

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



*PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER*

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

DAVID DUH, univ. dipl. inž. grad.

**SAMOZGOŠČEVALNI IN VIBRIRANI BETONI
Z APNENČEVO MOKO**

Doktorska disertacija štev.: 185

**SELF-COMPACTING AND VIBRATED CONCRETES
WITH LIMESTONE POWDER**

Doctoral thesis No.: 185

Temo doktorske disertacije je odobril
Senat Univerze v Ljubljani na 7. seji dne 27. junija 2006
in imenoval mentorico doc.dr. Violeto Bokan-Bosiljkov.

Ljubljana, 25. avgust 2008

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi
doc.dr. Violeta Bokan-Bosiljkov,
izr.prof.dr. Roko Žarnić,
prof.dr. Stanislav Pejovnik (UL, FKKT),
prof.dr. Dubravka Bjegović (Sveučilište u Zagrebu, GF)

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 9. redni seji dne
19. aprila 2006.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi
doc.dr. Violeta Bokan-Bosiljkov,
izr.prof.dr. Roko Žarnić,
prof.dr. Stanislav Pejovnik (UL, FKKT),
prof.dr. Dubravka Bjegović (Sveučilište u Zagrebu, GF)

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 18. redni seji dne
28. maja 2008.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi
prof.dr. Bojan Majes, dekan, predsednik,
doc.dr. Violeta Bokan-Bosiljkov,
izr.prof.dr. Roko Žarnić,
prof.dr. Stanislav Pejovnik (UL, FKKT),
prof.dr. Dubravka Bjegović (Sveučilište u Zagrebu, GF)

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 19. redni seji dne
02. julija 2008.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo



IZJAVA O AVTORSTVU

Večino raziskovalnega dela smo opravili v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Poskus prenosa sprojektiranih samozgoščevalnih betonskih mešanic v laboratoriju na različne tipe betonskih mešalcev večjih kapacitet v realnih pogojih smo opravili v dveh betonarnah, in sicer v obratu GOBI podjetja Primorje d.d. iz Ajdovščine in v betonarni CGP Novo mesto.

Analize zrnastostne sestave uporabljenih apnenčevih mok in cementa smo opravili na Naravoslovno-tehniški fakulteti v Ljubljani, na Oddelku za geotehnologijo in rudarstvo.

Ultrazvočno čiščenje brušene površine betonskih vzorcev smo opravili na Zavodu za gradbeništvo Slovenije v Ljubljani. Preiskave učinka načina brušenja in poliranja površine betonskih vzorcev na rezultate kvantitativne mikroskopske analize smo izvajali v sodelovanju s Podjetjem za pridobivanje, predelavo in montažo naravnega kamna Mineral d.d., in sicer ročno brušenje v obratu predelave v Podpeči in brušenje na tekočem traku v kamnolomu Lesno Brdo.

Avtor slike na uvodnih straneh je Branko Duh, Malečnik 2008.

Podpisani **DAVID DUH, univ. dipl. inž. grad.**, izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom: »SAMOZGOŠČEVALNI IN VIBRIRANI BETONI Z APNENČEVO MOKO«.

Ljubljana, 25. avgust 2008

.....
(podpis)

The journey is the reward.



ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA O PREGLEDU NALOGE

Disertacijo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN

UDK	691.215+691.32(043.3)
Avtor	David Duh
Mentor	doc. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Naslov	Samozgoščevalni in vibrirani betoni z apnenčevo moko
Obseg in oprema	200 str., 53 pregl., 170 sl., 83 en., 4 pril.
Ključne besede	samozgoščevalni beton, apnenčeva moka, projektiranje, analitični modeli, mehanske lastnosti, obstojnost, mikroskopska analiza, stereologija, avtomatizacija, Powersov faktor oddaljenosti

Izvleček

Doktorska disertacija je vsebinsko razdeljena na dva med seboj povezana dela. Prvi del je posvečen projektiranju, zamešanju in lastnostim samozgoščevalnih (SCC) in vibriranih betonov z apnenčevo moko. V okviru projektiranja SCC mešanic so bile izvedene številne preiskave na cementnih pastah, maltah in na betonskih mešanicah z različnimi vrstami mineralnih in kemijskih dodatkov. Lastnosti betonov v svežem in v strjenem stanju so bile določene s standardnimi in nestandardnimi metodami na »makro« in na »mikro« ravni. Mikroskopske analize so pokazale nekatere bistvene razlike v mikrostrukturi obravnavanih betonov, ki dobro razlagajo opaženo obnašanje materiala na »makro« nivoju. Izdelani so bili analitični modeli za časovne razvoje mehanskih lastnosti SCC z apnenčevo moko. V okviru obstojnostnih karakteristik SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko je bil poudarek na odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilnih soli in na odpornosti betona proti sulfatni koroziji.

Drugi del disertacije obravnava linijski in planarni stereološki pristop k avtomatizaciji metode za ugotavljanje značilnosti zračnih por v strjenem betonu. Predstavljene so izvirne rešitve za pomembne detajle in matematične probleme na tem področju, na podlagi katerih smo izdelali računalniški aplikaciji LMAir in PMAir za avtomatsko izvedbo te stereološke metode. Predstavljena je tudi študija pravega fizikalnega ozadja Powersovega faktorja oddaljenosti in smernice za »posodobljeno« formulo tega stereološkega parametra, ki bi zajela tudi kvaliteto cementnega kamna v betonu.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC	691.215+691.32(043.3)
Author	David Duh
Supervisor	Assist. Prof. Dr. Violeta Bokan-Bosiljkov
Title	Self-compacting and vibrated concretes with limestone powder
Notes	200 p., 53 tab., 170 fig., 83 eq., 4 ann.
Key words	self-compacting concrete, limestone powder, mix design, analytical models, mechanical properties, durability, microscopical analysis, stereology, automation, Powers spacing factor

Abstract

The thesis is divided into two connected parts. The first part deals with design, mixing and characteristics of self-compacting concrete (SCC) and vibrated concrete with limestone powder. In the framework of SCC mixture design extensive tests on cement pastes, mortars and concrete mixtures with different mineral additions and chemical admixtures were done. Characteristics of fresh and hardened concrete were obtained with standard and non-standard methods on »macro« and »micro« level. The microscopical analysis showed some essential differences in microstructure of the discussed concretes, which gave a good explanation for the observed behaviours. Further on, analytical models for the evolution of mechanical properties of SCC with limestone powder were developed. In the scope of durability of SCC and vibrated concrete with limestone powder the main focus was on salt frost scaling and sulfate attack.

The second part of the thesis presents linear and planar stereological approach to computer assisted determination of air void characteristics in hardened concrete. Original solutions for some significant missing links and mathematical problems in this research area were proposed and successfully integrated in the developed computer applications, called LMAir and PMAir, for linear and planar analysis of air void system in hardened concrete, respectively. A true physical background of the Powers spacing factor was studied as well, according to which an outline for upgraded formula was proposed.

ZAHVALA

Hvala, mama Marjana in ati Branko, da sta tolikšen del sebe posvetila moji življenjski poti. Hvala, da sta mi kupila računalnik in me podpirala v številnih željah, ki mi jih je narekovala moja radovedna narava. Brez tega danes najverjetneje ne bi mogel zaključevati tega dela. Hvala tudi tebi, sestra Darja, da si mi pokazala, kako lepo je potovati in spoznavati nove stvari. Hvala vsem trem, da ste mi vedno stali ob strani po svojih najboljših močeh.

Doc. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, hvala, da ste mi v zaključni fazi mojega dodiplomskega študija predstavili zanimivost raziskovanja materialov. Hvala vam, da ste celo leto počakali name in me sprejeli pod svoje mentorstvo, tako za diplomsko kot tudi za doktorsko delo. Brez vaših dragocenih izkušenj, znanja in idej, ki ste mi jih posredovali, delo na takšni ravni, kot smo ga izvedli, ne bi bilo mogoče. Hvala, da ste mi na nek način zaupali tudi takrat, ko sem se za trenutek znašel v situaciji, iz katere ni bilo enostavnega izhoda.

Prof. dr. Roko Žarnić, hvala vam, da ste mi kot predstojnik Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani omogočili mojo raziskovalno pot tudi na najvišji ravni, ki jo danes tehnologija ponuja. Hvala vam tudi za številne nasvete in pogovore, predvsem takrat, ko se je bilo potrebno od problema oddaljiti, da smo prišli do rešitve. Na tem mestu bi se rad zahvalil tudi Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije za financiranje mojega usposabljanja kot mladega raziskovalca za pridobitev doktorata znanosti.

Prof. dr. Stanislav Pejovnik, hvala vam, da ste mi predstavili znanstveno vedo – stereologijo, ki je odgovorila na moja vprašanja in mi omočila razvoj nekaterih zelo zanimivih idej. Prof. dr. Goran Turk, hvala vam za diskusije o konkretnih problemih verjetnostnega računa v sklopu moje doktorske disertacije. Prof. dr. Miran Saje, hvala vam za resnično kvalitetna predavanja predvsem na podiplomskem študiju, iz katerih se je bilo moč naučiti pristopa k reševanju matematično-fizikalnih problemov višje stopnje zahtevnosti. Hvala vam tudi za tiste vzpodbudne besede, ko sem jih najbolj potreboval. Bili ste edini, profesor. Dr. John Hughes, hvala vam, da ste mi predstavili pravi pomen doktorskega dela. Prof. dr. Mario de Rooij, hvala vam za posredovanje dragocene informacije o programu ImageJ. Dr. Robert Leskovar, hvala za vse pogovore. Močno so mi pomagali. Prof. dr. Itai Panas, hvala vam za tisto več-urno debato, ki mi je razjasnila nekaj zelo pomembnih detajlov glede mikrostrukture betona. Dr. Pär Meiling, hvala, za vse.

Franci Čepon, hvala za vso pomoč in izjemno uporabne ideje ter rešitve za eksperimentalno delo. Aleksandra Hribar, Uroš Vetric, Franc Turk, Igor, Jože Mehle, Barbara Pezdirc, Jure Trtnik, Mitja Žnidaršič, Janez, Tomaž Potrpin, Boris Hunjak, Marija Zaletelj, Lovro Cimperman in Tomaž Rugelj, hvala vam za pomoč pri preiskavah in za pozitivno vzdušje v laboratoriju. Andraž Mezgec, Simon Detellbach, mag. Gašper Vindišar, mag. Marta Stojmanovska, Marjan Kuret, doc. dr. Vlatko Bosiljkov in mladi raziskovalci FGG, še posebej Franc Sinur in Daniel Celarec, hvala vam za pozitivno vzdušje na naši fakulteti. Pevci komornega zbora Krog, hvala vam za vzpodbudne besede in za vse trenutke glasbe. Dr. Alenka Grošel, hvala za tisti SMS o sreči. Dr. Niko Kristanič in dr. Miha Kramar, hvala, da sta me poslušala, ko sem potreboval nekoga. Snežana Manojlović, hvala vam, za vse. Bine Tornič in Bernarda Bardutzky, hvala tudi vama, da sta se letos spomladi odzvala na mojo prošnjo in me sprejela v vaš tim. Meni sta v veliki meri osmislila zaključek tega dolgoletnega dela.

Nenazadnje hvala tudi tebi, Jernej Kocbek, da si bil ves ta čas moj prijatelj.

ACKNOWLEDGMENTS

Thank you, my mama Marjana and my father Branko, for such a portion of your life that you have dedicated to my path. Thank you for buying me a computer and for all the support in my curious nature. Without all that I do not believe this doctoral work would be possible. Thank you, my sister Darja, for showing me the joy of journey and meeting of new. Thank you all for standing by my side, always at your best.

Assist. Prof. Dr. Violeta Bokan-Bosiljkov, thank You for introducing me to the material science and research. Thank You for waiting that whole year and for taking me under your supervision. Without Your rich experiences, knowledge and ideas that You have passed on to me such level of work that this thesis was carried out at would not be possible. Thank You, as well, for trusting me, in a way, regardless the situations that I have managed to find myself in.

Prof. Dr. Roko Žarnić, thank You for giving me the opportunity for research, also at the technological State-of-the-Art level. Thank You, as well, for all the advices and debates, especially at times when I needed to take a step back to find the solution. At this point, I would also like to thank the Ministry of Higher Education, Science and Technology of the Republic of Slovenia for funding my PhD studies and research.

Prof. Dr. Stanislav Pejovnik, thank You for introducing me to the science of stereology, which answered my questions and gave me the opportunity to develop some very interesting ideas. Prof. Dr. Goran Turk, thank You for all the debates regarding the probabilistic approach to some problems in my doctoral work. Prof. Dr. Miran Saje, thank You for truly inspiring lectures that gave me an opportunity to learn the approach for solving somewhat more intriguing mathematical problems. Thank You, as well, for those encouraging words, when I needed them the most. You were the only one, Professor. Dr. John Hughes, thank You for outlining the true meaning of the doctoral work for me. Prof. Dr. Mario de Rooij, thank You for sharing the valuable information regarding the ImageJ software. Dr. Robert Leskovar, thank you for all the discussions. They were of true support to me. Prof. Dr. Itai Panas, thank You for that long-lasting debate that opened some significant »doors« regarding concrete microstructure to me. Dr. Pär Meiling, thank you, for everything.

Franci Čepon, thank you for all the help and truly inspiring ideas and solutions for experimental work. Aleksandra Hribar, Uroš Vetrih, Franc Turk, Igor, Jože Mehle, Barbara Pezdirc, Jure Trtnik, Mitja Žnidaršič, Janez, Tomaž Potrpin, Boris Hunjak, Marija Zaletelj, Lovro Cimperman and Tomaž Rugelj, thank you all for the help and positive atmosphere in the lab. Andraž Mezgec, Simon Detellbach, M.Sc. Gašper Vindišar, M.Sc. Marta Stojmanovska, Marjan Kuret, Assist. Prof. Dr. Vlatko Bosiljkov and all FGG Research Assistants, especially Franco Sinuar and Daniel Celarec, thank you all for truly positive atmosphere on our Faculty. Singers of the Chamber choir Krog, thank you for encouraging words and for all the music. Dr. Alenka Grošel, thank you for that message about what happiness is. Dr. Niko Kristanič and Dr. Miha Kramar, thank you for listening to me, when I needed somebody. Snežana Manojlović, thank You, for everything. Bine Tornič and Bernarda Bardutzky, thank You for responding to my application this spring and for inviting me to Your team. To me, You have put quite some meaning to all this work.

At last but not at least, thank you, Jernej Kocbek, for being my friend all this time.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	SAMOZGOŠČEVALNI BETON.....	3
2.1	MOTIVI ZA RAZVOJ SCC	3
2.2	SCC V SVEŽEM STANJU	4
2.2.1	<i>Lastnosti SCC v svežem stanju</i>	<i>4</i>
2.2.1.1	Sposobnost zapolnjevanja	4
2.2.1.2	Sposobnost prehajanja.....	5
2.2.1.3	Odpornost na segregacijo	5
2.2.2	<i>Preiskave SCC v svežem stanju</i>	<i>6</i>
2.2.3	<i>Numerični model sveže SCC mešanice</i>	<i>7</i>
2.3	STRJEN SCC	9
2.3.1	<i>Lastnosti strjenega SCC</i>	<i>9</i>
2.3.1.1	Tlačna trdnost.....	9
2.3.1.2	Natezna trdnost.....	10
2.3.1.3	Statični modul elastičnosti.....	10
2.3.1.4	Lezenje.....	10
2.3.1.5	Krčenje.....	10
2.3.1.6	Sprijemnost z armaturo	11
2.3.1.7	Obstojnost	11
2.3.2	<i>Preiskave strjenega SCC</i>	<i>12</i>
2.4	SCC V PRAKSI.....	12
3	PROJEKTIRANJE BETONSKIH MEŠANIC	15
3.1	UVOD.....	15
3.2	PROJEKTIRANJE SCC MEŠANIC	15
3.2.1	<i>Materiali.....</i>	<i>18</i>
3.2.1.1	Praškasti materiali	18
3.2.1.2	Superplastifikatorji.....	19
3.2.1.3	Sredstva za kontrolo viskoznosti	20
3.2.1.4	Aeranti.....	21
3.2.2	<i>Projektiranje lastnih SCC mešanic.....</i>	<i>22</i>
3.2.3	<i>Časovno spreminjanje obdelavnosti svežih SCC mešanic</i>	<i>27</i>
3.2.4	<i>Izbira SCC mešanic za nadaljnje preiskave</i>	<i>28</i>
3.2.5	<i>Lastne izkušnje z vgrajevanjem SCC v večje AB elemente v laboratoriju in v betonarnah</i>	<i>32</i>
3.3	PROJEKTIRANJE PRIMERLJIVIH VIBRIRANIH BETONSKIH MEŠANIC	35
4	MEHANSKE LASTNOSTI SCC IN VIBRIRANIH BETONOV Z APNENČEVO MOKO.....	39
4.1	UVOD.....	39
4.2	BETONSKE MEŠANICE IN MATERIALI.....	39
4.3	PRIPRAVA PREIZKUŠANCEV	41
4.4	TLAČNA TRDNOST.....	42
4.4.1	<i>Časovni razvoj tlačne trdnosti SCC z apnenčevo moko.....</i>	<i>49</i>
4.5	NATEZNA TRDNOST SCC Z APNENČEVO MOKO.....	51
4.5.1	<i>Časovni razvoj natezne trdnosti SCC z apnenčevo moko</i>	<i>53</i>
4.6	STATIČNI MODUL ELASTIČNOSTI.....	54

