine vode koja se dodaje malteru kako bi se postigao definisani kriterijum. Tako pripremljen malter se nakon očvršćavanja podvrgava ispitivanjima koja nam daju podatke o njegovoj kompatibilnosti sa istorijskim malterom, ali i trajnosti. Isputuju se fizičko mehanička svojstva, odnosno zapreminska masa, poroznost, kapilarno upijanje vode, čvrstoća pri pritisku i savijanju i dr. Prema potrebi i zahtevima projekta konzervacije mogu se sprovesti i ispitivanja adhezije maltera *pull-off* metodom

za elemente za zidanje predviđene za datu građevinu. Ispitivanje ovog svojstva se sprovodi uglavnom kod maltera za malterisanje, ali je retko primenjivano kod maltera za zidanje, iako može biti veoma važno. Za maltere za zidanje je nekada potrebno uraditi i ispitivanje čvrstoće pri smicanju između maltera i elementa za zidanje. Za maltere za malterisanje je pored napred navedenih parametara nekada potrebno uraditi ispitivanja paropropusnosti i toplotne provodljivosti, u zavisnosti od mesta primene i vrste elemenata za zidanje koji se koriste. Pored navedenih ispitivanja potrebno je izvršiti ispitivanje kontaktne zone između starog i novog maltera kako bi se procenila njihova hemijska, ali i fizička kompatibilnost. Ispitivanja očvrsljih maltera se mogu vršiti na uzorcima koji su prošli starenje u standardnim laboratorijskim uslovima, ili na onim koji se izlažu različitim uslovima prilikom tzv. veštačkog starenja. Uzorci mogu proći kroz cikluse smrzavanja i odmrzavanja ili zagrevanja i kvašenja, kako bi se što približnije simulirali uslovi kojima će malter biti izložen nakon ugradnje, i tako ocenila njihova trajnost. Predloge za pripremu konzervatorskih maltera je pre konzervacije potrebno proveriti njihovom primenom: na manjim eksperimentalnim površinama u spoljnim uslovima u okviru laboratorije, kao i pored samih spomenika, a zatim i na originalnim zidovima građevine. Tek nakon praćenja i ocene uspešnosti primene mogu biti donete odluke o eventualnim ili neophodnim korekcijama određene recepture i konačno usvojiti ona koja je najpovoljnija za datu građevinu ili njenu pojedinačnu strukturu. Kvalitet komponenata maltera, kao i samog maltera, potrebno je pratiti u fazi njegove pripreme na terenu, odnosno zanatskog izvođenja radova, u cilju prevencije eventualnih neželjenih promena samog maltera u budućnosti.

Proučavajući razlike u metodologiji dizajna maltera za konzervaciju primenjivanoj u naučnim istraživanjima i onoj koja se kasnije koristi u konzervatorskoj praksi, preko više studija slučaja, istraživači su zaključili da u okviru projekta konzervacije predlog kompatibilnog maltera uglavnom nastaje nakon uzimanja uzoraka i laboratorijskih ispitivanja u cilju karakterizacije originalnog maltera, a zatim se u okviru tehničke specifikacije on propisuje za potrebe praktičnih radova (Schuere-

mans *et al.* 2011: 4348). Nažalost, kako dalje pišu, naknadna procena konačnog rezultata konzervacije često se oslanja samo na vizuelnu inspekciju, dok se provera stvarnog sastava maltera korišćenog u okviru radova retko vrši, iako bi tek uzimanjem uzoraka primenjenih konzervatorskih maltera trebalo na kraju proceniti stvarnu kompatibilnost. Zapažaju da je tokom naučnih istraživanja maltera fokus na potrazi za fizičko-mehaničkom, hemijskom i mineraloškom kompatibilnošću, dok se tokom praktične primene javlja samo povećana zainteresovanost za vizuelne osobine maltera. Nabrajaju i brojne druge probleme u vezi sa primenom predloga iz laboratorije i kabineta na terenu. Naime, sastav konzervatorskih maltera je izražen tokom istraživanja u masenim odnosima, dok se u zanatskoj praksi uglavnom koriste zapreminski odnosi, pa se mora paziti da oni budu usklađeni. Takođe, u praksi se često u cilju dostizanja bržeg vezivanja nekritički koriste dopunski savremeni materijali koji zatim dovode do hemijske nekompatibilnosti. Na kraju, adekvatno iskustvo zidara, koje nekada može nedostajati, ima izuzetan uticaj na uspešnu primenu propisanog maltera.

Postupak adekvatne pripreme maltera za arhitektonsku konzervaciju je dugotrajan, što ukazuje na potrebu blagovremenog planiranja neophodnih radova, kako bi bilo dovoljno vremena za svaki korak pripreme i ispitivanja novih maltera u cilju potvrđivanja njihove kompatibilnosti sa originalnim malterima i ugrađenim elementima za zidanje. Nažalost, često ovo nije slučaj, a probne mešavine maltera se pripremaju i primenjuju uporedo sa izvođenjem radova, što se ponekad može ozbiljno odraziti na stanje istorijskog tkiva, a u najgorim slučajevima i na stabilnost jedne strukture, ili čak celokupne građevine. Takođe, koja god procedura da se odabere, uvek je potrebno adekvatno snimiti sve njene korake. Potrebu kompatibilnosti novih i starih materijala u konzervaciji i jasnog dokumentovanja postupaka obrazložio je i pre više od četiri decenije, apelom na oprez, brigu o specifičnostima primene novih materijala na starim konstrukcijama i originalnim materijalima, kao i na precizno čuvanje tačnih podataka o svim primenjenim materijalima i praćenje njihovog kasnijeg ponašanja, na „radilištu, toj prirodnoj laboratoriji”, Mihailo

Vunjak, hemičar i tadašnji rukovodilac fizičko-hemijske laboratorije Narodnog muzeja u Beogradu (Буњак 1978: 14).

U procesima pripreme receptata konzervatorskih maltera uz tradicionalne sirovine često se upotrebljavaju i dodatni materijali koji poboljšavaju otpornost novih maltera na različite spoljašnje uticaje. Ovi uticaji mogu biti posledica aktivnosti savremenog doba koji nisu postojali u prošlosti, a kojima je istorijska građevina izložena danas, što je posebno važno kod očuvanja zidova koji su imali spoljne zaštitne slojeve, odnosno malterne ili druge obloge, a koji nisu očuvani do danas, pa je konstrukcija nezaštićena.

Zidovi istorijskih građevina su većinom bili omalterisani ili čak samo okrečeni, čime je bila zaštićena njihova noseća struktura, a same građevine su najčešće imale krovne konstrukcije. U slučaju da su se do danas ove građevine očuvale u obliku ruševina izgubivši tokom vekova svoju inicijalnu upotrebnu funkciju pa i eventualne krovne konstrukcije, ovi zidovi su često ogoljeni ili imaju delimično očuvane spoljne obloge, i potpuno su izloženi spoljnim uticajima. Iako bi ponovno malterisanje ili krečenje (uz neophodnost stalnog održavanja) ove zidove zaštitilo, nekada bi moglo predstavljati aktivnost kojom bi se izazvalo očuvanje autentičnosti nasleđenog istorijskog tkiva. Svaki pojedinačni slučaj se stoga mora razmatrati u širem kontekstu i nakon toga se donosi odluka o tome da li će se pristupiti ponovnoj izradi spoljnih zaštitnih slojeva zidova. Što se tiče građevina iz daleke prošlosti kao što je antika, obnova spoljnih premaza ili fasada ukoliko su postojale, možda i samih krovova, predstavljala bi ujedno i izuzetno neizvestan proces sa mnogo nepoznatih ulaznih podataka. Osim zaštite ovih građevina različitim pokrivnim konstrukcijama, čime dodatno možemo izazvati ili povrediti autentičnost i integritet građevine, moguće je primeniti konzervatorske maltere otporne na spoljne uticaje za spojnice, a dodatno zaštititi osetljive gradivne elemente različitim preparatima. S druge strane, veliki broj istorijskih zidova od kamena verovatno nije imao nikakvu spoljnu zaštitu, pa su upravo malteri za izradu spojnica ili zidanje tokom vremena najviše stradali i propadali. Malter je uvek nosio ulogu žrtvenog materijala tokom istorijskog trajanja, pa je tako i danas kod procesa konzervacije. Materijal čiju autentičnost često moramo žrtvovati u cilju zaštite tkiva

jedne istorijske građevine, prekrivajući ga nekim novim, upravo je istorijski malter. Međutim, osim što izradom novih spojnica pokrivamo, odnosno menjamo stare maltere, dolazimo i do drugog problema u vezi sa novim malterima, jer se ispred njih postavljaju viši zahtevi nego što su postojali za one istorijske, a u vidu veće trajnosti i otpornosti na spoljne uticaje. Često se prema istorijskim građevinama ne odnosimo kao prema onima u kojima živimo ili radimo, a koje zahtevaju stalno i često održavanje, jer nemaju istu upotrebnu vrednost, čije nas očuvanje uglavnom i vodi kod brige o savremenim građevinama. Nažalost, usled toga se često konzervatorsko rešenje zaštite građevina ponudi kroz upotrebu trajnih, ali uglavnom nekompatibilnih materijala. Tako se u iskrenoj želji za očuvanjem oštećene istorijske strukture, ali i u želji da se ona što lakše održava u budućnosti, mogu izazvati dodatne štete koje u najgorem slučaju dovode do gubitka istorijskog tkiva (**Slika 127**). Ovde nauka, kroz ispitivanja karakteristika starih, i davanje preporuka za odabir i primenu novih materijala, uz spoznaju njihovih međusobnih uticaja, postaje neizbežan akter u planiranju izuzetno kompleksnih praktičnih procesa tehničke zaštite istorijskih građevina.



Slika 127. Restauriran zid i spojnice u istorijskom tkivu izvedeni nekompatibilnim cementnim malterom pre više decenija

Potrebno je podsetiti se da je često nemoguće ispuniti sve unapred postavljene uslove različitih vidova kompatibilnosti. U okviru plana konzervacije građevine neophodno je odrediti čemu težimo, koje zahteve kompatibilnosti možemo ispuniti i u kojoj meri, uz svest da ispunjenje jednog zahteva može uticati na nivo ispunjenja drugog (Schueremans *et al.* 2011: 4348). Univerzalni recept za pripremu jedinstvenog konzervatorskog maltera za sve tradicionalne građene strukture ne postoji i svaka od njih zahteva detaljnu analizu upotrebljenih istorijskih materijala, a u ukupnom procesu je neophodno da podjednako učestvuju nauka, konzervatorska i zidarska struka.

Tradicionalne pripreme maltera za konzervaciju decenijama su promovisale međunarodne organizacije tradicionalnih zidara, ali ih tek u poslednje vreme sve više prihvataju i istraživači i konzervatori. Upravo je očuvanje zidarskog zanata, i ujedno nematerijalnog nasleđa, bilo jedna od važnih tema projekta *MoDeCo2000* i promovisano kroz završnu radionicu projekta. Kroz svaki korak poduhvata, koji svakako predstavlja arhitektonska konzervacija bilo koje istorijske strukture, neophodna je stalna saradnja nauke, struke i prakse, odnosno istraživača, konzervatora i majstora, u kojoj je podjednako važno znanje i iskustvo svakog učesnika, kako bi se zaštitile i očuvale na samo materijalne već i nematerijalne vrednosti jedne istorijske građevine.

Istraživači se trude da kroz laboratorijska ispitivanja istorijskih materijala, daju što adekvatnije predloge izrade i primene materijala tokom konzervacije. Međutim, često se probe koje su bile uspešne u laboratoriji na samom terenu pokažu kao teže primenjive. U stalnoj potrazi za poboljšanjem konzervatorskih mešavina, bez obzira na sva saznanja o spoljnim uslovima kojima je struktura bila izložena nekada i danas, često se pitamo kako je moguće da su ljudi kroz istoriju uspevali da naprave trajne krečne maltere koji su izdržali vekove, dok se danas čini da je to veoma teško izvesti. Dolazimo uglavnom do zaključka da je pored same kompozicije maltera podjednako važan način njegove pripreme i primene, pa je rad majstora možda najdragoceniji u čitavom procesu arhitektonske konzervacije. Jan Kramb (Ian Cramb, 1928–2013), jedan je od zidara koji je svoje praktično

iskustvo podelio i kroz pisanu reč. Prema njemu, „... radeći na restauraciji ovih starih građevina, vraćate se u njenu istoriju, učeći tajne načina gradnje i upotrebljenih maltera”, a rad zahteva „poznavanje tradicionalnih metoda gradnje, strpljenje (to je dugotrajan posao), oprez (može biti opasan), a pre svega zdrav razum...” (Cramb 2021: 91). Slično je pisao i Mihailo Vunjak, pozivajući na primenu „zdravog razuma” i „zdrave neimarske logike za koju sami spomenici često nude već gotove i vekovima isprobane rezultate” (Буњак 1978: 14).

5.3 ZNAČAJ ISTRAŽIVANJA ISTORIJSKIH MALTERA I PROJEKTA *MoDeCo2000*

Projekat *MoDeCo2000* obuhvata multidisciplinarno istraživanje maltera iz doba rimske dominacije na teritoriji nekadašnjeg dunavskog limesa u Srbiji, pružajući veliki broj dragocenih podataka koji u budućnosti mogu pomoći u donošenju zaključaka o eksploataciji, transportu, obradi i upotrebi mineralnih i drugih sirovina u cilju dobijanja građevinskih materijala, a samim tim i o ekonomiji, trgovini i svim vrstama materijalnih i nematerijalnih veza među ljudima unutar jedne, ali i između više međusobno udaljenih teritorija u predmetnom periodu. Kroz više publikacija, kao i kroz ovu koja je pred nama, predložene su smernice za moguću pripremu zvanične metodologije ispitivanja istorijskih maltera u Srbiji i dizajn njima kompatibilnih maltera za konzervaciju, koja uz već postojeće postupke ispitivanja koji se vrše u nadležnim institucijama zaštite može iznedriti deo neke buduće nacionalne strategije za arhitektonsku konzervaciju. Kroz projektne aktivnosti povezana je praktična konzervacija koja je u Srbiji uglavnom prepoznata kao isključivo stručna i profesionalna veština ili zanat, sa naučnim istraživanjima iz okvira osnovnih i primenjenih nauka.

Čitajući Emilijana Josimovića, čini se da prepoznamo Vitruvijeve reči. Josimovićeve *dugovečnost, udobnost i lepotu* kao osobine „savršenog zdanja” (Јосимовић 1860: 11) povezujemo sa Vitruvijevim osobinama čvrstoće (*firmitas*), svrhe (*utilitas*) i lepote (*venustas*), na koje se mora paziti tokom gradnje. „O čvrstoći se vodi računa kad se temelji kopaju

do tvrde osnove, a materijal se za gradnju odabere brižljivo i bez škrtosti" (Vitruvije 1951: 1.3). Dugovečnost zdanja je, kako je pisao Josimović, zasnovana na statičkim zakonima i iskustvima, a postiže se postojanjem dobrog temelja, dobre međusobne veze između delova zgrade, zasnovanosti na statičkim zakonima i „građi koju imamo pri ruci za upotrebu“, „strogim i savesnim ispunjavanjem svih, naukom i iskustvom dokučenih pravila samog građenja; jer su mnogo puta prenebregnute male pogreške uzroci velike štete i nesrećnih događaja" kao i „dobrom, postojanom građom; zbog čega je tačno poznavanje građe za svakoga, koji što, ili sam sa sobom, ili posredno gradi, jedna od najprećih potreba" (Юсимовић 1860: 11–12).

Veliki broj građevina iz rimskog perioda nestao je u rušenjima i osvajanjima kroz istoriju, tokom prirodnih katastrofa ili razgradnje koju su vršili novi stanovnici predela. Međutim, najveći broj njih danas ne postoji jer nije odoleo protoku vremena, a primenjeni materijali, među njima i malteri, nisu uspeli da opstanu u svom prvobitnom obliku do danas. Svedoci smo trajanja i jednog broja monumentalnih rimskih građevina u periodu i do dve hiljade godina (čiji pak određen nivo oštećenja usled vekovnog trajanja svakako mora postojati, iako na prvi pogled to ne sagledavamo), među kojima je najviše onih nastalih upotrebom rimskog betona uz prisustvo vulkanskih materijala. Upravo one bude najviše interesovanja kod istraživača rimskih maltera. Ove građevine su uglavnom bile deo urbanih sredina Rimskog carstva nad kojima su kasnije nikla nova naselja i u čije su tkivo one uključene, nekada kroz prenamenu, a nekada kroz rekonstrukciju, odnosno kroz jednu vrstu održavanja, tako bez rušenja opstavši u jednom ili drugom obliku. Najpoznatiji primer je Panteon u Rimu, koji je pak u prvim vekovima imao burnu istoriju. Prvobitno je izgrađen u III deceniji pre nove ere, zatim je goreo 80. godine nove ere, da bi nakon obnove, ponovo bio paljen. Arhitektonski oblik koji danas poznajemo dobio je u celini u trećoj deceniji II veka nove ere u vreme cara Hadrijana, nakon čega je sa mnogo kasnijih izmena u enterijeru i spoljnoj dekoraciji i uz održavanje hrišćanske crkve, ostao sačuvan do današnjeg dana (Wilson Jones 2009: 177–178, 190–191). Kupola građevine koja se uglavnom smatra delom arhitekta Apolodora iz Damaska (Marder, Wilson Jones 2015: 23; Wilson

303

Jones 2009: 192–193) izgrađena je od rimskog betona. Sve do nastanka Brunelleskijeve firentinske katedrale imala je najveći raspon među svim kupolama, ali i danas drži rekord u najvećim rasponima kupola od nearmiranog betona (Wilson Jones 2015: 193) (Slika 128).



Slika 128. Panteon, Rim (privatna arhiva: Emilija Nikolić)

Čuveni Le Korbizje (Charles-Édouard Jeanneret, Le Corbusier, 1887–1965) u razgovorima sa studentima preneo je svoje viđenje *prave* prirode arhitekture, definišući je duhovnim vrednostima koje dolaze iz svesti, i tehničkim faktorima koji omogućavaju realizaciju ideje, dajući objektu snagu, efikasnost i izdržljivost. Svest opisuje kao zavisnu od karaktera i povezuje je sa unutrašnjim osećanjem. Opisujući dalje tehničke faktore, on ih povezuje sa tehnologijom, koja se ogleda u čovekovom uspostavljanju kontakta sa sopstvenom okolinom, a rezultat je proučavanja i vezana je za stručno znanje zasnovano na razumu i ličnoj darovitosti (Le Korbizje 2013: 46). Koliko je afirmativnih opisa koji povezuju čoveka sa terminom tehnologije sadržano u njegovim rečima! *Razum, lična darovitost, stručno znanje, kontakt sa okolinom* – upravo nam govore o tome šta se sve nalazi u osnovi praktičnosti i trajnosti građevinskih konstrukcija, savremenih i istorijskih.

Međutim, i pored toga što pomenuti vulkanski materijali nisu bili dostupni na svim teritorijama Rimskog carstva, smeće građevinske strukture su nastajale, na različitim mestima, uglavnom uz upotrebu krečnih maltera sa uobičajenim sastojcima u vidu nehidrauličnog kreča i rečnog agregata, kakav je bio i najveći broj ovih maltera kroz istoriju. Trajanov most, koji je projektovao arhitekta koga povezuјemo sa Panteonom, Apolodor iz Damaska, izgrađen od 103. do 105. godine nove ere, bio je ukupne dužine od 1130 m. Ne zna se tačno kada je most uništen, odnosno da li je to bila posledica carske odluke ili uticaja prirode (Гарашанин, Васић 1980: 8, 16; Mirković 1986: 112–113; Gušić 1996: 259–260; Merhotra, Glišić 2015; Bjelić 2020: 23). Na srpskoj i rumunskoj obali danas su vidljivi ostaci po četiri zidana stupca prilaznih sekcija mosta, a oni najbliži reci su opstali u najvećoj meri, pa je stubac u Srbiji sačuvan do visine od nešto više od 8 m. Zidani stupci sa platformama koji su nosili gornju drvenu konstrukciju u reci održali su se vekovima, u manjoj ili većoj meri očuvanosti, sve do danas, o čemu svedoče zapisi i crteži putopisaca, kao i savremena podvodna istraživanja (Гарашанин, Васић 1980: 6; Каниц 1989: 488–489; Катанић 1958; Karović, Nenadović 2014: 95–97; Unković *et al.* 2023: 148). (Slika 129).

305

Najveći broj rimskih građevina, i to uglavnom onih nastalih na granicama Carstva, usled ljudskih aktivnosti i neizbežnih prirodnih procesa, nije doživeo savremeno doba i sačuvane su eventualno u temeljnim zonama. Isprekidani niz tragova graditeljskih aktivnosti na granicama Rimskog carstva pred-



Slika 129. Ostaci Trajanovog mosta na srpskoj obali Dunava danas (gore); idealna rekonstrukcija mosta (dole – Bjelić 2020: 36)

stavlja upravo dunavski limes u Srbiji, koji je i pored diskontinuiteta, izuzetan kulturni i istorijski predeo iz koga savremena arheološka nauka i nauka o materijalima, ali i konzervaciji, mogu crpiti neprestano nova saznanja.

Rezultati istraživanja sprovedenih tokom projekta *MoDeCo2000* mogu biti deo složene baze rimskih maltera kao i drugih tradicionalnih materijala i sirovina korišćenih na teritoriji današnje Srbije kroz celokupnu istoriju građevinarstva. Ova baza bi bila izuzetno važna kako za istraživače istorijskih i savremenih istorijskih materijala, tako i za konzervatore koji se staraju o spomenicima. Prilikom pregleda dostupne literature, može se приметiti da istraživanje istorijskih maltera, kroz prostorni obuhvat jedne šire teritorije i vremenski opseg od više vekova, nije sprovedeno ni u susednim državama kroz čije teritorije se takođe proteže dunavski limes. U Grčkoj su pak istraživači Laboratorije za građevinske materijale Aristotelovog univerziteta u Solunu, podatke o istorijskim malterima koji potiču sa teritorije današnje Grčke i pripadaju vremenskom opsegu od IV veka pre nove ere do XX veka, sakupljane tokom više od dvadeset godina ispitivanja ovog materijala, organizovali u internu bazu podataka sa mogućnošću komparativne analize, odnosno poređenja svojstava ispitanih maltera prema odabranim kriterijumima – vrsti, istorijskom periodu, građevinama i dr. Ukupno nešto više od 3000 uzoraka istorijskih maltera dobilo je svoje mesto u bazi za koju se istraživači nadaju da će biti umrežena kroz slične buduće baze istorijskih građevinskih materijala u drugim državama (Papayianni, Pachta, Iliadou 2008; Pachta, Pappayianni 2016). Nadamo se da će skup rezultata projekta *MoDeCo2000* predstavljati dobru osnovu da se ovakva baza formira i u Srbiji i naravno postane deo jedne buduće međunarodne baze čija će uloga biti dragocena, kako u nastavku naučnih istraživanja istorijskih maltera, tako i u konzervaciji spomenika. Nadamo se, takođe, da će ona uključiti i rezultate već sprovedenih naučnih ispitivanja istorijskih maltera u Srbiji, među kojima su i ona vezana za period od I do VI veka (Nikolić, Bogdanović 2012; Рогоћ 2014; Topličić-Ćurčić *et al.* 2014; Kalamković 2015; Nikolić *et al.* 2016; Momčilović-Petronijević *et al.* 2018; Nikolić, Rogić 2018; Stanković *et al.*

2019; Франковић, Игњатовић 2021; Vučetić *et al.* 2022b; Momčilović-Petronijević *et al.* 2022; Nikolić *et al.* 2023; Delić-Nikolić *et al.* u štampi). Veliki broj ispitivanja istorijskih građevinskih materijala, pa i maltera, sprovode decenijama saradnici nadležnih zavoda za zaštitu spomenika kulture i muzeja u Srbiji, a posebno u okviru Republičkog zavoda za zaštitu spomenika kulture. Prva hemijska laboratorija ove institucije osnovana je još 1949. godine (Вуловић 1956: 195), a uz kasniji razvoj u fizičko-hemijsku laboratoriju, do danas je u njoj sproveden izuzetno veliki broj analiza u cilju konzervacije spomenika i umetničkih dela širom današnje Srbije, nekadašnje SFRJ, ali i u inostranstvu (Republički zavod za zaštitu spomenika kulture – Beograd 2022). Nadamo se da će dragoceni rezultati istraživanja ovih institucija zaštite takođe kroz nacionalnu bazu moći da budu povezani sa drugim istraživanjima istorijskih maltera u Srbiji i podacima dobijenih tokom projekta *MoDeCo2000*, čime će se ostvariti neophodna veza između naučnih i primenjenih istraživanja iz oblasti arhitektonske konzervacije, ali i izbeći ponavljanje uzorkovanja maltera sa samih spomenika – za potrebe istraživanja ili praktične konzervacije.

Na osnovu svih prikupljenih podataka dobijenih tokom ispitivanja istorijskih maltera, kao i testiranja modela maltera za konzervaciju u laboratorijama i njihove primene na terenu kroz projekat *MoDeCo2000*, tokom budućih planova konzervacija pojedinačnih građevina dunavskog limesa na teritoriji Srbije, biće olakšano donošenje odluka o pripremi i upotrebi maltera u praksi. Zato rezultati projekta *MoDeCo2000* mogu biti i doprinos obimnom nominacionom dosijeu koji trenutno izrađuju Arheološki institut i Republički zavod za zaštitu spomenika kulture, za napred pomenuto dobro *Granice Rimskog carstva – Dunavski limes u Srbiji* i Uneskovu listu svetskog nasleđa. Projekat dosijeu može pružiti važan pisani segment o ispitivanju istorijskih maltera i razvoju njima kompatibilnih konzervatorskih maltera za dunavski limes, i tako međunarodnim organizacijama iz oblasti zaštite kulturnog nasleđa dodatno pokazati spremnost naših institucija da buduće praktične procese na spomenicima limesa vrše u skladu sa međunarodno usvojenim dokumentima iz oblasti očuvanja graditeljskog nasleđa

i primene materijala, istovremeno prateći savremene tokove nauke o konzervaciji.

Prema Konradu van Balenu, Venecijanska povelja, doneta 1964. godine (ICOMOS 1964), prihvata samo jedan pristup očuvanju, a ujedno je i dvosmisljena, jer je njen osnovni cilj koncept kontinuiteta, održavanja i očuvanja, uz istovremenu promociju koncepta diskontinuiteta, podstičući upotrebu savremenih tehnika u arhitektonskim intervencijama i potrebu da se pokaže razlika između originalnog i restauriranog dela građevine. Iz ovog raskida sa prošlošću proističe i posledica – gubljenje mogućnosti da se ta ista prošlost iskoristi za razumevanje budućnosti. Nekada se smatralo da je savremeni malter pogodan za izgradnju novih, ali i popravku starih građevina, a danas, iz ponašanja starih materijala, kao što je krečni malter, istraživači uče da razvijaju savremene materijale (van Balen 2003a: 2035–2037). Pored toga, zaštita, odnosno konzervacija istorijskih građevina uz upotrebu tradicionalnih građevinskih materijala podrazumeva i poznavanje tradicionalnih veština potrebnih za njihovu pripremu i primenu (Sandstrom 2008: 118, 120). Nažalost, ove veštine, usled sve manjeg interesovanja mladih generacija za njih, ubrzano odumiru u Srbiji, kao i u Evropi uopšte. Istraživanja nekih specifičnih tradicionalnih građevinskih tehnologija ukazuju nam na značaj iskustvenih, odnosno praktičnih, često nezabeleženih znanja lokalnih zajednica. Savremene potrebe ovih zajednica bi trebalo da nas upute u načine na koje ova znanja treba sačuvati i zaštititi, ali i načine opstanka znanja kao dela živog kulturnog nasleđa koje može biti važno za njihov društveno-ekonomski razvoj.