4.6.1	<i>Časovni razvoj modula elastičnosti</i>	56
4.7	DUKTILNOST	58
4.8	KRČENJE	62
5	OBSTOJNOST SCC IN VIBRIRANIH BETONOV Z APNENČEVO MOKO	63
5.1	UVOD	63
5.2	ODPORNOST BETONA PROTI ZMRZOVANJU IN TAJANJU	64
5.2.1	<i>Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju</i>	67
5.2.2	<i>Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju</i>	67
5.2.2.1	Dejavniki, ki lahko pomembno vplivajo na rezultate preiskave OSMO odpornosti betona predpisane v SIST 1026 (2004)	68
5.2.2.2	Vpliv dodatka apnenčeve moke na OSMO odpornost betona	70
5.2.2.3	Vpliv načina vgrajevanja sveže betonske mešanice na OSMO odpornost betona	74
5.2.2.4	Vpliv vrste mineralnega dodatka na OSMO odpornost SCC	76
5.2.2.5	Vpliv stopnje aeriranosti na OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko AM-L	82
5.2.2.6	Vpliv temperature in trajanja mokre nege SCC z apnenčevo moko na njegovo OSMO odpornost	87
5.2.2.7	Razvoj novih parametrov metode LMA	90
5.3	ODPORNOST BETONA PROTI SULFATNI KOROZIJI	92
5.3.1	<i>Ukrepi za povečanje odpornosti betona proti sulfatnemu napadu</i>	93
5.3.2	<i>Lastne preiskave</i>	94
6	AVTOMATIZACIJA METODE EN 480-11	103
6.1	UVOD	103
6.2	VALIDACIJA METODE EN 480-11	103
6.3	AVTOMATIZACIJA METODE EN 480-11	111
6.3.1	<i>Identifikacija problema avtomatizacije</i>	112
6.3.2	<i>Ideje za rešitev problema kontrastiranja</i>	114
6.3.3	<i>Ideje za rešitev problema izbire prave threshold vrednosti</i>	118
6.3.4	<i>Razvoj računalniške aplikacije LMAir</i>	121
6.3.4.1	HST metoda	122
6.3.4.2	THR metoda	124
6.3.4.3	Končna faza aplikacije LMAir	125
6.3.4.4	Validacija LMAir	127
6.3.5	<i>Razvoj računalniške aplikacije PMAir</i>	135
6.3.5.1	Izpeljava planarnih stereoloških zvez za oceno parametrov LMA	137
6.3.5.2	Aplikacija PMAir	152
6.3.5.3	Validacija PMAir	155
7	ZAKLJUČKI	161
7.1	SAMOZGOŠČEVALNI BETON	161
7.1.1	<i>Projektiranje SCC in primerljivih vibriranih mešanic</i>	161
7.1.2	<i>Numerični model sveže SCC mešanice</i>	164
7.1.3	<i>SCC v praksi</i>	164
7.1.4	<i>Prispevek disertacije</i>	165
7.1.5	<i>Ideje za nadaljnje delo</i>	166
7.2	MEHANSKE LASTNOSTI SCC IN VIBRIRANIH BETONOV Z APNENČEVO MOKO	167
7.2.1	<i>Tlačna trdnost</i>	167
7.2.2	<i>Natezna trdnost</i>	168
7.2.3	<i>Statični modul elastičnosti</i>	168

7.2.4	<i>Duktilnost</i>	168
7.2.5	<i>Krčenje</i>	169
7.2.6	<i>Prispevek disertacije</i>	170
7.2.7	<i>Ideje za nadaljnje delo</i>	170
7.3	OBSTOJNOST SCC IN VIBRIRANIH BETONOV Z APNENČEVO MOKO	171
7.3.1	<i>Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju</i>	171
7.3.2	<i>Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju</i>	171
7.3.3	<i>Odpornost betona proti sulfatni koroziji</i>	174
7.3.4	<i>Prispevek disertacije</i>	175
7.3.5	<i>Ideje za nadaljnje delo</i>	176
7.4	AVTOMATIZACIJA METODE EN 480-11	178
7.4.1	<i>Metoda EN 480-11</i>	178
7.4.2	<i>Mehanski tip avtomatizacije LMA</i>	178
7.4.3	<i>Avtomatizacija LMA z optičnim čitalcem</i>	179
7.4.4	<i>Planarna stereološka analiza</i>	180
7.4.5	<i>Prispevek disertacije</i>	181
7.4.6	<i>Ideje za nadaljnje delo</i>	181
8	POVZETEK	183
9	SUMMARY	187
VIRI	191

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1: Zahteve prEN 206-2 (2006) glede obdelavnosti samozgoščevalnega betona	7
Preglednica 3.1: Okvirne vrednosti deležev materialov za SCC mešanico (Skarendahl, Petersson, 2000).....	18
Preglednica 3.2: Primer zadnje faze projektiranja aerirane SCC mešanice (mešanica LA).....	24
Preglednica 3.3: Medsebojni vplivi in posamični učinki kemijskih dodatkov.....	25
Preglednica 3.4: Vpliv naknadnega dodajanja aeranta in naknadnega mešanja na delež zraka v sveži aerirani SCC mešanici	26
Preglednica 3.5: Sestave sprojektiranih SCC mešanic v prvi fazi (vrednosti v kg/m ³)	27
Preglednica 3.6: Projektiranje optimizirane SCC mešanice LN brez sredstva za kontrolo viskoznosti	29
Preglednica 3.7: Raztros obdelavnosti večkrat zamešanih SCC mešanic iz istih šarž sestavnih materialov	33
Preglednica 3.8: Sestave in lastnosti vibriranih betonskih mešanic iz prve faze (vrednosti v kg/m ³)	36
Preglednica 3.9: Projektiranje aerirane vibrirane mešanice z v/c = 0,39	36
Preglednica 3.10: Največja priporočena količina finih delcev v betonski mešanici (SIST EN 206-1, 2003).....	37
Preglednica 4.1: Sestave in lastnosti sprojektiranih SCC in vibriranih mešanic (vrednosti v kg/m ³).....	40
Preglednica 4.2: Sestave in lastnosti sprojektiranih aeriranih SCC mešanic (vrednosti v kg/m ³)	41
Preglednica 4.3: Ocena kvalitete betona z ultrazvočno metodo.....	48
Preglednica 4.4: Vrednosti statistike H^{χ^2} pri preizkušanju skladnosti različnih računskih modelov z dejanskimi rezultati meritev tlačne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih	51
Preglednica 4.5: Ocenjena natezna trdnost SCC z apnenčevo moko (LN-43).....	52
Preglednica 4.6: Statični in sekantni modul elastičnosti SCC z apnenčevo moko (LN-43)	55
Preglednica 4.7: Statični modul elastičnosti (v GPa) SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih	56
Preglednica 4.8: Sekantni modul elastičnosti (v GPa) SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih	56
Preglednica 4.9: Razmerje med statičnim in sekantnim modulom elastičnosti SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih.....	57
Preglednica 4.10: Razlika med vzdolžnima deformacijama na nasprotnih stranicah posameznega preizkušanca	60
Preglednica 4.11: Razlika med prečnima deformacijama na nasprotnih stranicah posameznega preizkušanca	60
Preglednica 4.12: Razlika med doseženimi maksimalnimi tlačnimi napetostmi pri vitkih prizmah in tlačno trdnostjo betona (LN-43).....	61
Preglednica 4.13: Poissonov koeficient SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih betona	61
Preglednica 5.1: Merila za ocenjevanje odpornosti površine strjenega betona proti zmrzovanju/tajanju, količina odluščenega materiala v mg/mm ² (SIST 1026, 2004)	72
Preglednica 6.1: Primerjava rezultatov LMA pri navpični in stranski osvetlitvi	106
Preglednica 6.2: Primerjava rezultatov LMA dveh različnih izvajačev.....	107

Preglednica 6.3: Pričakovana natančnost dobljenih ocen parametrov LMA pri minimalnem testnem sistemu	111
Preglednica 6.4: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA10 (srednji prerezi).....	128
Preglednica 6.5: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA10 (prerezi ob površini).....	128
Preglednica 6.6: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce EF (srednji prerezi)	128
Preglednica 6.7: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce EF (prerezi ob površini)	129
Preglednica 6.8: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce CA4 (srednji prerezi).....	129
Preglednica 6.9: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce CA4 (prerezi ob površini)	129
Preglednica 6.10: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce TA4	129
Preglednica 6.11: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA4	130
Preglednica 6.12: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA6	130
Preglednica 6.13: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA8	130
Preglednica 6.14: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA12	130
Preglednica 6.15: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LVA8	131
Preglednica 6.16: Relativne napake ocen LMA parametrov z aplikacijo LMAir.....	134
Preglednica 6.17: Odštevanje relativnih frekvenc največjega velikostnega razreda od skupne frekvenčne porazdelitve vseh identificiranih dvodimenzionalnih sledi zračnih por	143
Preglednica 6.18: Ocenjena porazdelitev zračnih por z metodo odštevanja relativnih frekvenc.....	145
Preglednica 6.19: Primerjava preostalih parametrov LMA za obravnavan vzorec določenih z različnimi stereološkimi pristopi	150
Preglednica 6.20: Primerjava preostalih parametrov LMA za obravnavan vzorec določenih z različnimi stereološkimi pristopi	151
Preglednica 6.21: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce CA4	156
Preglednica 6.22: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LVA8	156
Preglednica 6.23: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce EF	156
Preglednica 6.24: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce TA4	156
Preglednica 6.25: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA4	157
Preglednica 6.26: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA8	157
Preglednica 6.27: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA10	157
Preglednica 6.28: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA12	157

LIST OF TABLES

Table 2.1: Requirements of prEN 206-2 (2006) for workability of self-compacting concrete	7
Table 3.1: Approximate proportions of materials for SCC mixture (Skarendahl, Petersson, 2000).....	18
Table 3.2: Example of the last phase of aerated SCC mix design (mix LA)	24
Table 3.3: Interaction and effects of chemical admixtures	25
Table 3.4: Effect of air-entraining agent addition after primary mixing and effect of additional mixing on air content in fresh aerated SCC mixture.....	26
Table 3.5: Compositions of first phase SCC mixtures (values in kg/m ³).....	27
Table 3.6: SCC mix design of optimal LN mixture without viscosity agent	29
Table 3.7: Deviation in properties of repeatedly mixed SCC mixtures from the same parcels of materials.....	33
Table 3.8: Composition and characteristics of the first phase concrete mixtures (values in kg/m ³).....	36
Table 3.9: Ordinary aerated concrete mix design at w/c ratio of 0.39	36
Table 3.10: Recommended maximum of powder content in concrete mixture (SIST EN 206-1, 2003)	37
Table 4.1: Composition and characteristics of the designed SCC and vibrated mixtures (values in kg/m ³)	40
Table 4.2: Composition and characteristics of the designed aerated SCC mixtures (values in kg/m ³).....	41
Table 4.3: Estimation of concrete quality from ultrasonic method.....	48
Table 4.4: Values of statistic $H\chi^2$ from accordance test (χ^2 -test) of different models and the results of compressive strength tests on discussed SCC with limestone powder (LN-43) at different age.....	51
Table 4.5: Estimated tensile strength of SCC with limestone powder (LN-43).....	52
Table 4.6: Static and secant modulus of elasticity of SCC with limestone powder (LN-43).....	55
Table 4.7: Static modulus of elasticity (in GPa) of SCC with limestone powder (LN-43) at different age.....	56
Table 4.8: Secant modulus of elasticity (in GPa) of SCC with limestone powder (LN-43) at different age	56
Table 4.9: Ratio of static to secant modulus of elasticity of SCC with limestone powder (LN-43) at different age.....	57
Table 4.10: Difference between longitudinal strains on opposite sides of each specimen	60
Table 4.11: Difference between transversal strains on opposite sides of each specimen	60
Table 4.12: Difference between maximum achieved compressive stress for slender prisms and compressive strength of concrete (LN-43)	61
Table 4.13: Poisson's ratio of SCC with limestone filler (LN-43) at different age	61
Table 5.1: Criterion for estimation of freeze-thaw resistance of hardened concrete surface, amount of scaled material in mg/mm ² (SIST 1026, 2004)	72
Table 6.1: Comparison of the LTM results at the vertical and side lighting.....	106
Table 6.2: Comparison of the LTM results obtained by two different operators.....	107
Table 6.3: Precision and bias of the obtained LTM parameters at the minimum size of the probe system.....	111
Table 6.4: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA10 samples (middle sections).....	128
Table 6.5: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA10 samples (near surface sections).....	128
Table 6.6: Comparison of LMAir and classic LTM results for EF samples (middle sections).....	128

Table 6.7: Comparison of LMAir and classic LTM results for EF samples (near surface sections)	129
Table 6.8: Comparison of LMAir and classic LTM results for CA4 samples (middle sections)	129
Table 6.9: Comparison of LMAir and classic LTM results for CA4 samples (near surface sections)	129
Table 6.10: Comparison of LMAir and classic LTM results for TA4 samples	129
Table 6.11: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA4 samples	130
Table 6.12: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA6 samples	130
Table 6.13: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA8 samples	130
Table 6.14: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA12 samples	130
Table 6.15: Comparison of LMAir and classic LTM results for LVA8 samples	131
Table 6.16: Relative error of the automated LMAir estimations of LTM parameters	134
Table 6.17: Example of the first phase of sphere distribution unfolding method from plane intersections	143
Table 6.18: Estimated air void distribution according to sphere distribution unfolding method	145
Table 6.19: Comparison of the remaining LTM parameters for the test sample obtained from different stereological methods	150
Table 6.20: Comparison of the remaining LTM parameters for the test sample obtained from different stereological methods	151
Table 6.21: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for CA4 samples	156
Table 6.22: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LVA8 samples	156
Table 6.23: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for EF samples	156
Table 6.24: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for TA4 samples	156
Table 6.25: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA4 samples	157
Table 6.26: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA8 samples	157
Table 6.27: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA10 samples	157
Table 6.28: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA12 samples	157

KAZALO SLIK

Slika 1.1: Primer vgrajevanja SCC (The European Guidelines..., 2005).....	2
Slika 2.1: Shematični prikaz sestave SCC (zgoraj) in običajnega betona (spodaj).....	3
Slika 2.2: Vgrajevanje SCC s črpanjem ob dnu opaža	4
Slika 2.3: SCC popolnoma prevzame strukturo površine opaža.....	5
Slika 2.4: Mehanizem blokiranja sveže betonske mešanice (Skarendahl, Petersson, 2000).....	5
Slika 2.5: Model Binghamove in Newtonove tekočine	8
Slika 2.6: Primer numerične simulacije večfaznega vgrajevanja SCC (Roussel, 2007) s 5 minutnim časovnim razmakom (zgoraj) in z 20 minutnim časovnim razmakom (spodaj)	9
Slika 2.7: Vpliv v/c razmerja in količine cementa na krčenje betona zaradi sušenja (Mehta, Monteiro, 2006)	11
Slika 2.8: Primer uporabe SCC za močno armirano konstrukcijo »Pokriti vkop na HC Razdrto – Vipava«	13
Slika 3.1: Splošen pristop k doseganju samozgoščevalnih lastnosti sveže betonske mešanice (povzeto po Ouchi, <i>et al.</i> , 1998).....	17
Slika 3.2: SEM slike: a) elektrofiltrski pepel (Mehta, Monteiro, 2006); b) apnenčeva moka	19
Slika 3.3: Shematični prikaz delovanja SP: a) adsorpcija SP na površino cementnih zrn; b) elektrostatični odboj cementnih zrn (Mehta, Monteiro, 2006).....	19
Slika 3.4: Shematični prikaz delovanja SP nove generacije: a) molekule SP nove generacije; b) adsorpcija na površino cementnih zrn; c) učinkovitejši sterični odboj že delno hidratiziranih cementnih zrn (Petan, 2002)	20
Slika 3.5: ESEM slike biopolimera »welan gum«: a) suhi delci pri 70% RH; b) stanje po 5 min pri 100% RH; c) stanje po 12 min pri 100% RH. Dolžina skale je 100 µm (Mehta, Monteiro, 2006)	21
Slika 3.6: Prerez neaeriranega betona (levo) in aeriranega betona (desno). Dolžina skale je 2 mm.....	22
Slika 3.7: Mehanizem delovanja aeranta (Mehta, Monteiro, 2006).....	22
Slika 3.8: Standardni mešalec za malte in paste (levo) in protitočni mešalec za betone (desno).....	24
Slika 3.9: Časovno spreminjanje obdelavnosti svežih SCC mešanic (razlezanje).....	28
Slika 3.10: Časovno spreminjanje obdelavnosti svežih SCC mešanic (viskoznost)	28
Slika 3.11: Rezultati prvotne analize zrnastostne sestave uporabljenih apnenčevih mok in cementa	30
Slika 3.12: Rezultati ponovno opravljene analize zrnastostne sestave uporabljenih apnenčevih mok.....	31
Slika 3.13: Preskus »hidrofilnosti« uporabljenih apnenčevih mok	32
Slika 3.14: Skrajšana AB varnostna ograja »New Jersey«: a) izdelan opaž; b) končni izdelek	32
Slika 3.15: Večfazno vgrajevanje SCC mešanic v laboratoriju	33
Slika 3.16: Betonski mešalec v betonarni CGP Novo mesto (levo) in premajhen razlez s posedom (desno).....	34
Slika 3.17: Vgrajevanje SCC mešanice v eni fazi, betonarna CGP Novo mesto.....	34
Slika 3.18: Izdelan AB element odlične kvalitete, betonarna CGP Novo mesto	34
Slika 3.19: Izdelan AB element »New Jersey« v obratu GOBI podjetja Primorje d.d. iz Ajdovščine	35
Slika 3.20: Manjšanje deleža vnešenega zraka pri vibriranju sveže betonske mešanice (PCA, 2003)	37
Slika 4.1: Nega betonskih preizkušancev takoj po vgraditvi v kalupe (levo) in po razkalupiranju (desno)	41