Savremena nauka o konzervaciji jedna je od multidisciplinarnih oblasti kojoj je potrebna veća afirmacija u Srbiji. Njena dostignuća stečena u saradnji naučnika i stručnjaka daju neophodne rezultate za praktičnu konzervaciju koja bi trebalo da sačuva građevine, uz adekvatnu upotrebu tehnika, tehnologija i izbor materijala, ali i prirodno okruženje, koje je, između ostalog, ugroženo upravo industrijskom proizvodnjom građevinskih materijala. Zbog ogromnog porasta stanovništva na Zemlji, potrebe za smeštajem, radom i svim drugim ljudskim aktivnostima, postaju sa svakim danom sve veće, što dovodi do ubrzane urbanizacije, ali i nemilosrdne eksploatacije prirodnih

resursa, pa i intenziviranja klimatskih promena. Pokušavajući da odgovori savremenim ljudskim potrebama, građevinska industrija proizvodi ogromnu količinu materijala za sve brže građevinske aktivnosti, tako povećavajući zagađenje. Tako i uticaj aktivnosti koje se sprovedu u cilju zaštite kulturnog nasleđa nekada može biti štetan ne samo za nasleđe, već i za prirodu, s obzirom na način proizvodnje i upotrebe pojedinih materijala u konzervaciji spomenika. S druge strane, same klimatske promene izazvane, između ostalog i prekomernim zagađenjem, utiču i na kulturno nasleđe. Iako je prepoznata kod brojnih istraživača vezanih za nasleđe, njegovu zaštitu i upravljanje u svetu, ova tema nije dovoljno razvijena u naučnoj zajednici Srbije, a gotovo je nepoznata u njenoj široj javnosti. Osim što je neophodna podrška razvoju naučnoistraživačkog rada na temu veze kulturnog nasleđa i klimatskih promena, trebalo bi vršiti i njegovu kasniju promociju i afirmaciju, a politike zaštite istorijskih građevina se moraju razvijati u međusobnoj saradnji nadležnih i istraživačkih institucija, povezanih sa kulturnim nasleđem, ekonomijom, pravom i privredom, industrijom i infrastrukturom, ekologijom i sociologijom, kao i mnogim drugim oblastima.

* * *

Naučno istraživanje maltera u okviru projekta *MoDeCo2000* na prvi pogled je veoma praktično i obuhvata veliki broj laboratorijskih analiza uzoraka koje daju numeričke rezultate. Iako ovi rezultati nekada nisu kompletni i dovoljni za željeni nivo interpretacije, oni su uvek konkretni. S druge strane, tema projekta je u svojoj osnovi humanistička, a rezultati egzaktnih istraživanja kod ovakvih tema nisu dovoljni da se dobiju traženi odgovori u vezi sa istorijom i arheologijom. U okviru radionice projekta *MoDeCo2000* na arheološkom nalazištu Viminacijum pod imenom *Science for Conservation of the Danube Limes* u leto 2022. godine okupili su se istraživači istorijskih materijala – geolozi, hemičari, biolozi, tehnolozi i fizičari, ali u društvu arheologa i istoričara umetnosti, arhitekata, konzervatora restauratora i zidara. Ova šarolikost struka i profesija koja je nekoliko dana činila radionicu kompaktnom i celovitom izraz je onoga što je napisano u uvodu publikacije radionice. „...Nekada,

tokom iskopavanja obrušenog zida, arheolog pronade zidarsku mistriju, koju je slučajno tu ostavio graditelj zida iz prošlosti. Da li je ona važniji trag za otkrivanje saznanja o nastanku zida nego odnos veziva i agregata u korišćenom malteru? Možemo li je podići i zamisliti ruke koje su kombinovale šarena zrna agregata sa zemljom, gipsom, krečom ili cementom?" (Nikolić, Jovičić 2022: 9). Zaista, da li je tema istraživanja maltera celovita ako je njen jedini cilj otkriti što više informacija o njihovom sastavu? Da li je potraga za tragovima ruku zidara, odnosno za načinom na koji ih je on koristio dok je nanosio malter između dve opeke važna u ovom procesu ili je to neki *drugi deo* nauke, *samo* istorija, i kakvu veze to saznanje ima sa našim praktičnim radom na terenu i radom u laboratoriji? Na odgovor bi nas možda mogao inspirisati i Jan Kramb, koji, iako pomalo romantično, pokazuje vezu između zidara iz istorije i zida koji je stvorio, a u kome se danas kriju dragocena znanja i veštine koje bi trebalo da spoznamo.

„Stari kameni zid može otkriti mnoge tajne. Njegovu starost, i otprilike kada je građen, možete utvrditi po malteru koji je korišćen, po tehnici zidanja, a posebno po malternim ispunama u srcu zidova. Možete čak saznati i kakvo je bilo raspoloženje zidara... Dok se krećete po stopama prvobitnog zidara... podižete isti kamen koji je on podigao kada je sagradio ovaj zid stotinama godina ranije. Ako, dok radite, duboko razmislite o bilo kom problemu koji biste mogli imati, možda je i on to uradio. Uz malo razmišljanja o tome kako je on mogao izgledati, kakav je čovek bio, otkrićete da bi stari zidar mogao da reši vaš problem. Ništa nije nemoguće u građenju kamenom, samo treba da znate kako. Sve je već urađeno pre vas" (Cramb 2021: 91).

Važnost saradnje više struka i disciplina u oblasti konzervacije doneo nam je i jedan rad koji je nastao pre skoro sedam decenija, a koji je napisala Vera Vulović, tehnolog i konzervator tadašnjeg Zavoda za zaštitu i naučno proučavanje spomenika Narodne Republike Srbije, rekavši da „na prvi pogled hemija i umetnost, izgleda, nemaju nikakve veze". Međutim, „kad malo bolje pogledamo vidimo ... da dobro poznavanje materijala omogućava stvaranje dugotrajnih i kvalitetnijih umetničkih

dela, da je pomoć hemije od neocenjive vrednosti pri čuvanju i konzervaciji kulturnog nasleđa, pri utvrđivanju autentičnosti dela, analiziranju, poznavanju tehnika starih majstora...” (Вуловић 1956: 195).

Mnogo toga se može naučiti iz prošlosti kada je u pitanju zaštita prirode, ali i kulturnog nasleđa. Saznanja mogu biti rezultat negativnih iskustava dobijenih iz ljudskih aktivnosti novijeg vremena, ali i pozitivnih odnosa čoveka prema prirodi u daljoj prošlosti. Nadamo se da će naučnici i stručnjaci tokom globalne borbe protiv klimatskih promena, unaprediti postojeće, ali i razviti nove građevinske materijale, uključujući sve više istraživanja o onim istorijskim. Mali doprinos procesu može dati upravo istraživanje istorijskih maltera, u cilju projektovanja konzervatorskih maltera upotrebom tradicionalnih materijala, ali i razvoja savremenih građevinskih materijala, uz veće očuvanje prirodnih resursa, umanj enje zagađenja i promovisanje održivog građevinarstva.

Na pitanje studenata arhitekture koje glasi: „zašto moramo da učimo istoriju ili teoriju arhitekture?“, uz već unapred spreman odgovor: „bićemo arhitekta, a ne teoretičari ili istoričari“, arhitekta, istoričarka arhitekture i njihova profesorka iz Norveške odgovara i daje nam dodatnu potvrdu značaja ispitivanja istorijskih materijala. „Ono što je lepo u proučavanju građevina, teorija i ideja iz prošlosti jeste to što iznenada shvatimo da su stvari bile, i mogu da budu, potpuno drugačije... Tako posmatrano, istorija ima ogromnu snagu kao aktivni svet predstava koji proširuje naše vidike.“ Ona predstavlja „aktivno prisustvo koje ne možemo da isključimo, i ona svemu što gradimo, razmišljamo ili činimo daje dubinu i kompleksnost“ (Vatum 2020: 162–163). Kroz ispitivanje istorijskih materijala i mi shvatamo *da su stvari bile drugačije*. U isto vreme, vidimo da na osnovu saznanja dobijenih iz ovog ispitivanja tokom konzervacije ili proizvodnje nekih novih materijala u savremenom svetu, u cilju zaštite istorijskih građevina, napretka građevinarstva uz očuvanje životne sredine, *stvari mogu da budu potpuno drugačije*. Jedan od istorijskih materijala koji nam nudi dragocene podatke iz prošlosti, često *skoro spremne* za upotrebu u sadašnjosti i budućnosti, upravo je malter.



HISTORICAL MORTARS: FROM CHARACTERISATION TO CONSERVATION

Introduction

Discovered through archaeological excavations as part of simple or complex structures, building materials have not always been considered significant for obtaining valuable information about the past. The largest number of these materials used throughout history, and even today, for the construction activities have a local origin and, at first glance, do not contain valuable information that can be conveyed to us. We especially get this impression when these materials bear no traces of previous use or the traces have not been preserved to this day. However, their research is valuable as well. This especially applies to those materials that are combined with other materials into new ones and, thus, remain visually hidden.

Materials created by combining two or more materials are called composites. One of the oldest and most important materials of this type is mortar. The use of mortar in modern construction is not so different from its historical use, although its roles developed following the emergence of new elements for masonry, and the development of regulations in the field of construction, of environmental protection, the built structures themselves, and their users.

Mortar today is generally viewed as a common technological construction product with established processes of creation and selection of components, given the centuries-old dominance of cement mortars that are simply and quickly prepared and applied on construction sites. However, through researching the preparation and application of traditional earth, gypsum, and lime mortars, as well as the development of the much younger cement mortars, researchers can learn about a large number of aspects regarding the life of a certain place and historical period.

During the research of historical mortars, one should take into account the different contexts in which they were created

and *lived* within one structure, through changes in its properties and its duration. The type and importance of a particular part of the built structure and, more broadly, the structure for the construction of which a certain mortar was used, make up a part of its archaeological context, while its role in the structure part itself and, indirectly, in the structure, represents the architectural-construction (constructive) context. The process of degradation of mortar and the surrounding material during the life of a structure depends on the context of the environment in which the structure is located, as well as the context of the structure's use. We define the composition and method of making mortar as the technological context related to its creation, and it necessarily includes the natural-geological context related to the origin of the raw materials used for its preparation. If, on the other hand, we are looking for answers related to the organisation of the selection and exploitation of raw materials, their transport, and the processes on the construction site during the production and application of mortar, we must connect the aforementioned contexts to obtain a broader, socio-economic context. This context, along with various events, some of which are directly related to the construction of the built structures of an entire settlement, or the arrangement of a territory, as well as their destruction or the dying out of life within them, provides the broadest, historical context.

By interlinking the research of the mortar of several built structures in one region, the area in which they are located or to which they gravitated in the past becomes extremely important; so the research leads us to possible routes of material transport, the economy, and connections between distant areas. The isolated specificities in the properties of individual mortars then become less important, and what is common to the mortars of one structure is further compared with the data obtained in the same way by researching the mortars of another structure, with which the previous structure is connected through a certain aspect. Mutual similarities of mortars further lead us to the connection of the technological, i.e., craft processes used for their creation, which is especially important when they belong to different territories, which can further lead to tracing

the origin of the raw materials used. The characterisation of geological building materials and raw mineral materials used for the production of mortar can lead to conclusions about the methods of their exploitation, transport, and use throughout history in one or more areas. By studying mortars that originate from different historical periods, it is possible to follow the development of the technology of their production through the centuries in one spatial framework. All findings further open the way to the study of the socio-economic aspect of research, physical and spiritual connections between spaces.

Through the *Mortar Design for Conservation - Danube Roman Frontier 2000 Years After (MoDeCo2000)* project, examinations were carried out on historical mortars used from the 1st to the 6th century AD for the construction of military fortifications and buildings, civil buildings, city ramparts, a bridge, and sacral structures in the part of the territory of today's Serbia connected with the Danube river, to obtain scientific knowledge about their composition and production technology, as well as to apply this knowledge in the practical processes of architectural conservation. The sites belong to the property named *Frontiers of the Roman Empire – Danube Limes (Serbia)*, currently on a UNESCO tentative list.

The Danube Limes on the territory of today's Serbia in the period from the 1st to the 6th century AD stretched from Neštin to Radujevac, including two large military fortifications for the accommodation of legions, namely *Singidunum* (Belgrade) and *Viminacium* (the village of Kostolac), as well as medium-sized or smaller military fortifications that served to house parts of legions or auxiliary units. Over time, civilian and military settlements, agricultural farms, and necropolises developed in the vicinity of the fortifications, which thus became an inseparable part of the Limes.

Twenty-two archaeological sites and cultural monuments were included in the *MoDeCo2000* project. The choice of research sites within the project was limited, that is, it included those sites whose built structures are available to researchers today. In addition to the twenty-one sites on the right bank of the Danube, the project also includes the archaeological site of *Sirmium* (Sremska Mitrovica), whose exceptional importance

in the Roman period led to the construction of imperial buildings there, but whose construction certainly influenced nearby Limes sites. Also, to follow the development of mortar production technology through the centuries, mortars belonging to structures from the 12th century - Braničevo in the village of Kostolac, and the 15th century - Ram Fortress in the village of Ram, both near *Viminacium*, were sampled. The largest number of samples originate from *Viminacium*, and they belong to built structures dated to the 1st, 2nd, 3rd, 4th, and 6th centuries. As part of the cooperation with researchers from the field of archaeology in Serbia, and to support the project idea of establishing a national collection of mortar samples for the needs of future research and conservation, several samples collected during earlier archaeological research, i.e., protective excavations (*Sirmium* and *Castra Tricornia* - Ritopek), were included in the project data set. The only mortar sample reliably dated to the 5th century comes from a building at the archaeological site of *Sirmium*. The site of *Egeta* II, until recently broadly dated to the period from the 1st to the 6th century AD, during the most recent archaeological excavations carried out after sampling was nevertheless determined to be from the 11th century, and so it unexpectedly found its place in the collection of mortar samples originating from a total of twenty-five sites as another sample belonging to the Middle Ages.

The mortar samples researched during the *MoDeCo2000* project originate from the following sites: *Sirmium* (Sremska Mitrovica), *Ad Herculae* (Čortanovci), *Acumincum* (Slankamen), *Singidunum* (Beograd), *Castrum Octavum* (Višnjica), *Castra Tricornia* (Ritopek), Late Roman tomb (Brestovik), Aureus Mons (Seone), *Margum* (Dubravica), Braničevo – Todića crkva (Village of Kostolac), *Viminacium* (Village of Kostolac), Ram Fortress (Ram), *Lederata* (Ram), *Cuppae* (Golubac), Golubac Fortress – "Roman House" (Golubac), *Castrum Novae* (Čezava), *Gerulata* (Miroč), Diana (Karataš), *Pontes* – with Trajan's Bridge (Kostol), Glamija I (Rtkovo), *Egeta II* with *Egeta III* (Brza Palanka), *Mora Vagei* (Mihajlovac), *Aquae* (Prahovo), and Četaće (Radujevac).

Locally available natural materials have always been the basis for the development of all human activities, including

construction. Applied building and masonry techniques depended on them, but they also influenced the shape of architecture. Perhaps the best example of these claims is Roman architecture, where the development of one material, the so-called Roman concrete, on the territory of today's Italy led to a construction revolution. The concrete that made it possible to reach monumental spans, according to most researchers, was based on the use of hydraulic mortar, and it was based on local raw materials, i.e., volcanic products with pozzolanic properties in the case of today's Italy, where it was developed. It was a composite created from hydraulic mortar (made with the use of volcanic ash), and mainly light volcanic aggregate (but also an aggregate of stone and brick fragments), faced with stone and/or brick as permanent formwork and decoration. On the territory of today's Serbia and its part of the Danube Limes, we recognise the core of the wall, known locally as *trpanac*, built from fragments of broken stone and brick and mostly non-hydraulic lime mortar, with wall faces that were more or less connected to the core. However, in this region, we also find walls with cores similar to Roman concrete with brick and stone faces. This certainly includes Trajan's Bridge, whose currently best-preserved above-ground column closest to the Danube has the remains of a brick face and the barely visible remains of stone facing blocks, along with a solid core, made of small stone and hard mortar.

For the production of historical (but also modern) mortars, the use of raw materials throughout the world is based almost exclusively on the exploitation of local resources, and the knowledge of their preparation and application has been transmitted and improved through the centuries. For the production of lime, limestones from local quarries were used, the aggregate was of local natural origin, and to improve the properties of the mortar, various additives and admixtures were used, depending on the purpose of the mortar and, of course, depending on the local availability of the additive itself, thus creating numerous compositions of mortar mixtures.

In architectural conservation processes, the term compatibility practically means that the new material should have characteristics similar to the historical one and that

it must not endanger it or the structure it builds in any way. Apart from technical compatibility, which implies that the new mortar does not threaten the existing structure in a physical sense and that it has resistance to external influences, which is what laboratory preparations and later tests of mortar models for conservation are primarily for, it is necessary to take other, intangible compatibility aspects into account in the processes of building protection.

The process of characterisation of historical mortars is mainly linked to research carried out in the laboratory. With modern laboratory methods and material testing techniques, it is possible to learn, to a great extent, the composition of mortars used for construction throughout history and the technology of their preparation. By examining the mortars that had different functions in the part of a built structure or were applied in different periods, i.e., phases of construction, it is possible to learn about many details of the building process, as well as its later use. Through laboratory tests, along with the achievements of the natural sciences, we obtain exceptional data for further research in these and other sciences. However, mortar characterisation is much more than laboratory analysis. The initiative for such research often comes from the humanistic field, when it comes to the characterisation of mortar as a carrier of important historical data, or the technical-technological field, when it is used for the development of new materials or architectural conservation. In any case, the successful characterisation of mortar must be based on the necessary cooperation between basic and applied sciences from several scientific fields. Within architectural conservation, they occupy a special place as materials whose use affects all characteristics of the built structure - from structural to aesthetic, and which together affect its stability and perception by users and observers. Therefore, the decision to choose a mortar for conservation cannot be made only based on the laboratory research of the materials and technical requirements of the structure but also the research of all its intangible values.

The examination of historical mortars through the *MoDeCo2000* project included 122 samples of different mortars embedded in the walls, pillars and floors of 40 built structures

as well as numerous samples of stone, aggregate, fired brick, and clay, which were subjected to various methods and techniques of laboratory tests. Laboratory methods and techniques were conditioned by each other, i.e., the results of testing with basic methods provided guidelines for choosing more complex ones. During the research, from a large number of sampled mortars, those that were expected to provide the most valuable scientific information were selected, as well as those that belonged to built structures that should undergo conservation processes in the coming period. According to this grouping, a set of test methods and techniques and the dynamics of their application were determined.

The methodology for the characterisation of historical mortars during the *MoDeCo2000* project was, therefore, based on existing standards and recommendations created in international frameworks through the work of building materials researchers and, specifically, researchers of historical mortars, but also based on the experience of project team members, adapted to the spatial and temporal context of the mortars that are the subject of research as well as the needs of architectural conservation in Serbia. After the characterisation of the original mortars, the process of making conservation models followed, which also directed its methodology towards a type of grouping. The groups of components related to aggregates, binders, and various additives specified for the use and preparation of conservation mortars were expanded during the project. From the initial activities focused on the simplest mortar mixtures with raw materials detected during characterisation, through the application of various traditional additions to improve properties and durability, to combining traditional components with modern materials for the same purpose, the change in the characteristics of the mixtures was followed, with their constant comparison with the analogous properties of historical mortar, i.e. verification of preservation of technical compatibility.

Methods and Techniques in Mortar Characterisation

The methods and techniques presented in this monograph are those most often applied by the largest number of researchers in the world during mortar characterisation. Each of them was applied to a certain extent within the *MoDeCo2000* project during the examination of Roman mortars of the Danube Limes in today's Serbia.

The methods and techniques of examining historical mortars can be grouped in different ways. It is particularly difficult to group methods due to the fact that many instrumental techniques are used in the examination by several scientific disciplines. With the mortar, its visual, mineralogical-petrographic, chemical, physical-mechanical, and thermal properties can be examined or its age can be determined. Some of the properties are tested with combinations of several methods and techniques, while we use some methods and techniques to determine several properties of these materials. The grouping of methods and techniques in this monograph has, therefore, been compiled using the experience related to mortar testing gained during the *MoDeCo2000* project:

- *visual inspection of mortar*: macroscopic and microscopic observations of samples and cross-sections; colourimetry;
- *determination of the mineralogical-petrographic composition of the mortar*: optical microscopy using transmitted polarised light (thin-section microscopy, i.e., polarised light microscopy (PLM)); scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS); X-ray diffraction analyses (XRD); Raman spectroscopy; Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR);
- *determination of physical and mechanical properties of mortar*: determination of bulk density, porosity, capillary water absorption, testing of compressive and flexural strength, and adhesion of mortar to the substrate;

- *determination of the chemical composition of mortar*: wet chemical analysis, X-ray fluorescence spectrometry (XRF), inductively coupled plasma with optical emission spectroscopy (ICP-OES);
- *thermal analyses of mortar*: loss on ignition, differential thermal analysis (DTA), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetry (TGA).

It is noticeable that the largest number of methods and techniques belongs to the group that examines mineralogical-petrographic properties. Namely, the largest number of examinations of historical mortars for scientific research is related to the determination of the origin of raw materials, which primarily involves the petrographic characterisation and determination of minerals in the components of the mortar. On the other hand, in recent times, the recognition of chemical reactions between aggregates and binders, the role of materials with pozzolanic properties, as well as the identification of compounds formed by the pozzolanic reaction, have been the topics of worldwide research that brings us closer to understanding the reasons for the durability of Roman mortars as well as the processes of their production. Some of the mentioned techniques have also been used to determine possible organic additives. The examination of historical mortars can also include additional methods, depending on the information we are looking for, which do not have to be related only to the characterisation of the mortar in terms of the identification of the materials used. Among them, dating the mortar is extremely important.

The application of laboratory methods and techniques for testing materials that we use today are standardised at the international level and are mostly related to modern products. However, for some of the methods and techniques there are also specialised standards that refer to their application in the examination of historical mortars. For other tests that can be performed, the standards prepared for individual traditional and modern building materials present in today's construction are still used.

Laboratory tests of historic mortars are preceded by work in the field, whether it includes a visual inspection of the monument, an assessment of its condition, recording of structures using non-destructive methods, or taking different types of samples. The sample required for the characterisation, i.e., determining the composition of the historical mortar, should be a representative part of the material so that the results obtained from later research can be as reliable as possible. The majority of samples of historical mortars are obtained by manual sampling. It is very important that the position of the samples has not been compromised by any previous human activity carried out in a period unrelated to the creation of the mortar itself, by external chemical or biological influences, and that their condition corresponds to the needs of the test objectives. In case of any doubt regarding the origin of the sample (uncertainty as to whether it belongs to a certain structure, in cases where the sample has been separated from the structure itself and dislocated), the sample cannot be considered valid for testing.

Sampling mortar for its characterisation must be preceded by a plan that determines whether its goal is preparation for conservation or scientific research. Before sampling, various data on the structure itself must be collected, and a visual inspection with photographic and written observations must be made. Sampling techniques and sampling tools must always be chosen based on the specific characteristics of a mortar sample, which is a very sensitive procedure. A visual inspection and basic mineralogical-petrographic, physical, and mechanical characterisation can be performed on the sample to assess its overall performance. A macroscopic study must be carried out before preparing the samples for their study in the laboratory, which will reveal the general characteristics of the material, the stratigraphy, the presence of residues of production, use or previous treatment, as well as visible degradation. The first, and probably the most important, task in the analysis of historical mortar is the determination of the type of binder and aggregate, their ratio, the presence of mineral additives, and the texture of the mortar, which is determined by way of a macroscopic examination, as well as a basic mineralogical-petrographical

analysis of the mortar. The results of testing with these methods offer a basic picture of the composition of the mortar.

The methods and techniques used further during the characterisation process should be adapted to the available capacities of the testing laboratories and the requirements set by the conservation project. The most commonly used techniques for these tests include PLM – polarised light microscopy, SEM-EDS – scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy, XRD – X-ray diffraction analysis, XRF – X-ray fluorescence spectroscopy, and wet chemical analysis, as well as the determination of loss of ignition. Chemical analyses are also performed on the binder after its separation from the aggregate, to evaluate its hydraulicity. Additionally, an examination of the aggregate's granulometry can be applied. In case of the need to collect more detailed data on the specific properties of the mortar, it is necessary to additionally apply scanning electron microscopy, as well as ICP-OES - inductively coupled plasma with optical emission spectroscopy, FTIR – infrared spectroscopy with Fourier transform and Raman spectroscopy, as well as other thermal analyses (TGA, DTA and DSC). In addition to the mentioned techniques aimed at determining the composition of the sample, it is necessary to carry out certain physical and mechanical tests, subject to the possibility of the laboratory and the quality of the sample, as well as the function of the sampled mortar in the building. These tests provide the necessary data on the compactness of the mortar, its water absorption, porosity, and its strength. It is also important to determine the colour of the mortar as well as the colour of the individual aggregate fractions using one of the standard techniques for these tests. By looking at all the test results, data on the properties of the mortar will be obtained, based on which it is possible to draw an approximate picture of the mortar preparation process, along with the components used.

This monograph covered a large number of methods and techniques applied in the characterisation of historical mortars and the examination of new mortars compatible with them. Their application in practice is often limited by the technical or financial possibilities of research. In this case, the experience of

the analysis is of great importance, because they can provide a large amount of data on the historical mortar based on a visual inspection, after which the researchers with the collected common knowledge from different disciplines can select suitable and available laboratory techniques, the combination of which can obtain the required information. After the visual inspection and the initial interpretation of the data, there will rarely be a need to implement all the methods and techniques of testing presented in this monograph. Without the technical skills, knowledge and capability of interpretation offered by the participants in the research, despite the number of techniques used, the characterisation of historical mortars will not bring all the required information.

Components of Historical Mortars

Throughout history, a wide range of minerals and rocks have been used for the creation of built structures for various purposes, among which geological construction materials occupy an important place. In most cases, these were easily available raw materials, exploited in large quantities: stone for construction and as a raw material for the production of crushed stone aggregate; rocks for the production of binders (cement and lime); clay for making brick products and binders; and gravel and sand as aggregates.

The variety of components used in the mortar shows how well the builder knew his local environment and used its potential, i.e., geological resources for his needs. During the research of mortars within the *MoDeCo2000* project, among the important data required for the characterisation of the sampled mortars was that related to the origin of the raw materials used and their connection with the raw materials present in the local territory, that is, a specific area or part of the area of today's Serbia.

The nature of aggregates in historical mortars is very diverse. River sand was most often used; river gravel, pit aggregate, and crushed stone aggregate were present somewhat less often, and sea sand and gravel were also used, depending on their availability. The most exploited and used in the territory

of today's Serbia were river sand and gravel, but aggregate obtained by crushing local stone is visible in the mortar samples as well.

The properties of aggregates, binders, additives, or admixtures are examined within the characterisation of the historical mortars, to determine their role in the mortars and their mutual relationships, and to obtain various information regarding their origin and exploitation. During the selection of components for the conservation mortar, the same type and origin of the aggregates are most often required, that is, an adequate similarity of the properties of the new aggregate to that of the original mortar, to meet the criteria of different aspects of compatibility. Based on this data, the desired properties of components of this type are defined for modern use in conservation mortar models. The components are selected (preferably almost entirely of local origin) and then their properties are tested, as with the historical ones, to determine whether they meet the necessary levels of similarities with them, as well as standards, in order to create compatible and durable mortar that will be used for conservation. Knowing that in the mortar production many components are combined, it is difficult to imagine how many different compositions could be created in this way, which shows how complex the interpretation of the composition of historical mortars really is.

Throughout the history of construction, different types of binders have been used to prepare mortar, individually or in combination with other binders, including clay materials, lime, gypsum, cement, and organic binders. Standard building lime today includes air lime, which sets in air and can be in the form of quicklime and slaked lime; and lime with hydraulic properties that has a higher percentage of clay and can set in water and, according to the standard for building lime (SRPS EN 459-1:2016), can be natural hydraulic lime (NHL), formulated lime (FL) and hydraulic lime (HL). Historically, air lime was mainly used, and much less often naturally hydraulic lime. The group of binders made from limestone also includes cement, although it is separate from lime.

The hydraulicity of the historical mortar could be achieved in several ways: by using pit sand with a higher amount of clay

as the aggregate (inert aggregate with reactive components), naturally hydraulic lime (the result of calcination of impure limestone), or artificially hydraulic lime (the result of calcination of limestone with impurities introduced into the kiln before or during calcination) as a binder, or by using natural or artificial materials with pozzolanic properties (mechanically or thermally processed (and activated) natural materials), as a replacement, or as an addition to the aggregate (reactive aggregate). It has not been established if builders in Antiquity intentionally fired impure limestone or added components to it during firing to obtain lime with hydraulic properties, but it is possible that impure stone was also used to make lime when clean material was not available, or even due to its non-recognition during the exploitation of pure limestone. Hydraulicity was intentionally created when additives with pozzolanic properties were mixed with air lime, but lime with mild hydraulic properties could also have been created accidentally, due to the presence of various impurities with mild pozzolanic properties during the preparation of the lime or the mortar itself.

The hydraulic properties of lime are determined by knowing its composition and calculating the hydraulic hydraulicity index (HI) and cementation index (CI), which are related to the content of SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , and MgO . The same calculations can be applied to the separated carbonate binder from mortar, as well as lime lumps. Researchers often evaluate the hydraulicity of mortar through the loss of carbon dioxide and structurally bound water, that is, the ratio of the weight loss at a temperature of $>600^\circ\text{C}$ and a temperature of $200\text{--}600^\circ\text{C}$, and show it through the formula $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$.

According to the standard related to non-metallic mineral raw materials for the production of cement, materials with pozzolanic properties include pozzolanic materials that represent natural substances within which we recognise natural pozzolans (natural materials) and naturally calcined pozzolans (natural materials activated by a thermal process); and fly ash, i.e., material that simply possesses pozzolanic properties. Pozzolanic materials consist mainly of amorphous or reactive silicon dioxide (SiO_2) and aluminium oxide (Al_2O_3), while the

rest are made up of smaller amounts of iron oxide (Fe_2O_3) and other oxides. They do not harden by themselves when mixed with water, but when finely ground, at normal temperature, they react chemically with lime, giving compounds with hydraulic (cementitious) properties. Fly ash is a fine powder created by burning pulverized coal, which consists mainly of SiO_2 and Al_2O_3 , with the remainder consisting of CaO , Fe_2O_3 , and other compounds.

The reaction of materials with pozzolanic properties with lime in the presence of water is called a pozzolanic reaction. The reaction products can be calcium-silicate hydrate (C-S-H; $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), calcium-aluminate hydrate (C-A-H; $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$) or calcium-aluminosilicate hydrate (C-A-S-H; $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$). The use of materials with pozzolanic properties increases the durability of the binder, its strength, and its chemical resistance to aggressive influences.

In the fields of historical mortar research and conservation, we often encounter a simple division of the materials with pozzolanic properties into *natural* and *artificial*, which we classify according to whether they were created naturally or by the role of man through the thermal or mechanical activation of the natural materials. Natural materials include pyroclastic (volcanic) rocks; clastic (sedimentary) rocks; and altered rocks of mixed origin. Artificial materials with pozzolanic properties include thermally activated natural materials (mostly calcined clays) and by-products. Examination of the pozzolanic activity of the material is carried out according to the tests prescribed in various national and international standards.

Deposits of natural materials with pozzolanic properties are found all over the world. In Serbia, as natural materials with pozzolanic properties, during the modern production of building materials, volcanic tuffs from several deposits were most often exploited, and today there are active deposits of zeolitic tuffs. Natural materials with pozzolanic properties found in Serbia include diatomaceous earth and opal breccia. So far, it has not been confirmed that Roman builders on the territory of today's Serbia exploited any of these materials to make mortar. It is necessary to mention the material

created after the self-combustion of the coal deposits, and by changing the clay sediments due to the high temperature, which, conditionally speaking, formed natural brick. This material can be accepted as a natural material with pozzolanic properties, and on the territory of Serbia it appears in the area of the Kostolac and Kolubara coal basins. A similar material is found in several locations around the world. To date, in today's Serbia, its use during the Roman period has been recorded in *Viminacium* and *Margum* (for making building blocks, filling the core of walls, and making floor layers). Tests of this material, locally referred to as *crvenka* in the region of Kostolac and during the *MoDeCo2000* project itself, found that it possesses pozzolanic properties, so it can be assumed that it could have been added to *Viminacium* lime mortars, either crushed or ground, to improve certain properties, i.e., the fragments of red colour in the mortars, which are usually accepted as fired brick fragments, may sometimes represent fragments of *crvenka*. These assumptions require further, thorough research in the future.

Natural materials that become artificial materials with pozzolanic properties through activation (thermal or mechanical) include clays: kaolin, montmorillonite, various brick clays, etc. Metakaolin is obtained by calcining kaolin clays. Although it is often used in modern conservation, researchers and conservators appeal for its careful use, to ensure the durability of the mortar. The best-known artificial material with pozzolanic properties used in mortars throughout history was created by calcining brick clays, such as crushed and ground brick. However, for this purpose, tiles, and other building elements, as well as fragments of pottery were also used. During the investigation of the mortars of the Danube Limes' built structures in today's territory of Serbia, and within the *MoDeCo2000* project, a large number of mortar samples with the addition of crushed or ground fired bricks that needed resistance to water and moisture (floor mortars, plasters and renders) were found. Although the use of fired brick was mainly related to waterproofing mortars, it was also used in masonry mortars, but to a much lesser extent, as mentioned above. Its

increased use in these mortars appeared in the 6th century and continued later.

Through the experience of builders and craftsmen, as well as artists, it has been observed that adding small amounts of certain substances to the mortar mixture significantly improves its physical and mechanical properties and workability, and speeds up the setting process, etc. Today, these additions are divided into additives and admixtures. Additives include accelerators, plasticisers, air-entraining agents, hydrophobic agents, and others, while admixtures include pigments, materials with pozzolanic properties (if they are added in small quantities and not as a latent binder), and various fibres. Apart from mineral materials with pozzolanic properties, organic additives stood out as important in traditional construction, whose application was extremely widespread and often related to a specific area. Among them are milk, cheese, eggs, blood, animal fat and glue, beeswax, resin, beer, urine and faeces, malt, rye flour, olive oil, sticky rice, starch, seaweed, wood ash, etc. They were used to improve the adhesion of the mortar, to slow down the setting, to thicken it, as aerating mediums, for water repellence, to give mortar plasticity, etc. To reduce deformations due to shrinkage and prevent the appearance of cracks, natural fibres of plant or animal origin were traditionally used, and these were most often straw and animal hair.

The use of fly ash, as well as other modern additions created as industrial products, such as silica fume and blast furnace slag, in conservation lime mortars is rare, but it is not completely excluded. Apart from these materials, modern additions to mortars also include chemical additives. For micro-reinforcement of mortar, synthetic fibres can also be found in lime mortars today.

Preparation and Testing of Conservation Lime Mortars

Conservation mortars are prepared for various interventions on historical structures, as part of ensuring the durability of built structures that may already be damaged due to the passage of time, previous inadequate interventions, or sudden accidents and damage, as well as part of regular

maintenance. Among the interventions that can sometimes be of a larger scale, depending on the conditions of protection and preservation of the historical structure itself, are restoration, anastylosis, and rehabilitation with consolidation. For these needs, mortars for masonry and grouting are mainly prepared, sometimes for rendering or plastering and, in the case of basic maintenance, it is necessary to carry out various treatments of existing degraded joints, especially if their condition can damage the structural properties of the element. One of the extremely important functions of the conservation mortar is the protection of the upper finishing layers of the wall, called wall capping, which is a big challenge when it comes to the collapsed remains of the walls of built structures that have lost their function, considering the need for increased resistance of these mortars to external influences, and the simultaneous maintenance of technical compatibility with the existing historical fabric.

The proposal of activities during the preparation of conservation mortar must be based on already proven processes in practice, although each already established methodology must be modified and supplemented in some of its segments because there is no prescribed treatment for all built structures. A systematic approach to achieving technical compatibility is based on the characterisation of the historical mortar itself and the preparation of conservation mortars following its results. During conservation, the existing masonry elements, i.e., stone and brick, are preserved first, while mortar often loses its historical fabric, which is an inevitable process to prevent damage to the basic building elements. This is precisely the biggest reason for the need for the compatibility of the new mortars with the historical fabric because otherwise, they cannot fulfil their basic role.

When preparing laboratory models of mortar for conservation, the amount of each component is measured extremely precisely, while the measurement of components on the construction site itself throughout history could not be done in that way, and it cannot be expected in the future conservation of monuments either. In the repair of walls or restorations carried out by masons, it is difficult to expect that

the mortar ratios can be precisely maintained during the entire work process and that the measurement with the mason's tools will always give the same result. The exception is minor repairs, especially in the case of those on decorative plasters performed by a conservator, when it can be relatively simple. During the examination of the composition of historical mortars originating from a built structure, one often encounters mutually different, but still similar ratios of components, so it is necessary to check (depending on the function of the mortar) whether in the planned conservation of the built structure one ratio can be adopted for several similar ratios. On the other hand, when preparing conservation mortar, it should be borne in mind that the proportions of the components of historical mortar during characterisation by laboratory methods are always determined as closely as possible, and to obtain an adequate mortar that will be as similar as possible to the original and as suitable as possible for the given purpose in the conservation process, it is often necessary to prepare several different mixtures in which the binder and aggregate ratios vary minimally, and then to test them. This optimisation of the ratio of components is also extremely important for obtaining a compact mortar in which the space between the aggregate grains is adequately filled with binder.

Lime-based conservation mortar mixtures are prepared using different types of lime and aggregates, in different ratios and aggregate granulometry, with smaller or larger amounts of additions. For conservation purposes, all forms of lime are used today, created by the traditional or industrial process of burning (and slaking). In the scientific and professional community that deals with the examination of historical mortars and the preparation of conservation mortars compatible with them, the use of quicklime as a binder has increasingly been posed as a challenge. Some researchers point out that the promotion of the use of mortars with quicklime (hot mixing) in conservation is based on their large presence throughout history, which is also indicated by modern laboratory research on historical mortars. Also, according to records from contemporary practice, masons accept the use of these mortars, claiming they offer numerous advantages during work. However, the use of quicklime cannot

be given an exclusive advantage in conservation over the use of other forms of lime, but research must always be carried out on the application of the type and form of lime in each case.

Examinations of the advantages and disadvantages of the use of different forms of lime in architectural conservation in recent decades are often carried out by national organisations for the protection of monuments in an attempt to obtain the most compatible materials. During the preparation of conservation mortars with non-hydraulic (air) lime, natural (mainly river) and crushed aggregate are used, while materials with pozzolanic properties, as well as other additives and admixtures, are used as an addition (or even replacement of aggregate). By adding materials with pozzolanic properties to non-hydraulic lime, hydraulic mortars are created, to reach a faster initial setting, and to gain the ability to harden in wet conditions and under water. However, natural hydraulic lime (NHL), after observing the consequences that cement has on the physical fabric of historic buildings, and a large number of failures of using air lime in unprotected structures, almost three decades ago, became an extremely popular binder in conservation. Mortar strengths achieved with this type of lime exceed the analogous properties of historical hydraulic mortars, which were generally prepared by adding materials with pozzolanic properties to air lime. Furthermore, tests of mixtures with the use of NHL proved the existence of variations in compressive strengths concerning standard classifications, depending on the origin of the material and the method of lime production. In addition, binders of the same class (determined by the strength) can have very different characteristics from each other, even when it is the same manufacturer. This is why appeals for the moderate and selective use of this material in conservation are increasingly appearing in the international community of researchers and experts.

Certain properties of cement mortar, primarily low porosity and permeability, as well as high strength values, are not compatible with those of traditional building materials, i.e., porous stone, and those of lower strength, bricks and lime or earthen mortars. Precisely because of the lack of compatibility with historical materials, the use of cement in conservation

is extremely limited, mainly for the serious static repair of historical structures. Then it is necessary to take care with the contact of new and old materials and carefully examine the nature of those historical materials with which the cement will be in contact, to avoid damage to the historical fabric.

The process of preparing and testing conservation mortars during the *MoDeCo2000* project required a careful selection of binders, aggregates, additives and admixtures to be used, respecting the principle of compatibility. The recipes of the prepared mortar models, i.e., the selection and quantity of their raw components, were based on the results obtained after testing samples of historical mortars, i.e., the use of materials whose presence was determined during the characterisation of the samples, the possibilities of applying different technologies for the production of mortars, but also the conditions to which historical structures whose conservation will be carried out are exposed today. Before use in the preparation of mortar, all components recognised in historical mortars were subjected to appropriate tests. Dozens of models of mineral mixtures were prepared and tested in the laboratory. The largest number of mortar mixtures were prepared only based on air lime (quicklime and slaked lime) and aggregates in different ratios, as well as with different granulations of aggregates. Characteristics of such mortars are lower mechanical properties, weak resistance to atmospheric influences, especially freezing and thawing, high water absorption, but good compatibility with old mortars, so their use is suitable in historical built structures protected from external influences. However, the examination of historical mortars from several locations of the Danube Limes in Serbia indicated the need to prepare mortars with improved mechanical properties and greater resistance, primarily considering their current exposure to external influences as ruins. For this reason, a number of mixtures were prepared in which, in addition to lime and river sand, but also crushed stone aggregate, a certain amount of material with pozzolanic properties was added, i.e., crushed or ground fired brick, zeolitic tuff, as well as mechanically activated local brick clay and kaolin clay. Mortar trials also included the addition of metakaolin to prepare compatible mortars for characteristic

historical samples with high strength values. No naturally hydraulic lime was used, since the tests of historical mortars of the Danube Limes did not prove its intentional introduction into the mixtures during their preparation.

For each typical ratio of binders and aggregates determined after testing historical mortars during the *MoDeCo2000* project, two or three mixtures of components were made, where their ratio was varied by a small percentage. In this way, a larger range of ratios was covered, following the results of numerous earlier research that shows that mortar samples of the same functions, taken from the same built structure often show different, but very similar ratios of binder and aggregate, which is expected and depends on the mortar preparation.

The preparation of mortar mixes requires a series of laboratory tests to check whether their properties meet the defined ranges, whether they are compatible with the historical mortar, and also to assess their durability. The basic properties of fresh mortar that must be taken into account when preparing mortar for conservation are consistency, entrained air, bulk density, embedment time, and chloride content, and they need to be tested after the mixture is made, to determine its properties that directly affect its eventual application during conservation. The mortar must have satisfactory workability for the intended purpose. This is achieved by testing the consistency of fresh mortar and optimizing the amount of water added to the mortar to achieve the defined criteria.

Mixture samples prepared during the *MoDeCo2000* project were poured into moulds in the laboratory, maintained under standard laboratory conditions, and then subjected to tests. Certain samples also underwent artificial aging processes. After hardening, the prepared mortar was subjected to tests of physical and mechanical properties: bulk density, porosity, capillary water absorption, compressive and flexural strength, etc. Tests on hardened mortars can be performed on samples that have undergone aging in standard laboratory conditions, but also on those that have been exposed to different conditions during the so-called artificial aging, when they go through cycles of freeze-thaw or dry-wet cycles, and other influences, to imitate as closely as possible the conditions to which the

mortar will be exposed after application and, thus, evaluate their durability.

To check the compatibility of the new with the historical mortar, models are also prepared in which a piece of the old mortar is pressed into the freshly prepared new mortar. A number of laboratory models during the *MoDeCo2000* project were prepared this way. With such samples, with the help of a microscope, the contact zone between the two mortars during joint aging was further monitored, while the carbonatization in the area was checked using phenolphthalein.

In addition to testing the durability of designed mortar models for conservation in the laboratory, it is necessary to carry out tests and apply the mortars in real external conditions, experimentally next to the historical built structures for which they are designed, but also on the structures themselves. After monitoring and evaluating the success of the mortar applied to authentic structures, decisions can be made about the possible or necessary corrections to a specific recipe and finally, the one that is most favourable for a given building or its part can be selected. The quality of the mortar components, as well as the mortar itself, needs to be monitored, even in the stage of artisanal execution of works to prevent any unwanted changes to the mortar itself in the future. The behaviour of applied mortars needs to be further monitored and examined with measuring techniques on-site, but also in the laboratory, where samples are tested using the same techniques as historical mortars or hardened conservation models. It is necessary to monitor visual changes to the mortars, as well as microstructural changes, the appearance of cracks and fissures, salt in the form of efflorescence, colour changes due to external influences, and the process of forming a contact zone between new and old mortar, as well as between new mortar and masonry elements. Due to the long-term hardening process of lime mortars, the process of monitoring the properties of the applied mortar should last as long as possible.

After the completion of laboratory tests, selected recipes of conservation models prepared within the *MoDeCo2000* project were applied in outdoor conditions. This was done by applying them to smaller experimental masonry structures that

had been built, and to certain historical structures. The contact of the mortar with stone and brick masonry elements was evaluated, while some mortars were also sampled and tested in the laboratory. As part of the international workshop of the *MoDeCo2000* project at the archaeological site of Viminacium, under the name *Science for Conservation of the Danube Limes* in the summer of 2022, researchers of historical materials gathered - geologists, chemists, archaeologists, biologists, technologists, physicists, and art historians, together with practical conservators-restorers, masons, and architects. During the workshop, several mixtures were prepared, using the hot mixing method, from lime, Danube aggregate, crushed schist, crushed *crvenka*, and zeolitic tuff, depending on the function (bedding, infill, pointing or wall capping), which were then applied immediately after preparation. The material for the construction of the wall consisted of several types of stone, fired brick, and *crvenka*, which all originated from the remains of the Roman *Viminacium*. The structure has been monitored since, with the aim of obtaining guidelines for the optimisation of the applied mortars in the future.

Conclusion

The *MoDeCo2000* project focused its research on a building material used in one specific territory in a specific period of history – Roman mortar of the Danube Limes' built structures in Serbia. The study of mortar is deeply related to many other construction materials and their life cycle, that is, the exploitation of raw materials, their processing, and their use as basic materials or components for composite materials, such as mortar itself. The life span and durability of a built structure often depended on the composition and application of mortar as one of the most complex historical building materials. It is similar today when we are trying to protect those structures because the choice of new mortar to be applied is one of the most important factors in their preservation.

The process *from characterisation* (research of historical mortars) *to conservation* (application of conservation mortars) includes a large number of activities to fulfil numerous

requirements set in advance by several actors involved in the protection and preservation of a historical built structure or its remains, but also the needs of the historical structure itself. All activities and the largest number of laboratory tests presented in this monograph were carried out during the implementation of the *MoDeCo2000* project.

Roman construction activities were carried out following specific local natural conditions related to the availability of raw materials, the climate, the possibility of exploiting resources and their transportation and, in the case of the Danube Limes, also within the framework of socio-economic flows of people and goods that moved along the border, on the entire area along which it stretched and whose areas were interconnected by the big river. Danube sand is the dominant aggregate of Danube lime mortar. The abundant use of crushed schist as an aggregate in mortars for the construction of the *Lederata* fort in the village of Ram is a characteristic example in the research during the project *MoDeCo2000* that deviates from this. The fort itself is a true example of the reliance of Roman builders on local resources, as a structure made from schist quarried from the rock on which it was actually built. The mortar of the *Lederata* fort was the most characteristic project sample, based on its exceptional physical and mechanical properties, and the reasons for these properties were partially revealed by the project laboratory research, bringing us closer to the nature of its components. Fired brick, an addition to mortars, is present in all sites of the Danube Limes and is especially important for research in the Viminacium area. As the provincial Roman centre of brick production on the Danube, the tradition of brickmaking has persisted for centuries in this brick-clay rich area.

A large number of built structures from the Roman period disappeared as a result of destruction and conquests throughout history, or during natural disasters or demolition by new inhabitants of certain areas. The largest number of them do not exist today because they did not withstand the passage of time, and the materials used, among them mortar, did not survive in their initial form until today. However, we are witness to the high durability of many monumental Roman

built structures in the period up to 2000 years ago (whose level of damage over the centuries must still exist, although at first glance we do not perceive it), among which the majority are those created using Roman concrete with the presence of volcanic materials. It is precisely these structures that are of greatest interest to researchers of Roman mortars. Even though the aforementioned volcanic materials were not available in all territories of the Roman Empire, bold structures were nevertheless created everywhere, mostly with the use of lime mortars including the usual ingredients of non-hydraulic lime and river aggregate, which was the case with the largest number of these mortars throughout history. The remains of four masonry pillars of the approach sections of Trajan's Bridge on the Danube situated on both the Serbian and Romanian banks today, designed by Apollodorus of Damascus and built at the beginning of the 2nd century, are still visible today. However, the largest number of Roman built structures and mostly those created on the borders of the empire, as a result of human activities and inevitable natural processes, did not survive the modern era and were eventually preserved only in their foundation zones. The interrupted series of traces of construction activities on the borders of the Roman Empire is represented by the Danube Limes in Serbia, which, despite the discontinuity, represents an exceptional cultural and historical landscape from which modern archaeology and material science, as well as conservation, can constantly draw new knowledge.

After the completed laboratory tests of historical mortar samples within the *MoDeCo2000* project, it turned out that our pre-set *competition* between mortars originating from different sites (of different importance in the Roman period) is completely contrary to what the Roman builders aimed for in construction, especially of fortifications, to which most of the built structures investigated during the project belong. Namely, these mortars were always made with great economy in the process, with prior planning of the flow of raw materials, without a *race* for the best materials, but with the aspiration to prepare the best possible mixture with locally available materials through the adaptation of the production technology,

or, perhaps better said, its refinement using various locally available raw materials.

Before creating the conservation mortar recipes, it is necessary to prepare the basic guidelines and priorities on which they should be based, that is, to determine the ranges in which the values of the different properties of the new mortars must be found. This determines the choice of binders, aggregates, and additions to the mortar, with constant attention paid to the fact that historical built structures were most often created using local materials, i.e., raw materials, and that only in exceptional cases related to the function of the structure or the status of the investor, were the materials delivered from distant places. Adapting activities to locally available raw materials has been a common way of thinking throughout the history of construction in all regions of the world. Is it possible to act in the same way in architectural conservation processes today? What is the permissible measure of upgrading traditional building knowledge by conservators with the help of modern science, so that this valuable intangible heritage remains preserved?

Mortars for conservation were prepared during the *MoDeCo2000* project using local raw materials and applied using traditional technologies. However, the results of the activity showed that, in addition to maintaining tradition during the conservation of the monument, it is necessary to improve the conservation mortar mixtures in line with the conditions of the modern external environment and the possible methods of presentation - with the overall aim of improving the mortars' durability. This influenced the introduction of modern materials compatible with the traditional ones in a series of project experiments, which helped with the attainment of the overall aim. External impacts may also be the result of contemporary activities that did not exist in the past, and to which the historic built structure is exposed today. The addition of these compatible but non-traditional materials in conservation mixes needs to be done carefully, because often mortars applied as suitable for conservation in one period, may become inadequate in some subsequent time due to insufficiently researched external influences or changes in the way the built structures is used, and especially due to the insufficiently scientifically

understood processes that occur over time in the mortar, which are still being researched today.

The walls of historical buildings were mostly rendered, plastered or even just whitewashed, which protected their supporting structure, and the buildings themselves most often had roofs. If these buildings have been preserved in the form of ruins to this day, having lost their initial useful function over the centuries, these walls are often bare or with only partially preserved covering mortars, and completely exposed to external influences. Although applying new rendering or whitewash (with the necessity of constant maintenance) would protect these walls, sometimes it could represent an activity that would challenge the preservation of the authenticity of the inherited historical fabric. Each case must, therefore, be considered in a wider context and, after that, a decision is made as to whether to proceed with the renewal of the external protective layers of the walls. Considering buildings from the distant past, such as Antiquity, the restoration of external wall coatings or facades, if they existed, or of the roofs themselves, would be an extremely uncertain process with only a small amount of certain and proved inputs. In addition to protecting these buildings with different sheltering or roofing constructions which can additionally either enhance or damage the authenticity and integrity of the building, it is possible to apply conservation mortars resistant to external influences to joints and protect building elements with different products. On the other hand, a large number of stone walls probably did not have any external protection, so it was the pointing or bedding mortars that suffered the most and deteriorated over time. Mortar has always played the role of a sacrificial material, so historical mortar is a material whose authenticity we often have to sacrifice as well, to protect the fabric of a historical building, covering it with new mortar. However, in addition to the fact that by making new joints we cover, that is, alter the old joints, we also face another problem related to new mortars, because higher requirements are placed on them than was the case with historical mortars, in the form of greater durability and resistance to external influences. Unfortunately, the solution is often offered through the use of incompatible materials. Thus,

due to the sincere desire to preserve the damaged historical structure, but also to make it as easy as possible to maintain in the future, additional damage can be caused that leads to the loss of the historical fabric. Here, science, through examining the characteristics of the old, and giving recommendations for the selection and application of new materials, with the knowledge of their mutual influences, becomes an inevitable actor in the planning of the extremely complex practical processes of the technical protection of buildings.

The process of the preparation of mortar for architectural conservation is long-term, which indicates the need for timely planning of the necessary works, to leave enough time for each step of the preparation and testing of new mortars, and to confirm their compatibility with the original mortars and built-in elements for masonry. Unfortunately, very often this is not the case, and trial mixes of mortar are prepared and applied simultaneously with the execution of works, which can sometimes lead to serious consequences for the state of the historic fabric and, in the worst cases, for the stability of a part of a built structure, or even the entire structure. There is no universal recipe for the preparation of a unique conservation mortar for all traditionally built structures, since each of them requires a detailed analysis of the historical materials used. Through every step of the undertaking, which certainly represents the architectural conservation of any historical structure, constant cooperation between science, profession, and practice, i.e., researchers, conservators, and craftsmen, is necessary, in which the knowledge and experience of each participant is equally important, to protect and preserve the tangible values, but also the intangible values of a historical structure. Protection, i.e., conservation of historical built structures with the use of traditional building materials, also implies knowledge of the traditional skills required for their preparation and use, that is masonry crafts which, unfortunately, due to the decreasing interest of younger generations in this profession, are rapidly dying out in Serbia, as well as in Europe in general. Traditional mortar production for conservation has been promoted for decades by international organisations of traditional masons, but only recently have they become more and more accepted by

researchers and conservators. The preservation of the masonry craft and the traditional preparation of mortar, and at the same time intangible heritage, was one of the important themes of the *MoDeCo2000* project, also promoted through the final workshop of the project in *Viminacium*.