Slika 4.2: Preverjanje dimenzij betonskih preizkušancev (levo) in ultrazvočna metoda (desno).....	42
Slika 4.3: Tlačna preša z računalniškim zajemanjem podatkov	42
Slika 4.4: 28-dnevna tlačna trdnost SCC in vibriranih betonov z in brez apnenčeve moke	43
Slika 4.5: Tlačna trdnost betona v odvisnosti od: a) v/c razmerja; b) količine cementa v betonski mešanici (Mehta, Monteiro, 2006).....	43
Slika 4.6: Odvisnost tlačne trdnosti betona od temperature zamešanja in nege (Mehta, Monteiro, 2006).....	44
Slika 4.7: Mikrostruktura SCC betona LN-43 (levo) in vibriranega betona LV-43 (desno)	44
Slika 4.8: Stično območje med cementnim kamnom in agregatnimi zrni pri SCC LN-43 (zgoraj) in pri primerljivem vibriranem betonu LV-43 (spodaj). Mikroskopske in digitalizirane slike (na desni) so rezultat topografske mikroskopske analize po patentu HIROX (2002).....	45
Slika 4.9: 28-dnevna tlačna trdnost SCC in vibriranih betonov z v/c razmerjem 0,39.....	46
Slika 4.10: Odnos med poroznostjo kamna ali cementnega kamna in njegovo trdnostjo (Mehta, Monteiro, 2006)	46
Slika 4.11: Tlačne trdnosti posameznih betonskih preizkušancev v odvisnosti od deleža zraka.....	47
Slika 4.12: Kontrastirana površina prereza aeriranega vibriranega betona LVA8 (levo) in aeriranega SCC betona LA8 (desno). Sliki sta zajeti z optičnim čitalcem pri 1200 dpi. Širina slike je 3000 μm.....	48
Slika 4.13: Zveza med tlačno trdnostjo betonskih vzorcev in hitrosti potovanja ultrazvoka skozi.....	49
Slika 4.14: Tlačna trdnost SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različni starosti betona	49
Slika 4.15: Znani računski modeli za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti betona	50
Slika 4.16: Napetostno stanje v betonskem preizkušancu pri cepilnem nateznem preizkusu (Žarnić, <i>et al.</i> , 2008)	52
Slika 4.17: Časovni razvoj natezne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko (LN-43).....	53
Slika 4.18: Ukrivljeni jekleni elementi za obremenitev pri cepilnem preizkusu (SIST EN 12390-6, 2001).....	54
Slika 4.19: Preizkuševalni stroj z računalniško krmiljenim obremenjevanjem (levo) in preizkušanec (desno).....	54
Slika 4.20: Tipični postopek obremenjevanja za določanje statičnega modula elastičnosti betona	55
Slika 4.21: Definicija statičnega (levo) in sekantnega (desno) modula elastičnosti betona	55
Slika 4.22: Časovni razvoj statičnega modula elastičnosti SCC z apnenčevo moko (LN-43).....	57
Slika 4.23: Vpliv podpiranja (levo) in vitkosti betonskega preizkušanca (desno) na njegovo obnašanje pri enoosnem tlaku (RILEM., 2000).....	58
Slika 4.24: Odnos med vzdolžno deformacijo in tlačno silo (Bonfiglioli, Pascale, 2000)	58
Slika 4.25: Odnos med napetostmi in deformacijami za SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri enoosnem tlaku pri različnih starostih betona	59
Slika 5.1: Koordinacijsko število in pripadajoča koordinacijska geometrija cementnega kamna z nizko (levo) in visoko (desno) gostoto (Shackelford, 1990).....	64
Slika 5.2: Razmerja med velikostmi odprtin v cementnem kamnu betona (Mehta, Monteiro, 2006)	65
Slika 5.3: Primer luščenja betona zaradi zmrzovanja in tajanja v prisotnosti talilnih soli (PCA, 2003)	65
Slika 5.4: Mehanizem ugodnega učinka vnešenih zračnih por v betonu (Mehta, Monteiro, 2006).....	66
Slika 5.5: Odpornost aeriranega in neaeriranega betona proti zmrzovanju in tajanju v odvisnosti od v/c razmerja (Mehta, Monteiro, 2006)	67
Slika 5.6: Odstranjevanje odlučenega materiala pri OSMO preiskavi s curkom vode (levo) ali s krtačko (desno).....	68

Slika 5.7: Rezultati preiskave OSMO odpornosti SCC betona (LN-43) v odvisnosti od načina odstranjevanja odlučenega materiala	68
Slika 5.8: Časovno naraščanje mase filtrskega papirja, pri $RH \approx 50\%$, po vzetju iz sušilnice v odvisnosti od načina izpiranja soli iz zmrzovalnega medija	69
Slika 5.9: Validirana preiskava OSMO odpornosti: a) izpiranje soli iz filtrskega papirja z 2-5 dcl vode; b) tehtanje filtriranih odlučenih delcev, posušenih do stalne mase, posebej	70
Slika 5.10: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke	71
Slika 5.11: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke	71
Slika 5.12: Površine vzorcev po 60 ciklih zmrzovanja/tanja v prisotnosti soli: a) LVMA; b) LVA8; c) LVM	72
Slika 5.13: Primer rezultatov nadaljnje OSMO preiskave s ponovno nameščenim vodotesnim okvirjem	73
Slika 5.14: Mikroskopski sliki cementnega kamna: a) betona LVM; b) betona LVMA. Sliki sta zajeti pri polarizirani svetlobi. Dolžina skale je $50 \mu\text{m}$	74
Slika 5.15: Mikroskopski sliki cementnega kamna: a) betona LVM; b) betona LVMA. Sliki sta zajeti z mikroskopsko tehniko »temno polje«. Dolžina skale je $100 \mu\text{m}$	74
Slika 5.16: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko	75
Slika 5.17: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko	76
Slika 5.18: OSMO odpornost SCC z različnimi vrstami mineralnega dodatka	77
Slika 5.19: Delež zraka določen iz prostorninske mase betona p_v in LMA parametri za obravnavane betone	79
Slika 5.20: Ocenjene porazdelitve zračnih por s klasično ročno LMA ($T_{tot} \approx 2400 \text{ mm}$) za obravnavane betone	80
Slika 5.21: Ocenjene porazdelitve zračnih por z LMAir ($T_{tot} \approx 10.000 \text{ mm}$) za obravnavane betone	80
Slika 5.22: Ocenjene porazdelitve zračnih por z PMAir (celotna površina vzorca) za obravnavane betone	80
Slika 5.23: Ocenjene porazdelitve zračnih por z LMAir (levo) in PMAir (desno) za obravnavane betone	81
Slika 5.24: Primer poškodovane površine po standardu SIST 1026 (2004) še OSMO odpornega betona EF: a) po 50 ciklih zmrzovanja/tanja ($0,31 \text{ mg/mm}^2$); b) po 75 ciklih zmrzovanja/tanja ($1,38 \text{ mg/mm}^2$)	82
Slika 5.25: OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko AM-L in z različnim deležem zraka	83
Slika 5.26: OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko AM-L in z različnim deležem zraka (posamezno)	83
Slika 5.27: LMA parametri za obravnavane betone v povezavi s količino odlučenega materiala po 70 ciklih	84
Slika 5.28: Približne dimenzije vzorca izrezanega iz betonskega preizkušanca (SIST EN 480-11, 2005)	85
Slika 5.29: Prerez betonskega vzorca LA8 v sredici (levo) in ob preiskovani površini (desno)	85
Slika 5.30: LMA parametri za prereze ob OSMO površini v povezavi s količino odlučenega materiala	86
Slika 5.31: Porazdelitve zračnih por za obravnavane betone ocenjene z avtomatizirano PMAir	87
Slika 5.32: OSMO odpornost aeriranega SCC z apnenčevo moko (LA8) v odvisnosti od režima nege	88
Slika 5.33: Vodovpojnost aeriranega SCC z apnenčevo moko (LA8) v odvisnosti od režima nege	89
Slika 5.34: Rezultati testa vodovpojnosti betona s kapilarnim srkom po nekaj dneh	89
Slika 5.35: Frekvenca krožnih sledi zračnih por na preiskovanem prerezu obravnavanega vzorca (LVA8)	90

Slika 5.36: Definicija LMA parametra α (levo) in novega parametra α^* (desno).....	91
Slika 5.37: Primer propadanja betona v sulfatnem okolju (Mehta, Monteiro, 2006)	92
Slika 5.38: Primer tvorbe sekundarnega etringita v stičnem območju (Mehta, Monteiro, 2006)	93
Slika 5.39: Raztezanje cementnega kamna zaradi tvorbe sekundarnega etringita (Mehta, Monteiro, 2006)	93
Slika 5.40: Vpliv količine in vrste cementa na sulfatno odpornost betona (Mehta, Monteiro, 2006)	94
Slika 5.41: Primer neovirane tvorbe sekundarnega etringita v zračni pori (Mehta, Monteiro, 2006)	95
Slika 5.42: Huggenbergerjev deformeter z natančnostjo 0,0001 inče (levo) in meritve vzdolžnih deformacij betonskih prizem (desno).....	95
Slika 5.43: Potopitev betonskih preizkušancev v sulfatno raztopino pri (20±1)°C	96
Slika 5.44: Povprečna vzdolžna deformacija betonskih prizem zaradi potopitve v vodo in v sulfatno raztopino.....	96
Slika 5.45: Povprečna vzdolžna deformacija betonskih prizem zaradi sulfatnega napada	97
Slika 5.46: Vzdolžne deformacije posameznih betonskih vzorcev zaradi sulfatnega napada	97
Slika 5.47: Tlačne trdnosti obravnavanih betonov pri različni starosti in izpostavljenosti.....	98
Slika 5.48: Tlačna preša (levo) za preizkus upogibne natezne trdnosti betona (desno).....	99
Slika 5.49: Upogibna natezna trdnost betonskih vzorcev pri 16 mesečni različni izpostavljenosti.....	99
Slika 5.50: Mikroskopski sliki tvorb kristalov v zračni pori v vrhnjem sloju betonske prizme LV-43, ki je bila potopljena v sulfatno raztopino. Dolžina skale je 100 μm	100
Slika 5.51: Mikroskopski sliki produktov hidratacije v zračni pori betonske prizme LV-43, ki je bila potopljena v vodo. Dolžina skale je 100 μm	100
Slika 5.52: Mikroskopski sliki tvorb kristalov v zračni pori v vrhnjem sloju betonske prizme LN-43, ki je bila potopljena v sulfatno raztopino. Dolžina skale je 100 μm	100
Slika 5.53: Mikroskopski sliki produktov hidratacije v zračni pori betonske prizme LN-43, ki je bila potopljena v vodo. Dolžina skale je 100 μm	101
Slika 5.54: Mikroskopski sliki tvorb kristalov v zračni pori v vrhnjem sloju betonske prizme LA4, ki je bila potopljena v sulfatno raztopino. Dolžina skale je 100 μm	101
Slika 5.55: Mikroskopski sliki produktov hidratacije v zračni pori betonske prizme LA4, ki je bila potopljena v vodo. Dolžina skale je 100 μm	101
Slika 6.1: Skica preseka n -dimenzionalnih objektov, pri čemer v splošnem dobimo $(n-1)$ -dimenzionalne sledi (Kališnik, 2002)	104
Slika 6.2: Optični mikroskop z navpično osvetlitvijo HIROX KH-3000, s katerim smo opravili LMA.....	104
Slika 6.3: Skica prečnega prereza polirane površine betonskega vzorca z dvema tipičnima primeroma zračnih por, pri katerih je $h < H$: a) zračna pora, prisekana ob svojem vznožju; b) zelo majhna zračna pora	105
Slika 6.4: Mikroskopska slika polirane površine vzorca pri navpični osvetlitvi (levo) in pri osvetlitvi s strani (desno). Povečava zajetih slik je 50x. Dolžina skale je 2000 μm	105
Slika 6.5: Parameter A v odvisnosti od velikosti testnega sistema	107
Slika 6.6: Parameter α v odvisnosti od velikosti testnega sistema	107
Slika 6.7: Parameter \bar{L} v odvisnosti od velikosti testnega sistema	108
Slika 6.8: Parameter A_{300} v odvisnosti od velikosti testnega sistema	108
Slika 6.9: Porazdelitev zračnih por v odvisnosti od velikosti testnega sistema	108

Slika 6.10: Parameter A v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm	109
Slika 6.11: Parameter α v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm	109
Slika 6.12: Parameter \bar{L} v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm	110
Slika 6.13: Parameter A_{300} v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm	110
Slika 6.14: Porazdelitev zračnih por v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm.....	110
Slika 6.15: RapidAir 457 – analizator zračnih por (RapidAir, 2006)	112
Slika 6.16: Naenkratno zajemanje celotne preiskovane površine vzorca z optičnim čitalcem z visoko resolucijo	112
Slika 6.17: Faze kontrastiranja preiskovane površine betonskega vzorca: a) nanos črnila; b) nanos kontrastnega sredstva; c) odstranitev odvečnega materiala s strgalom.....	113
Slika 6.18: Kontrastirana površina betonskega vzorca s končno uporabo običajnega strgala (levo) in britvice (desno). Sliki sta zajeti z optičnim čitalcem pri enakih nastavitvah svetlosti in kontrasta	114
Slika 6.19: Neustrezno (levo) in ustrezno (desno) brušena površina betonskega vzorca. Sliki sta zajeti s tridimenzionalno tehniko optičnega mikroskopa Hirox (2002), pri povečavi 50x. Dolžina skale je 2000 μm	114
Slika 6.20: Rezultat kontrastiranja brušene (levo) in polirane (desno) površine betona. Sliki sta zajeti z optičnim čitalcem pri ločljivosti 1200 dpi in pri enakih nastavitvah svetlosti in kontrasta	115
Slika 6.21: Korekcija (desno) barvi agregata ustreznih RGB kanalov zajete slike (levo)	116
Slika 6.22: Posledica kromatične aberacije optičnih čitalcev (levo, slika je zajeta pri resoluciji 1200 dpi) in mikroskopska slika realnega stanja pri povečavi 100x (desno).....	116
Slika 6.23: Površina betonskega vzorca: a) 1 mesec po brušenju, brez zaključnega čiščenja; b) naknadno čiščena v ultrazvočni čistilni napravi; c) ponovno čiščena v ultrazvočni čistilni napravi. Slike so zajete z optičnim mikroskopom pri povečavi 50x. Dolžina skale je 1000 μm	116
Slika 6.24: Površina betonskih vzorcev po enakem postopku brušenja: a) aeriran vibriran beton z bodisi šibko matrico cementnega kamna ali šibkim agregatom; b) aeriran samozgoščevalni beton. Sliki sta zajeti s tridimenzionalno tehniko optičnega mikroskopa Hirox (2002) pri povečavi 50x.....	117
Slika 6.25: Rešitev problema morebitnih por v agregatu v primeru računalniške avtomatizacije	118
Slika 6.26: Identificirani predeli (rdeča barva) na zajeti sliki kontrastirane površine betonskega vzorca pri threshold vrednosti: a) 80; b) 100; c) 120; d) 140; e) 160; f) 180	118
Slika 6.27: Kontrastirana površina betonskega vzorca zajeta z optičnim čitalcem pri srednjih, ničelnih, nastavitvah kontrasta (levo) in pri visokem kontrastu (desno)	119
Slika 6.28: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – predlagana HST metoda.....	123
Slika 6.29: Normiranje histograma zajete slike testne površine vzorca: avtomatsko normiranje za levi rob histograma in ročna postavitev desnega roba histograma na vrh desnega »hribčka«.....	123
Slika 6.30: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – predlagana THR metoda	124
Slika 6.31: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – končni rezultati #1/2	125
Slika 6.32: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – končni rezultati #2/2	126
Slika 6.33: Primerjava rezultatov avtomatiziranega sistema LMAir in klasične LMA	131
Slika 6.34: Primer nekvalitetno kontrastirane površine enega srednjih prerezov vzorcev CA4	132
Slika 6.35: Primerjava števila identificiranih tetiv ročne in avtomatizirane izvedbe LMA za vzorce CA4	132
Slika 6.36: Kontrastirana površina vzorca mešanice LVA8. Slika je zajeta z optičnim čitalcem (1200 dpi)	133