The *MoDeCo2000* project included multidisciplinary research on mortars from the era of Roman domination in the territory of the former Danube Limes in Serbia, providing a large amount of valuable data that can help obtain conclusions regarding the exploitation, transport, processing, and use of mineral and other raw materials to obtain building materials and, therefore, about the economy, trade and all kinds of material and immaterial connections between people within one territory, but also between more distant territories. Considering the nature of the project, which included the research of a large number of different mortar samples originating from numerous built structures over a period of six centuries in one large territory, that is along the Danube in Serbia, its results can represent a framework for future detailed mortar research of each monument in Serbia that belongs to this period, regardless of location, but also to those of other periods.

Through several publications, as well as this one before us, the project has proposed guidelines for the preparation of the official methodology for the research of historical mortars in Serbia and the preparation of mortars for conservation compatible with them, which, along with the already existing examination procedures carried out in the responsible institutions for protection, can be part of some future national strategy related to architectural conservation. The *MoDeCo2000* project, thus, connects practical conservation, which in Serbia is generally recognised as an exclusively expert and professional skill or craft, with scientific research from the framework of basic and applied sciences.

The research of historical mortars, through the spatial coverage of a wider territory and over a period of several centuries, has not been carried out in Serbia until now and, by reviewing the available literature, it is noticeable that it has not been carried out in the neighbouring countries through whose

territories the Danube Limes also extends. The results of the research conducted during the *MoDeCo2000* project can be part of a complex database of Roman mortars as well as other traditional materials and raw materials used in the territory of today's Serbia throughout history. It can also become part of a future international database whose role would be valuable, both in the continuation of scientific research on historical mortars and in the conservation of monuments. We also hope that it will include the existing scientific investigations of historical mortars in Serbia, among which are those related to the period from the 1st to the 6th century AD, as well as the results of research carried out by institutions for protection in Serbia. This will achieve the necessary connection between scientific and applied research in the field of architectural conservation and will help to avoid repeated sampling of mortar from the monuments themselves.

Based on all the collected data obtained during the research of historical mortars, as well as the testing of mortar models for conservation in laboratories and their application in the field through the *MoDeCo2000* project, during future conservation plans of individual built structures of the Danube Limes in the territory of Serbia, it will be easier to make decisions regarding the preparation and use of mortars in practice. That is why the results of the *MoDeCo2000* project can also serve as a contribution to the extensive nomination dossier that is currently being prepared by the Institute of Archaeology and the Institute for the Protection of Cultural Monuments of Serbia, for the *Frontiers of the Roman Empire – Danube Limes (Serbia)*, aimed at having it inscribed to the UNESCO World Heritage List. The project can provide an important written segment of the examination of historical mortars and the development of compatible conservation mortars to the dossier and, thus, to international organisations in the field of protection, additionally showing the readiness of national institutions to carry out future practical processes on monuments following the recommendations in the field of architectural heritage preservation internationally adopted around the world, whilst at the same time following contemporary trends in conservation science.

Contemporary conservation science is one of the multidisciplinary fields that needs greater affirmation in Serbia. Its achievements gained in collaborations between scientists and experts provide the necessary results for practical conservation that should preserve built structures with adequate use of techniques, technologies, and choice of materials, but also the protection of the natural environment, which, among other things, is threatened precisely by the industrial production of building materials. The needs of humankind are increasing every day, which leads to the ruthless exploitation of natural resources, and the intensification of climate change. Activities within the protection of cultural heritage can sometimes be harmful to heritage, but also to nature, when it comes to the production and use of certain materials in the conservation of monuments. On the other hand, climate change itself also affects cultural heritage. This topic is not sufficiently developed in the scientific community of Serbia, and it is almost unknown among its wider public. Policies for the protection of historical built structures must be developed in a cooperative way between responsible institutions related to the research and protection of cultural heritage, law and economy, industry and infrastructure, ecology and sociology, as well as many other fields.

A small contribution to the global fight against climate change can be made by the research of historical mortars, with the aim of designing conservation mortars using traditional materials, but also to develop modern building materials based on historical research, with greater preservation of natural resources, a reduction of pollution and a promotion of sustainable construction. Historical mortar is one of the materials that offers us precious data about the past, and is often found to be *almost ready* for use in the present and the future.

List of Figures

Figure 1. Mixtures of traditional mortars immediately after preparation, created from different aggregates, binders and additives

Figure 2. Production of traditional lime mortars and building with stone and brick for the needs of future conservation during the workshop held in Viminacium in 2022 as part of the *MoDeCo2000* project (photo: Goran Stojić)

Figure 3. Map of the Danube course with indicated sites included in the *MoDeCo2000* project (author of the map: Danica Petrović; with modification by: Davor Radulj)

Figure 4. Sampling of the mortars of the city of *Viminacium* (collage preparation: Konstantin Janjić)

Figure 5. Mortar sampling inside Ram Fortress (collage preparation: Konstantin Janjić)

Figure 6. Sampling of the mortars of the *Diana* fortification (collage preparation: Konstantin Janjić)

Figure 7. Mortar sampling of Trajan's Bridge and the *Pontes* Fort (collage preparation: Konstantin Janjić)

Figure 8. Roman bedding mortars of Danube Limes in Serbia: *Viminacium* (top), Trajan's Bridge (middle), *Castrum Novae* (bottom)

Figure 9. Roman infill mortars of Danube Limes in Serbia: *Castrum Novae* (up), *Viminacium* (bottom)

Figure 10. Roman pointing mortars of Danube Limes in Serbia: *Castrum Octavum*

Figure 11. Roman flooring mortars of Danube Limes in Serbia (layers from several phases of the building's life): *Viminacium*

Figure 12. Roman mortars of Danube Limes in Serbia for rendering (top) and plastering (bottom): *Viminacium*

Figure 13. Roman mortars of Danube Limes in Serbia with painted decoration (fragments after excavation): *Viminacium*

Figure 14. Hadrian's villa in Tivoli, Italy – visible Roman concrete with brick faces (private archive: Emilija Nikolić)

Figure 15. The walls of Danube Limes buildings in Serbia: face in the technique similar to the *opus incertum* technique and wall core (trpanac) made of crushed stone (*Viminacium*, top left – condition during excavation); imprints in the mortar after stone extraction with visible wall core (*Viminacium*, top right – condition during excavation; Archive of the Institute of Archaeology, photo: Nemanja Mrđić); a wall made of crvenka with wall core in the form of trpanac (*Viminacium*, middle left – condition during excavation; Archive of the Institute of Archaeology, photo: Nemanja Mrđić); brick wall without wall core (*Viminacium*, middle right – condition during excavation); face of the ramparts and the walls of the fortification towers, executed in the *opus incertum mixtum* technique, similar to the *opus vittatum mixtum* technique (*Diana*, bottom – restored walls)

Figure 16. Trajan's Bridge on the Danube: a preserved pillar on the Serbian bank, closest to the river, showing the remains of the brick and stone face and the core

Figure 17. Trajan's Bridge on the Danube: the core at the top of the best-preserved pillar missing the faces (top); restored pillar with visible traces of formwork in the foundation (bottom)

Figure 18. Fragments of historical mortar samples from the Danube Limes in Serbia

Figure 19. Technical compatibility of historical (left) and conservation mortar (right) designed for one of the Roman buildings of the Danube Limes in Serbia achieved through the *MoDeCo2000* project

Figure 20. Methods and techniques of laboratory characterisation of mortars, binders and aggregates after sampling (scheme drawn based on SRPS EN 17187: 2021)

Figure 21. Manual sampling of mortar: consolidated samples retrieved using hammer and chisel (top left); completely separated from the structure and powdered samples (top right); completely separated from the structure and fragmented samples (bottom left); samples partially separated from the structure (bottom right)

Figure 22. Reading of GPS coordinates from the device placed at the spot of the sample and sample packaging with label

Figure 23. Typical samples of historical mortars after being brought to the testing laboratory

347

Figure 24. Method of photographing the position of sample taking (with and without metric scale), wider and narrower context: *Aquae*

Figure 25. Examination of cross-section of a mortar sample under portable digital magnification equipment

Figure 26. Variety of historical mortar samples sampled along the Danube limes in Serbia (photo: Goran Stojić)

Figure 27. Plastering and rendering mortars with visible stratigraphy (photo: Goran Stojić)

Figure 28. Variety of colours of binders and aggregates, and the shape and size of aggregate grains of historical mortars that are visible to the naked eye (photo: Goran Stojić)

Figure 29. Reaction of carbonate binder in historical mortar with HCl

Figure 30. Aggregate grains in mortar samples, 0.5 mm (left) and 5 mm (right) scales present

Figure 31. Cross-section of mortar samples, with a visible ratio of grains under 1 mm and larger grains, 1 mm (left) and 2 mm (right) scales present.

Figure 32. Crushed brick grains in cross-sections of mortar samples, 2 mm scale present

Figure 33. Lime lumps in a mortar sample

Figure 34. Lime lumps in a mortar sample, compact and homogenous, scales of 1 mm (left) and 2 mm (right) present

Figure 35. Lime lumps of different sizes, shapes and homogeneity in one sample, scale 2 mm present (left); lime lump with a prominent crack in the middle, 2 mm scale present (right)

Figure 36. Shells in the mortar sample, scale 2 mm present (left); visible to the naked eye (bottom – Archive of the Laboratory for Stone and Aggregate of the IMS Institute)

Figure 37. Coal (charcoal) particles, 2 mm scale present

Figure 38. Traces of plant fibres visible to the naked eye in samples of historical mortars for plastering

Figure 39. Traces of plant remains in a sample of plastering mortar, 2 mm scales present

Figure 40. *Munsell Rock Color Chart*, an example of catalogue page with a mortar sample

Figure 41. L * a * b colour space (taken from SRPS EN 15886: 2016)

Figure 42. Colourimetric examination of the colour of the mortar sample

Figure 43. Cutting the sample for the preparation of the thin section (top left); grinding pad (top right); mortar sample glued to a glass slide and prepared for grinding (middle); ground sample – prepared thin section (bottom)

Figure 44. Polarizing microscope for examining mortar thin sections (left) and stereomicroscope (right)

Figure 45. Photomicrographs of the mortar thin sections (photo: Prof. Dr Kristina Šarić)

Figure 46. Sample preparation for SEM-EDS analysis and installation in the device of the Laboratory for SEM at the Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade

Figure 47. SEM micrograph of a cross-section of a mortar sample (top); polished mortar sample (bottom left) with EDS spectra of the mineral phases of the polished sample in question (bottom right)

Figure 48. Diffractogram of a mortar sample with detected mineral phases

Figure 49. FTIR spectrum of four mortar samples with characteristic bands of mineral phases (Ilić *et al.* in preparation)

Figure 50. Recording of a mortar sample with a Raman spectrometer and the spectrum of the sample with a characteristic band of mineral phases

Figure 51. Evacuation vessel (left); adding the powdered sample to a flask with deionized water (right)

Figure 52. Pore size distribution of a historical mortar sample determined using the mercury porosimetry method

Figure 53. Prepared test specimens of historical mortar (left) and measurement of their dimensions (right)

Figure 54. Testing the compressive strength of historical mortar in a press

Figure 55. Test specimens of the historical mortar sample before (top) and after testing the compressive strength (bottom) in a press

Figure 56. Test specimens of compact historical mortar with high value of compression strength before testing in a press

Figure 57. Drilling a sample using the DRMS technique (top left and middle – Archive of the Laboratory for Testing Materials in Cultural Heritage at the Faculty of Technology, University of Novi Sad); a sample showing three points – drilling holes (top right); force profile diagram with data on average, minimum and maximum force values given for three mortar samples in order to compare them (bottom)

Figure 58. Test of adhesion strength of mortar for brick using the *pull-off* method – a fracture occurred in the mortar

Figure 59. Layout of a chemical laboratory for performing wet chemical analyses

Figure 60. Mechanical separation of aggregates from binders

Figure 61. Testing of soluble salts using reagent strips

Figure 62. Preparation of sample for testing using the XRF technique (mill for sample preparation; sample measurement; sample homogenization; placing the test tablet in the press element; starting the press for preparing the pressed tablet; tablet after production)

Figure 63. Powdered mortar samples (top) and pressed samples prepared for XRF analysis (bottom)

Figure 64. Examination of the mortar sample in the EDXRF spectrometer and the output diagram with a qualitative presentation of the elemental composition of the sample

Figure 65. Examination of a historical mortar sample in an ICP-OES device

Figure 66. Placing samples in the drying oven (top); powdered sample in the oven and closed oven (bottom)

Figure 67. DTA/TGA diagram of a mortar sample with peaks showing changes in the sample at certain temperatures (Ilić *et al.* in preparation)

Figure 68. Overview geological map of Serbia (Blagojević 2019)

Figure 69. Mortar typology and types of components (scheme drawn on the basis of SRPS EN 17187:2021)

Figure 70. Sand: natural, heterogeneous mineral composition (left); monomineralic (quartz) sand (right) – originating from Serbia

Figure 71. Typical river gravel – originating from the Danube in Serbia

Figure 72. Contemporary exploitation of gravel and sand from the Danube (Archives of the Laboratory for Stone and Aggregate of the IMS Institute)

Figure 73. Aggregates of different grain sizes, natural and crushed – originating from Serbia

Figure 74. Set of sieves and accessories for sieving aggregates

Figure 75. Titration of aggregate suspension with different clay contents using methylene blue solution (MB) (Archives of the Laboratory for Binders, Chemistry and Mortars of the IMS Institute)

Figure 76. Standard colour solution (in accordance with SRPS EN 1744-1: 2014) compared to sand with organic matter content (top) and sand without organic matter content (bottom)

Figure 77. Mesh baskets made of stainless steel for immersing samples in magnesium sulphate solution

Figure 78. Earth mortars of ancient buildings on the Danube Limes in Serbia

Figure 79. Earth mortars of a house in one of today's villages on the Danube Limes, which survived for almost a century and a half. Due to the abandonment of the house and the resulting damage, they are now falling apart with it (private archive: Emilija Nikolić).

Figure 80. Limestone quarry and material prepared for transport, Serbia

Figure 81. Typology of building lime (scheme drawn on the basis of SRPS EN 459-1:2016)

Figure 82. Incompatibility of cement mortar with masonry elements, conservation performed decades ago

Figure 83. Lime kilns in the villages of Mala Vrbica and Veliki Šenj, Kragujevac; access to kiln for firing and a stack of limestone pieces (top); kiln firing and lime burning in the kiln (cover) (middle); burnt (quick) lime in the process of being removed from the kiln (bottom)

Figure 84. Quicklime in pieces

Figure 85. Slaked lime as lime putty

Figure 86. Schematic representation of the lime cycle of air lime (scheme drawn according to Henry, Stewart 2011: 32)

Figure 87. Schematic representation of the lime cycle of natural hydraulic lime (scheme drawn according to Henry, Stewart 2011: 37)

Figure 88. Volcanic material at the foot of Mount Vesuvius (private archive: Emilija Nikolić)

Figure 89. Volcanic material from the island of Santorini (private archive: Emilija Nikolić)

Figure 90. Zeolitic tuff from a deposit in Igroš (Brus), Serbia

Figure 91a. Crvenka in a deposit, Kostolac village, *Viminacium* surroundings (Nikolić *et al.* 2023: 12, fig. 5)

Figure 91b. Samples of crvenka from a deposit, village of Kostolac (Nikolić *et al.* 2023: 13, fig. 7)

Figure 92. Ground brick and crushed Roman brick of different grain sizes from *Viminacium*

Figure 93. Roman mortars with bricks for floors and plastering: *Viminacium* (top), *Diana* (bottom)

Figure 94. Masonry mortar from the 6th century with brick fragments

Figure 95. Fibres of animal origin in historical plaster, several centuries old, which have survived to this day, scale 0.5 mm present (Archives of the Laboratory for Stone and Aggregate of the IMS Institute)

Figure 96. Making mortar with quicklime during the workshop of the *MoDeCo2000* project in Viminacium (stills from video material recorded by Dragan Beljić)

Figure 97. Preparation of precisely determined grain sizes of certain components for conservation mortar models

Figure 98. *Viminacium* bricks (top) and bricks from domestic semi-industrial production (bottom) used as crushed or ground raw material during the production of conservation mortar models within the *MoDeCo2000* project

Figure 99. Crushed schist of different grain size from deposits in the villages of Ram and Zatonje, Serbia

Figure 100. Clay after excavation (left) and ground clay (right), Poljana village near Požarevac, Serbia

Figure 101. Ground zeolitic tuff, Igroš, Brus, Serbia (left) and imported metakaolin (right) during the process of preparing conservation mortar models

Figure 102. Preparation of lime mortar model with slaked lime in the laboratory, using a mixer

Figure 103. Preparation of lime mortar model with quicklime in the laboratory, with manual mixing

Figure 104. Testing the consistency of fresh mortar on a flow table

Figure 105. Examination of historical built structures using non-destructive methods (ground-penetrating radar)

Figure 106. Model of conservation mortar after compression strength test – visible difference in colour of fresh section and smooth surface

Figure 107. Testing the compression strength of the hardened model of conservation mortar

Figure 108. An example of the devastating effect of frost on an unprotected lime mortar with air lime that has not yet undergone carbonation.

Figure 109. Biological growth on a historical masonry structure of the Danube Limes – lichens and mosses on Trajan's Bridge

Figure 110. Models of conservation mortar in the standard ageing process

Figure 111. Accelerated aging of the conservation mortar models in a programmable climate chamber with simulation of the conditions in which the conservation mortars will be applied

Figure 112. Indication of incomplete carbonation (in the case of lime lumps) using phenolphthalein – mortar slightly more than five centuries old

Figure 113. Fragment of historical mortar inserted into a compatible laboratory mortar model

Figure 114. Creation of a contact zone between historical and conservation mortar on a laboratory model (Ilić *et al.* in preparation)

Figure 115. Indication of the process of carbonation, using phenolphthalein in a hardened compatible mortar model for conservation in the contact zone with an inserted fragment of a historical mortar sample.

Figure 116. Production and application of conservation mortar mixtures on masonry structures in Viminacium (October)

Figure 117a. Monitoring of applied mortar mixtures on masonry structures in Viminacium: Structure 4 – newly built, June (top), after seven days, June (bottom)

Figure 117b. Monitoring of applied mortar mixtures on masonry structures in Viminacium: Structure 4 – after 35 days, July (top); after 128 days, October (middle); after 255 days, February (bottom)

Figure 117c. Monitoring of applied mortar mixtures on masonry structures in Viminacium: Structure 4 – after 587 days, January (hardened bedding mortar without damage)

Figure 118. Assessment of the contact between historical masonry materials and new mortar on an experimental masonry structure in Viminacium using mobile equipment (top left); mortar sampled from one of the structures (top right and middle); samples taken from multiple structures after compression strength tests (bottom)

Figure 119. Application of conservation mortar mixtures on today's damaged historical structures, partially restored decades ago with cement mortar: masonry in June (top); after 18 days, July (middle); after 398 days, July (bottom). There is a noticeable difference in the colour of the new mortar and the cement mortar that has been applied long ago.

Figure 120. Production of mortar mixes for a demonstration at the workshop in Viminacium (photo: Goran Stojić)

Figure 121. Building a masonry structure at the workshop in Viminacium (top – photo: Goran Stojić); masonry structure 13 days after building (bottom)

Figure 122. Lederata: the rock on which the fort was founded (top) and the schist walls of the fort (middle and bottom).

Figure 123. Lederata: schist as a masonry element with bound mortar (top); schist as an aggregate in the mortar (middle) and micrographs of the mortar (cross-section – bottom left and thin section – bottom right; present scales 0.5 mm)

Figure 124. A plaque of a Roman legionnaire carved into the schist rock below Ram Fortress

Figure 125. Roman brick kiln from *Viminacium* (top left); kiln for traditional brick production in the village of Poljana, which is still in use today (top right); making bricks in the workshop in the village of Poljana (bottom) (private archive: Emilija Nikolić)

Figure 126. Visual similarities between the Roman bricks of *Viminacium* (top) and crvenka (bottom) (Nikolić *et al.* 2023: 16, fig. 11)

Figure 127. Restored wall and joints in the historical fabric made with incompatible cement mortar many decades ago

Figure 128. Pantheon, Rome (private archive: Emilija Nikolić)

Figure 129. Remains of Trajan's Bridge on the Danube's Serbian bank today (top); ideal reconstruction of the bridge (bottom – Bjelić 2020: 36)

List of Tables

Table 1. Mortars sampled during the *MoDeCo2000* project (with data on their site origin, dating, and function in the structure)

Table 2. Chemical composition of two samples of 0–4 mm aggregate originating from the Danube in the territory of Serbia (Archives of the Laboratory for Stone and Aggregate of the IMS Institute)

Table 3. Results of testing of the grain size distribution of 0–4 mm aggregates originating from the Danube in the territory of Serbia (Archives of the Laboratory for Stone and Aggregate, in the IMS Institute)

Table 4. Chemical composition of limestones that were used or are still used for lime production in Serbia (Archives of the Laboratory for Stone and Aggregate, in the IMS Institute)

Table 5. Chemical composition of samples of natural materials with pozzolanic properties in the territory of Serbia and the surrounding region (*Archives of the Laboratory for Binders, Chemistry and Mortars, in the IMS Institute; **personal communication; ***Geological Institute of Serbia 2009; ****Križak, Maksimović, Vojnović 2014: 229; *****Nikolić *et al.* 2023:18)



LITERATURA

Arhiva Laboratorije za kamen i agregat Instituta IMS

Arhiva Laboratorije za veziva, hemiju i maltere Instituta IMS

Abbass, A., Lourenço, P.B., Oliveira, D.V. 2020

The use of natural fibers in repairing and strengthening of cultural heritage buildings, *Materials Today: Proceedings* 31/2: S321–S328.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.206>.

Adams, C. et al. 2020

The use of pXRF for light element geochemical analysis: A review of hardware design limitations and an empirical investigation of air, vacuum, helium flush and detector window technologies, *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 20/3: 366–380.
<https://doi.org/10.1144/geochem2019-076>

Albert, S., Keppler Albert, K., Quack, M. 2011

High-resolution Fourier transform infrared spectroscopy, u *Handbook of High-Resolution Spectroscopy*, ur. M. Quack, F. Merkt, New York: John Wiley and Sons Ltd, 965–1019.

Alberti, L. B. 1988

On the Art of Building in Ten Books, prev. J. Rykwert, N. Leach, R. Tavernor, Cambridge: MIT Press.

Al-Hamood, A. A., Frayyeh, Q. J., Abbas, W. A. 2021

Raw bentonite as supplementary cementitious material – a review, *ICMLAP 2020: Journal of Physics: Conference Series* 1795: 012018.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1795/1/012018>

Allen, J. R., Fullford, M. G. 2004

Early Roman mosaic materials in southern Britain, with particular reference to Silchester (*Calleva Atrebatum*): A regional geological perspective, *Britannia* 35: 9–38.
<https://doi.org/10.2307/4128620>

Allen, J. R., Fullford, M. G. Todd, J. A. 2007

Burnt Kimmeridgian shale at early Roman Silchester, south-east England, and the Roman Poole-Purbeck Complex – agglomerated geomaterials industry, *Oxford Journal of Archaeology* 26: 167–191.
<https://doi.org/10.1111/j.1468-0092.2007.00279.x>

Allen, J. R., Todd, J. A. 2010

A Kimmeridgian (Upper Jurassic) source for early Roman yellow tesserae and *Opus Sectile* in southern Britain, *Britannia* 41: 317–321.

<https://doi.org/10.1017/S0068113X10000127>

Alvarez, J. I. et al. 2021

RILEM TC 277-LHS report: A review on the mechanisms of setting and hardening of lime-based binding systems, *Materials and Structures* 54: 63.

<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01648-3>

Anson Cartwright, T. et al. 2008

ICOMOS-ISCS: Illustrated Glossary On Stone Deterioration / Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, Monuments & Sites XV, Paris: ISCS.

Antonović, D. 2022

Arheološki institut Beograd, privatna komunikacija, 2022.

Arizzi, A., Cultrone, G. 2021

Mortars and plasters—how to characterise hydraulic mortars, *Archaeological and Anthropological Sciences* 13: 144.

<https://doi.org/10.1007/s12520-021-01404-2>

Arizzi, A., Viles, H., Cultrone, G. 2012

Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings, *Construction and Building Materials* 28/1: 807–818.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.059>

Armada Brás, A. M. 2011

Grout Optimization for Masonry Consolidation, Doktorska disertacija odbranjena na Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Portugal.

Arsenović, M. et al. 2014

The effects of chemical composition on firing temperature in heavy clay brick production—chemometric approach, *InterCeram - International Ceramic Review* 63: 26–29.

<https://doi.org/10.1007/BF03401031>

Artioli, G., Secco, M., Addis, A. 2019

The Vitruvian legacy: Mortars and binders before and after the Roman world, u *The Contribution of Mineralogy to Cultural Heritage. EMU Notes in Mineralogy* 20, ur. G. Artioli, R. Oberti, London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 151–202.

<https://doi.org/10.1180/EMU-notes.20.4>

Ашкрабић, М. 2021

Утицај природног зеолита и дробљене опеке на својства кречних малтера намењених за рестаурацију историјских грађевина, Докторска дисертација одбрањена на Грађевинском факултету Универзитета у Београду, Србија

Aškrabić, M. et al. 2019a

Comparison between damage development on composite and standardized mortar specimens exposed to soluble salts, u *Proceedings of SWBSS 2021. Fifth International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures*, ur. B. Lubelli, A. Kamat, W. Quist, Delft: TU Delft Faculty of Architecture and the Built Environment, 129–139.

Aškrabić, M. et al. 2019b

Effects of fine crushed ceramic waste addition to lime-based coating for restoration of historical buildings, u *PhLDAC 2019. V International Symposium for Students of Doctoral Studies in the Fields of Civil Engineering, Architecture and Environmental Protection, Proceedings*, ur. Z. Grdić, Topličić-Ćurčić, N. Ristić, V. Milošević, Niš: Faculty of Civil Engineering and Architecture, University of Niš, 296–303.

Aškrabić, M. et al. 2019c

Effects of natural zeolite addition to lime based render layers for restoration of historical buildings, u *5th Historic Mortars Conference (HMC 2019), RILEM Proceedings Pro 130*, ur. J. I. Álvarez, J. M. Fernández, I. Navarro et al., Paris: RILEM Publications SARL, 1087–1098.

Aškrabić, M. et al. 2021

Effects of natural zeolite addition on the properties of lime putty-based rendering mortars, *Construction and Building Materials* 270: 121363.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121363>

Aškrabić, M. et al. 2023

Determination of the salt distribution in the lime-based mortar samples using XRF and SEM-EDX characterization, u *Conservation and Restoration of Historic Mortars and Masonry Structures, RILEM Bookseries vol 42*, ur. V. Bokan Bosiljkov, A. Padovnik, T. Turk, Cham: Springer, 542–553.