Slika 6.37: Razvoj volumetričnih stereoloških metod: a) planimetrično; b) z linearno integracijo; c) z diferencialnim štetjem točk (Kališnik, 2002)	135
Slika 6.38: Ocena dolžine presečne tetive pri LMA v primeru odkrušenih robov zračnih por (EN, 2005).....	136
Slika 6.39: Shematična predstavitev poenostavitvenih predpostavk za račun Powersovega faktorja oddaljenosti \bar{L} (Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001)	137
Slika 6.40: Tridimenzionalni pogled na poljubno ravnino, ki seka sistem sfer, in medsebojne razdalje njihovih dvodimenzionalnih sledi (bela črtkana črta) ter realne medsebojne razdalje sfer (črna črta).....	137
Slika 6.41: Frekvenčna porazdelitev premerov presekov na celotni testni površini obravnavanega vzorca	140
Slika 6.42: Primer dveh različnih presekov krogle, tj. krog s premerom $2R$ in krog s premerom R	140
Slika 6.43: Relativne frekvence polmerov pričakovanih presekov r pri naključnih prerezih krogel iz največjega velikostnega razreda $D_{28} \in (3000, 4000] \mu\text{m}$	142
Slika 6.44: Grafična rešitev obravnavanega verjetnostnega problema po literaturi (Kališnik, 2002)	143
Slika 6.45: Grafični prikaz odštevanja relativnih frekvenc prvih 8 velikostnih razredov od skupne frekvenčne porazdelitve vseh identificiranih dvodimenzionalnih sledi zračnih por	144
Slika 6.46: Skica geometrijske verjetnosti presečnih tetiv krogle (EN, 2005) z dodanim primerom testne linije (rdeča črtkana puščica) za lažjo predstavo	146
Slika 6.47: Skica geometrije krožnih presekov skozi kroglo oz. zračno poro	147
Slika 6.48: Skica identificiranega krožnega preseka j -te zračne pore na zajeti sliki	149
Slika 6.49: Primerjava kumulativnega deleža zraka za obravnavan vzorec določenega z različnimi pristopi	150
Slika 6.50: Rešitev problema deloma stikajočih se zračnih por: a) originalno stanje; b) napačna identifikacija števila por; c) popravljeno stanje z uporabo metode <i>Watershed</i> ; d) pravilnejša identifikacija števila por	151
Slika 6.51: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – HST metoda.....	152
Slika 6.52: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – THR metoda	153
Slika 6.53: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – končni rezultati #2/2	154
Slika 6.54: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – končni rezultati #1/2	155
Slika 6.55: Primerjava rezultatov avtomatiziranih sistemov PMAir in LMAir ter klasične LMA	158
Slika 6.56: Delna uspešnost funkcije <i>Watershed</i> (desno) v primeru močne zgostitve zračnih por (levo)	159
Slika 7.1: Vzorec OSMO neodpornega betona: a) po natočeni raztopini; b) po 25 ciklih; c) po 50 ciklih	177
Slika 7.2: Vzorec OSMO odpornega betona: a) po natočeni raztopini; b) po 25 ciklih; c) po 50 ciklih	177
Slika 7.3: Vzorec visoko OSMO odpornega aeriranega betona takoj po natočeni raztopini	177
Slika 7.4: Osvetlitev testne površine s štirih strani in primer računalniške vsote svetlih predelov slik (desno).....	182
Slika 7.5: Virtualni tridimenzionalni model poroznosti cementnega kamna (Head, 2006)	182

LIST OF FIGURES

Fig. 1.1: Casting of SCC (The European Guidelines..., 2005).....	2
Fig. 2.1: Mixture proportions of SCC (upper) and ordinary concrete (bottom).....	3
Fig. 2.2: Casting of SCC by pumping from below	4
Fig. 2.3: An example of excellent filling ability of SCC	5
Fig. 2.4: Mechanism of blocking of fresh concrete mixture (Skarendahl, Petersson, 2000)	5
Fig. 2.5: Bingham model and Newtonian fluid.....	8
Fig. 2.6: Example of numerical simulation of multi-layer casting of SCC (Roussel, 2007) for 5 minute resting time (upper) and for 20 minute resting time (bottom)	9
Fig. 2.7: Effects of water-cement ratio and cement content on drying shrinkage (Mehta, Monteiro, 2006)	11
Fig. 2.8: Example of SCC application – densely reinforced concrete construction in Slovenia.....	13
Fig. 3.1: General approach for achieving self-compactibility of fresh concrete mixture (adopted from Ouchi, <i>et al.</i> , 1998).....	17
Fig. 3.2: Scanning electron micrographs of: a) fly ash (Mehta, Monteiro, 2006); b) limestone powder	19
Fig. 3.3: Mechanism of superplasticizer action: a) surface adsorption of superplasticizer; b) electrostatic repulsion of cement particles (Mehta, Monteiro, 2006)	19
Fig. 3.4: Mechanism of new generation superplasticizers action: a) longer surfactant chains; b) adsorption; c) more effective steric repulsion of partially hydrated cement particles (Petan, 2002).....	20
Fig. 3.5: ESEM images of biopolymer welan gum: a) at 70% RH (dry particles); b) after 5 minutes at 100% RH; c) after 12 minutes at 100% RH. Scale bar length is 100 μ m (Mehta, Monteiro, 2006)	21
Fig. 3.6: Section of non-aerated concrete (left) and aerated concrete (right). Scale bar length is 2 mm	22
Fig. 3.7: Mechanism of air entrainment (Mehta, Monteiro, 2006)	22
Fig. 3.8: Standard mortar and paste mixer (left) and lab concrete mixer (right).....	24
Fig. 3.9: Decrease of SCC mixtures workability (flow) with time	28
Fig. 3.10: Decrease of SCC mixtures workability (viscosity) with time	28
Fig. 3.11: First results of particle size distribution analysis of used limestone powders and cement	30
Fig. 3.12: Final results of particle size distribution analysis of used limestone powders	31
Fig. 3.13: Hydrophilic test of used limestone powders with water drops.....	32
Fig. 3.14: Shortened New Jersey concrete barrier: a) manufactured formwork; b) finished element.....	32
Fig. 3.15: Multi-layer casting of SCC mixtures in the laboratory.....	33
Fig. 3.16: Concrete mixer in CGP Novo mesto (left) and low slump flow (right)	34
Fig. 3.17: Casting of designed SCC mixture in concrete plant CGP Novo mesto	34
Fig. 3.18: Finished element of high quality, at concrete plant CGP Novo mesto	34
Fig. 3.19: Finished full scale SCC element at concrete plant GOBI-Primorje from Ajdovščina.....	35
Fig. 3.20: Decrease of entrained air content with fresh mixture vibration time (PCA, 2003)	37
Fig. 4.1: Curing of concrete specimens after casting (left) and after demoulding (right).....	41
Fig. 4.2: Verification of specimen dimensions (left) and ultrasonic method (right).....	42

Fig. 4.3: Compression machine with data capturing device	42
Fig. 4.4: 28-day compressive strength of SCC and vibrated concrete with and without limestone powder.....	43
Fig. 4.5: Compressive strength of concrete in relation to: a) water-cement ratio; b) cement content in concrete mixture (Mehta, Monteiro, 2006)	43
Fig. 4.6: Compressive strength of concrete at different curing regimes (Mehta, Monteiro, 2006).....	44
Fig. 4.7: Microstructure of SCC LN-43 (left) and vibrated concrete LV-43 (right).....	44
Fig. 4.8: Transition zones between bulk cement paste and aggregate of SCC LN-43 (upper) and comparable vibrated concrete LV-43 (bottom). Photomicrographs and digital images (on the right) are the results of topographic microscopical analysis patented by HIROX (2002).....	45
Fig. 4.9: 28-day compressive strength of SCC and vibrated concrete at w/c ratio of 0.39.....	46
Fig. 4.10: Porosity-strength relation for aggregates and normally cured cements (Mehta, Monteiro, 2006)	46
Fig. 4.11: Compressive strength of concrete samples in relation to their total air content	47
Fig. 4.12: Contrast enhanced surfaces of a vibrated air-entrained concrete specimen (left) and an air-entrained SCC specimen (right). Images are captured with flatbed scanner at 1200 dpi. Images width is 3000 μm	48
Fig. 4.13: Compressive strength of concrete samples in relation to the velocity of ultrasonic sound through them	49
Fig. 4.14: Compressive strength SCC with limestone powder (LN-43) at different age.....	49
Fig. 4.15: ACI and EN models for concrete compressive strength evolution.....	50
Fig. 4.16: Stress state in concrete specimen at splitting tensile strength (Žarnić, <i>et al.</i> , 2008)	52
Fig. 4.17: Tensile strength evolution of SCC with limestone powder (LN-43).....	53
Fig. 4.18: Curved loading piece for splitting test (SIST EN 12390-6, 2001)	54
Fig. 4.19: Testing machine with loading controlled system (left) and concrete specimen (right).....	54
Fig. 4.20: Typical loading procedure for determination of concrete static modulus of elasticity.....	55
Fig. 4.21: Definition of static (left) and secant (right) modulus of elasticity of concrete.....	55
Fig. 4.22: Evolution of secant modulus of elasticity of SCC with limestone powder (LN-43).....	57
Fig. 4.23: Effect of boundary restraint (left) and concrete specimen slenderness (right) on the compressive stress-strain behaviour (RILEM..., 2000).....	58
Fig. 4.24: Longitudinal microstrain vs. total load (Bonfiglioli, Pascale, 2000).....	58
Fig. 4.25: Relationship of stress and strain for SCC with limestone powder (LN-43) subjected to uniaxial compression at different age	59
Fig. 5.1: Coordination number and coordination geometry of low density (left) and high density (right) hydrated cement paste (Shackelford, 1990)	64
Fig. 5.2: Dimensional range of solids and pores in a hydrated cement paste (Mehta, Monteiro, 2006).....	65
Fig. 5.3: Example of salt frost scaling of concrete pavement (PCA, 2003).....	65
Fig. 5.4: Mechanism of entrained air voids in concrete at freezing (Mehta, Monteiro, 2006)	66
Fig. 5.5: Frost durability of aerated and non-aerated concrete in relation to w/c ratio (Mehta, Monteiro, 2006)	67
Fig. 5.6: Removal of scaled material in the salt frost scaling test with a jet of water (left) or with a brush (right)	68
Fig. 5.7: Results of the salt frost scaling test on SCC (LN-43) in relation to the type of removal of the scaled material.....	68

Fig. 5.8: Weight increase of a filter paper, at $RH \approx 50\%$, after drying to zero mass in relation to amount of washing out the de-icing salts from the freezing medium	69
Fig. 5.9: Validated procedure of salt frost scaling: a) washing out the de-icing salts from the filter paper with 2-5 dcl of water; b) weighing of scaled material alone after drying to its zero mass	70
Fig. 5.10: Salt frost scaling of aerated and non-aerated vibrated concretes with or without limestone powder	71
Fig. 5.11: Salt frost scaling of aerated and non-aerated vibrated concretes with or without limestone powder	71
Fig. 5.12: Surface of concrete samples after 60 salt frost cycles: a) LVMA; b) LVA8; c) LVM	72
Fig. 5.13: Example of results of further salt frost scaling of concrete with new set up of sealing frame	73
Fig. 5.14: Photomicrographs of hydrated cement paste: a) of concrete LVM; b) of concrete LVMA. Micrographs are captured at polarized light. Scale bar length is $50 \mu\text{m}$	74
Fig. 5.15: Photomicrographs of hydrated cement paste: a) of concrete LVM; b) of concrete LVMA. Micrographs are captured with dark field microscopy. Scale bar length is $100 \mu\text{m}$	74
Fig. 5.16: Salt frost scaling of aerated and non-aerated SCC and vibrated concretes with limestone powder	75
Fig. 5.17: Salt frost scaling of aerated and non-aerated SCC and vibrated concretes with limestone powder	76
Fig. 5.18: Frost scaling of SCC with different types of mineral addition	77
Fig. 5.19: Air content obtained from fresh concrete density and LTM parameters for discussed concrete mixes	79
Fig. 5.20: Manual LTM estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes ($T_{tot} \approx 2400 \text{ mm}$)	80
Fig. 5.21: LMAir estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes ($T_{tot} \approx 10.000 \text{ mm}$)	80
Fig. 5.22: PMAir estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes (whole specimen surface)	80
Fig. 5.23: LMAir (left) and PMAir (right) estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes	81
Fig. 5.24: Example of deteriorated surface of concrete EF, which is still considered as resistant to frost scaling by SIST 1026 (2004) definition: a) after 50 frost cycles (0.31 mg/mm^2); b) after 75 frost cycles (1.38 mg/mm^2)	82
Fig. 5.25: Frost scaling of SCC with limestone powder AM-L at different total air content	83
Fig. 5.26: Frost scaling of SCC with limestone powder AM-L at different total air content (all specimens)	83
Fig. 5.27: LTM parameters for discussed concrete mixes in relation to scaled material after 70 frost cycles	84
Fig. 5.28: Production of specimen from concrete sample, approximate dimensions (SIST EN 480-11, 2005)	85
Fig. 5.29: Middle section (left) and a section near the test surface (right) of a LA8 sample	85
Fig. 5.30: LTM parameters for sections near test surface in relation to scaled material after 70 frost cycles	86
Fig. 5.31: PMAir estimation of air-void distribution of discussed concrete mixes	87
Fig. 5.32: Frost scaling of aerated SCC with limestone powder (LA8) at different curing regimes	88
Fig. 5.33: Water absorption of aerated SCC with limestone powder (LA8) at different curing regimes	89
Fig. 5.34: Results of concrete water absorption test after few days	89
Fig. 5.35: Air-voids profiles frequency on the test section of the investigated concrete sample (LVA8)	90
Fig. 5.36: Definition of the LTM parameter α (left) and the new proposed parameter α^* (right)	91
Fig. 5.37: Sulfate attack on concrete in Fort Peck Dam (Mehta, Monteiro, 2006)	92

Fig. 5.38: The example of delayed ettringite formation in the transition zone (Mehta, Monteiro, 2006)	93
Fig. 5.39: Expansion in the paste caused by delayed ettringite formation (Mehta, Monteiro, 2006)	93
Fig. 5.40: Effects of cement content and type on sulfate resistance of concrete (Mehta, Monteiro, 2006)	94
Fig. 5.41: Ettringite crystals need space to grow. They are often found in air voids (Mehta, Monteiro, 2006)	95
Fig. 5.42: Huggenberger's deformer with precision of 0,0001 inch (left) and measurement of deformations of concrete specimens (right)	95
Fig. 5.43: Immersion of concrete specimens in sodium sulfate solution at $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$	96
Fig. 5.44: Average longitudinal deformation of concrete prisms immersed in water or sodium sulfate solution	96
Fig. 5.45: Average longitudinal deformation of concrete prisms as a result of sulfate attack	97
Fig. 5.46: Longitudinal deformations of individual concrete specimens as a result of sulfate attack	97
Fig. 5.47: Compressive strengths of the discussed concrete mixes at different age and different exposure	98
Fig. 5.48: Compression machine (left) for bending tensile strength of concrete (right)	99
Fig. 5.49: Bending tensile strength of concrete specimens after 16 months of different exposure	99
Fig. 5.50: Photomicrographs of fibrous crystals in an air void near the surface of LV-43 prism, which was immersed in sodium sulfate solution. Scale bar length is $100\ \mu\text{m}$	100
Fig. 5.51: Photomicrographs of hydration products in an air void of LV-43 prism, which was immersed in water. Scale bar length is $100\ \mu\text{m}$	100
Fig. 5.52: Photomicrographs of fibrous crystals in an air void near the surface of LN-43 prism, which was immersed in sodium sulfate solution. Scale bar length is $100\ \mu\text{m}$	100
Fig. 5.53: Photomicrographs of hydration products in an air void of LN-43 prism, which was immersed in water. Scale bar length is $100\ \mu\text{m}$	101
Fig. 5.54: Photomicrographs of fibrous crystals in an air void near the surface of LA4 prism, which was immersed in sodium sulfate solution. Scale bar length is $100\ \mu\text{m}$	101
Fig. 5.55: Photomicrographs of hydration products in an air void of LA4 prism, which was immersed in water. Scale bar length is $100\ \mu\text{m}$	101
Fig. 6.1: Section of n -dimensional objects with $(n-1)$ -dimensional profiles, in general (Kališnik, 2002)	104
Fig. 6.2: Optical microscope with vertical lighting HIROX KH-3000, which we have used for the LTM	104
Fig. 6.3: Cross-section of a polished concrete specimen surface with two typical air voids with $h < H$: a) air void cut shallow; b) very small air void	105
Fig. 6.4: Photomicrograph of a polished specimen surface at vertical lighting (left) and at side lighting (right). Photomicrographs are taken at the magnification of 50x. Scale length is $2000\ \mu\text{m}$	105
Fig. 6.5: Dependency of the parameter A from the size of the probe system	107
Fig. 6.6: Dependency of the parameter α from the size of the probe system	107
Fig. 6.7: Dependency of the parameter \bar{L} from the size of the probe system	108
Fig. 6.8: Dependency of the parameter A_{300} from the size of the probe system	108
Fig. 6.9: Dependency of the air void distribution from the size of the probe system	108
Fig. 6.10: Dependency of the parameter A from the position of the probe system at its minimum size	109
Fig. 6.11: Dependency of the parameter α from the position of the probe system at its minimum size	109
Fig. 6.12: Dependency of the parameter \bar{L} from the position of the probe system at its minimum size	110