Avet, F. et al. 2022

Report of RILEM TC 267-TRM phase 2: optimization and testing of the robustness of the R3 reactivity tests for supplementary cementitious materials, *Materials and Structures* 55: 92.
<https://doi.org/10.1617/s11527-022-01928-6>

Baccini, P., Brunner, P. H. 2012

Metabolism of the Anthroposphere: Analysis, Evaluation, Design, Cambridge: The MIT Press.

Badica, P. et al. 2022

Mud and burnt Roman bricks from Romula, *Scientific Reports* 12: 15864.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-19427-7>

Bakolas, A. et al. 1995

Characterization of the lumps in the mortars of historic masonry, *Thermochimica Acta* 269-270: 809–816.
[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02573-1](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02573-1)

Bakolas, A. et al. 1998

Characterization of structural Byzantine mortars by thermogravimetric analysis, *Thermochimica Acta* 321/1-2: 151–160.
[https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(98\)00454-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(98)00454-7)

Balksten, K. 2007

Traditional Lime Mortar and Plaster – Reconstruction with Emphasis on Durability, Doktorska disertacija odbranjena na Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology, Švedska.

Balksten, K. 2010

Understanding historic mortar and their variations—a condition for performing restorations with traditional materials, u *2nd Conference on Historic Mortars – HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop*, ur. J. Válek, C. Groot, J. J. Hughes, Paris: RILEM Publications SARL, 11–18.

Balksten, K. et al. 2019

Petrography of historic mortar materials: polarising light microscopy as a method for characterising lime-based mortars, u *Proceedings of the 5th Historic Mortars*, ur. J. I. Alvarez, J. M. Fernandez, I. Navarro, A. Duran, R. Sirera, Paris: RILEM Publications SARL, 453–467.

Balvanović, R. et al. 2023

Archaeometry in Serbia: Where we are and where we should go next? *Interdisciplinaria Archaeologica – Natural Sciences in Archaeology* 2/2023: 235–241.
<http://dx.doi.org/10.24916/jansa.2023.2.6>

Barr, E. S, 1961

The infrared pioneers – I. Sir William Herschel, *Infrared Physics* 1/1: 1–4.
[https://doi.org/10.1016/0020-0891\(61\)90037-9](https://doi.org/10.1016/0020-0891(61)90037-9)

BelAnzué, P, Elert, K. 2021

Changes in traditional building materials: the case of gypsum in Northern Spain, *Archaeological and Anthropological Sciences* 13: 177.
<https://doi.org/10.1007/s12520-021-01438-6>

Bensharada, M. et al. 2022

Loss on ignition versus thermogravimetric analysis: a comparative study to determine organic matter and carbonate content in sediments, *Journal of Paleolimnology* 67: 191–917.
<https://doi.org/10.1007/s10933-021-00209-6>

Bilbija, N., Matović, V. 2009

Tehnička petrografija, svojstva i primene kamena, Beograd: Građevinska knjiga.

Bjelić, I. 2020

Trajan's Bridge – analysis of Apollodorus' design concept, u *Illyricvm Romanvm, Studiola in Honorem*, ur. M. Vasić, I. Popović, S. Petković, Belgrade: Institute of Archaeology, 22–39.

Bjelić, I. 2022

Using of building materials during the construction of Trajan's Bridge on the Danube, *Archaeology and Science* 18(2022): 45–58.
https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2022.18.4

Bjelić, I., Nikolić, E. 2020

From an element to a composition: Reconstruction of a vault of terracotta tubes from Timacum Minus, Serbia, *Starinar* LXX: 173–199.
<https://doi.org/10.2298/STA2070173B>

Благојевић, Д. 2019

Геолошка карта Републике Србије, Београд: Геолошки завод Србије.

Bonnie, R. 2016

Thrown into Limekilns: The reuse of statuary and architecture in Galilee from late antiquity onwards, in *Spaces in Late Antiquity: Cultural, Theological and Archaeological Perspectives*, ur. J. Day, R. Hakola, M. Kahlos, U. Tervahauta, Abingdon: Routledge – Taylor & Francis Group, 190–211.

Boynton, R. 1966

Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 1st edition, New York: John Wiley and Sons, Inc.

Boynton, R. 1980

Chemistry and Technology of Lime and Limestone, 2nd edition, New York: John Wiley and Sons, Inc.

Böke, H. et al. 2006

Characteristics of brick used as aggregate in historic brick-lime mortars and plasters, *Cement and Concrete Research* 36: 1115–1122.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.011>

Böke, H. et al. 2008

Characteristics of lime produced from limestone containing diatoms, *Construction and Building Materials* 22/5: 866–874.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.010>

Borić, D. 2019

Lepenski Vir chronology and stratigraphy revisited, *Starinar* LXIX: 9–60.
<https://doi.org/10.2298/STa1969009B>

Brouwer, P. 2010

Theory of XRF. Getting Acquainted with the Principles, Almelo: PANalytical BV.

Brunello, V. et al. 2021

Understanding the microstructure of mortars for cultural heritage using X-ray CT and MIP, *Materials* 14(20): 5939.
<https://doi.org/10.3390/ma14205939>

Bruni, S. et al. 1997

White lumps in fifth- to seventeenth-century AD mortars from Northern Italy, *Archaeometry* 39/1: 1–7.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.1997.tb00786.x>

Bui, H. T. T. 2021

Study on performance enhancement of coconut fibres reinforced cementitious composites, Doktorska disertacija odbranjena na Civil Engineering. Normandie Université, Francuska.

Bunaciu A. A., Udriștioiu, E. G., Aboul-Enein, H. Y. 2015

X-ray diffraction: instrumentation and applications, *Critical Reviews in Analytical Chemistry* 45/4: 289–299.

<https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>

Callebaut, K., van Balen, K. 2000

Dry-slaked lime: An alternative binder for restoration mortars, u *Proceedings of the International workshop on Urban Heritage and Building Maintenance VII. Maintenance and Restrengthening of Materials and Structures: Plaster*, Zürich, 65–72.

Callebaut, K. et al. 1999

Petrographical, mineralogical and chemical characterisation of lime mortars in the Saint-Michael's Church (Leuven, Belgium), u *International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests*, ur: P. Bartos, C. Groot, J. J. Hughes, Paris: RILEM Publications SARL, 113–123.

Callister, W. Jr., Rethwisch, D. G. 2018

Materials Science and Engineering. An Introduction, New York: Wiley and Sons, Inc.

Casadio, F., Chiari, G., Simon, S. 2005

Evaluation of binder/aggregate ratios in archaeological lime mortars with carbonate aggregate: a comparative assessment of chemical, mechanical and microscopic approaches, *Archaeometry* 47/4: 671–689.

<https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2005.00226.x>

Chen, B. et al. 2020

Petrography, mineralogy, and geochemistry of combustion metamorphic rocks in the Northeastern Ordos Basin, China: Implications for the origin of "White Sandstone", *Minerals* 10: 1086.

<https://doi.org/10.3390/min10121086>

Cizer, Ö. et al. 2010

Assessment of the compatibility of repair mortars in restoration projects, *Advanced Materials Research* 133-134: 1071–1076.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.1071>

Cizer, Ö, van Balen, K., van Gemert, D. 2010

Competition between hydration and carbonation in hydraulic lime and lime-pozzolana mortars, *Advanced Materials Research* 133-134: 241–246.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.241>

Cooper, F. G. 1921

Munsell Manual of Color. Defining and Explaining the Fundamental Characteristics of Color, Baltimore: Munsell Color Company, Inc.

Copsey, N. 2019a

Hot Mixed Lime and Traditional Mortars. A Practical Guide to their Use in Conservation and Repair, Ramsbury: The Crowood Press Ltd.

Copsey, N. 2019b

Historic Environment Scotland Technical Paper 30: Historic Literature Review of Traditional Lime Mortars: Excerpts from Historic texts 160BC–1955, Edinburgh: Historic Environment Scotland.

Copsey, N. 2019c

Traditional hot mixed lime mortars for conservation and repair, *Journal of Building Survey, Appraisal & Valuation* 8/1: 9–30.

Copsey, N. 2019d

A Critical Review of Historic Literature Concerning Traditional Lime and Earth-Lime Mortars, Master teza odbranjena na Department of Archaeology, Conservation Studies, University of York, Engleska.

Copsey, N. 2020

Like-for-like and compatible mortars for the repair of traditional buildings, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-1: 1017–1024.

Copsey, N. 2022

The rudiments of traditional mortar preparation and use, *Archaeology and Science* 18(2022): 199–222.

https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2022.18.14

Corti, C. et al. 2013

Thermal analysis and archaeological chronology: The ancient mortars of the site of Baradello (Como, Italy), *Thermochimica Acta* 572: 71–84.

<https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.08.015>

Cosca, M. A. et al. 1989

Pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal beds, Powder River Basin, Wyoming, *American Mineralogist* 74: 85–100.

Costa, U., Massazza, F. 1974

I fattori che governano la reazione con la calce di pozzolane Italiane / Factors affecting the reaction with lime of Italian pozzolans, *Il Cemento* 3: 131–139.

Costa, U., Massazza, F. 1977

Influenza del trattamento termico sulla reattività con la calce di alcune pozzolane naturali / Influence of the thermal treatment on the reactivity of some natural pozzolanas with lime, *Il Cemento* 74: 105–122.

Costa, D., Magalhães, A., do Rosário Veiga, M. 2012

Characterization of mortars using DRMS: tests on field panels samples, u *Historic Mortars: Characterisation, Assessment and Repair*, ur. J. Válek, J. J. Hughes, C. J. W. P. Groot, Dordrecht: Springer, 413–423.

Cramb, I. 2021

The Art of the Stonemason, Mechanicsburg: Stackpole Books.

Cultrone, G., Sebastián, E., Ortega Huerta, M. 2005

Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes, *Cement and Concrete Research* 35: 2278–2289. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.012>

Curtis, R. 2015

Clay Mortars for Masonry Buildings, Edinburgh: Historic Scotland.

Cvetković, V., Šarić, K. 2022

Tuffs of Serbia – what we need to know when characterizing them as archaeological raw material, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 64–67.

D'Ambrosio et al. 2015

Provenance materials for Vitruvius' *harenae fossiciae* and *pulvis puteolanis*: Geochemical signature and historical-archaeological implications. *Journal of Archaeological Science: Reports* 2: 186–203. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2015.01.012>

Daugbjerg, T. S. et al. 2020

A field guide to mortar sampling for radiocarbon dating, *Archaeometry* 63/5: 1121–1140.

Daugbjerg, T. S. et al. 2022

Radiocarbon dating of lime plaster from a Roman period cister in ancient Gerasa, Jerash in Jordan, *Journal of Archaeological Science: Reports* 42: 103373.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103373>

Day, R. L. 1990

Pozzolans for Use in Low-cost housing, A State of the Art Report prepared for The International Development Research Centre, Ottawa, Canada, Ottawa: International Development Research Centre.

De Laine, J. 2001

Bricks and mortar: Exploring the economics of building techniques at Roma at Ostia, u *Economies Beyond Agriculture in the Classical World*, ur. D. J. Mattingly, J. Salmon, London and New York: Routledge, 230–268.

De Laine, J. 2021

Production, transport and onsite organization of Roman mortars and plasters, *Archaeological and Anthropological Sciences* 13: 1-17.
<https://doi.org/10.1007/s12520-021-01401-5>

Del Monte, E., Boschi, S., Vignoli, A. 2020

Prediction of compression strength of ancient mortars through in situ drilling resistance technique, *Construction and Building Materials* 237: 117563.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117563>

Delgado Rodrigues, J., Grossi, A. 2007

Indicators and rating for the compatibility assessment of conservation actions, *Journal of Cultural Heritage* 8/1: 32–43.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.04.007>

Делић-Николић, И. 2014

Типологија камена карбонатног порекла, у *Креч као историјски материјал: зборник радова*, ur. А, Јеликић, Д. Станојевић, Београд: Републички завод за заштиту споменика културе – Београд, 25–32.

Delić-Nikolić, I. et al. 2022

Geology of raw materials in Roman mortars of the Danube limes in Serbia, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 44–48.

Delić-Nikolić, I. et al. u štampi

Landscape and its traces in Roman mortars of the Danube limes in Serbia, u *RILEM TC 277 LHS WORKSHOP Lime Based Materials for Repairing Historic Structures*, ur. I. Papayianni, Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki.

Delić-Nikolić, I., Kurešević, L., Vušović, O. 2017

Dolomiti, svojstva i mogućnosti upotrebe u građevinarstvu, u *Međunarodni simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija*, Zbornik radova, ur. D. Jevtić, R. Folić, Beograd: Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, 463–470.

De Nardi, C. et al. 2017

Effect of age and level of damage on the autogenous healing of lime mortars, *Composites Part B: Engineering* 124: 144–157.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.041>

Dheilly, R. M. et al. 2002

Influence of storage conditions on the carbonation of powdered $\text{Ca}(\text{OH})_2$, *Construction and Building Materials* 16/3: 155–161.

[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00012-0)

Dilaria, S., Secco, M. 2022

Mortar recipes through the ages. A brief review of data from prehistory to late antiquity, *Archaeology and Science* 18: 113–126.

https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2022.18.9

Dilaria, S. et al. 2021

Phasing the history of ancient buildings through PCA on mortars' mineralogical profiles: the example of the Sarno Baths (Pompeii), *Archaeometry* 64/4: 866–882.

<https://doi.org/10.1111/arcm.12746>

Dilaria, S. et al. 2023

Early exploitation of Neapolitan pozzolan (*pulvis puteolana*) in the Roman theatre of Aquileia, Northern Italy, *Scientific Reports* 13: 4110.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-30692-y>

Divya Rani, S., Rahul, A. V., Santhanam, M. 2021

A multi-analytical approach for pore structure assessment in historic lime mortars, *Construction and Building Materials* 272: 121905.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121905>

Donatello, S. et al. 2010

Comparison of test methods to assess pozzolanic activity, *Cement and Concrete Composites* 32/2: 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008>

Drdácký, M., Michoinová, D. 2003

Lime mortars with natural fibres, u *Proc. Int. Symp. Brittle Matrix Composites 7*, ur. A. M. Brandt, V. C. Li, I. H. Marshall, Warsaw: ZTUREK RSI and Woodhead Publ., 523–532.

Drdácký, M., Slížková, Z. 2008

Mechanical characteristics of historic mortars from tests on small-sample non/standard specimen, *Materials Science and Applied Chemistry* 17: 20–29.

Dumitrescu, T. F., Pesce, G. L. A., Ball, R. J. 2017

Optimization of drilling resistance measurement (DRM) user-controlled variables, *Materials and Structures* 50: 243.
<https://doi.org/10.1617/s11527-017-1113-8>

Đorđević V., Đorđević P., Milovanović D. 1991

Osnovi petrologije, Beograd: Nauka.

Echlin, P. 2009

Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, New York: Springer.

Eckel, E. C. 1922

Cements, Limes, and Plasters: Their Materials, Manufacture and Properties, 2nd edition, London: John Wiley and Sons, Inc.

Elert, K. et al. 2022

Lime mortars for the conservation of historic buildings, *Studies in Conservation* 47: 62–76.
<https://doi.org/10.1179/sic.2002.47.1.62>

Elsen, J. 2006

Microscopy of historic mortars–A review, *Cement and Concrete Research* 36: 1416–1424.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.006>

Elsen, J., van Balen, K., Mertens, G. 2012

Hydraulicity in historic lime mortars: a review, u *Historic Mortars: Characterisation, Assessment and Repair*, ur. J. Válek, J. J. Hughes, C. J. W. P. Groot, Dordrecht: Springer, 125–139.

Erić, S. 2019

Primenjena mineralogija, Beograd: Univerzitet u Beograd, Rudarsko-geološki fakultet.

Estes, M. B. et al. 2010

Clinker, pumice, scoria, or paralava? Vesicular artifacts of the Lower Missouri Basin, *Plains Anthropologist* 55: 67–81.

<https://doi.org/10.1179/pan.2010.013>

Fabbri, A. et al. 2021

An overview of the remaining challenges of the RILEM TC 274-TCE, testing and characterization of earth-based building materials and elements, *RILEM Technical Letters* 6: 150–157.

Fang, S. Q. et al. 2014

The identification of organic additives in traditional lime mortar, *Journal of Cultural Heritage* 15/2: 144–150.

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.04.001>

Fang, S. et al. 2015

A study of traditional blood lime mortar for restoration of ancient buildings, *Cement and Concrete Research* 76: 232–241.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.06.006>

Favreau, G., Meisser, N., Chiappero, P.-J. 2010

Un aspect méconnu du Parc Naturel du Luberon: Les minéraux de pyrométamorphisme de Saint-Maime (Alpes-de-Haute-Provence), *Courrier Scientifique du Parc Naturel Régional du Luberon* 9: 12–27.

Fernandez, R., Martirena, F., Scrivener, K. L. 2011

The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, *Cement and Concrete Research* 41/1: 113–122.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013>

Fernandes, M. 2008

Earth mortars and earth-lime renders, *Conservar Património* 8: 21–27.

https://doi.org/10.14568/cp8_4

Ferraz, E. et al. 2019

Recycling waste seashells to produce calcitic lime: characterization and wet slaking reactivity, *Waste and Biomass Valorization* 10/8: 2397–2414.

<https://doi.org/10.1007/s12649-018-0232-y>

Figueireido, C., Lawrence, M., Ball, R. J. 2016

Chemical and physical characterization of three NHL2 binders and the relationship with the mortar properties, u *REHABEND 2016 Euro-American Congress, Construction Pathology, Rehabilitation Technology And Heritage Management (6th REHABEND Congress)*, ur. L. Villegas, I. Lombillo, H. Blanco, Y. Boffill, Santander: University of Cantabria – Building Technology R&D Group, 1293–1300.

Figueireido, C. 2018

Properties and Performance of Lime Mortars for Conservatiion: The Role of Binder Chemistry and Curing Regime, Doktorska disertacija odbranjena na University of Bath, Department of Architecture and Civil Engineering, Engleska.

Filipović I. Rodin, V. 1980

Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za list Obrenovac, Beograd: Savezni geološki zavod.

Forsyth, M. (ur.) 2008

Materials and Skills for Historic Building Conservation, Oxford: Wiley-Blackwell.

Franković. M. 2022

Fizičko-hemijsko raspadanje krečnjaka ugrađenih u objekte Beogradske tvrđave i mogućnost konsolidacije, Doktorska disertacija odbranjena na Rudarsko-geološkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, Srbija.

Франковић, М., Игњатовић, М. 2021

Мозаик са археолошког налазишта Косанчићев венац 12-16 у Београду: Конзервација и могућности презентације, *Годишњак града Београда LXVIII*: 47–69.

Fusade, L. et al. 2019

The effect of wood ash on the properties and durability of lime mortar for repointing damp historic buildings, *Construction and Building Materials* 212: 500–513.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.326>

Fusade, L., Viles, H. A. 2019

A comparison of standard and realistic curing conditions of natural hydraulic lime repointing mortar for damp masonry: Impact on laboratory evaluation, *Journal of Cultural Heritage* 37: 82–93.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.11.011>

Gajic-Kvascev, M., Andrić, V. 2013

Portable EDXRF analytical technique in cultural heritage: advantages and challenges, u *Serbia – Italia, Italian – Serbian Bilateral Workshop on Science for Cultural Heritage*, ur P. Battinelli, J. Striber, Belgrado: Associazione Italiani e Serbi Scienziati e Studiosi, 119–125.

Gameiro, A. et al. 2012

Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing, *Thermochimica Acta* 535: 36–41.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.02.013>

Gameiro, A. et al. 2014

Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: influence of binder:aggregate ratio, *Cement and Concrete Research* 45: 264–271.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.010>

Гарашанин, М., Васић, М. 1980

Трајанов мост – кастел Понтес, у *Ђерданске свеске* I, ур. В. Кондић, Београд: Археолошки институт, 7–24.

Gardiner, D. J. 1989

Introduction to Raman scattering, u *Practical Raman Spectroscopy*, ur. D. J. Gardiner, P. R. Graves, Berlin Heidelberg: Springer, 1–12.

Gerharz, R. R., Lantermann, R., Spennemann, D. R. 1988

Munsell Color Charts: A necessity for archaeologists? *Australian Historical Archaeology* 6: 88–95.

Geološki institut Srbije 2009

Prirodni granulirani zeolit. Izveštaj o izvršenim ispitivanjima, Beograd: Geološki institut Srbije.

Giesche, H. 2006

Mercury porosimetry: a general (practical) overview, *Particle & Particle Systems Characterization* 23/1, 9–19.
<https://doi.org/10.1002/ppsc.200601009>

Goedicke, C. 2011

Dating mortar by optically stimulated luminescence: A feasibility study, *Geochronometria* 38: 42–49.
<https://doi.org/10.2478/s13386-011-0002-0>

Goins, E. S. 2004

Standard Practice for Determining the Components of Historic Cementitious Materials, Natchitoches: National Center for Preservation Technology and Training, Technology Saving the Future of America's Heritage.

Golubović S., Mrđić, N. 2014

Danube Limes as a UNESCO World Heritage Site, *Archaeology and Science* 9(2013): 101–118.
https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2013.9.9

Gomes, M. I., Faria, P., Gonçalves, T. D. 2018

Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers, *Journal of Cleaner Production* 172: 2401–2414.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>

Gonzales, M. A. 2010

Badlands of the Northern Great Plains: Hell with the fires out, u *Geomorphological Landscapes of the World*, ur. P. Migon, Dordrecht: Springer, 29–38.

Goodhew, P. J., Humphreys, J., Beanland, R. 2001

Electron Microscopy and Analysis, 3rd edition, London and New York: Taylor & Francis.

Grapes, R. et al. 2011

Paragenesis of unusual Fe-cordierite (sekaninaite)-bearing paralava and clinker from the Kuznetsk coal basin, Siberia, Russia, *Contributions to Mineralogy and Petrology* 162: 253–273.
<https://doi.org/10.1007/s00410-010-0593-0>

Grapes, R., Zhang, K., Peng, Z.-I. 2009

Paralava and clinker products of coal combustion, Yellow River, Shanxi Province, China. *Lithos* 113: 831–843.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.07.009>

Green, K. 1990

The Archaeology of the Roman Economy, Berkeley: University of California Press.

Groot, C. J. W. P. et al. 1999

Historic mortars: characteristics and tests - Concluding summary and state-of-the-art, u *International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests*, ur. P. Bartos, C. Groot, J. J. Hughes, Paris: RILEM Publications SARL, 443–454

Groot, C. J. W. P. et al. 2004

Characterisation of old mortars with respect to their repair: A state of the art, u *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 167-COM: Characterization of Old Mortars with Respect to Their Repair*, ur. C Groot, G. Ashall, J. Hughes, Paris: RILEM Publications SARL, 1–19.

Groot, C. et al. 2012

RILEM TC 203-LHS report: Repair mortars for historic masonry. Performance requirements for renders and plasters, *Materials and Structures* 45: 1277–1285.
<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9916-0>

Groot, C. et al. 2022

RILEM TC 277-LHS report: lime-based mortars for restoration-a review on long-term durability aspects and experience from practice, *Materials and Structures* 55: 245.
<https://doi.org/10.1617/s11527-022-02052-1>

Guibert, P. et al. 2020

Modeling light exposure of quartz grains during mortar making: Consequences for optically stimulated luminescence dating, *Radiocarbon* 62/3 (MoDIM 2018 Proceedings of the Mortar Dating International Meeting): 693–711.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.34>

Gulbe, L., Vitina, I., Setina, J. 2017

The influence of cement on properties of lime mortars, *Procedia Engineering* 172: 325–332.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.030>

Gušić, S. 1996

Trajan's Bridge – A contribution towards its reconstruction, u *Roman Limes on the Middle and Lower Danube*, ur. P. Petrović, Belgrade: Archaeological Institute, 259–260.

Hajdas, I. et al. 2018

Preparation and dating of mortar samples – Mortar dating inter-comparison study (MODIS), *Radiocarbon* 59/6: 1845–1858.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2017.112>

Hale, J. et al. 2003

Dating ancient mortar, *American Scientist* 91: 130–137.

Hanein, T. et al. 2022

Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL, *Materials and Structures* 55: 3.

<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-6>

Hansen, E. F., Rodriguez-Navarro, C., van Balen, K. 2008

Lime putties and mortars: insights into fundamental properties, *Studies in Conservation* 53/1: 9-23.

Hay, R. A., Sheppard, R. L. 2001

Formation of zeolites in open hydrologic systems, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 45/1: 261c275.

<https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.8>

Heffern, E. et al. 2007

Geochronology of clinker and implications for evolution of the Powder River Basin landscape, Wyoming and Montana, u *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World. GSA Reviews in Engineering Geology XVIII*, ur. G. B. Stracher, Boulder: Geological Society of America, 155–175.

[https://doi.org/10.1130/2007.4118\(10\)](https://doi.org/10.1130/2007.4118(10))

Henry, A. 2018

Hot-mixed mortars: the new lime revival, *Context* 154: 30–33.

Henry, A., Stewart, J. 2011

English Heritage Practical Building Conservation. Mortars, Renders & Plasters, London: Ashgate Publishing Limited

Hetherington, S., Laycock, E. 2020

A comparative study into the performance of hot mixed and lime putty mortars with additions of metakaolin and brick dust pozzolans, *Journal of Building Survey, Appraisal and Valuation* 8/4: 309–325.

Hewlett, P., Liska, M. 2019

Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 5th edition, Oxford: Elsevier-Butterworth-Heinemann.

Hobbs, L.W., Siddall, R. 2011

Cementitious materials of the ancient world, u *Building Roma Aeterna: Current Research on Roman Mortar and Concrete*, ur. Å. Ringbom, R.L. Hohlfelder, Helsinki: Societas Scientiarum Fennica, 34–58.

Hodder I. 2006

The Leopard's Tale: Revealing the Mysteries of Çatalhöyük, London: Thames & Hudson.

Hoffman, G. K. 1996

Natural clinker—the Red Dog of aggregates in the Southwest, u *Proceedings of the 31st Forum on the Geology of Industrial Minerals—The Borderland Forum, El Paso, Texas, 23–28 April 1995*, ur. G. S. Austin *et al.*, Socorro: Authority of State of New Mexico, USA, 187–195.

Hou, X. *et al.* 2016

Inductively coupled plasma optical emission spectrometry, u *Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory, and Instrumentation*, ur. R. A. Meyers, New York: John Wiley & Sons, Ltd.

Hromiš, N. 2015

Razvoj biorazgradivog aktivnog ambalažnog materijala na bazi hitozana: sinteza, optimizacija svojstava, karakterizacija i primena, Doktorska disertacija odbranjena na Tehnološkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu, Srbija.

Hughes, J. J., Callebaut K. 2002

In-situ visual analysis and practical sampling of historic mortars, *Materials and Structures* 35: 70–75.

<https://doi.org/10.1007/BF02482103>

Hughes, J. J., Cuthbert, S., Bartos, P. 1999

Alteration textures in historic Scottish lime mortars and the implications for practical mortar analysis, u *Proceedings of the 7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, ur. H. S. Pietersen, J. A. Larbi, H. H. A. Janssen, Delft: Delft University of Technology, 417–426.

Hughes, J. J., Leslie, A. B., Callebaut, K. 2001

The petrography of lime inclusions in historic lime based mortars, *Annales Geologiques des pays Helleniques, Edition Speciale XXXIX*: 359–364.