Fig. 6.13: Dependency of the parameter A_{300} from the position of the probe system at its minimum size.....	110
Fig. 6.14: Dependency of the air void distribution from the position of the probe system at its minimum size.....	110
Fig. 6.15: RapidAir 457 – Air void analyzer (RapidAir, 2006).....	112
Fig. 6.16: Scanning the whole specimen test surface at once with high-resolution flatbed scanner.....	112
Fig. 6.17: Procedure of the concrete test surface contrast enhancement: a) applying ink; b) covering with contrast material; c) removing the excess material with a scraper	113
Fig. 6.18: Contrast enhanced surface of a concrete specimen with the final use of an ordinary scraper (left) and a razor blade (right). The images are obtained with a flatbed scanner at equal brightness and contrast settings	114
Fig. 6.19: Unsuitably (left) and suitably (right) lapped specimen surface. Photomicrographs of 3-D optical microscopy, patented by Hirox (2002), are taken at the magnification of 50x. Scale length is 2000 μm	114
Fig. 6.20: The result of contrast enhancement of ground (left) and polished (right) concrete surface. The images are obtained with a flatbed scanner at resolution of 1200 dpi, with equal brightness and contrast settings	115
Fig. 6.21: Correction (right) of the adequate RGB channels in the captured image (left)	116
Fig. 6.22: Chromatic aberration of a flatbed scanner (left, the image is captured at the resolution of 1200 dpi) and a photomicrograph of the real state at the magnification of 100x (right)	116
Fig. 6.23: Surface of a concrete sample: a) 1 month after grinding, without final cleaning; b) cleaned using ultrasonic bath; c) cleaned again using ultrasonic bath. Photomicrographs are taken at the magnification of 50x. Scale length is 1000 μm	116
Fig. 6.24: Surface of concrete samples after equal procedure of grinding: a) aerated vibrated concrete with either weak cement-paste matrix or friable aggregate; b) aerated self-compacting concrete. Photomicrographs of 3-D optical microscopy, patented by Hirox (2002), are taken at the magnification of 50x	117
Fig. 6.25: Aggregate voids problem solution in case of computerized automation	118
Fig. 6.26: Identified areas (red colour) on the scanned image of the contrast enhanced surface of a concrete specimen at threshold value of: a) 80; b) 100; c) 120; d) 140; e) 160; f) 180	118
Fig. 6.27: Contrast enhanced concrete specimen surface obtained with a flatbed scanner at zero contrast settings (left) and at high contrast settings (right)	119
Fig. 6.28: Sample screenshot from the prototype application LMAir – the proposed HST method.....	123
Fig. 6.29: Normalization of the scanned image: automatic normalization for the left edge of the image histogram and manual normalization of the right edge to the top of the right »hill« of the image histogram.....	123
Fig. 6.30: Sample screenshot from the prototype application LMAir – the proposed THR method	124
Fig. 6.31: Sample screenshot from the prototype application LMAir – final results #1/2.....	125
Fig. 6.32: Sample screenshot from the prototype application LMAir – final results #2/2.....	126
Fig. 6.33: Comparison of the results of the automated system LMAir and classic LTM	131
Fig. 6.34: Low quality of contrast enhancement (surface of CA4 specimen, middle section).....	132
Fig. 6.35: Comparison of the recorded number of chords with manual and automated LTM for CA4 samples	132
Fig. 6.36: Contrast-enhanced surface of LVA8 sample. Image is captured with a flatbed scanner at 1200 dpi.....	133

Fig. 6.37: Development of volumetric stereological methods: a) plane geometry; b) linear traverse method; c) point-count method (Kališnik, 2002)	135
Fig. 6.38: Estimation of chord length for broken void edges during microscopic examination (EN, 2005)	136
Fig. 6.39: Schematic description of the simplifying assumptions used in the computation of the Powers spacing factor \bar{L} (Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001)	137
Fig. 6.40: 3-D view of a random plane intersecting a system of spheres and spacing lengths of spheres 2-D profiles (white dashed line) and true spacing lengths of spheres (black line)	137
Fig. 6.41: Distribution of planar intercept diameters on the test surface	140
Fig. 6.42: Example of planar intercepts of a sphere, i.e. two circles with diameter of $2R$ and R	140
Fig. 6.43: Radius frequencies of planar intercepts of the spheres from the class $D_{28} \in (3000, 4000] \mu\text{m}$	142
Fig. 6.44: Graphic solution of the discussed problem as presented in (Kališnik, 2002).....	143
Fig. 6.45: Graphical presentation of the sphere distribution unfolding method from plane intersections	144
Fig. 6.46: Void geometry (EN, 2005) with test line example (red dashed arrow).....	146
Fig. 6.47: Void geometry with two examples of plane intercepts	147
Fig. 6.48: Example of an air void plane intercept in the scanned image	149
Fig. 6.49: Comparison of the test sample cumulative air content obtained with different methods	150
Fig. 6.50: Solution for the joint air voids problem: a) original state; b) false identification of air voids; c) corrected state using <i>Watershed</i> method; d) corrected identification of air voids.....	151
Fig. 6.51: Sample screenshot from the prototype application PMAir – HST method	152
Fig. 6.52: Sample screenshot from the prototype application PMAir – THR method.....	153
Fig. 6.53: Sample screenshot from the prototype application PMAir – final results #2/2.....	154
Fig. 6.54: Sample screenshot from the prototype application PMAir – final results #1/2.....	155
Fig. 6.55: Comparison of the results of automated systems PMAir, LMAir and classic LTM	158
Fig. 6.56: Partial efficiency of the <i>Watershed</i> method (right) in case of high stacking of air voids (left).....	159
Fig. 7.1: Sample of frost non-resistant concrete: a) at poured freezing medium; b) at 25 cycles; c) at 50 cycles.....	177
Fig. 7.2: Sample of salt frost resistant concrete: a) at poured freezing medium; b) at 25 cycles; c) at 50 cycles.....	177
Fig. 7.3: Sample of highly salt frost resistant aerated concrete after poured freezing medium	177
Fig. 7.4: Side lighting from four directions and an example of images bright pixels sum (right).....	182
Fig. 7.5: Virtual 3D model of hardened cement paste porosity (Head, 2006)	182

KAZALO PRILOG

Priloga A:	SKRIPT ZA ImageJ – PREDLAGANA LINIJSKA THR METODA
Priloga B:	PREGLEDNICA ZA DOLOČITEV PORAZDELITVE ZRAČNIH POR Z REDUCIRANIM ŠTEVILOM VELIKOSTNIH RAZREDOV
Priloga C:	FUNKCIJA ZA Matlab – PREVEDBA PLANARNIH PODATKOV NA LINIJSKE
Priloga D:	PREGLEDNICA ZA GROBO OCENO PORAZDELITVE ZRAČNIH POR IZ REZULTATOV PLANARNE ANALIZE

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

AB	armiranobetonska konstrukcija ali element
ACI	The American Concrete Institute
BIBM	The European Precast Concrete Organisation
CEN	evropska komisija za standardizacijo (Comité Européen de Normalisation)
CN	koordinacijsko število (Coordination Number)
EC2	Evrokod 2 (Eurocode 2)
EFCA	The European Federation of Concrete Admixture Associations
EFNARC	The European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EN	evropski standard (Europäische Norm)
ERMCO	The European Ready-mix Concrete Organisation
ESEM	slika elektronskega mikroskopa (Environmental Scanning Electron Micrograph)
HPC	visoko-kakovostni beton (High-Performance Concrete)
HSC	visokotrden beton (High-Strength Concrete)
HST	predlagana histogram metoda v sklopu razvojne aplikacije LMAir
LMA	linijska mikroskopska analiza (metoda EN 480-11)
LTM	angleška kratica za linijsko mikroskopsko analizo (Linear Traverse Method)
OSMO	odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju v ali brez prisotnosti talilnih soli
PC	portlandski cement
RH	relativna vlažnost (Relative Humidity), %
RGB	barvni model RGB (glej slovar tujk na naslednjih straneh)
SCC	samozgoščevalni beton (Self-Compacting Concrete, Self-Consolidating Concrete)
SEM	slika elektronskega mikroskopa (Scanning Electron Micrograph)
SP	superplastifikator
SIST	slovenski standard
THR	predlagana threshold metoda v sklopu razvojne aplikacije LMAir
%c	masni delež glede na količino cementa, %
%pr	masni delež glede na količino vseh praškastih delcev, %
dpi	število pik/pikslov na inčo (dots per inch)

pix	pika, piksel (glej slovar tujk na naslednjih straneh)
v/c	masno vodo-cementno razmerje
A	delež zraka, %
A_i	identificirana ploščina i -tega kontrastiranega predela na testni površini, pix
A_{300}	delež mikropor določen iz porazdelitvene funkcije velikosti zračnih por s standardiziranim številom velikostnih razredov, %
$A_{300.red}$	delež mikropor določen iz porazdelitvene funkcije velikosti zračnih por z reduciranim številom velikostnih razredov, %
A_{thix}	koeficient tiksotropičnosti sveže SCC mešanice
D	premer zračne pore oz. sfere, μm
D_{max}	maksimalno zrno agregata v betonski mešanici, mm
E_c	tangentni modul elastičnosti, GPa
E_{cm}	sekantni modul elastičnosti pri starosti 28 dni, GPa
F_{sp}	tlačna sila pri cepilni porušitvi betona, kN
F_{up}	sila pri upogibni porušitvi betona, kN
H	globinska ostrina mikroskopa pri testni povečavi, μm
\bar{L}	Powersov faktor oddaljenosti, mm
\bar{L}^*	posodobljen Powersov faktor oddaljenosti, mm
N	število identificiranih zračnih por oz. število presečnih tetiv pri LMA
N_j	ocenjeno število presečnih tetiv j -tega identificiranega krožnega preseka
N_{pix}	število identificiranih pikselov na zajeti sliki pri izbrani threshold vrednosti x
P_i	površina i -tega geometrijskega telesa/delca, mm^2
P_{sist}	celotna površina ocenjenega sistema zračnih por, mm^2
R	polmer zračne pore oz. sfere, μm
R_m	relativni čas iztekanja malte iz V-lijaka, s^{-1}
S_{ij}	ploščina vseh identificiranih predelov na j -ti liniji pri i -ti threshold vrednosti, pix
S_{img}	ploščina celotne testne površine oz. število vseh pikselov na zajeti sliki
S_s	površinska (arealna) gostota neke sestavine/faze materiala, mm^2/mm^2
T	temperatura, $^{\circ}\text{C}$
T_{500}	čas pri razlezu s posedom 500 mm, s
T_a	vsota vseh presečnih tetiv, mm
$T_{a.k}$	dolžina k -te presečne tetive ocenjene iz rezultatov planarne analize, μm
T_B	temperatura sveže betonske mešanice, $^{\circ}\text{C}$
T_i	dolžina i -te presečne tetive, μm
T_N	temperatura vode pri mokri negi betonskih vzorcev, $^{\circ}\text{C}$
T_{tot}	dolžina vseh testnih linij, mm
T_{tot}^{min}	minimalna predpisana velikost testnega sistema, 2400 mm
V_B	prostornina betonske mešanice, m^3
V_{cem}	prostornina cementa v betonski mešanici, m^3
V_{DA}	prostornina drobnozrnatega agregata v betonski mešanici, m^3
V_{GA}	prostornina grobozrnatega agregata v betonski mešanici, m^3

V_M	prostornina malte v betonski mešanici, m ³
V_i	prostornina i -tega geometrijskega telesa/delca, mm ³
V_P	prostornina paste v betonski mešanici, m ³
$V_{praš}$	prostornina dodatnih praškastih delcev v betonski mešanici, m ³
V_{sist}	celotna prostornina ocenjenega sistema zračnih por, mm ³
V_V	prostorninska gostota neke sestavine/faze materiala, mm ³ /mm ³
V_v	prostornina zamesne vode v betonski mešanici, m ³
V_X	koeficient variacije, %
b_{pr}	širina prereza preizkušanca, cm
c_i	pričakovano število tetiv i -tega velikostnega razreda v 1 mm ³ betona, mm ⁻³
d	premer dvodimenzionalne sledi zračne pore oz. kroga, μm
d_0	premer dna prisekanega stožca za preiskavo razleza s posedom za malte/paste, 100 mm
d_m	povprečna vrednost dveh meritev razleza malte v dveh pravokotnih smereh, mm
d_{sc}	povprečna vrednost dveh meritev razleza SCC mešanice v dveh pravokotnih smereh, mm
d_{VB}	razlez običajnega vibriranega betona, mm
f_{cc}	tlačna trdnost betona, MPa
f_{cf}	upogibna natezna trdnost betona, MPa
f_{ck}	karakteristična tlačna trdnost betonskega valja pri starosti 28 dni, MPa
$f_{ck.cube}$	karakteristična tlačna trdnost betonske kocke pri starosti 28 dni, MPa
f_{cm}	povprečna tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni, MPa
$f_{cm}^{HPC}(t)$	računski model razvoja tlačne trdnosti visoko-kakovostnih betonov, MPa
$f_{cm}^{HSC}(t)$	računski model razvoja tlačne trdnosti visokotrdnih betonov, MPa
$f_{cm}^{SCC_{am}}(t)$	računski model razvoja tlačne trdnosti SCC z apnenčevo moko, MPa
f_{ct}	osna natezna trdnost betona, MPa
$f_{ct,sp}$	cepilna natezna trdnost betona, MPa
f_{ctm}	povprečna natezna trdnost betona pri starosti 28 dni, MPa
Δh	posed običajnega vibriranega betona, mm
h	globina mikro-kraterja zračne pore na prerezu betonskega vzorca, μm
h_1	višina vzorca sveže SCC mešanice na izpustu L-zaboja po opravljeni preiskavi, mm
h_2	višina vzorca sveže SCC mešanice na koncu L-zaboja po opravljeni preiskavi, mm
h_{ij}	višina vseh identificiranih predelov na j -ti liniji pri i -ti threshold vrednosti, 1 pix
h_{pr}	višina preizkušanca, cm
h_{sp}	višina preizkušanca pri cepilnem nateznem preizkusu, cm
k_{EF}	vezivni faktor uporabljenega elektrofiltrskega pepela
k_v	korekcijski faktor velikosti tetiv ali krogov zaradi kromatične aberacije optičnih čitalcev in zaradi »halo« učinka kontrastnega sredstva
l_{ij}	dolžina vseh identificiranih predelov na j -ti liniji pri i -ti threshold vrednosti, pix
l_{sp}	dolžina raznosa tlačne sile pri cepilnem nateznem preizkusu, cm
l_{UZ}	razdalja potovanja ultrazvoka, m
m_{50}	kumulativna količina odlučenega materiala po 50 ciklih zmrzovanja/tajanja, mg/mm ²

m_a	masa aeranta, g
m_c	masa cementa, kg
m_d	masa odluščenega materiala, mg
m_{DA}	masa drobozrnatega agregata, kg
m_{GA}	masa grobozrnatega agregata, kg
m_p	masa filtrskega papirja
m_v	masa zamesne vode, kg
m_{vez}	masa veziva, kg
$\max[X]$	največja vrednost
$\min[X]$	najmanjša vrednost
$n_{C.red}$	reducirano število velikostnih razredov porazdelitve zračnih por
$n_{C.red.i}$	ocenjeno število zračnih por i -tega velikostnega razreda v 1 mm^3 betona, mm^{-3}
p	poroznost sveže betonske mešanice izmerjena s porozimetrom, %
p_P	poroznost cementnega kamna, %
p_γ	poroznost sveže betonske mešanice določena iz njene prostorninske mase, %
p_{proj}	projektiran delež zraka v sveži betonski mešanici, %
$r_{C.red.i}$	polmer zračne pore na zgornji meji i -tega velikostnega razreda, mm
r	polmer dvodimenzionalne sledi zračne pore oz. kroga, μm
r_k	polmer kroga, mm
r_{kr}	polmer krogle, mm
s	koeficient vrste veziva
Δt	čas mirovanja sveže SCC mešanice, s
Δt^*	starost sveže SCC mešanice (od zaključka prvotnega zamešanja), min
t	starost betonske mešanice od trenutka zamešanja, dnevi
t_i	opazovano število tetiv v i -tem velikostnem razredu
t_{izt}	čas iztekanja malte/betona iz V-lijaka, s
t_{UZ}	čas potovanja ultrazvoka, μs
v_i	pričakovano število zračnih por i -tega velikostnega razreda v 1 mm^3 betona, mm^{-3}
v_{UZ}	hitrost ultrazvoka, m/s
$\text{var}[X]$	varianca
x	threshold vrednost (glej slovar tujk na naslednjih straneh) ali splošna neznanka
x_a	threshold vrednost za identifikacijo zračnih por
x_p	threshold vrednost na prevojnem delu krivulj $A(x)$, $\alpha(x)$ in $\bar{L}(x)$
z	koordinata prereza krogle z izhodiščem na dnu krogle, μm
Δ	sprememba ali neko majhno število
Γ_m	relativni razlez s posedom malte
Γ_p	relativni razlez s posedom paste
α	specifična površina zračnih por, mm^{-1}
$\alpha_{distr.red}$	specifična površina zračnih por določena iz ocenjene porazdelitve zračnih por, mm^{-1}