Hughes, J. J., Válek, J. 2000

Historic Scotland Technical Advice Notes: Literature Review: Mortars in Historic Buildings, Edinburgh: Historic Scotland.

Hunt, A. M. W., Speakman, R. J. 2015

Portable XRF analysis of archaeological sediments and ceramics, *Journal of Archaeological Science* 53: 626–638.

<https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.11.031>

Hurst, H. 2022

Marcello Mogetta, *The Origins of Concrete Construction in Roman Architecture: Technology and Society in Republican Italy*, Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2021, *The Journal of Roman Studies* 112: 286–287.

Hwang, H.-Y. et al. 2022

Comparative study of effects of natural organic additives and cellulose ether on properties of lime-clay mortars, *Journal of Building Engineering* 48/1:103972.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103972>

IAEA 1997

Sampling, Storage and Sample Preparation Procedures for X ray Fluorescence Analysis of Environmental Materials (IAEA-TECDOC-950), Vienna: International Atomic Energy Agency.

ICOMOS 1964

International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964),
https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/Venice_Charter_EN_2023.pdf
(pristupljeno 16.januara 2024.)

ICOMOS 1981

Summary Report on the VIth ICOMOS General Assembly, Roma, Bari, Firenze, Verona: ICOMOS.

Ilić, B. et al. u pripremi

Design of conservation mortars for the archaeological sites of *Lederata* and *Egeta III* in Serbia.

Ilić, B., Mitrović, A., Miličić, Lj. 2010

Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin, *Hemijska industrija* 64/4: 351–356.
<https://doi.org/10.2298/HEMIND100322014I>

Ingham, J. 2010

Geomaterials under the microscope. A colour guide, London: Manson Publishing Ltd.

Isaac, B. 1988

The meaning of the terms *limes* and *limitanei*, *The Journal of Roman Studies* 78: 125–147.

Iskra-Janošić, I. 1992

Građevinski materijali i njihova upotreba u Cibalama, *Opvscula Archaeologica* 16/1: 207–218.

Jackson, M. 2014

Sea-water concretes and their material characteristics, u *Building for Eternity. The History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea*, ur. J. Oleson, Oxford: Oxbow Press, 141–189.

Jackson, M. et al. 2007

Geological observations of excavated sand (*harenae fossiciae*) used as fine aggregate in Roman pozzolanic mortars, *Journal of Roman Archaeology* 20: 25–53.
<https://doi.org/10.1017/S1047759400005304>

Jackson, M. et al. 2012

Cement microstructures and durability in ancient Roman seawater concretes, u *Historic Mortars: Characterisation, Assessment and Repair*, ur. J. Válek, J. J. Hughes, C. J. W. P. Groot, Dordrecht: Springer, 49–76.

Jackson, M. et al. 2013

Unlocking the secrets of Al-tobermorite in Roman seawater concrete, *American Mineralogist* 98: 1669–1687.
<https://doi.org/10.2138/am.2013.4484>

Janačković, Đ., Radovanović, B., Dimitrijević, A. 2002

Mogućnosti i pravci razvoja proizvodnje građevinskog materijala na sirovinskom području Kostolačkog basena, u *Savetovanje Energetski kompleks Kostolac i životna sredina, zbornik radova*, Požarevac: Savez Društava inženjera i tehničara opštine Požarevac, 176–177.

Janssens, E., Serre, G. 2010

Compatibiliteit van herstellingsmortels in Restauratieprojecten, Master teza odbranjena na K.U.Leuven, Belgija.

Jevremović, D. 1997

Geološki građevinski materijali, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet.

Јевтић, М. 2004

Прочитавања прошлости: разговори са Ђурђем Бошковићем, Београд: Археолошки институт.

Jevtović, Lj. 2022

Production of ceramic building material in ancient Viminacium, *Starinar* LXXII: 133–154.

<https://doi.org/10.2298/STA2272133J>

Јевтовић, Љ. 2023

Опекарска делатност VII Клаудијеве легије, Докторска дисертација одбрањена на Филозофском факултету Универзитета у Београду, Србија.

Jevtović, Lj. i dr. 2020

Opeke VII Klauđijevе legije sa lokaliteta Čair – Castrum (Viminacijum): preliminarna mineraloško-petrološka analiza, u *Aktuelna interdiciplinarna istraživanja tehnologije u arheologiji jugoistočne Evrope*, ur. S. Vitezović, K. Šarić, D. Antonović, Beograd: Srpsko arheološko društvo, 82–88.

Јеликић, А. 2014

Хемизам у основи кречног циклуса у *Креч као историјски материјал: зборник радова*, ur. А. Јеликић, Д. Станојевић, Београд: Републички завод за заштиту споменика културе – Београд, 41–48.

Jilek, S., Breeze, D., Thiel, A. 2009

The Frontiers of the Roman Empire. The Danube Limes as a River Frontier, Generico.

Johnson, H. V. 1926

Cement-Lime Mortars. Technological Papers of the Bureau of Standards, No. 308 (Part of Vol. 20), Washington: Government Printing Office.

Jović, B. 2021

Infracrvena spektroskopija, Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet.

Jovičić, M. 2022

Researching Roman mortars from the Danube region - Archaeological perspective of the MoDeCo2000 project, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 40–43.

Jovičić, M. i dr. 2023

Naučnoistraživački projekat MoDeCO2000 – realizacija projekta u 2020. godini, u *Arheologija u Srbiji. Projekti Arheološkog instituta u 2020. godini*, ur. S. Vitezović, Đ. Obradović, M. Radišić, Beograd: Arheološki institut, 219–234.

Jovičić, M., Milovanović, B. 2017

Roman brick kiln from the eastern necropolis of Viminacium, *Archaeology and Science* 12(2016): 19–36.
https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2016.12.2

Jordović, Č. 1994

Grnčarski i ciglarski centar u Viminacijumu, *Saopštenja XXVI*: 95–106.

Юсимовић, Е. 1860

Грађанска архитектура и грађенъ путова. Понајпрече за учеснике лица, а и за свакогъ другога, Београд: Књигопечатњин и Книжества Србскогъ.

Judd, J. 1908

Henry Clifton Sorby, and the birth of microscopical petrology, *Geological Magazine* 5/5: 193–204.

Jun Oh, S. 2020

Comparative Laboratory Evaluation of Natural Hydraulic Lime Mortars for Conservation, Master teza odbranjena na Graduate School of Architecture, Planning and Preservation, Columbia University, SAD.

Kalamković, S. 2015

Razvoj hemijske proizvodnje u doba antike na teritoriji današnje Srbije, Doktorska disertacija, Doktorska disertacija odbranjena na Prirodno-matematičkom fakultetu, Departman za hemiju, biohemiju i zaštitu životne sredine, Univerziteta u Novom Sadu, Srbija.

Kasaniya, M. et al. 2022

Exploring the efficacy of emerging reactivity tests in screening pozzolanic materials, *Construction and Building Materials* 325: 126781.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126781>

Kasaniya, M., Thomas, M.D.A., Moffatt, E.G. 2019

Development of rapid and reliable pozzolanic reactivity test method, *ACI Materials Journal* 116/4: 145–156.
<https://doi.org/10.14359/51716718>

Кашин, В. 2017

Минералогенија зеолитских туфова Србије, Докторска дисертација одбрањена на Рударско-геолошком факултету Универзитета у Београду, Србија.

Kašić, V. i dr. 2017

Mineraloška i kristalohemijska svojstva minerala HEU-tipa iz ležišta zeolitskih tufova Srbije, *Hemijska industrija* 71/1: 49–60.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND151019017K>

Kašić, V. i dr. 2018

Karakterizacija zeolitskog tufa iz ležišta „Igroš-Vidojevići” sa geološkog i tehnološkog aspekta, *Hemijska industrija* 72/1: 29–37.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND170428015K>

Kang, S.-H. et al. 2019

Hydrated lime activation on byproducts for eco-friendly production of structural mortars, *Journal of Cleaner Production* 231: 1398–1398.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.313>

Каниц, Ф. 1989

Србија: земља и становништво од римског доба до краја XIX века, друга књига, Београд: Српска књижевна задруга.

Катанић, Н. 1958

Неколико претстава Трајановог моста на Дунаву, *Зборник заштите споменика културе* IX: 115–120.

Каровић, Г., Nenadović, М. 2004

Multibeam sonar on the remains of the Trajan's Bridge, u *The Application of Recent Advances in Underwater Detection and Survey Techniques to Underwater Archaeology*, ur. T. Akal et al., Bodrum: Uluburun Publishing, 91–98.

Kekanović, М., Čeh, А., Karaman, G. 2011

Betoni od prirodno pečene gline—Požarevac, u *Radovi po pozivu saopšteni na Savetovanju Održivi razvoj Grada Požarevca i Energetskog kompleksa Kostolac*, Požarevac: Gradska skupština Požarevac, 23–27.

Kesikidou, F., Stefanidou, M. 2019

Natural fiber-reinforced mortars, *Journal of Building Engineering* 25: 100786.

<https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100786>

Kingery D., W., Vandiver, P. B., Prickett, M. 1988

The beginnings of pyrotechnology, part II: Production and use of lime and gypsum plaster in the Pre-Pottery Neolithic Near East, *Journal of Field archaeology* 15: 219–243.

<https://doi.org/10.2307/530304>

Klisińska-Kopacz, A. et al. 2010

Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility, *Journal of Cultural Heritage* 11/4: 404–410.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.03.002>

Klisińska-Kopacz, A., Tišlova, R. 2013

The effect of composition of Roman cement repair mortars on their salt crystallization resistance and adhesion, *Procedia Engineering* 57: 565–571.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.072>

Knežević, V. i dr. 1984

Dijatomiti kolubarskog ugljenog basena i mogućnost njihove valorizacije kao nemetalne mineralne sirovine, u *Geološka istraživanja u privredi i prostornom razvoju Beograda*, Beograd: Savez društava inženjera i tehničara Beograda, 313–319.

Knöfel, D. 1991

Alte und neue Mörtel. Materialkundliche Untersuchungen und Empfehlungen für Instandsetzungsmörtel, *Arbeitshefte des Sonderforschungsbereiches 315, Erhalten Historisch Bedeutsamer Bauwerke* 10: 32–38.

Köberle, T. 2020

Heißkalkmörtel und Heißkalktünchen: Anwendungsgeschichte und naturwissenschaftliche Charakterisierung der Eigenschaften von Heißkalk in der Baudenkmalpflege / Hot applied mortar (HAM) and hot applied limewash: Application history and scientific characterization of the properties of hot applied lime mortars (HAM) in the preservation of architectural monuments, Doktorska disertacija odbranjena na Hochschule für Bildende Künste Dresden, Dresden, Nemačka.

Köberle, T. et al. 2019

Hot applied lime mortar – assessment of a traditional technique used in modern restoration: u *Proceedings of the 5th Historic Mortars Conference. RILEM Proceedings PRO 130*, ur. J. I. Alvarez, J. M. Fernandez, I, Navarro et al., Paris: RILEM Publications SARL. 614–627.

Кojiчић, Д. 2014: 207

Проблеми у конзервацији објеката од земље у Војводини, *Модерна конзервација* 2: 203–213.

Kojičić, D., Kojičić, B 2015

Priručnik za obnovu i unapređenje energetske efikasnosti kuća od zemlje, Zrenjanin: Klub finih zanata.

Korać, M. 2019

Viminacium Urbs et Castra Legionis. Research, Protection, Presentation and Valorisation, Belgrade: Institute of Archaeology

Korać, M. et al. 2014

Frontiers of the Roman Empire – Granice Rimske imperije / Roman Limes in Serbia – Rimski limes u Srbiji, Belgrade: Institute of Archaeology

Krajcar-Bronić, I. et al. 2010

Radiocarbon application in environmental science and archaeology in Croatia, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 619/1-3: 491–496.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.032>

Kraus, K., Droll, K. 2005

Investigations of soluble salt contents in modern hydraulic lime mortars – test method and first results, u *International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry, Delft, the Netherlands, 26th-28th January 2005*, ur. C. Groot, Paris: RILEM Publications SARL, 207–213.

Križak, D. 2003

Diatomite of Bunuševac near Vranje, u *Palaeolimnology of the Serbian Neogene: Guide, Workshop, 7 - 11 July 2003 in Serbia*, ur. Lj. Savić, N. Krstić, Belgrade: Serbian Geological Society, 72–74.

Križak, D., Maksimović, M., Vojnović, D. 2014

"Jablanica 1" – Prospective zeolite deposit, *Tehnika – rudarstvo, geologija i metalurgija* 65: 225–230.

Kristensen, T. J. et al. 2019

Identifying and sourcing pyrometamorphic artifacts: clinker in subarctic North America and the hunter-gatherer response to a Late Holocene volcanic Eruption, *Journal of Archaeological Science: Reports* 23: 773–790.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.11.039>

Krstev, B. i dr. 1993

Ispitivanje mogućnosti dobijanja kompozitnog proizvoda opalske breče lokaliteta Opalit-Češinovo – R. Makedonija, u *XXV Oktobarsko savetovanje, saopštenja, I knjiga, Bor, 1 – 3. Oktobar 1993*, 567–570.

Kuckova, S. et al. 2021

Analysis of protein additives degradation in aged mortars using mass spectrometry and principal component analysis, *Construction and Building Materials* 288: 123124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123124>

Kudlacz, K. 2013

Phase Transitions Within the Lime Cycle: Implications in Heritage Conservation, Doktorska disertacija odbranjena na Faculty of Science, University of Granada, Španija.

Kumar, N., Kumbhat, S. 2018.

Concise Concepts of Nanoscience and Nanomaterials, Jodhpur: Scientific Publishers.

Kutlusoy, M. et al. 2023.

Production parameters of novel geopolymer masonry mortar in heritage buildings: Application in masonry building elements, *Journal of Building Engineering* 76/1: 107038. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107038>

Laita, E., Bauluz, B., Yuste, A. 2019

High-temperature mineral phases generated in natural clinkers by spontaneous combustion of coal, *Minerals* 9: 213. <https://doi.org/10.3390/min9040213>

Lanas, J., Sierra, R., Alvarez, J. I. 2006

Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions, *Cement and Concrete Research* 36: 961–970. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.003>

Lancaster, L. 2005

Concrete Vaulted Construction in Imperial Rome. Innovations in Context, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Lancaster, L. 2015

Innovative Vaulting in the Architecture of the Roman Empire—1st to 4th Centuries CE, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Langer, W. H. 2011

Aggregate Resource Availability in the Conterminous United States, Including Suggestions for Addressing Shortages, Quality, and Environmental Concerns, Open-File report 2011–1119, Reston: US Geological Survey.

Laperche, V., Lemière, B. 2021

Possible pitfalls in the analysis of minerals and loose materials by portable XRF, and how to overcome them, *Minerals* 11(1): 33.
<https://doi.org/10.3390/min11010033>

Laverde, V. et al. 2022

Use of vegetable fibres as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review, *Construction and Building Materials* 340(1-3): 127729.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729>

Lavina, B., Dera P., Downs, R.T. 2014

Modern X-ray diffraction methods in mineralogy and geosciences, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 78: 1–31.
<http://dx.doi.org/10.2138/rmg.2014.78.1>

Лазаревић, Ј. 2019

Раманова спектроскопија фармаколошки активних супстанци и биокатализатора, Докторска дисертација одбрањена на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, Србија.

Lea, F.M. 1970

The Chemistry of Cement and Concrete, London: Edward Arnold Ltd.

Le Blanc, R. J. 1991

Prehistoric clinker use on the Cape Bathurst Peninsula, Northwest Territories, Canada: The dynamics of formation and procurement, *American Antiquity* 56: 268–277.

Le Korbizje 2013

Razgovori sa studentima arhitektonskih škola, Loznica: Karpos.

Londono-Zuluaga, D. et al. 2022

Report of RILEM TC 267-TRM phase 3: validation of the R³ reactivity test across a wide range of materials, *Materials and Structures* 55: 142.
<https://doi.org/10.1617/s11527-022-01947-3>

Lindross, A. et al. 2018

Radiocarbon dating historical mortars: lime lumps and/or binder carbonate? *Radiocarbon* 60/3: 875–899.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2018.17>

Lindroos, A. et al. 2020a

Delayed hardening and reactivation of binder calcite, common problems in radiocarbon dating of lime mortars, *Radiocarbon*, 62/3: 565–577.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.5>

Lindroos, A. et al. 2020b

The Roman amphitheatre in Mérida, Spain – Augustan or Flavian? Radiocarbon dating results on mortar carbonate, *Geochronometria* 47: 187–195.
<https://doi.org/10.2478/geochr-2020-0028>

Livingston, R.A. et al. 1992

Preliminary analysis of the masonry of the Hagia Sophia Basilica, Istanbul, u *MRS Online Proceedings Library* 267, 721–736.

Livingston, R. A. 1993

Materials analysis of the masonry of Hagia Sophia Basilica, Istanbul, *WIT Transactions of Built Environment* 3: 849–865.

Lubelli, B., Nijland, T. G., van Hees, R. P. J. 2011

Self-healing of lime based mortars: microscopy observation on case studies, *Heron* 56/1-2: 75–92.

Lucas, A., Harris, J.R. 1962

Ancient Egyptian Materials and Industries, London: Edward Arnold.

Lynch, G. 2007

The myth in the mix. The 1:3 ratio of lime to sand. *Building Conservation*, reproduced from *The Building Conservation Directory* 2007,
<http://www.buildingconservation.com/articles/mythmix/mythmix.htm>
(pristupljeno 26. juna 2022.)

Malešev, M., Radonjanin, V., Marinković, S. 2010

Recycled concrete as aggregate for structural concrete production, *Sustainability* 2: 1204–1225.
<https://doi.org/10.3390/su2051204>

Maravelaki, N. et al. 2023

RILEM TC 277-LHS: additives and admixtures for modern lime-based mortars, *Materials and Structures* 56: 106.
<https://doi.org/10.1617/s11527-023-02175-z>

Marčeta, L. i dr. 2007

Prosečna svojstva mineralno-petrološkog sastava drinskog šljunka i njegova primena u građevinarstvu, OMC Banja Vrujci.

Marder, T., Wilson Jones, M. 2015

Introduction, u *The Pantheon. From Antiquity to the Present*, ur. T. A. Marder, M. Wilson Jones, Navasota: Cambridge University Press: New York, 1–48.

Margalha, G. et al. 2011

Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method, *Cement and Concrete Composites* 33: 796–804.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.008>

Marković, M. 2021

Kobaltom impregnisane pilarene gline kao katalizatori oksidativne degradacije zagađujućih materija vode, Doktorska disertacija odbranjena na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, Srbija.

Marić, R. 1951

Iskopavanja na Orašju, prethodni izveštaj o radovima u 1945–1949. godini, *Starinar* II: 113–132.

Marques, S. F. et al. 2006

Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix, *Cement and Concrete Research* 36: 1894–1902.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.005>

Martinelli, G. et al. 2015

Italian peat and coal fires, u *Coal and Peat Fires: A Global Perspective, vol.4: Peat-Geology, Combustion, and Case Studies*, ur. G. Stracher, A. Prakash, G., Rein, G., Amsterdam: Elsevier, 39–73.

Martinez Ramirez, S. et al. 2003

Micro-Raman spectroscopy applied to depth profiles of carbonates formed in lime mortar, *Cement and Concrete Research* 33: 2063–2068.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00227-8)

Massazza, F. 1976

Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, *Il Cemento* 73/1:3–39.

Massazza, F. 1988

Pozzolana and pozzolanic cements, u: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, ur. F. M. Lea, P. C. Hewlett, London: Arnold, 471–636.

Massazza, F. 2001

Pozzolana and pozzolanic cements, u: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, ur. P.C. Hewlett, Oxford: Butterworth-Heinemann, 471–636.

Massazza, F. 2007

Pozzolana and pozzolanic cements, u: *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, ur. P.C. Hewlett, London: Elsevier, 471–636.

Massi, G., Sassoni, E. 2021

Air lime mortar consolidation by nanolimes and ammonium phosphate: Compatibility, effectiveness and durability, *Construction and Building Materials* 299: 123999.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123999>

McCarthy, M. J., Dyer, T. D. 2019

Pozzolanas and pozzolanic materials, u *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5th edition, ur. P. C. Hewlett, M. Liska, Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 363–467.

McCartney, T. R., Gharaibeh, S., Shank, R. 2017

Improved methods for removal of silicate deposits, u *Proceedings of the 12th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning – 2017, June 11-16, 2017, Aranjuez (Madrid), Spain*, ur. H. U. Zettler, Navasota: HTRI, 235–239.

Mehrotra, A., Glišić, B. 2015

Reconstruction of the appearance and structural system of Trajan's Bridge, *Journal of Cultural Heritage*, 16/1: 65–72.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.01.005>

Mertens, G. et al. 2009

Pozzolanic reaction of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity, *Cement and Concrete Research* 39/3: 233–240.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.008>

Miller, S. A. et al. 2018

Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050, *Cement and Concrete Research* 114: 115–124.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>

Middendorf, B. et al. 2005a

Investigative methods for the characterisation of historic mortars, part 1: mineralogical characterization, *Materials and Structures* 38: 761-769.

<https://doi.org/10.1007/BF02479289>

Middendorf, B. et al. 2005b

Investigative methods for the characterisation of historic mortars, part 2: chemical characterisation. *Materials and Structures* 38: 771-780.

<https://doi.org/10.1007/BF02479290>

Midtgaard, M., Brajer, I., Taube, M. 2020

Hot-mixed lime mortar: historical and analytical evidence of its use in medieval wall painting plaster, *Journal of Architectural Conservation* 26/3: 235-246.

<https://doi.org/10.1080/13556207.2020.1785758>

Миличић, Љ. 2014а

Физичко-хемијска анализа кречних малтера, у *Креч као историјски материјал: зборник радова*, ур. А, Јеликић, Д. Станојевић, Београд: Републички завод за заштиту споменика културе – Београд, 73–78.

Миличић, Љ. 2014б

Адитиви кречних малтера, у *Креч као историјски материјал: зборник радова*, ур. А, Јеликић, Д. Станојевић, Београд: Републички завод за заштиту споменика културе – Београд, 89–92.

Miličić, Lj. et al. 2022

Compatible mortars for the architectural conservation of the Danube limes in Serbia – importance of the raw component characterisation, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ур. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 55–59.

Miličić, Lj. et al. u štampi

Following the ancients – conservation mortars for the Danube Limes in Serbia, u *RILEM TC 277 LHS WORKSHOP Lime Based Materials for Repairing Historic Structures*, ур. I. Papayianni, Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki.

Milotta, F. L. et al. 2018

Munsell color specification using ARCA (Automatic Recognition of Color for Archaeology), *Journal of Computing and Cultural Heritage* 11/4: 1-15.

<https://doi.org/10.1145/3216463>

Mijatović, N. 2021

Hemometrijski pristup ispitivanju uticaja hemijskih svojstava elektrofilterskog pepela, zeolita i bentonita na svojstva ekološko prihvatljivih građevinskih materijala, Doktorska disertacija odbranjena na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, Srbija.

Mijatović, N. et al. 2022

Energy dispersive X-ray fluorescence in the investigation of the composition of historical mortars, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 49–51.

Mijatović, N. et al. 2023

Fired pressed pellet as a sample preparation technique of choice for an energy dispersive X-ray fluorescence analysis of raw clays, *Talanta* 252: 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123844>

Mileto, C., Vegas, F., La Spina, V. 2011

Is gypsum external rendering possible? The use of gypsum mortar for rendering historic façades of Valencia's city centre, *Advanced Materials Research* 250-253: 1301–1304.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.1301>

Miljević, B. et al. 2022

Computed tomography as a tool for non destructive investigation of cultural heritage materials' inner structure, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 159–161.

Miriello, D. et al. 2010

Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis, *Journal of Archaeological Science* 37/9: 2207–2223.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.09.046>

Miriello et al. 2018

New compositional data on ancient mortars and plasters from Pompeii (Campania – Southern Italy): Archaeometric results and considerations about their time evolution, *Materials Characterization* 146: 189–203.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.09.046>

Mirković, M. 1986

Rimski gradovi na Dunavu u Gornjoj Meziji, Beograd: Arheološko društvo Jugoslavije.

Mirković, M. 2007

Moesia Superior. Eine Provinz an der mittleren Donau, Mainz: Verlag Philipp von Zabern.

Miriam-Webster 2022

Dictionary, Compatible, Definition,

<https://www.merriam-webster.com/dictionary/compatible>

(pristupljeno 28. decembra 2023.)

Mitrović, A. i dr. 2005

Metakaolin: nova generacija dopunskih cementnih materijala, *Materijali i konstrukcije* 48: 48–54.

Mitrović, A. A., Komljenović, M. M., Ilić, B. R. 2009

Research of possibilities for use domestic kaolin clays for production of metakaolin, *Hemijska industrija* 63/2: 107–113.

<https://doi.org/10.2298/HEMIND0902107M>

Mitrović, A., Zdujić, M. 2013

Mechanichemical treatment of Serbian kaolin clay to obtain a highly reactive pozzolana, *Journal of Serbian Chemical Society* 78: 579–590.

<https://doi.org/10.2298/JSC120829107M>

Mitrović, A., Zdujić, M. 2014

Preparation of pozzolanic addition by mechanical treatment of kaolin clay, *International Journal of Mineral Processing* 132: 59–66.

<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2014.09.004>

Mogetta, M. 2013

The Origins of Concrete in Rome and Pompeii, Doktorska disertacija odbranjena na University of Michigan, SAD.

Mogetta, M. 2015

A new date for concrete in Rome, *Journal of Roman Studies* 105: 1–40.

<https://doi.org/10.1017/S007543581500043X>

Mogetta, M. 2019

The Origins of Concrete Construction in Roman Architecture. Technology and Society in Republican Italy, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Momčilović-Petronijević, A. et al. 2018

Characteristics of mortar from the archaeological site Romuliana – Gamzigrad, *Romanian Journal of Materials* 48/4: 442–449.

Momčilović-Petronijević, A. J. et al. 2022

An analysis of mortar from the archaeological site Caričin Grad, Serbia, *Romanian Journal of Materials* 52/4: 357–367.

Monthel, J. et al. 2002

Mineral Deposits and Mining Districts of Serbia. Compilation Map and GIS Database, BRGM/RC-51448-FR, Belgrade: Geoinstitut.

Moorehead, D. R. 1986

Cementation by the carbonation of hydrated lime, *Cement and Concrete Research* 16/5: 700–708.

[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(86\)90044-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(86)90044-X)

Moropolou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. 1995

Characterization of ancient, Byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques, *Thermochimica Acta* 269/270: 779–795.

[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02571-5](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02571-5)

Moropolou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. 2000

Investigation of technology of historic mortars, *Journal of Cultural Heritage* 1: 45–58.

[https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(99\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(99)00118-1)

Moropolou, A. et al. 1996

Hot lime technology imparting high strength to historic mortars, *Construction and Building Materials* 10/2: 151–159.

[https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00022-4](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00022-4)

Moropolou, A. et al. 2002

Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: The crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials* 16: 543–552.

[https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(02\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(02)00005-3)

Moropolou, A. et al. 2005

Reverse engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars, u *Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, ur. C. Groot, Paris: RILEM Publications SARL, 278–291.

Muñoz Viñas, S. 2009

Minimal intervention revisited, u *Conservation Principles, Dilemmas and Uncomfortable Truths*, ur. A. Richmond, A. Bracker, London, New York: Routledge, Victoria and Albert Museum London, 47–59.