α_i	specifična površina i -tega geometrijskega telesa/delca, mm^{-1}
α^*	površina vseh zračnih por glede na prostornino cementnega kamna, mm^{-1}
α'	koeficient odvisen od vrste veziva
β'	koeficient odvisen od pogojev nege
$\beta_{cc}(t)$	koeficient časovnega razvoja tlačne trdnosti betona
δ_{ε_p}	razlika v prečni deformaciji na nasprotnih stranicah preizkušanca pri enoosnem tlaku
δ_{ε_v}	razlika v vzdolžni deformaciji na nasprotnih stranicah preizkušanca pri enoosnem tlaku
ε_{c1}	osna deformacija betona pri tlačni trdnosti, ‰
ε_{cu1}	porušna osna deformacija betona pri enoosnem tlaku, ‰
ε_p	prečna deformacija betona pravokotna na smer enoosnega tlaka, ‰
ε_v	vzdolžna deformacija betona v smeri enoosnega tlaka, ‰
$\dot{\gamma}$	gradient hitrosti (strižna hitrost), s^{-1}
γ_{dej}	dejanska prostorninska masa zamešanega betona, kg/m^3
γ_{proj}	projektirana prostorninska masa sveže betonske mešanice, kg/m^3
γ_{GA}^{zbit}	prostorninska masa grobozrnatega agregata v zbitem stanju, kg/m^3
μ	viskoznost, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
ν	Poissonov koeficient
ρ_{DA}	gostota drobozrnatega agregata, kg/m^3
ρ_{GA}	gostota grobozrnatega agregata, kg/m^3
σ_c	napetost v betonu pri enoosnem tlaku, MPa
σ_x	standardna deviacija
τ	strižna napetost, Pa
τ_0	napetost na meji tečenja, Pa
τ_b	trenje med obremenilno ploščo in betonskim preizkušancem pri enoosnem tlaku

SLOVAR MANJ ZNANIH BESED IN TUJK

analizator slike	Sistem za optično zajemanje (ponavadi video/CCD kamera montirana na okularju optičnega mikroskopa), procesiranje in analizo slike s pomočjo računalniškega vmesnika. (St John, Poole, Sims, 1998).
barvni model RGB	RGB je kratica, ki prihaja iz angleščine in pomeni Red (rdeča), Green (zelena) in Blue (modra), ki so osnovne barve RGB modela. Vsaka od teh barv se lahko pojavi v 256 odtenkih, kar skupno znaša $256^3 = 16.777.216$ barv. (Wikipedia, 2008).
beli prsti	Telesna poškodba, ki jo povzroči nenehno delo z vibratorji in drugo mehansko opremo, ki proizvaja vibracije. Posledice so epizodno bledenje prstov na rokah, otopelost prstov, ščemenje in bolečine v dlaneh, ipd. (Wikipedia, 2008).
globinska ostrina	V optiki razdalja pred in za opazovanim objektom, ki je še v fokusu. (Wikipedia, 2008).
kromatična aberacija	Posledica različnih lomnih količnikov optičnih leč za različne valovne dolžine vidne svetlobe. Posledica kromatične aberacije so barvno spačeni robovi predvsem na močno kontrastnih predelih zajete slike. (Wikipedia, 2008).
piksel	V računalništvu okrajšava za »picture element« (slikovni element). Predstavlja najmanjšo naslovljivo enoto slike, ki se jo lahko prebere ali nariše. Formalno je piksel točka, ki nima oblike ali določene velikosti, le informacije o karakteristiki (barva, intenziteta) slike. (Wikipedia, 2008).
skript	Zaporedje računalniških ukazov za neko računalniško aplikacijo. Skriptni jezik je programski jezik za vodenje računalniških aplikacij. (Wikipedia, 2008).
stereologija	Multidisciplinarna metodologija o postopkih, ki omogočajo kvantitativne ocene o tridimenzionalni notranji zgradbi teles iz dvodimenzionalnih presekov skozi. (Kališnik, 2002).
temno polje	Mikroskopska tehnika (<i>dark field</i>) pri kateri opazujemo nek objekt osvetljen s strani v krogu okoli objekta. Posledica je temno, skoraj črno ozadje za osvetljenim objektom, ki ga opazujemo. (Wikipedia, 2008).
threshold	Izbran prag na lestvici sivin (običajno od 0 do 255) za prevedbo zajete slike sivin (<i>grayscale</i>) v binarno (črno-belo) obliko. (Russ, Dehoff, 2000).
tiksotropija	Lastnost nekaterih ne-Newtonovih tekočin, ki spreminjajo viskoznost glede na čas delovanja strižnih napetosti. Dalj časa ko so takšne tekočine izpostavljene strižnim napetostim, manjša je njihova viskoznost, in obratno. (Wikipedia, 2008).

1 UVOD

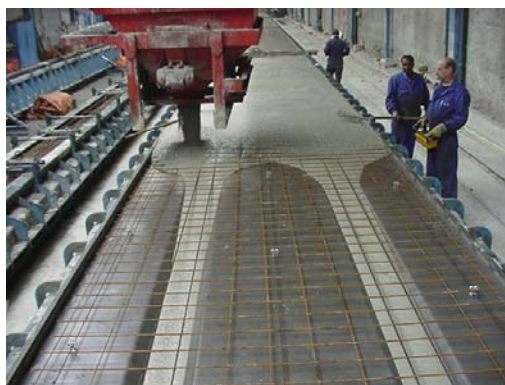
Za razumevanje obnašanja nekega materiala izpostavljenega različnim obremenitvam ali agresivnemu okolju je vpogled v njegovo mikrostrukturo izjemno pomemben. Mikrostruktura materiala namreč kroji lastnosti materiala. Kljub na prvi pogled enostavni sestavi betona – kamen, pesek, voda in cement, je njegova mikrostruktura zelo kompleksna. Beton je izjemno heterogen material več ali manj neenakomerno porazdeljenih zrn agregata, praškastih delcev, produktov hidratacije in raznih odprtih velikosti od 1 nm do 1 cm, kar je relativno gledano enak razpon kot od velikosti človeka do premera Marsa. Še več, v primerjavi z ostalimi gradbenimi materiali mikrostruktura betona ni statična lastnost materiala. Matrica cementnega kamna ter stično območje med cementnim kamnom in agregatnimi zrni se s časom spreminjata. Beseda beton (*ang.* concrete) izvira iz latinske besede *concretus*, kar pomeni »rasti«. V okviru doktorske disertacije smo tako ob standardiziranih »makro« testih posvetili veliko časa tudi raziskovanju mikrostrukture betona in stereološkim metodam, ki so za to potrebne. Na tem znanstvenem področju nas je raziskovalna pot pripeljala tudi do možnosti avtomatizacije nekaterih klasičnih dolgotrajnih mikroskopskih postopkov, ki jo danes ponuja visoko razvita računalniška oprema. Razvili smo dva sistema za avtomatizirano izvedbo linijske in planarne analize sistema zračnih por v strjenem betonu, ki smo ju poimenovali LMAir in PMAir. Ob klasični linijski mikroskopski analizi (metoda EN 480-11) sta detajlno predstavljena v poglavju 6.

V gradbeništvu se v zadnjem času pojavlja potreba po vedno bolj nosilnih armiranobetonskih konstrukcijah. Ideja o visokotrdnih betonih z gostejšim armiranjem je v teoriji sicer zadostila tej potrebi, a je v praksi privedla do problema izključujoče se narave. Za kvalitetno obvitje večjega števila armaturnih palic manjšega prereza bi namreč potrebovali čim bolj tekočo betonsko mešanico, za doseganje visokih trdnosti betona pa čim manjšo količino zamesne vode. Gradbeniška stroka je bila tako postavljena pred dejstvo, ali je moč izdelati takšno betonsko mešanico, ki bi bila ob visoki kohezivnosti tudi visoko obdelavna. Začetke razvoja takšnih betonskih mešanic je omogočil prihod superplastifikatorjev v tehnologijo betona, proti koncu prejšnjega stoletja pa smo na Japonskem že pričali razvitim posebnim visoko obdelavnim betonskim mešanici, ki so v svetu danes znane pod imenom samozgoščevalni betoni. Samozgoščevalni beton (v nadaljevanju SCC) je betonska mešanica z močno povečano sposobnostjo tečenja in z vzdrževano stabilnostjo suspenzije do takšne mere, da lahko v svežem stanju teče skozi relativno majhne odprtine, zapolni opaž, oblije armaturo in se zgosti brez kakršnekoli energije dovedene od zunaj (Slika 1.1). Takšne reološke lastnosti ob dodatku superplastifikatorja omogoča tudi povečan delež paste, kar dosežemo z dodajanjem praškastih delcev betonski mešanici. SCC je detajlno predstavljen v 2. poglavju.

Izkušnje glede zamenjave portland cementnega klinkerja (v nadaljevanju PC klinkerja) s finimi mineralnimi materiali kot so žlindra, elektrofiltrski pepel in apnenčeva moka, so zabeležene že v prvi polovici 20. stoletja. Kljub diskusije vrednim rezultatom je bila apnenčeva moka prepovedana kot delna zamenjava PC klinkerja. To je bilo vse do naftne krize (1974-1980), ko so nekateri evropski proizvajalci cementa z dolgoletnimi izkušnjami z delno zamenjavo PC klinkerja s pucolanskimi materiali odredili fini mineralni material kot dovoljen sekundarni sestavni del portland cementa. Tako je bilo npr. v Franciji ob koncu leta 1978 že nekaj cementarn, ki so proizvajale portland cement z dodatkom apnenca v količinah od 10% do 15%. Število takšnih cementarn v Evropi se je nato postopoma večalo, večala pa se je tudi količina dodanega apnenca. Kljub temu je imelo le malo takšnih cementov z dodatkom apnenca certifikat za obstojnost v morskem okolju in za odpornost na delovanje sulfatov. Ob koncu prejšnjega stoletja je v Evropi delna zamenjava PC klinkerja z apnenčevo moko že dovoljena, a je zaradi pomanjkanja izkušenj s tovrstnim materialom omejena na

5% (Poitevin, 1999). Standard EN 197-1, ki ga je CEN harmoniziral leta 2000, pa končno dovoljuje tudi uporabo cementov z večjimi količinami apnenčeve moke. S sprejetjem tega standarda kot slovenskega standarda, leta 2001, so se po določenem času tudi na slovenskem trgu prvič pojavili cementi z dodatkom apnenčeve moke. Neposredno vključevanje mineralnih dodatkov tipa I v betonsko mešanico, kamor spada tudi apnenčeva moka, pa je v Sloveniji omogočeno šele z letom 2003, in sicer z uveljavitvijo standarda EN 206-1 kot slovenskega standarda. Ker bivši jugoslovanski standardi vključevanja apnenčeve moke v betonsko mešanico niso dovoljevali, so v Sloveniji preiskave karakteristik tovrstnih betonov šele na začetku. Interes za vključevanje apnenčeve moke v betonske mešanice je velik, saj je apnenčeva moka pridobljena z odpraševanjem drobljenega apnenčevega agregata dejansko odpadni material. Iz teh razlogov smo se v okviru doktorske disertacije osredotočili na SCC in vibrirane betone z apnenčevo moko. Projektiranje betonskih mešanic je predstavljeno v 3. poglavju, preiskave mehanskih lastnosti pa v 4. poglavju.

Velik del raziskovalnega časa smo posvetili tudi projektiranju in preskušanju aeriranih betonskih mešanic. Motiv za vnašanje zračnih mehurčkov v svežo betonsko mešanico je povečanje odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju v ali brez prisotnosti talilnih soli. Pričakovane so tudi spremembe v sulfatni odpornosti tovrstnih betonov. Trenutno se na znanstvenem področju gradbenega materiala betona daje velik poudarek na preiskovanju obstojnosti betonov z vključenim večjim deležem finih mineralnih delcev. Kljub temu so zaključki in mnenja raziskovalcev še vedno močno deljena. Na obstojnost betona namreč vpliva veliko dejavnikov, ki jih je pri preiskavah zelo težko identificirati, kaj šele kontrolirati in pravilno določiti njihov medsebojni vpliv. Velik del časa samo tako posvetili sami validaciji metod, s katerimi smo želeli določiti obstojnostne karakteristike betona. V obstoječih standardih je namreč nekaj nejasnosti in/ali nedefiniranih detajlov, ki imajo lahko na končne rezultate preiskave zelo velik vpliv. Preiskave obstojnosti SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko so predstavljene v 5. poglavju.

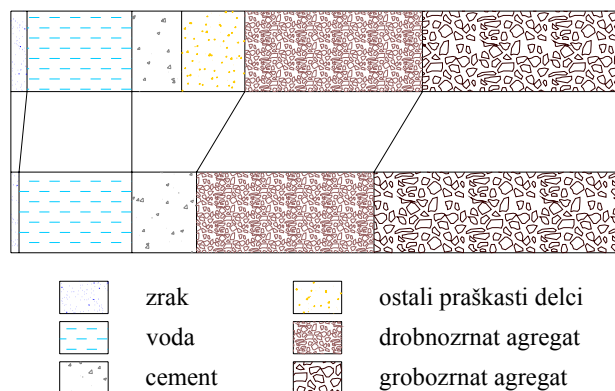


Slika 1.1: Primer vgrajevanja SCC (The European Guidelines..., 2005)

Fig. 1.1: Casting of SCC (The European Guidelines..., 2005)

2 SAMOZGOŠČEVALNI BETON

Samozgoščevalni beton (v nadaljevanju SCC) je beton, ki je v svežem stanju samo zaradi delovanja lastne teže in sposobnosti tečenja sposoben popolnoma zapolniti opaž poljubne oblike, pri tem tesno oblitati nameščeno armaturo, se odzračiti in znivelirati, ne da bi pri tem segregiral. Takšne lastnosti mu daje povečan delež paste na račun grobozrnatega agregata (Slika 2.1) in dodatek superplastifikatorja.



Slika 2.1: Shematični prikaz sestave SCC (zgoraj) in običajnega betona (spodaj)

Fig. 2.1: Mixture proportions of SCC (upper) and ordinary concrete (bottom)

2.1 Motivi za razvoj SCC

Ideja o uporabi visokotrdnih betonov z gostejšim armiranjem je v teoriji zadostila potrebi gradbene stroke po vedno bolj nosilnih armiranobetonskih (v nadaljevanju AB) konstrukcijah (Mehta, Monteiro, 2006). V praksi se je izkazalo, da gre za problem izključujoče se narave. Izvedba tako gosto armiranih AB elementov namreč zahteva čim bolj tekoče sveže betonske mešanice, ki pa imajo v strjenem stanju praviloma slabše mehanske karakteristike. Gradbeniška stroka je bila tako postavljena pred vprašanje, ali je moč izdelati takšno betonsko mešanico, ki bi bila ob visoki kohezivnosti (nizko vodo-cementno razmerje) tudi visoko obdelavna? Začetke razvoja takšnih betonskih mešanic je omogočil prihod superplastifikatorjev v tehnologijo betona. Nadaljnje preiskave japonskih, nemških in italijanskih raziskovalcev na tem področju pa so proti koncu prejšnjega stoletja privedle do razvoja visoko obdelavnih in obenem močno kohezivnih betonskih mešanic, ki so v svetu danes znane pod imenom samozgoščevalni betoni (Mehta, Monteiro, 2006).

K razvoju samozgoščevalnih betonov so botrovala tudi naslednja dejstva:

- Popolna izločitev potrebe po zgoščevanju sveže betonske mešanice z vibriranjem bistveno poveča hitrost betoniranja, nekoliko zmanjša stroške in s tem poveča produktivnost. Uporaba SCC tako lahko igra pomembno vlogo pri povečevanju konkurenčnosti betonskih konstrukcij.
- Visoka obdelavnost svežih SCC mešanic ponuja tudi enostavnejše načine vgrajevanja betona v opaže, kot npr. vgrajevanje betona ob dnu opaža skozi črpalko (Slika 2.2). Na ta način je tudi precej enostavneje sanirati spodnje strani AB plošč ali nosilcev.

- Izločitev vibriranja predstavlja tudi pomembno izboljšanje delovnega okolja. Vibracije vibratorjev namreč povzročajo motnje krvnega obtoka znane pod imenom »beli prsti« (Skarendahl, Petersson, 2000), dodatno obremenitev pa predstavlja tudi hrup zaradi vibriranja.
- Pričakovana povečana homogenost SCC betonov je ponujala tudi morebitno rešitev za problem obstojnosti betonov.



Slika 2.2: Vgrajevanje SCC s črpanjem ob dnu opaža
Fig. 2.2: Casting of SCC by pumping from below

2.2 SCC v svežem stanju

2.2.1 Lastnosti SCC v svežem stanju

SCC ima v svežem stanju odlično sposobnost zapolnjevanja opaža (Slika 2.3) in prehajanja skozi ozke odprtine bodisi opaža ali gosto nameščene armature. Ob tem je sveža SCC mešanica odporna na segregacijo in je lahko tudi samonivelirna (Skarendahl, Petersson, 2000).

2.2.1.1 Sposobnost zapolnjevanja

Sposobnost zapolnjevanja betonske mešanice je določena s sposobnostjo deformiranja in s hitrostjo deformiranja sveže betonske mešanice zaradi delovanja lastne teže. Sposobnost deformiranja določa, kako daleč od mesta praznjenja lahko beton steče, hitrost deformiranja pa, kako hitro se to zgodi. Dobra sposobnost zapolnjevanja je dosežena, ko sta sposobnost deformiranja in hitrost deformiranja v ravnotežju.

Pri SCC mešanici je dobra sposobnost zapolnjevanja dosežena z:

- majhnim trenjem med trdnimi delci (posledica povečanja deleža paste na račun grobozrnatega agregata),
- pasto z dobro sposobnostjo deformiranja (posledica dodatka superplastifikatorja in uravnoveženega razmerja med vodo in praškastimi delci).