Munro, B. 2011

Approaching architectural recycling in Roman and later Roman villas, u *TRAC 2010: Proceedings of the Twentieth Annual Theoretical Roman Archaeology Conference, Oxford, England, UK, 25–28 March 2010*, ur. D. Mladenović, N.B. Russel, Oxford: Oxbow Books, 76–88.

Munsell Color Company, Inc. 1970

Munsell Book of Color. Neighbouring Hues Edition. Matte Finish Collection, Baltimore: Munsell Color Company, Inc.

Munsell Color 2009

Geological Rock-Color Chart with Genuine Munsell Color Chips, Grand Rapids: X-rite, Inc.

Munsell 2022

Munsell Color. How to read a Munsell color chart, <https://munsell.com/about-munsell-color/how-color-notation-works/how-to-read-color-chart/> (pristupljeno 26. juna 2022.)

Muravlјov, M. 1995

Građevinski materijali, Beograd: Građevinski fakultet, ГрoскЊИГА.

Nadi, S. S. et al. 2023

Determination of Munsell soil colour using smartphones, *Sensors* 23(6): 3181.
<https://doi.org/10.3390/s23063181>

Naiiri, F. et al. 2021

Performance of lightweight mortar reinforced with doum palm fiber, *Journal of Composite Materials* 55/12: 1591–1607.
<https://doi.org/10.1177/0021998320975>

Nair, H. B., Tom, B. 2022

Seashells to lime: swotting of a vernacular method and needs for revival, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1258(1): 012066.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1258/1/012066>

Ngoma, A. M. K. 2009

Characterisation and Consolidation of Historical Lime Mortars in Cultural Heritage Buildings and Associated Structures in East Africa, Doktorska disertacija odbranjena na University of Dar-es-Salaam, Tanzanija.

Nežerka, V. et al. 2014

Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust, *Cement and Concrete Research* 64: 17–29.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.006>

Nikolić, E. 2013

Contribution to the study of Roman architecture in Viminacium: Construction materials and building techniques, *Archaeology and Science* 8(2012): 21–48.
https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2012.8.2

Николић, Е. 2014

Примена кречног малтера приликом рестаурације римског амфитеатра Виминацијума током 2013. године, у *Грађевински материјали и конзерваторско-рестаураторски поступци – малтери*, ур. Д. Младеновић. Е. Васић-Петровић. Београд: Друштво конзерватора Србије, 37–50.

Николић, Е. 2018

Конструкција, деконструкција и реконструкција Виминацијума: контекст и концепт, Докторска дисертација одбрањена на Архитектонском факултету, Универзитет у Београду, Србија.

Николић, Е. 2021

Прилог савременом развоју архитектонске конзервације у Србији: научна истраживања малтера Дунавског лимеса, *Модерна конзервација* 8-9: 87–99.

Nikolić, E., Bogdanović, I. 2012

Proučavanje maltera iz viminacijumskog amfiteatra kao osnova za njegovu buduću konzervaciju i restauraciju, u *Arheologija u Srbiji. Projekti Arheološkog instituta u 2011. godini*, ur. V. Bikić, S. Golubović, D. Antonović, Beograd: Arheološki institut, 58–61.

Nikolić, E. et al. 2016

Roman mortars from the amphitheatre of *Viminacium*, u *Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference (HMC 2016)*, Santorini, Greece, ur. I. Papayiani, M. Stefanidou, V. Pachta. Thessaloniki: Laboratory of Building Materials, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 137–144.

Nikolić, E. et al. 2022

Our MoDeC02000: Results overview of the scientific and research project, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 34–39.

Nikolić, E. et al. 2023

Recycling and reuse of building materials in a historical landscape—Viminacium natural brick (Serbia), *Sustainability* 15(3): 2824.
<https://doi.org/10.3390/su15032824>

Nikolić, E., Jovičić, M. 2022

Preface, u *1st International Conference with Workshop - Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 9–11.

Nikolić, E., Milovanović, B., Raičković Savić, A. 2017

Contribution to the study of Roman architecture in Viminacium: Research of thermae masonry techniques, *Archaeologia Bulgarica* XXI 2017/1: 39–58.

Nikolić, E., Rogić, D. 2018

Short observations on the possible hydraulicity of Viminacium lime mortars based on the results of laboratory research, *Archaeology and Science* 14(2018): 39–49.
https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2018.14.4

Nikolić, E., Rogić, D., Milovanović, B. 2015

The role of brick in the hydraulicity of Viminacium mortars: decorative mortars from the thermae, *Archaeology and Science* 10(2014): 71–92.
https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2014.10.4

Nikolić, E., Roter-Blagojević, M. 2018

Cultural landscape of ancient Viminacium and modern Kostolac—Creation of a new approach to the preservation and presentation of its archaeological and industrial heritage, u *Conference Proceedings, 5th International Academic Conference on Places and Technologies, Belgrade, Serbia, 26–27 April 2018*, ur. A. Krstić-Furundžić et al., Belgrade: University of Belgrade, Faculty of Architecture, 785–792.

Nikolić, E., Tapavički-Ilić, M., Delić-Nikolić, I. 2022

Viminacium landscape (trans)formation, u *Handbook of Cultural Analysis*, ur. S. D'Amico, V. Venuti, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2017–2073.

Николић, В. 2014

Гашење креча: технолошки и хемијски аспекти, у *Креч као историјски материјал: зборник радова*, ур. А. Јеликић, Д. Станојевић, Београд: Републички завод за заштиту споменика културе – Београд, 49–54.

Nikolić Ivanović, M. i dr. 2018

Kvalitet sitnih čestica u agregatima za noseće slojeve kolovozne konstrukcije, u *Zbornik radova, Treći sprski kongres o putevima, 14-15.jun 2018*, ur. V. Tubić, G. Mladenović, Beograd: Srpsko društvo za puteve Via Vita, 209–217.

Nogueira, R., Ferreira Pinto, A. P., Gomes, A. 2014

Assessing mechanical behavior and heterogeneity of low-strength mortars by the drilling resistance method, *Construction and Building Materials* 68: 757–768.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.010>

Novikova, S. A. et al. 2015

Ancient coal fires on the southwestern periphery of the Kuznetsk Basin, West Siberia, Russia: geology and geochronology, u *Coal and Peat Fires: A Global Perspective, vol.3: Case Studies—Coal Fires*, ur. G. Stracher, A. Prakash, E. Sokol., Amsterdam: Elsevier, 509–541.

Nunes, C., Slížková, Z. 2016

Freezing and thawing resistance of aerial lime mortar with metakaolin and a traditional water-repellent admixture, *Construction and Building Materials* 114: 896–905.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.029>

Obradović, J., Hein, J. R., Đurđević, J. 1994

Diagenesis of diatomite from the Kolubara Coal Basin, Baroševac, Serbia, *Geological Journal* 29: 209–217.

Odgers, D. 2017

Nanolime. A Practical Guide to its Use for Consolidating Weathered Limestone, Swindon: Historic England.

Odgers, D., Henry, A. 2012

English Heritage Practical Building Conservation: Stone, London: Ashgate Publishing Limited.

Ohls, K., Bogdajn, B. 2016

History of inductively coupled plasma atomic emission spectral analysis: from the beginning up to its coupling with mass spectrometry, *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 31: 22–31.
<https://doi.org/10.1039/C5JA90043C>

Oleson, J. 2014

Ancient literary sources concerned with Roman concrete technology, u *Building for Eternity. The History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea*, ur. J. Oleson, Oxford: Oxbow Press, 11–36.

Oleson, J., Jackson, M. 2014

The technology of Roman maritime concrete, u *Building for Eternity. The History and Technology of Roman Concrete Engineering in the Sea*, ur. J. Oleson, Oxford: Oxbow Press, 1–10.

Oliveira, M. A. et al. 2017

Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion proceses in aerial lime mortar, *Construction and Building Materials* 148/1: 38–48.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.120>

Onjia, A. 2007

Analičičke tehnike za određivanje i praćenje hemijskih supstanci od uticaja na koroziju, *Integritet i vek konstrukcija* 7/2: 79–82.

Ozkaya, O. A., Böke, H. 2009

Properties of Roman bricks and mortars used in Serapis temple in the city of Pergamon, *Materials Characterization* 60: 995–1000.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.04.003>

Pacheco, J. et al. 2023

Recycled concrete for structural applications, u *Recycled Concrete. Technologies and Performance*, ur. V. W. Y. Tam, M. Soomro et al., Sawston: Woodhead Publishing, 195–231.

Pacheco-Torgal, F., Faria, J., Jalali, S. 2012

Some considerations about the use of lime – cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil? *Construction and Building Materials* 30 : 488–494.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.003>

Pachta, V., Pappayianni, I. 2016: 701–710

Design and application of a data system for the comparative study of historic mortars, u *EuroMed 2016: Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, ur. M. Ioannides, E. Fink, A. Moropolou et al., Cham: Springer, 271–277.

Pachta, V. et al. 2014

Technological evolution of historic structural mortars, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 8/7: 846–854.

<https://doi.org/10.17265/1934-7359/2014.07.005>

Pachta, V. et al. 2019

Evaluation of the fresh state properties of lime-based grouts through inter-laboratory comparative testing, u *Proceedings of the 5th Historic Mortars Conference. RILEM Proceedings PRO 130*, ur. J. I. Alvarez, J. M. Fernandez, I. Navarro et al., Paris: RILEM Publications SARL, 1225–1237.

Pamplona, M. et al. 2007

Drilling resistance: overview and outlook, *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 158/3: 665–676.

<https://doi.org/10.1127/1860-1804/2007/0158-0665>

Papayianni, I. 1994

Durability lessons from the study of old mortars and concretes, Lecture presented at *ACI P.K. Mehta Symposium on Durability of Concrete*, Nice France, 1–20.

Papayianni, I. et al. 2023

RILEM TC 243-SGM report: grouting for historic architectural surfaces, *Materials and Structures* 56: 1.

<https://doi.org/10.1617/s11527-022-02076-7>

Papayianni, I., Pachta, V., Iliadou, K. 2008

A data base system for managing information concerning historical mortars, u *VSMM 2008. Digital Heritage. Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, 20-25 October 2008, Limassol, Cyprus*, ur. M. Ioannides, A. Addison, A. Georgopoulos, L. Kalisperis, Budapest: Archaeolingua, 271–277.

Pasquini, L., Bonechi, M., Dini, A. 2021

Il gesso su laterizio naturale della miniera di Santa Barbara, Cavriglia (AR). Origine e cronaca del ritrovamento degli anni Serranta, *Rivista Mineralogica Italiana* 45: 8–45.

Pašalić, S. et al. 2012

Pozzolanic mortars based on waste building materials for the restoration of historical buildings, *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly* 18/2: 147–154.

<https://doi.org/10.2298/CICEQ110829056P>

Pavia, D. L., Lampman, G. M., Kriz, G. S. 2001

Introduction to Spectroscopy. A Guide for Students of Organic Chemistry, 3rd edition, Boston: Thomson Learning, Inc.

Pavia, S. et al. 2023

RILEM TC 277-LHS report: How hot are hot-lime-mixed mortars, *Materials and Structures* 56: 87.

<https://doi.org/10.1617/s11527-023-02157-1>

Pavlík, Z. et al. 2023

Lightweight pumice mortars for repair of historic buildings –Assessment of physical parameters, engineering properties and durability, *Construction and Building Materials* 404: 133275.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133275>

Pavliková, M. et al. 2022

Diatomaceous earth – lightweight pozzolanic admixtures for repair mortars – complex chemical and physical assessment, *Materials* 15(19): 6881.

<https://doi.org/10.3390/ma15196881>

Perkins, W. D. 1986

Fourier transform-infrared spectroscopy, *Journal of Chemical Education* 63/1: A5–A10.

Pesce, C. et al. 2021

Towards a better understanding of hot-mixed mortars for the conservation of historic buildings: The role of water temperature and steam during lime slaking, *Heritage Science* 9: 72.

<https://doi.org/10.1186/s40494-021-00546-9>

Плиније Старији 2011

Оуметности, прев. З. Бојић, Београд: Завод за уџбенике, Досије студио.

Poole, A., Sims, I. (ur.) 2016

Concrete Petrography. A Handbook of Investigative Techniques, 2nd edition, London: CRC Press.

Поповић, М. 1988

Светиња, нови подаци о рановизантијском Виминацијуму, *Старинар* XXXVIII: 1–37.

Поповић, М., Иванишевић, В. 1989

Град Браничево у средњем веку, *Старинар* XXXIX: 125–179.

Popović, P. (ur.) 1996

Roman Limes on the Middle and Lower Danube, Cahiers des Portes de Fer, Monographies 2, Belgrade: Archaeological Institute.

Příkryl, R. 2007

Understanding the Earth scientist's role in the pre-restoration research of monuments: and overview, u *Building Stone Decay from Diagnosis to Conservation, Special Publication 271*, ur. R. Příkryl, B. J. Smith, London: Geological Society, 9–21.

Příkryl, R. et al. 2016

Geomaterials in construction and their sustainability: understanding their role in modern society, u *Special Publications 416*, ur. R. Příkryl, Á. Török, M. Gomez-Heras, K. Miskovsky, M. Theodoridou, London: The Geological Society of London, 1–22.

Příkryl, R. 2021

Geomaterials and construction aggregates: a state-of-the-art, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 80: 8831–8845.
<https://doi.org/10.1007/s10064-021-02488-9>

Протић М., 1984

Петрологија седиментних стена, Београд: Рударско-геолошки факултет.

Ptáček, P., Šoukal, F., Opravil, T. 2021

Thermal decomposition of ferroan dolomite: A comparative study of nitrogen, carbon dioxide, air and oxygen, *Solid State Sciences* 122: 106778.
<https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2021.106778>

Purushothama Raj, P. 2017

Building Construction Materials and Techniques, Chennai, Delhi: Pearson.

Quintero, J. A. et al. 2009

Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejón Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean region of Colombia), *International Journal of Coal Geology* 80: 196–210.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.09.004>

Rădan, S.-C., Rădan, S. 2013

Paleo-coal Fires in Romania, u *Coal and Peat Fires: A Global Perspective, vol.2: Photographs and Multimedia Tours*, ur. G. Stracher, A. Prakash, E. Sokol., Amsterdam: Elsevier, 339–349.

Radivojević, A. 2018

Opeke u kasnoj antici. Zapisi u materijalu / Bricks in Late Antiquity. Records in the Material, Beograd: Univerzitet u Beogradu, Arhitektonski fakultet.

Radivojević, A., Kurtović-Folić, N. 2006

Evolution of Bricks and Brick Masonry in the Early History of Its Use in the Region of Today's Serbia, *Journal of Materials in Civil Engineering* 18/5: 692–699.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:5\(692\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:5(692))

Raičković, A., Redžić, S. 2006

Keramičke i opekarske peći Viminacijuma – lokacije „Pećine” i „Livade kod ćuprije”, *Archaeology and Science* 1(2005): 81–106.

https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2005.1.7

Rakić, M. 1979

Osnovna Geološka karta SFRJ 1:100.000. Tumač za List Bela Crkva, Beograd: Savezni geološki zavod.

Rampazzi, L. et al. 2016

Technology of medieval mortars: an investigation into the use of organic additives, *Archaeometry* 58/1: 115–130.

<https://doi.org/10.1111/arcm.12155>

Rapanić, Ž., Pranić, P. 1980

Kemijska analiza žbuke iz nekih solinskih građevina, u *Materijali, tehnike i strukture predantičkog i antičkog graditeljstva na istočnom jadranskom prostoru, Znanstveni kolokvij održan u Zadru od 6–8. XII 1976*, ur. M. Suić, M. Zaninović, Zagreb: Centar za povijesne znanosti - Odjel za arheologiju, 101–109.

Rapp, G. 2009

Archaeomineralogy, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH.

Raucourt, A. 1288

Traité sur l'art de faire de bons mortiers et d'en bien diriger l'emploi, ou Méthode générale pratique pour fabriquer en tous pays la chaux, les cimens et les mortiers les meilleurs et les plus économiques; par le colonel Raucourt, de Charleville,... 2e édition, Paris: Malher.

Reka, A. A. et al. 2021

Diatomaceous earth: characterization, thermal modification, and application, *Open Chemistry* 19: 451–461.

<https://doi.org/10.1515/chem-2020-0049>

401

Republički zavod za zaštitu spomenika kulture – Beograd 2022

O zavodu.

https://www.heritage.gov.rs/latinica/istorija_republickog_zavoda_za_zastitu_spomenika_kulture.php (pristupljeno 28. decembra 2023.)

Ribeiro, J. et al. 2013

The Douro coalfield fires in Portugal, u *Coal and Peat Fires: A Global Perspective, vol.2: Photographs and Multimedia Tours*, ur. G. Stracher, A. Prakash, E. Sokol., Amsterdam: Elsevier, 313–337.

Ricci, G. et al. 2022

Integrated multi-analytical screening approach for reliable radiocarbon dating of ancient mortars, *Scientific Reports* 12: 3339.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-07406-x>

RILEM TC-177 2004

RILEM recommendation MDT. D.1–Indirect determination of the surface strength of unweathered hydraulic cement mortar by the drill energy method, *Materials and Structures* 37/7: 485–487.

Rizzo, G. Megna, B. 2008

Characterization of hydraulic mortars by means of simultaneous thermal analysis, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 92: 173–178.

<https://doi.org/10.1007/s10973-007-8757-5>

Ringbom, Å. et al. 2014

19 years of mortar dating: Learning from experience, *Radiocarbon* 56/2: 619–635.

<https://doi.org/10.2458/56.17469>

Rodríguez-Navarro, C. 2012

Binders in historical buildings: traditional lime in conservation, *Seminarios SEM* 9: 91–112.

Rogers, G. 1917

Baked Shale and Slag Formed by the Burning of Coal Beds–Professional Paper 108-A, Washington: Department of the Interior and United States Geological Survey.

Rogich, D.G. 1996

Material use, economic growth, and the environment, *Nonrenewable Resources* 5, 197–210.

Rogić, D., Despotović, D., Milovanović, B. 2008

Fragmenti zidnog slikarstva sa termi iz Viminacijuma, *Archaeology and Science* 3(2007): 75–82.

https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2007.3.7

Rogić, D., Gajić-Kvašček, M., Andrić V. 2012

Analysis of blue and green pigments from the fresco painted tombs in Viminacium, *Archaeology and Science* 7(2011): 269–289.

https://doi.org/10.18485/arhe_apn.2011.7.8

Рогоћ, Д. 2014

Технологија античког зидног сликарства на територији Србије, Докторска дисертација одбрањена на Универзитету у Београду, Србија.

Santos, T., Faria, P. 2020

Characterization of earthen plasters. Influence of formulation and experimental methods, *Gremium – Revista de restauración arquitectónica* 7/14: 151–168.

<https://doi.org/10.56039/rgn14a12>

Santos Silva A. et al. 2014

Long-term behavior of lime-metakaolin pastes at ambient temperature, *Applied Clay Science* 88–89: 49–55.

<https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.016>

Saretok, V. 1957

Puts och putsning – ett kritiskt litteraturstudium (handlingar nr 29), Stockholm: Statens nämnd för byggnadsforskning.

Schnabel, L. 2008

Mortar analysis, part 1: Mortar-making materials, *APT Bulletin: the Journal of Preservation Technology* 39/1: 1–4.

Schnabel, L. 2009

Mortar analysis, part 2: Analytical methods, *APT Bulletin: the Journal of Preservation Technology* 40/2: 1–7.

Schram, R. 2016

X-Ray Fluorescence Analysis: Practical and Easy, 2nd edition, Bedburg-Hau: Fluxana.

Schroeder, H. 2018

The new DIN standards in earth building – the current situation in Germany, *Journal of Civil Engineering and Architecture* 12: 113–120.
<https://doi.org/10.17265/1934-7359/2018.02.005>

Schueremans, L. et al. 2011

Characterization of repair mortars for assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice, *Construction and Building Materials*, 4338-4339.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.01.008>

Secco, M. et al. 2020

Technological transfers in the Mediterranean on the verge of Romanization: Insights from the waterproofing renders of Nora (Sardinia, Italy), *Journal of Cultural Heritage* 44: 63–82.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.01.010>

Secco, M. et al. 2022

Cementation proceses of Roman pozzolanic binders from Caesarea Maritima (Israel), *Construction and Building Materials* 355: 129128.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129128>

Seymour, L. M. et al. 2021

Reactive binder and aggregate interfacial zones in the mortar of Tomb of Caecilia Metella concrete, 1C BCE, Rome, *Journal of the American Ceramic Society* 105/2: 1503–1518.
<https://doi.org/10.1111/jace.18133>

Seymour, L. M. et al. 2023

Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete, *Science Advances* 9(1): eead1602.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.add1602>

Shackley, M. S. 2011

An introduction to X-ray fluorescence (XRF) analysis in archaeology u *X-ray fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*, ur. M. S. Shackley, New York: Springer, 7–44.

Sharma, N., Sharma, P., kr Verma, S. 2021

Influence of diatomite on the properties of mortar and concrete: A review, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1116: 012174.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1116/1/012174>

Shivakumar, M., Selvaraj, T., Dhassaih, M. P. 2021

Preparation and characterization of ancient recipe of organic lime putty-evaluation for its suitability in restoration of Padmanabhapuram Palace, India, *Scientific Reports* 11: 13261.

<https://doi.org/10.1038/s41598-021-91680-8>

Sierra, E. J. et al. 2010

Pozzolanic activity of diatomaceous earth, *Journal of American Ceramic Society* 93: 3406–3410.

<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.03886.x>

Silverstein, R. M., Webster, F. X., Kiemle, D. J. 2005

Spectrometric Identification of Organic Compounds, 7th edition, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.

Симић, Г., Симић, З. 1984

Град Рам, *Саопштења XVI*: 31–55.

Simić, V. 1999

Pucolanski tufovi Srbije, u *Zbornik radova međunarodnog savetovanja Cement '99*, Novi Sad, Beočin, 164–170.

Simić, V., Đurić, S., Životić, D. 1997

Bentonitic clays of the Drmno deposit (Kostolac coal basin), *Bulletin – Geologie, Hidrogeologie et Geologie d'Ingenieur A, B/47*: 107–116.

Simić, V., Uhlík, P. 2006

Crystallite size distribution of clay minerals from selected Serbian clay deposits, *Геолошки анали Балканскога полуострва* 67: 109–116.

Sironić, A. 2022

Radiocarbon dating of historical mortars, u *1st International Conference with Workshop –Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 95–96.

Sironić, A. et al. 2019

Radiocarbon dating of mortar from the aqueduct in Skopje, *Radiocarbon* 61/5: 1239–1251.

<https://doi.org/10.1017/RDC.2019.66>

Sironić, A. et al. 2020

AMS radiocarbon dating of archaeological samples at the Zagreb Radiocarbon Laboratory, u *Aktuelna interdisciplinarna istraživanja tehnologije u arheologiji jugoistočne Evrope*, ur. S. Vitezović, K. Šarić, D. Antonović, Beograd: Srpsko arheološko društvo, 94–97.

Скоје, М. 2016

Шта је рецепција антике? Кратак увод у поље истраживања, у *Античко наслеђе и његова европска рецепција*, ур. М. Скоје, Ј. Вестрхејм, Лозница: Карпос, 13–43.

Smith, M. R. (ur.) 1999

Stone: Building Stone, Rock Fill and Armourstone in Construction, London: The Geological Society.

Smith, M. R., Collis, L. (ur.) 2001

Aggregates: Sand, Gravel and Crushed Rock Aggregates for Construction Purposes, 3rd edition, Engineering Geology Special Publications 17, London: The Geological Society.

Smyth, E., Dent, G. 2005

Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach, Chichester: John Wiley and Sons, Ltd.

Snellings, R., Mertens, G., Elsen, J. 2012

Supplementary cementitious materials, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* 74: 211–278.

<https://doi.org/10.2138/rmg.2012.74.6>

Спасић-Ђурић, Д. 2015

Град Виминацијум, Пожаревац: Народни музеј Пожаревац.

Spasovski, O., Spasovski, D. 2012

The potential of the nonmetallic mineral resources in the Republic of Macedonia, u *Зборник на трудови, Втор конгрес на Геолозите на Република Македонија*, ур. М. Јовановски, Б. Боев, Крушево: Македонско геолошко друштво, 91–94.

Срејовић, Д. 1969

Лепенски Вир: нова праисторијска култура у Подунављу, Београд: Српска књижевна задруга.

Stalović, B., Đorđević, S. 2013

Optička emisiona spektroskopija sa induktivno kuplovanom plazmom (ICP/OES) kao analitička tehnika za detekciju teških metala u biološkom materijalu, *Medicinska revija* 5/1: 053–057.

Stanković, M. N. et al. 2019

Chemical analysis of mortars of archaeological samples from Mediana locality, Serbia, *Science of Sintering* 51: 233–242.

Станојловић, М. 1992

Нека опажања о употребљеним малтерима за зидање и малтерисање гробова у Виминацијуму, *Гласник Друштва конзерватора Србије* 16: 56–59.

Stefanidou, M. 2010

Methods for porosity measurement in lime-based mortars, *Construction and Building Materials*, 24/12: 2572–2578.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.05.019>

Stefanidou, M. et al. 2021

Use of *Posidonia oceanica* fibres in lime mortars, *Construction and Building Materials*, 298: 1–11.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123881>

Stefanidou, M., Koltsov, P. 2022

The role of sand in mortar's properties, u *Sand in Construction*, ur. S. Hemeda, London: IntechOpen, 1–15.

Stefanidou, M., Papachristoforou, M., Kesikidou, F. 2016

Fiber-reinforced lime mortars, u *Proceedings of the 4th Historic Mortars Conference (HMC 2016)*, Santorini, Greece, ur. I. Papayiani, M. Stefanidou, V. Pachta, Thessaloniki: Laboratory of Building Materials, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 422–430.

Stefanidou, M., Papayianni, I., Pachta, V. 2012

Evaluation of inclusions in mortars of different historical periods from Greek monuments, *Archaeometry* 54/4: 737–751.

<https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2011.00645.x>

Stefanidou, M., Pavlidou, E. 2018

Scanning mortars to understand the past and plan the future for the maintenance of monuments, *Scanning* 2018: 7838502.

<https://doi.org/10.1155/2018/7838502>

Stella, G. et al. 2013

Historical mortars dating from OSL signals of fine grain fraction enriched in quartz, *Geochronometria* 40: 153–164.

<https://doi.org/10.2478/s13386-013-0107-8>

Стојановић, Д. 1968

Вулкански туфови и седиментне стене у Србији са садржајем зеолита, *Записници Српског геолошког друштва за 1968. годину*: 9–20.

Stojanović, S. et al. 2019

Evidence of continuous pottery production during the late Byzantine period in the Studenica Monastery, a UNESCO World Heritage Site, *Microchemical Journal* 146: 557–567.

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.01.056>

Stokes, D. J. 2008

Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy (VP-ESEM), Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Stripple, H. et al. 2021

CO₂ Uptake in cement-containing products. Background and calculation models for implementation in national greenhouse gas emission inventories. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute.

Stutzman, P. E. 2000

Scanning electron microscopy in concrete petrography, u *Materials Science of Concrete, Special Volume: Calcium Hydroxide in Concrete*, ur. J. P. Skalny, J. Gebauer, I. Odler, Malden: Wiley-Blackwell, 59–72.