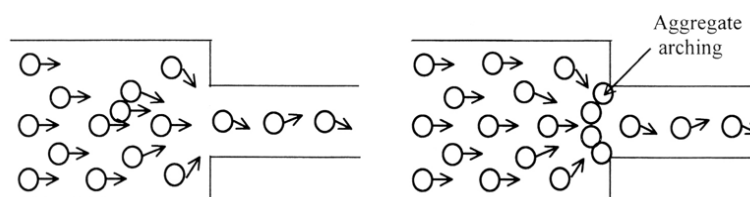
Slika 2.3: SCC popolnoma prevzame strukturo površine opaža
Fig. 2.3: An example of excellent filling ability of SCC

2.2.1.2 Sposobnost prehajanja

Sposobnost prehajanja je sposobnost sveže betonske mešanice, da prehaja med ovirami (ozke odprtine v opažu, ozki predeli med gosto nameščeno armaturo) brez blokiranja zaradi nakopičenja agregatnih zrn. Pri prehajanju betona med ovirami agregatna zrna v bližini ovire spreminjajo pot tečenja. Tako prihaja do trkov med agregatnimi zrni, zaradi česar se lahko na mestu tik pred oviro oblikuje stabilen obok, ki močno ovira ali celo popolnoma blokira nadaljnje tečenje betona (Slika 2.4).

Pri SCC mešanici je dobra sposobnost prehajanja dosežena z:

- visoko kohezivnostjo mešanice, ki zmanjšuje segregacijo agregata (posledica nizkega razmerja med vodo in praškastimi delci ter dodatka sredstva za kontrolo viskoznosti, po potrebi),
- zagotovljeno kompatibilnostjo med svetlo odprtino opaža in/ali armaturnega koša ter lastnostjo grobozrnatega agregata (posledica manjšega deleža grobozrnatega agregata in majhnega največjega zrna agregata).



Slika 2.4: Mehanizem blokiranja sveže betonske mešanice (Skarendahl, Petersson, 2000)
Fig. 2.4: Mechanism of blocking of fresh concrete mixture (Skarendahl, Petersson, 2000)

2.2.1.3 Odpornost na segregacijo

Odpornost na segregacijo je sposobnost suspenzije delcev, da obdrži svojo homogenost med mešanjem, transportom in vgrajevanjem. Nehomogena porazdelitev grobozrnatega agregata v svežem betonu kaže na segregacijo. Ta pojav praviloma nastane zaradi premajhne kohezivnosti komponent.

Posledice segregacije so oslabljene mehanske lastnosti strjenega betona in manjša obstojnost. Pri SCC mešanici je odpornost na segregacijo dosežena z naslednjimi ukrepi:

- nižji delež grobozrnatega agregata,
- nizka vsebnost zamesne vode,
- nizko razmerje med vodo in praškastimi delci,
- uporaba praškastih delcev z veliko specifično površino,
- uporaba sredstva za kontrolo viskoznosti (po potrebi).

2.2.2 Preiskave SCC v svežem stanju

Posebnih lastnosti SCC mešanic se s tradicionalnimi preiskavami za običajne sveže betonske mešanice ne da ovrednotiti. Tako so se vzporedno z razvojem SCC razvijale tudi razne metode preiskav za učinkovito ovrednotenje lastnosti SCC mešanic v svežem stanju.

Leta 2000 so raziskovalci vključeni v obsežen Brite EuRam projekt »Self-Compacting Concrete« na podlagi rezultatov izdali navodila za samozgoščevalne betone (Tviksta, 2000), ki obsegajo različne vidike od zasnove SCC mešanice, mešanja, metod preiskav, transporta, opažev, vgrajevanja, kontrole kvalitete, do okolja, zdravja in varnosti. Dve leti pozneje je EFNARC izdal specifikacije in navodila za samozgoščevalni beton (Specification and Guidelines..., 2002). Specifikacije temeljijo v splošnem na standardu EN 206-1 (2000), istočasno pa podajajo zahteve glede obdelavnosti svežih SCC mešanic. Leta 2005 je EFNARC z ostalimi evropskimi združenji BIBM, CEMBUREAU, ERMCO in EFCA izdal še obširnejša navodila za SCC (The European Guidelines..., 2005). Oktobra 2006 pa je izšel prvi osnutek evropskega standarda za samozgoščevalni beton prEN 206-2 (2006), kjer so navedene naslednje metode za preskušanje SCC v svežem stanju:

- prEN 12350-8 : Testing fresh concrete – Part 8: Slump-flow test for self-compacting concrete;
- prEN 12350-9 : Testing fresh concrete – Part 9: V-funnel test for self-compacting concrete;
- prEN 12350-10 : Testing fresh concrete – Part 10: L-box test for self-compacting concrete;
- prEN 12350-11 : Testing fresh concrete – Part 11: Sieve segregation test for self-compacting concrete;
- prEN 12350-12 : Testing fresh concrete – Part 12: J-ring test for self-compacting concrete.

Pri lastnih preiskavah smo se omejili na prve tri predlagane metode, tj. preiskava razleza s posedom, preiskava z V-lijakom in preiskava z L-zabojem. Med projektiranjem in preiskavami časovnega spreminjanja lastnosti svežih SCC mešanic smo bili namreč primorani optimizirati število preiskav. Odpornost na segregacijo smo tako preverili s ponovno opravljeno preiskavo z V-lijakom, kot navaja EFNARC v (The European Guidelines..., 2005), sposobnost prehajanja sveže SCC mešanice pa smo uspeli dovolj dobro oceniti s preiskavo z L-zabojem. Preiskava z J-obročem in še nekatere ostale razvojne metode za preverjanje lastnosti SCC v svežem stanju so detajlno predstavljene v diplomski nalogi Sandre Petan (2002). Izbrane metode za lastne preiskave smo opisali v (Duh, 2003). V preglednici (Preglednica 2.1) so podane zahteve prEN 206-2 (2006) glede obdelavnosti sveže SCC mešanice. Pri navedenih vrednostih so že upoštevane predpisane tolerance. Zahteve so razdeljene v razrede zaradi različne namembnosti SCC mešanic. Ti razredi so podrobneje predstavljeni v (The European Guidelines..., 2005).

Preglednica 2.1: Zahteve prEN 206-2 (2006) glede obdelavnosti samozgoščevalnega betona
Table 2.1: Requirements of prEN 206-2 (2006) for workability of self-compacting concrete

Metoda	Razred	Enota	Zahtevane meje	
			Spodnja	Zgornja
Razlez s posedom d_{sc}	SF1	mm	520	700
	SF2	mm	640	800
	SF3	mm	740	900
T_{500} pri razlezu s posedom	VS1	s	-	2,5
	VS2	s	1,5	-
V-lijak (čas iztekanja t_{izt})	VF1	s	-	10
	VF2	s	7	30
L-zaboj (razmerje h_2/h_1)	PL1	-	0,7	-
	PL2	-	0,7	-

2.2.3 Numerični model sveže SCC mešanice

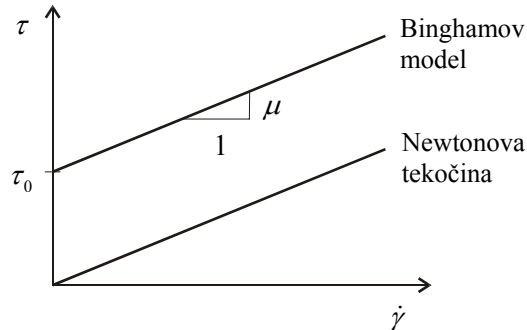
Danes je v svetu in pri nas gradbeniška praksa s samozgoščevalnim betonom že precej seznanjena. Kljub temu še vedno ostaja nekaj problematičnih detajlov v zvezi z njegovo uporabo, ki jih je še potrebno rešiti (Shah, *et al.*, 2007). Eden takšnih problemov je relativno visok bočni pritisk na opaž pri vgrajevanju betona. Ker se sveža SCC mešanica obnaša podobno kot tekočina, lahko ta bočni pritisk dosega vrednosti hidrostatičnega pritiska. To predstavlja problem npr. pri gradnji visokih sten, saj z višino hidrostatični pritisk linearno narašča. Večina raziskovalcev na tem področju (Khayat, Assaad, 2005; Graubner, Proske, 2005) ugotavlja, da se z manjšanjem hitrosti vgrajevanja SCC bočni pritisk na opaž zaradi tiksotropičnosti sveže SCC mešanice ugodno manjša. V drugih primerih lahko imata tiksotropičnost SCC mešanice in časovno spreminjanje njenih reoloških lastnosti neugoden učinek. To je npr. pri transportiranju SCC mešanice iz betonarne na gradbišče.

Obstaja velik motiv, da bi te vplive sveže SCC mešanice lahko predhodno napovedali, bodisi pred vgrajevanjem ali pred transportiranjem SCC. Za to je potrebno izdelati numerični model sveže SCC mešanice, ki bi čim boljše zajel vse njene lastnosti. V predlogu za temo doktorske disertacije smo na podlagi literature (Skarendahl, Petersson, 2000) podali hipotezo, da lahko reologijo sveže SCC mešanice dovolj dobro opišemo z modelom Binghamove tekočine (Slika 2.5), ki za razliko od modela Newtonove tekočine z napetostjo na meji tečenja $\tau_0 > 0$ zajema lastnost mirovanja SCC mešanice pri dovolj nizki strižni napetosti τ :

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (1)$$

kjer je μ viskoznost sveže SCC mešanice in $\dot{\gamma}$ gradient hitrosti (strižna hitrost), ki nastane v smeri pravokotno na plasti mešanice, ki se gibljejo različno hitro. Ker so tuji raziskovalci na tem področju hipotezo potrdili že na naslednjih konferencah o SCC, teh raziskav, ki smo jih začeli v sodelovanju s Fakulteto za strojništvo v Mariboru, nismo nadaljevali, temveč smo se lotili raziskav mikrostrukture SCC in stereološkega modeliranja sestave SCC, ki sta trenutno manj raziskani področji. Če kljub temu povzamemo zaključke tujih raziskovalcev, je moč svežo SCC mešanico dovolj dobro opisati z modelom Binghamove tekočine (Thrane, *et al.*, 2005; Roussel, 2007; Van Waarde, *et al.*, 2007; Gram, Farhang, Silfwerbrand, 2007; Mechtcherine, Shyshko, 2007), obnašanje sveže samozgoščevalne malte pa tudi z modelom Newtonove tekočine (Uebachs, Brameshuber, 2005). Numerična simulacija

vgrajevanja SCC v opaže poljubne geometrijske oblike (Slika 2.6) in napovedovanje bočnega pritiska SCC na opaž sta tako že možna, do neke mere.



Slika 2.5: Model Binghamove in Newtonove tekočine

Fig. 2.5: Bingham model and Newtonian fluid

Zaradi velike raznolikosti receptur in materialov, ki se v svetu uporabljajo za SCC mešanice, o tipični SCC mešanici ni mogoče govoriti. Nekatere mešanice so bolj tekoče in hitre, druge bolj viskozne in počasne, četudi dosežejo npr. enak končni razlez s posedom. Tako lahko pričakujemo, da za vsako SCC mešanico Binghamov model morda ne bo zadostoval. Na zadnjem mednarodnem RILEM-ovem simpoziju o SCC, ki je bil septembra 2007 v Belgiji, je veliko tujih raziskovalcev (Estellé, *et al.*, 2007; Feys, *et al.*, 2007; Modigell, *et al.*, 2007) za numerični model sveže SCC mešanice uporabilo nelinearen Hershel-Bulkleyev model:

$$\tau = \tau_0 + a\dot{\gamma}^b, \quad (2)$$

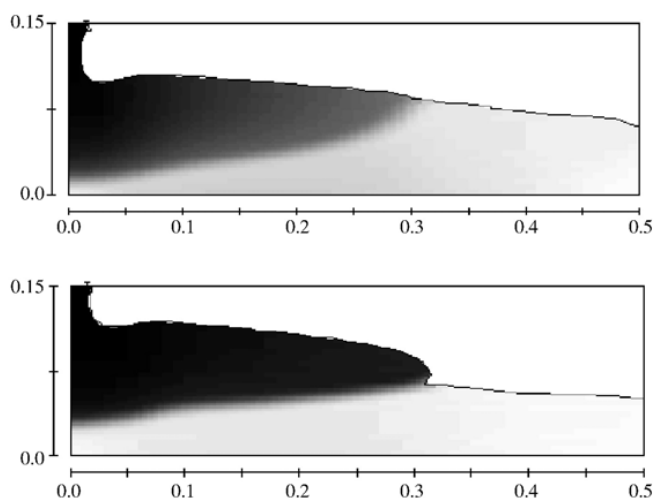
kjer parameter a predstavlja viskoznost sveže SCC mešanice, parameter b pa konstanto večjo od 1. Nekateri (Feys, Verhoeven, De Schutter, 2007) so preskusili tudi modificiran Binghamov model:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2, \quad (3)$$

kjer parameter c predstavlja vpliv »strižnega zgoščevanja« SCC mešanice, tj. večanja njene viskoznosti z večanjem strižne hitrosti $\dot{\gamma}$. Le redki (Roussel, 2007; Feys, Verhoeven, De Schutter, 2007) pa zaenkrat opozarjajo tudi na pomembnost upoštevanja časovnega spreminjanja reoloških lastnosti sveže SCC mešanice pri tovrstnih simulacijah. Feys, Verhoeven in De Schutter (2007) predlagajo delitev tega fizikalnega pojava na povratni del, ki ga predstavlja tiksotropija in se lahko izloči s konstantnim agitiranjem sveže SCC mešanice, in na nepovratni del, katerega predstavlja časovna izguba obdelavnosti sveže SCC mešanice. Časovno spreminjanje obdelavnosti SCC mešanice je predstavljeno v poglavju 3.2.3. Roussel (2007) v svojem pristopu časovno spreminjanje reoloških lastnosti SCC mešanice zajame sicer samo s povečanjem napetosti na meji tečenja τ_0 z enačbo:

$$\tau_0(\Delta t) = \tau_0 + A_{thix}\Delta t, \quad (4)$$

kjer je A_{thix} koeficient tiksotropičnosti in Δt čas mirovanja mešanice. Rezultat je prikazan na sliki (Slika 2.6) in je v skladu z realnim obnašanjem SCC mešanice. Za še bolj točen opis bi bilo v modelu potrebno upoštevati tudi časovno naraščanje viskoznosti sveže SCC mešanice, $\mu(\Delta t) > \mu(t = 0)$.



Slika 2.6: Primer numerične simulacije večfaznega vgrajevanja SCC (Roussel, 2007) s 5 minutnim časovnim razmakom (zgoraj) in z 20 minutnim časovnim razmakom (spodaj)

Fig. 2.6: Example of numerical simulation of multi-layer casting of SCC (Roussel, 2007) for 5 minute resting time (upper) and for 20 minute resting time (bottom)

Da bi bilo takšno napovedovanje poteka vgrajevanja SCC in ocenjevanje bočnega pritiska na opaž z numeričnimi simulacijami uporabno v praksi, bi potrebovali čim bolj enostavno in zanesljivo metodo določanja reoloških karakteristik svežih SCC mešanic, tj. parametrov τ_0 in μ . Najnovejše preiskave kažejo, da bi lahko parametra določali na poti betonske mešanice do gradbišča, in sicer iz meritev vrtilnega momenta na mešalni ročici agitatorja. Na istem principu delujejo tudi nekateri reometri za beton (Amziane, Ferraris, Koehler, 2005). Watanabe s soavtorji (2005), Esping (2007) ter Thrane, Pade in Svensson (2007) navajajo tudi možnost določanja parametrov τ_0 in μ iz meritev razleza s posedom, ki je prav tako zelo hitra in praktična preiskava.

2.3 Strjen SCC

2.3.1 Lastnosti strjenega SCC

Zaradi večje količine praškastih delcev in posebnih samozgoščevalnih lastnosti lahko pri SCC pričakujemo bolj homogeno in manj vodoprepustno mikrostrukturo kot pri običajnem vibriranem betonu. Večja homogenost in manjša vodoprepustnost matrice betona se običajno odraža v izboljšanih karakteristikah strjenega betona.

2.3.1.1 Tlačna trdnost

Zaradi izločitve potrebe po vibriranju sveže SCC mešanice ti betoni praviloma izkazujejo večjo tlačno trdnost kot običajni vibrirani betoni s primerljivim vodo-cementnim (v nadaljevanju v/c) ali vodo-vezivnim razmerjem (Skarendahl, Petersson, 2000). Vibriranje namreč oslabi stično območje med cementnim kamnom in večjimi agregatnimi zrni. Ta fizikalni pojav smo preverili s topografsko mikroskopsko analizo, ki je podrobneje predstavljena v 4. poglavju (Slika 4.8).

2.3.1.2 Natezna trdnost

SCC je moč sprojektirati tako, da zadosti kateremukoli trdnostnemu razredu betona. Ker povečanje deleža paste (cement + dodatni praškasti delci + voda) nima pomembnega vpliva na natezno trdnost betona, lahko v istem trdnostnem razredu betona pri SCC pričakujemo enako natezno trdnost kot pri običajnem vibriranem betonu (The European Guidelines..., 2005).