Şerifaki, K., Uğurlu Sağın, E. U., Böke, H. 2020

Microstructural characteristics of mortars prepared by hot lime mix, *Građevinar* 11: 991–1000.

<https://doi.org/10.14256/JCE.2892.2020>

Субаков-Симић, Г. и др. 2014

Биорецептивност кречњака и кречњачког супстрата историјских објеката, у *Креч као историјски материјал: зборник радова*, ур. А, Јеликић, Д. Станојевић, Београд: Републички завод за заштиту споменика културе – Београд, 93–98.

Špehar, P., Zorić, B. 2022

Arheološki tragovi nehrišćanskih obreda u srpskom delu Podunavlja tokom srednjeg veka, *Etnoantropološki problemi* n.s. 17/3: 985–1009.
<https://doi.org/10.21301/eap.v17i3.9>

Taglieri, G. et al. 2019

Innovative and green nanolime treatment tailored to consolidate the original mortar of the façade of a medieval building in L'aquila (Italy), *Construction and Building Materials* 221: 643–650.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.110>

Takahashi, G. 2015

Sample preparation for X-ray fluorescence analysis, III. Pressed and loose powder methods, *Rigaku Journal* 31/1: 26–30.

Taylor, H. F. W. 1997

Cement Chemistry, 2nd edition, London: Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Services Ltd.

TC 203-RHM 2009

Rilem TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry. Testing of hardened mortars, a proces of questioning and interpreting, *Materials and Structures* 42: 853–865.
<https://doi.org/10.1617/s11527-008-9455-x>

Theodoridou, M., Dagrain, F., Ioannou, I. 2015

Micro-destructive cutting techniques for the characterization of natural limestone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 76: 98–103.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.02.012>

Teixeira Marvila, M. et al. 2019

Evaluation of the use of marble waste in hydrated lime cement mortar based, *Journal of Material Cycles and Waste Management* 21: 1250–1261.
<https://doi.org/10.1007/s10163-019-00878-6>

Tekín, C., Kurügol, S. 2011

Physicochemical and pozzolanic properties of the bricks used in certain historic buildings in Anatolia, *Gazi University Journal of Science* 24: 959–972.

Terzić, A. i dr. 2018

Svojstva i performance maltera sa dodatkom primarnih i sekundarnih mineralnih sirovina u cilju zamene cementnog veziva, *Tehnika – Novi materijali* 27/4: 470–476.
<https://doi.org/10.5937/tehnika1804470T>

Terzić, A., Pavlović, Lj. Miličić, Lj. 2013

Evaluation of lignite fly ash for utilization as component in construction materials, *International Journal of Coal Preparation and Utilization* 33/4: 159–180.
<https://doi.org/10.1080/19392699.2013.776960>

Terzić, A., Pezo, L., Miličić, Lj. 2019

Thermal and mechanical behavior of composite mortars containing natural sorptive clays and fly ash, *Science of Sintering* 51: 39–56.
<https://doi.org/10.2298/SOS1901039T>

Teutonico, J. M. 1988

A Laboratory Manual for Architectural Conservators, Rome: ICCROM.

Teutonico, J.M. et al. 1993

The Smeaton project: Factors affecting the properties of lime-based mortars, *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology* 25/3-4: 32–49.

Thacker, M., Hughes, J., Odling, N. 2019

Animal, vegetable or mineral? Characterising shell-lime, maerl-lime and limestone-lime mortar evidence from the Late Norse and Medieval site of Tuquoy, Orkney, u *Proceedings of the 5th Historic Mortars Conference. RILEM Proceedings PRO 130*, ur. J. I. Alvarez et al, Paris: RILEM Publications SARL, 758–777.

Theodoridou, M., Dagrain, F., Ioannou, I. 2015

Micro-destructive cutting techniques for the characterization of natural limestone, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 76: 98–103.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.02.012>

Thomson, M. et al. 2007

Porosity of mortars, u *Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 167-COM*, ur. C. Groot, G. Ashall, J. Hughes, Bagnaux: RILEM Publications SARL, 77–106.

Thorstensen, R. T., Fidjestol, P. 2015

Inconsistencies in the pozzolanic strength activity index (SAI) for silica fume according to EN and ASTM, *Materials and Structures* 48: 3979–3990.
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0457-6>

Tiano, P. et al. 2000

The conservation of monuments: a new method to evaluate consolidating treatments, *International Journal for the Restoration of Buildings and Monuments* 6/2: 133–150.
<https://doi.org/10.1515/rbm-2000-5461>

410

Tirelli, G. et al. 2021

A chronology of ancient earthquake damage in Modena Cathedral (Italy): Integrated dating of mortars (14C, pollen record) and bricks (TL), *International Journal of Architectural Heritage* 17/2: 326–342.

<https://doi.org/10.1080/15583058.2021.1922783>

Tironi, A. et al. 2013

Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays, *Cement and Concrete Composites* 37: 319–327.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.002>

Tokyay, M. 2016

Cement and Concrete Mineral Admixtures, 1st edition, Boca Raton: CRC Press.

Tole, I. 2019

Mechanical Activation of Clay. A Novel Route to Sustainable Cementitious Binders, Licentiate Thesis odbranjena na Luleå University of Technology, Švedska.

Topličić-Ćurčić, G. A. et al. 2014

Characterization of Roman mortar from the Mediana archeological site, *Tehnički vjesnik* 21/1: 191–197.

Tuesen, I., Gwozdz, R. 1982

Lime plaster in Neolithic Hama, Syria. A preliminary report, *Paléorient* 8/2: 99-103.

Tufegdžić, V. 1979

Građevinski materijali. Poznavanje i ispitivanje, Beograd: Naučna knjiga.

Uğurlu Sağın, E., Engin Duran, H., Böke, H. 2021

Lime mortar technology in ancient eastern Roman provinces, *Journal of Archaeological Science: Reports* 39: 103132.

<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103132>

Ulrich, R. B. 2017

Building techniques and materials, Roman, Oxford Classical Dictionary,

<https://oxfordre.com/classics/display/10.1093/acrefore/9780199381135.001.0001/acrefore-9780199381135-e-8073>

(pristupljeno 28. decembra 2023.)

411

UN Environment, Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. 2018

Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research* 114: 2–26.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

UNESCO 2020a

Frontiers of the Roman Empire – The Danube Limes (Serbia),
<https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6475/>
(pristupljeno 16. januara 2024.)

UNESCO 2020

Đerdap UNESCO Global Geopark.
<https://en.unesco.org/global-geoparks/djerdap>
(pristupljeno 11. februara 2024.)

UNESCO WHC 2023

Basic Texts of the 1972 World Heritage Convention, Paris: UNESCO.

Unković, N. et al. 2022

Fungal proliferation on fresco painting: deterioration of mortar and painted layer, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 145–149.

Unković, N. et al. 2023

Preserving the Danube Limes in Serbia: A review of the biodeterioration of Trajan's Bridge, *Starinar* LXXIII: 141–160.
<https://doi.org/10.1016/10.2298/STA2373143U>

Urbanová, P. et al. 2018

A novel interdisciplinary approach for building archaeology: The integration of mortar "single grain" luminescence dating into archaeological research, the example of Saint Seurin Basilica, Bordeaux, *Journal of Archaeological Science: Reports* 20: 307–323.
<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.04.009>

Urbanová, P., Boaretto, E., Artioli, G. 2020

The state-of-the-art of dating techniques applied to ancient mortars and binders: A review, *Radiocarbon* 62/3: 503–525.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.43>

Vakanjac, B. 1992

Geologija ležišta nemetalčnih mineralnih sirovina, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.

Válek, J., Mataš, T. 2013

Experimental study of hot mixed mortars in comparison with lime putty and hydrate mortars, u *Historic Mortars: Characterisation, Assessment and Repair*, ur. J. Válek, J. J. Hughes, C. J. W. P. Groot, Dordrecht: Springer, 269–281.

Válek J., Veiga, R. 2005

Characterisation of mechanical properties of historic mortars – testing of irregular samples, *WIT Transactions on The Built Environment* 83: 365–374.

van Balen, K. et al. 2001

Mortar characterisation, from values to compatibility, u *EC environment programme, maintenance of pointing in historic buildings: decay and replacement, final report*, 75–84.

van Balen, K. 2003a

Research on built heritage contributes to sustainable construction for the future, u *Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, 20th–24th January 2003*, ur. S. Huerta et al., Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2035–2039.

van Balen, K. 2003b

Understanding the lime cycle and its influence on historical construction practice, u *Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid, 20th–24th January 2003*, ur. S. Huerta et al., Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2041–2054.

van Balen, K. et al. 2005

Introduction to requirements for and functions and properties of repair mortars, *Materials and Structures* 38: 781–785.
<https://doi.org/10.1007/BF02479291>

van Hees, R. P. J. et al. 2004

Characterisation and damage analysis of old mortars, *Materials and Structures* 37: 644–648.
<https://doi.org/10.1007/BF02483293>

van Hees, R. et al. 2012

RILEM TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry. From problem to intervention: a decision proces, *Materials and Structures* 45: 1295–1302.
<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9916-0>

Vandenabeele, P., Donais, M. K. 2016

Mobile spectroscopic instrumentation in archaeometry research, *Applied Spectroscopy* 70/1: 27–41.
<https://doi.org/10.1177/0003702815611063>

413

Васић-Деримановић, Ј., Адамовић, Н., Николић, Е. 2016

Двојни гроб и случајни налази античког периода из Ритопека, *Гласник Српског археолошког друштва* 32: 155–181.

Vapnik, Y. 2013

Burning on the Wessex Coast of England, u *Coal and Peat Fires: A Global Perspective, vol.2: Photographs and Multimedia Tours*, ur. G. Stracher, A. Prakash, E. Sokol, Amsterdam: Elsevier, 116–120.

Vatum, M. 2020

Šta je arhitektura? Loznica: Karpos.

Ventolà, L. et al. 2011

Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics, *Construction and Building Materials* 25/8: 3313–3318.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020>

Vicat, L. J. 1818

Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires, Paris: Chez Goujon.

Vitruvije 1951

Vitruvijevih Deset Knjiga o Arhitekturi, prev. M. Lopac, Sarajevo: Svjetlost.

Вученовић, С. 2004

Урбана и архитектонска конзервација, том 1. Свет-Европа, Београд: Друштво конзерватора Србије.

Vučetić, S. 2017

Degradacija i zaštita materijala nepokretnog kulturnog nasleđa, Doktorska disertacija odbranjena na Tehnološkom fakultetu, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija.

Vučetić, S., Ranogajec, J. 2022

Metodologija ispitivanja istorijskih maltera, Novi Sad: Tehnološki fakultet, Univerzitet u Novom Sadu.

Вучетић, С. и др. 2021

Дизајн малтера за конзервацију – римска граница 2000 година касније. Научноистраживачки пројекат МоDeCo2000, *Гласник Друштва конзерватора Србије* 45: 90–193.

Vučetić, S. et al. 2022a

Design of compatible mortars for conservation interventions, u *1st International Conference with Workshop – Science for Conservation of the Danube Limes, Book of Abstracts*, ur. E. Nikolić, M. Jovičić, Belgrade: Institute of Archaeology, 52–54.

Vučetić, S. et al. 2022b

Design of compatible mortars for a late Roman tomb in Serbia, u *The Future of Heritage Science and Technologies. Florence Heri-Tech 2022. Advanced Structured Materials*, vol. 179, ur. R. Furferi, R. Giorgi, K. Seymour, A. Pelagotti, Cham: Springer: 261–275.

Vučetić, S. et al. 2023

Bio-stimulated surface healing of historical and compatible conservation mortars, *Materials* 16(2): 642.

<https://doi.org/10.3390/ma16020642>

Vujović, S. et al. 2014

Pozzolanic mortars for the conservation of old masonry structures, *Građevinar* 8: 721–729.

Vuksanović-Macura, Z., Jevtić-Novaković, K. 2020

Surveying of Belgrade: Technical background of Emilijan Josimović Plan from 1867, *Zbornik Matice Srpske za likovne umetnosti* 48: 73–87.

Вуловић, В. 1956

Рад хемиске лабораторије Завода за заштиту и научно проучавање споменика културе у Србији, *Саопштења* I: 195–197.

Вуњак, М. 1978

Обнова архитектонских споменика и коришћење нових материјала, *Гласник Друштва конзерватора Србије* 2: 13–14.

Walker, R., Pavia, S. 2011

Physical properties and reactivity of pozzolans, and their influence on the properties of lime-pozzolan pastes, *Materials and Structures* 44: 1139–1150.

<https://doi.org/10.1617/s11527-010-9689-2>

Ward-Perkins, J. B. 1981

Roman Imperial Architecture, New Haven and London: Yale University Press.

Wayne, D. M., White, J. T. 2019

Thermal analysis and loss-on-ignition techniques, u *Plutonium Handbook*, 2nd edition, volume 6, ur. D. L. Clark, D. A. Geeson, R.J. Hanrahan, Jr., Downers Grove: American Nuclear Society, 3167–3199.

Weber, J., Köberle, T., Pintér, F. 2019

Methods of microscopy to identify and characterize hydraulic binders in historic mortars – A methodological approach, u: *Historic Mortars. Advances in Research and Practical Conservation*, ur. J. Hughes, J. Válek, C. Groot, Cham: Springer, 21–31.

Wiggins, D. 2018

Historic Environment Scotland Technical Paper 27: Hot-Mixed Lime Mortars: Microstructure and Functional Performance, Edinburgh: Historic Environment Scotland.

Wild, S. et al. 1997

Comparative study of pozzolanic, chemical and physical properties of clay bricks in four European countries for utilization of pulverized waste clay brick in production of mortar and concrete, *Building Research and Information* 25/3: 170–175.

Wilson Jones, M. 2009

Principles of Roman Architecture, New Haven and London: Yale University Press.

Wilson Jones, M. 2015

Building on adversity: The Pantheon and problems with its construction, u *The Pantheon. From Antiquity to the Present*, ur. T. A. Marder, M. Wilson Jones, Navasota: Cambridge University Press: New York, 193–230.

Yang, F., Zhang, B., Ma, Q. 2010

Study of sticky rice-lime mortar technology for the restoration of historical masonry construction, *Accounts of Chemical Research* 43/6: 936–944.

<https://doi.org/10.1021/ar9001944>

Young, D. 2021

Mortars: materials, mixes and methods. A guide to repointing mortar joints in older buildings – Technical Guide, Melbourne: Heritage Council of Victoria.

Žáček, V., Skála, R., Dvořák, Z. 2010

Petrologie a mineralogie porcelanitů mostecké pánve–produktů fosilních požárů neogénníh nedouhelné sloje, *Bulletin Mineralogie Petrologie* 18: 1–32.

416

STANDARDI

A3004-E1: 2018

Standard Practice for the Evaluation of Alternative Supplementary Cementitious Materials (ASCMS) for Use in Concrete as SCMs, Toronto: Canadian Standard Association.

ACI CT-13: 2013

ACI Concrete Terminology, An ACI Standard, Farmington Hills: American Concrete Institute.

ASTM C311/C311M-22

Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete, West Conshocken: ASTM International.

ASTM C 618-23e1

Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, West Conshocken: ASTM International.

DIN 18946:2018-12

Earth Masonry Mortar – Requirements, Test and Labelling, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN 18947: 2018-12

Earth Plasters – Requirements, Test and Labelling, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

IS 1727: 1967

Methods of Test for Pozzolanic Materials (First Revision), New Delhi: Bureau of Indian Standards.

SRPS B.C1.018: 2015

Неметалне минералне сировине – Пуцолански материјали – Састојци за поризводњу цемента – Класификација, технички услови и методе испитивања, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS B.C1.020: 1981 (POVUČEN 2012)

Građevinski kreč – Vrste, namena i uslovi kvaliteta, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS B.C8.040:1980 (POVUČEN 2012)

Građevinski kreč – Metode hemijskog ispitivanja, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

417

SRPS EN 1015-3: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 3: Određivanje konzistencije svežeg maltera (pomoću potresnog stola), Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-4: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 4: Određivanje konzistencije svežeg maltera (penetracijom klipom), Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-6: 2008/A1: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 6: Određivanje zapreminske mase svežeg maltera – Izmena 1, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-7: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 7: Određivanje sadržaja vazduha u svežem malteru, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-9: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 9: Određivanje vremena ugradivosti i vremena korekcije svežeg maltera, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-11: 2019

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 11: Određivanje čvrstoće pri savijanju u čvrstoće pri pritisku očvrslog maltera, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-12: 2016

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 12: Određivanje čvrstoće prijanjanja očvrslih maltera za oblaganje spoljašnjih i unutrašnjih površina na podloge, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-17: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 17: Određivanje sadržaja hlorida rastvorljivih u vodi u svežem malteru, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-18:2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 18: Određivanje koeficijenta kapilarnog upijanja vode očvrslog maltera, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1015-19: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 19: Određivanje paropropustljivosti očvrslih maltera za unutrašnja i spoljašnja oblaganja, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

418

SRPS EN 1015-21: 2008

Metode ispitivanja maltera za zidanje – Deo 21: Određivanje kompatibilnosti jednoslojnih maltera za unutrašnja oblaganja sa podlogama, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1052-3: 2010

Metode ispitivanja zidanih konstrukcija – Deo 3: Određivanje početne čvrstoće pri smicanju, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1097-6: 2016 (POVUČEN 2023)

Ispitivanje mehaničkih i fizičkih svojstava agregata – Deo 6: Određivanje stvarne zapreminske mase i upijanja vode, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 12407: 2019

Metode ispitivanja prirodnog kamena – Petrografsko ispitivanje, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 12667: 2008

Performanse građevinskih materijala i konstrukcija – Određivanje toplotne otpornosti pomoću metoda sa zaštićenom grejnom pločom i toplotnim fluksmetrom – Proizvodi visoke i srednje toplotne otpornosti, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13139: 2007

Agregati za malter, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13279-1: 2009

Veziva i malteri na bazi gipsa – Deo 1: Definicije, zahtevi i metode ispitivanja, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13279-2: 2015

Veziva i malteri na bazi gipsa – Deo 2: Metode ispitivanja, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1367-1: 2010

Ispitivanja toplotnih i vremenskih uticaja na svojstva agregata – Deo 1: Određivanje otpornosti prema zamrzavanju i odmrzavanju, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 1367-2: 2010

Ispitivanja toplotnih i vremenskih uticaja na svojstva agregata – Deo 2: Ispitivanje magnezijum-sulfatom, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

419

SRPS EN 13687-1: 2010

Ispitivanja toplotnih i vremenskih uticaja na svojstva agregata – Deo 1: Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja sa potapanjem u rastvor soli za odmrzavanje. Ispitivanje magnezijum-sulfatom, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13687-2: 2010

Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Određivanje toplotne kompatibilnosti – Deo 2: Ciklične toplotne promene (toplotni šok), Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13687-3: 2010

Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Određivanje toplotne kompatibilnosti – Deo 3: Toplotni ciklusi bez delovanja soli za odmrzavanje, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13687-4: 2010

Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Metode ispitivanja – Određivanje toplotne kompatibilnosti – Deo 4: toplotni ciklusi u suvim uslovima, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13914-1: 2016

Projektovanje, priprema i primena maltera za oblaganje spoljašnjih i unutrašnjih površina – Deo 1: Malteri za oblaganje spoljašnjih površina, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 13914-2: 2016

Projektovanje, priprema i primena maltera za oblaganje spoljašnjih i unutrašnjih površina – Deo 1: Malteri za oblaganje unutrašnjih površina, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 14688-1: 2018

Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Identifikacija i klasifikacija tla – Deo 1: Identifikacija i opis

SRPS EN 1504-2: 2010

Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Definicije, zahtevi, kontrola kvaliteta i vrednovanje usaglašenosti – Deo 2: Sistemi za zaštitu površine betona, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

420

SRPS EN 1504-3: 2010

Proizvodi i sistemi za zaštitu i sanaciju betonskih konstrukcija – Definicije, zahtevi, kontrola kvaliteta i vrednovanje usaglašenosti – Deo 3: Konstrukcijske i nekonstrukcijske sanacije, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 15801: 2012

Конзервација културних добара – Методе испитивања – Одређивање апсорпције воде помоћу капиларности, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 15824: 2017

Спецификације за малтере на бази органских везива за спољашњу и унутрашњу употребу, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 15886: 2016

Конзервација културних добара – Методе испитивања – Мерење боје површина, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 15898: 2020

Конзервација културног наслеђа – Главни општи термини и дефиниције, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 16085: 2014

Конзервација културних добара – Методологија за узорковање из материјала културних добара – Општа правила, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 16095: 2014

Конзервација културних добара – Услови снимања покретног културног наслеђа, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 16096: 2014

Конзервација културних добара – Услови прегледа и извештај за саграђена културна наслеђа, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 16455: 2015

Конзервација културног наслеђа – Екстракција и одређивање растворљивих соли у природном камену и сродним материјалима који се користе у културном наслеђу, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

421

SRPS EN 16515: 2016

Конзервација културног наслеђа – Смернице за карактеризацију природног камена који се употребљава у културном наслеђу, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 16572: 2016

Конзервација културног наслеђа – Речник техничких термина који се односе на малтере за зидање и унутрашње и спољашње малтерисање, који се користе у културном наслеђу, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 16853: 2017

Конзервација културног наслеђа – Процес конзервације – Доношење одлука, планирање и примена, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 17187: 2021

Конзервација културног наслеђа – Карактеризација малтера који се користе у културном наслеђу, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 1744-1: 2014

Ispitivanje hemijskih svojstava agregata – Deo 1: Hemijska analiza, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 1926: 2010

Metode ispitivanja prirodnog kamena – Određivanje jednoaksijalne čvrstoće pri pritisku, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 1936: 2009

Metode ispitivanja prirodnog kamena – Određivanje stvarne i prividne zapreminske mase i ukupne i otvorene poroznosoti, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 196-1: 2017

Metode ispitivanja cementa – Deo 1: Određivanje čvrstoće, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 196-2: 2015

Metode ispitivanja cementa – Deo 2: Хемичке анализе цемента, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

SRPS EN 196-3: 2017

Metode ispitivanja cementa – Deo 3: Određivanje vremena vezivanja i stalnosti zapremine, Београд: Институт за стандардизацију Србије.

422

SRPS EN 196-5: 2012

Metode ispitivanja cementa – Deo 5: Određivanje pucolanske aktivnosti za pucolanske cimente, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 196-6: 2019

Metode ispitivanja cementa – Deo 6: Određivanje finoće mliva, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 196-6: 2010

Metode ispitivanja cementa – Deo 7: Metode uzimanja i pripreme uzoraka cementa, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 197-1: 2013

Cement – Deo 1: Sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti za obične cimente, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 206: 2021

Beton – Specifikacije, performanse, proizvodnja i usaglašenost, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 450-1: 2014

Leteći pepeo za beton – Deo 1: Definicija, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 451-1: 2017

Metoda ispitivanja letećeg pepela – Deo 1. Određivanje sadržaja slobodnog kalcijum-oksida, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 451-2: 2017

Metoda ispitivanja letećeg pepela – Deo 2. Određivanje finoće mokrim prosejavanjem, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SPRS EN 459-1: 2016

Građevinski kreč – Deo 1: Definicije, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 459-2: 2021

Građevinski kreč – Deo 2: Metode ispitivanja, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 459-3: 2016

Građevinski kreč – Deo 3: Vrednovanje usaglašenosti, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

423

SRPS EN 480-13: 2015

Dodaci betonu, malteru i injekcionoj masi – Metode ispitivanja – Deo 13: Referentni zidarski malter za ispitivanje dodataka malteru, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 772-1: 2016

Metode ispitivanja elemenata za zidanje – Deo 1: Određivanje čvrstoće pri pritisku, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 932-1: 2008

Ispitivanja opštih svojstava agregata – Deo 1: Metode uzimanja uzoraka, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 932-2: 2008

Ispitivanja opštih svojstava agregata – Deo 2: Metode smanjivanja laboratorijskih uzoraka, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 932-3: 2023

Ispitivanja opštih svojstava agregata – Deo 3: Postupak i terminologija za pojednostavljeni petrografski opis, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 933-1: 2013

Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata – Deo 1: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda prosejavanja, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 933-3: 2013

Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata – Deo 3: Određivanje oblika zrna – Indeks pljosnatosti, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 933-4: 2010

Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata – Deo 4: Određivanje oblika zrna – Indeks oblika, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 933-7: 2007

Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata – Deo 7: Određivanje udela ljuštura – Udeo ljuštura u krupnozrnim agregatima, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 933-8: 2016

Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata – Deo 8: Ocena sadržaja sitnih čestica – Ispitivanje ekvivalenta peska, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 933-9: 2023

Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata – Deo 9: Ocenjivanje sitnih čestica – Ispitivanje na metilen-plavo, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 934-1: 2010

Dodaci betonu, malteru i injekcionoj masi – Deo 1: Opšti zahtevi, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 934-3: 2014

Dodaci za beton, malter i injekcionu masu – Deo 3: Dodaci za malter za zidanje – Definicije, zahtevi, usaglašenost, označavanje i obeležavanje, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 998-1: 2017

Specifikacija maltera za zidane konstrukcije – Deo 1: Malter za oblaganje spoljasnih i unutrašnjih površina, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

SRPS EN 998-2: 2017

Specifikacija maltera za zidane konstrukcije – Deo 1: Malter za oblaganje spoljasnih i unutrašnjih površina, Beograd: Institut za standardizaciju Srbije.

Autorska prava nad srpskim standardima i srodnim dokumentima pripadaju Institutu za standardizaciju Srbije u skladu sa Zakonom (Zakon o standardizaciji: *Službeni glasnik RS*, br. 36/2009 i 46/2015; Zakon o autorskom i srodnim pravima: *Službeni glasnik RS*, br. 104/2009, 99/2011, 119/2012, 29/2016 - odluka US i 66/2019), a izvodi standarda u ovoj publikaciji objavljuju se na osnovu pisane saglasnosti Instituta za standardizaciju Srbije.

Izvodi standarda koji nisu bili na srpskom jeziku, već su prevedeni od strane izdavača ove publikacije, nisu prevodi standarda autorizovani od strane komisije za standarde Instituta za standardizaciju Republike Srbije. Slika 20, Slika 69 i Slika 81 u ovoj publikaciji nisu originali iz standarda, već predstavljaju modifikacije grafičkih prikaza iz standarda, sa tekstovima prevedenim na srpski jezik od strane izdavača ove publikacije, koje nisu autorizovane od strane komisije za standarde Instituta za standardizaciju Republike Srbije.



CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

903/904"652":666.971(497.11)

620.1:666.971

7.025.3:666.971

ДЕЛИЋ Николић, Ивана, 1965-

Istorijski malteri : od karakterizacije do konzervacije / Ivana Delić-Nikolić, Ljiljana Miličić, Emilija Nikolić. - Beograd : Arheološki institut : Institut za ispitivanje materijala, 2024 (Beograd : Grid Studio). - XXII, 426 str. : ilustr. ; 23 cm

Na spor. nasl. str.: Historical mortars. - Tiraž 200. - Resume: Historical mortars: from characterisation to conservation. - Bibliografija: str. 357-424.

ISBN 978-86-6439-079-8 (AI)

ISBN 978-86-82081-33-3 (IMS)

1. Миличић, Љиљана, 1966- [аутор]

2. Николић, Емилија, 1979- [аутор]

а) Археолошка налазишта, римска -- Малтер -- Србија

б) Малтер -- Испитивање в) Малтер -- Заштита

COBISS.SR-ID 139027209