2.3.1.3 Statični modul elastičnosti

Statični modul elastičnosti betona je razmerje med napetostjo in deformacijo betona v elastičnem območju pri čistem tlaku. Ker agregat predstavlja največji prostorninski delež v betonu, ima na statični modul elastičnosti tudi največji vpliv. Z izbiro agregata z večjim modulom elastičnosti bomo povečali modul elastičnosti betona, in obratno. Preostala faza betona, cementni kamen, ima od običajnega agregata praviloma nižji modul elastičnosti (Mehta, Monteiro, 2006). Tako bi lahko povečanje deleža paste v betonu zmanjšalo njegov modul elastičnosti. V istem trdnostnem razredu lahko torej pri SCC pričakujemo nekoliko nižji modul elastičnosti kot pri običajnem vibriranem betonu (The European Guidelines..., 2005).

2.3.1.4 Lezenje

Lezenje betona je definirano kot postopno večanje deformacije v primeru konstantne obremenitve. Lezenje zajema tudi ostale časovno odvisne deformacije betona, tj. deformacije zaradi krčenja ali nabrekanja in temperaturne deformacije.

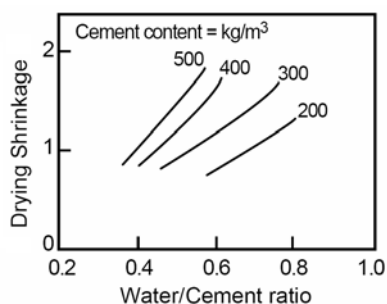
Lezenje betona se odvija v cementnem kamnu betona. Odvisno je od poroznosti cementnega kamna, ki je neposredno povezana z v/c razmerjem. Med procesom hidratacije se poroznost cementne paste zmanjšuje in s tem tudi lezenje betona, trdnost pa narašča. Eksperimentalno je bilo pokazano, da sta lezenje in trdnost betona obratno sorazmerna (Mehta, Monteiro, 2006). Ker agregat ovira lezenje cementne paste, povečanje deleža agregata v betonu in/ali izbira agregata z večjim modulom elastičnosti praviloma zmanjša lezenje betona. Zaradi večjega deleža paste bi tako lahko v istem trdnostnem razredu pri SCC pričakovali višji koeficient lezenja kot pri običajnem vibriranem betonu (The European Guidelines..., 2005), čeprav bi naj pričakovana večja kompaktnost cementne paste pri SCC lezenje betona zmanjšala.

2.3.1.5 Krčenje

Krčenje betona je definirano kot vsota avtogenega krčenja in krčenja zaradi sušenja. Avtogeno krčenje je posledica notranje »porabe« vode v času hidratacije. Prostornina produktov hidratacije je namreč manjša od izhodiščne prostornine nehidratiziranih cementnih zrn in vode (The European Guidelines..., 2005). Krčenje zaradi sušenja pa je posledica oddajanja vode v betonu v atmosfero. V večini gre za izgubo vode iz cementnega kamna, tako lahko pri betonih z večjim deležem paste pričakujemo večje krčenje zaradi sušenja (The European Guidelines..., 2005). Pri tem moramo biti sicer zelo pozorni, saj je krčenje zaradi sušenja močno odvisno tudi od v/c razmerja (Mehta, Monteiro, 2006). Manjše kot je v/c razmerje, manjše je krčenje (Slika 2.7). Veliko raziskovalcev na tem področju ugotavlja tudi pomemben vpliv vrste cementa in drugih praškastih delcev na krčenje betona.

Krčenje betona je torej odvisno od številnih vzajemnih faktorjev, katerih medsebojni odnosi so zelo kompleksni (Mehta, Monteiro, 2006). Tako je v raznih znanstvenih poročilih in člankih moč zaslediti

popolnoma nasprotujoče si zaključke glede primerjave krčenja med SCC in običajnimi vibriranimi betoni. Če se ponovno držimo koncepta enake tlačne trdnosti, Persson (1999, *cit. po* Skarendahl, Petersson, 2000) zaključuje, da je krčenje SCC in vibriranega betona primerljivo. RILEM v svojih zadnjih navodilih za SCC (The European Guidelines..., 2005) k temu dodaja, da lahko pri SCC pričakujemo manjše krčenje zaradi sušenja in sorazmerno večje avtogeno krčenje kot pri primerljivem vibriranem betonu.



Slika 2.7: Vpliv v/c razmerja in količine cementa na krčenje betona zaradi sušenja (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 2.7: Effects of water-cement ratio and cement content on drying shrinkage (Mehta, Monteiro, 2006)

2.3.1.6 Sprijemnost z armaturo

Ideja AB konstrukcij temelji na sprijemnosti betona z armaturnimi palicami. Na efektivnost vezi med armaturo in betonom vplivata položaj armaturnih palic in kvaliteta sveže betonske mešanice v času vgrajevanja. Betonska mešanica mora biti takšna, da lahko dovolj dobro obda vse površine armaturnih palic. Le-tako lahko pričakujemo želen prenos napetosti med betonom in jeklom.

Oslabljena sprijemnost betona z armaturo je velikokrat posledica bodisi slabe zgostitve sveže betonske mešanice, izcejanja vode ali segregacije. Z uporabo SCC mešanic lahko pričakujemo manj tovrstnih problemov. Eksperimentalno je bilo pokazano, da je sprijemnost SCC z armaturo na varni strani glede na izračunane vrednosti po EN1992-1 in EN206-1 (The European Guidelines..., 2005).

2.3.1.7 Obstočnost

Obstočnost betona je tesno povezana z vodoprepustnostjo površinskega sloja. Kvaliteten površinski sloj bi naj omejeval vdor agresivnih snovi (kloridi, sulfati, voda, kisik, CO₂, alkalije in kisline) v matrico betona. Praksa je pokazala, da je obstočnost betona močno odvisna od vrste uporabljenih materialov, od sestave betona, od kvalitete vgrajevanja, zgoščevanja in zaključevanja površine betona ter od nadaljnje nege.

Posledica vibriranja sveže betonske mešanice, četudi izvedenega strokovno, je praviloma neenakomerno zgoščena struktura betona. To pomeni, da ima vibriran beton na različnih mestih različno prepustnost, kar povečuje selektivni vdor agresivnih snovi. Še bolj neugoden vpliv na vodotesnost betona, in s tem tudi na njegovo obstočnost, ima nepravilno izvedeno vibriranje (The European Guidelines..., 2005).

Zaradi bolj enakomerne zgostitve in tudi bolj goste matrice cementnega kamna pri SCC lahko s fizikalnega vidika pričakujemo manjšo prepustnost SCC in s tem boljšo obstojnost. Glede na to, da za SCC potrebujemo precejšno količino praškastih delcev, ki imajo zelo raznoliko sestavo, pa lahko s kemijskega vidika pričakujemo procese, ki bi lahko imeli na obstojnost betona negativen učinek. V zadnjem času se veliko raziskovalcev ukvarja s preiskavami obstojnosti betona z različnimi vrstami in količinami praškastih delcev, vendar so si zaključki velikokrat nasprotujoči. Na obstojnost betona namreč vpliva veliko dejavnikov in je zato težko oceniti velikost posameznega vpliva. Obenem naletimo tudi na problem nekaterih nedorečenih detajlov pri obstoječih metodah preiskav, ki imajo na končne rezultate velik vpliv. Naš prispevek k temu znanstvenemu področju je predstavljen v 5. poglavju.

2.3.2 Preiskave strjenega SCC

Za razliko od preiskav sveže betonske mešanice za preiskave strjenega SCC načeloma ne potrebujemo drugačnih metod preiskav kot za običajni vibriran beton. V okviru lastnih preiskav smo lastnosti strjenih SCC in vibriranih betonov določali predvsem s porušnimi preiskavami, in sicer:

- preiskava tlačne trdnosti betona (SIST EN 12390-3, 2002);
- preiskava cepilne natezne trdnosti betona (SIST EN 12390-6, 2001);
- preiskava sovisnosti med napetostmi in deformacijami, modula elastičnosti in Poissonovega koeficienta (DIN 1048 Teil 5, 1991);
- preiskava vpijanja vode s kapilarnim srkom (SIST EN 772-11, 2000);
- preiskava odpornosti betona proti zmrzovanju/tajanju (SIST-TS CEN/TS 12390-9, 2006);
- preiskava odpornosti betona na delovanje sulfatov (Mielich, Öttl, 2004);
- preiskava značilnosti zračnih por v strjenem betonu (SIST EN 480-11, 2005).

Od neporušnih metod smo uporabili metodo z ultrazvokom. Z le-to smo določali dinamični modul elastičnosti betona in ocenjevali homogenost ter kvaliteto vgrajenega betona. Večino metod smo opisali v (Duh, 2003), preostale so navedene v naslednjih poglavjih.

2.4 SCC v praksi

V Evropi in na Japonskem se SCC uporablja pri močno armiranih AB konstrukcijah in za podvodno betoniranje. V severni Ameriki SCC trenutno uporabljajo predvsem za prefabricirane konstrukcijske elemente, pri čemer je možna visoka stopnja kontrole kvalitete. Večina betonarn za transportni beton se proizvodnji SCC betona upira zaradi večjih stroškov v primerjavi z običajnim vibriranim betonom in zaradi dodatnih zahtev glede kontrole kvalitete (Mehta, Monteiro, 2006).

Na zadnjem RILEM-ovem simpoziju o SCC je skupina strokovnjakov iz Francije (Cussigh, 2007) predstavila uporabnost SCC v praksi. Kot prednosti SCC betona so izpostavili predvsem enostavnost vgrajevanja SCC mešanice, kar omogoča gradnjo zahtevnih AB konstrukcij, kvaliteto površine strjenega SCC in povečanje produktivnosti. Kljub vsem naštetim prednostim ob dodatnem izboljšanju delovnih pogojev in zmanjšanju hrupa zaradi izločitve potrebe po vibriranju v Franciji trenutno le 3%

vseh betonarn za transportni beton ponuja SCC za betoniranje na terenu. Kot možne razloge za tako nizek procent navajajo:

- zahtevo po strogi kontroli kvalitete;
- potrebo po visoki kvaliteti uporabljenih materialov, tudi za opaže v primeru visokih navpičnih konstrukcijskih elementov;
- nezadostno natančnost obstoječe opreme za proizvodnjo betona;
- pomanjkanje določenih standardov.

Cussigh (2007) zaradi zgornjih razlogov ocenjuje povečanje stroškov pri proizvodnji SCC v primerjavi z običajnim vibriranim betonom na 30%. Pri tej oceni sicer ni podanih detajlov. Npr. stroški dodatne opreme in potrebe po dodatnem izobraževanju so praviloma enkratni. Cussigh (2007) poleg povečanja stroškov kot dodaten negativni motiv za uporabo SCC navaja še naslednje zelo neugodne posledice v primeru nepravilno zamešanega SCC:

- v primeru močne segregacije sveže SCC mešanice ni moč črpati ali izliti iz betonske hruške;
- v primeru slabo zatesnjene opaže sveža SCC mešanica izteka skozi odprtine;
- v primeru premajhnega razleza s posedom je površina strjenega SCC slaba.

Ti negativni motivi bi sicer lahko končno predstavljali motiv za izboljšanje kvalitete izvajanja betonskih del, kar bi se močno obrestovalo z dolgoročnega vidika, tj. v obstojnosti AB konstrukcij. Tega se v razvitejših državah sveta gradbeniška stroka vedno bolj zaveda. Pri nas so se koncepta samozgoščevalnih betonov lotili strokovnjaki iz Skupine Primorje, ki so na zadnji konferenci Združenja za beton Slovenije »Izvajanje betonskih del« v Lipici tudi predstavili svoje dosedanje delo in izkušnje z SCC v praksi (Slika 2.8). V svojem prispevku (Cotič, Koglot, Nemec, 2008) so poleg že navedenih prednosti SCC poudarili možnost večje hitrosti vgrajevanja betona, hitrejšega napredovanja del in izboljšane delovnega okolja v primeru uporabe SCC. V zaključkih izpostavljajo tudi izboljšano kvaliteto površine elementov iz SCC betona, kar predstavlja veliko uporabnost SCC v primeru vidnih betonov. Končno pa opozarjajo na potrebo po večji pozornosti pri negi SCC, saj se površina SCC izsušuje hitreje kot pri običajnih betonih.



Slika 2.8: Primer uporabe SCC za močno armirano konstrukcijo »Pokriti vkop na HC Razdrto – Vipava«

Fig. 2.8: Example of SCC application – densely reinforced concrete construction in Slovenia

3 PROJEKTIRANJE BETONSKIH MEŠANIC

3.1 Uvod

Prvo fazo eksperimentalnih preiskav v sklopu doktorske disertacije je predstavljalo projektiranje betonskih mešanic. Pri tem smo si zadali tri cilje. Prvi cilj je bil sprojektirati čim bolj ekonomično samozgoščevalno betonsko mešanico iz različnih materialov domačih proizvajalcev. Drugi cilj je bil sprojektirati aerirano samozgoščevalno mešanico, čim bolj odporno proti zmrzovanju/tajanju. Tudi pri tem smo želeli preizkusiti čim več različnih materialov domačih proizvajalcev. Tretji cilj je bil sprojektirati čim bolj primerljive vibrirane betonske mešanice, in sicer za primerjavo SCC in vibriranih betonov tako v svežem kot tudi v strjenem stanju. Pri tem smo primerljivost mešanic največkrat osnovali na enakem vodo-vezivnem razmerju ali na enaki količini dodatnega praškastega materiala, kot je natančno podano v tem poglavju. Predstavljene so tudi osnove projektiranja SCC mešanic.

3.2 Projektiranje SCC mešanic

Samozgoščevalni beton lahko opišemo kot suspenzijo delcev, kjer so delci grobozrnatega agregata enakomerno razpršeni v malti. Malta ima delce drobozrnatega agregata enakomerno razpršene v pasti, pasta pa cementne in praškaste delce enakomerno razpršene v vodi. Iz tega sledi, da reoloških lastnosti SCC ni moč optimizirati, če prej ne optimiziramo reoloških lastnosti paste in malte v SCC mešanici (Billberg, 1999a). SCC mešanica mora imeti v svežem stanju obenem tri lastnosti (v nadaljevanju samozgoščevalne lastnosti), in sicer:

- sposobnost zapolnjevanja, tj. visoka sposobnost tečenja ali deformiranja za dovolj dobro razlezanje mešanice samo zaradi delovanja lastne teže;
- odpornost na segregacijo, in sicer med razlezanjem ter v mirovanju po vgraditvi;
- sposobnost prehajanja, v smislu obliivanja armaturnih palic in prehajanja skozi ozke predele armaturnih košev brez blokiranja (Skarendahl, Petersson, 2000).

Splošen pristop k doseganju takšnih lastnosti sveže betonske mešanice je prikazan na shemi (Slika 3.1). In sicer, z omejitvijo količine grobozrnatega agregata zmanjšamo količino trkov med agregatnimi zrni in s tem povečamo sposobnost prehajanja mešanice. Posledično s tem povečamo tudi količino paste v betonski mešanici, kar ob dodatku superplastifikatorja in znižanju v/c razmerja poveča plastičnost mešanice. S tem se sicer zniža tudi napetost na meji tečenja, kar lahko povzroči segregacijo betonske mešanice. Zato je potrebno povečati viskoznost paste v betonu. To lahko dosežemo z:

- zadostno količino dodanih praškastih delcev ustrezne zrnivosti in/ali
- z dodatkom sredstva za kontrolo viskoznosti.

Recept za doseganje samozgoščevalnih lastnosti sveže betonske mešanice torej ni en sam. Poleg tega še zaradi široke palete sestavnih materialov, med katerimi lahko izbiramo, obstaja več metod za projektiranje SCC mešanic. Kot nekakšna splošna metoda za projektiranje SCC mešanic je postala relativno enostavna »korak-za-korakom« metoda, ki so jo predlagali Okamura in Ozawa s sodelavci

(1995, *cit. po* Skarendahl, Petersson, 2000). Postopek je sledeč. Najprej določimo delež grobozrnatega agregata v betonski mešanici, ki naj predstavlja 50% prostornine betonske mešanice brez deleža zraka A (v %):

$$\frac{V_{GA}}{V_B} = 0,5 \left(1 - \frac{A}{100} \right), \quad (5)$$

kjer je V_{GA} prostornina grobozrnatega agregata in V_B prostornina betonske mešanice. Pri tem moramo upoštevati agregat v zbitem stanju. Masa grobozrnatega agregata m_{GA} je tako enaka:

$$m_{GA} = \gamma_{GA}^{zbit} V_{GA}, \quad (6)$$

kjer je γ_{GA}^{zbit} prostorninska masa izbranega grobozrnatega agregata v zbitem stanju. Nato določimo prostornino drobozrnatega agregata V_{DA} , ki naj predstavlja 50% preostale faze v betonski mešanici, tj. malte V_M :

$$V_{DA} = 0,5 V_M = 0,5 \left[\left(1 - \frac{A}{100} \right) V_B - \frac{m_{GA}}{\rho_{GA}} \right] = \frac{m_{DA}}{\rho_{DA}}, \quad (7)$$

kjer je ρ_{GA} gostota uporabljenega grobozrnatega agregata, ρ_{DA} gostota uporabljenega drobozrnatega agregata in m_{DA} masa drobozrnatega agregata. Pri tem je zelo pomembno, da vse delce agregata manjše od 0,09 mm upoštevamo kot praškaste delce. Preostala prostornina od skupne prostornine V_B je prostornina paste V_P :

$$V_P = \left(1 - \frac{A}{100} \right) V_B - \frac{m_{GA}}{\rho_{GA}} - \frac{m_{DA}}{\rho_{DA}}. \quad (8)$$

Pasto predstavljajo voda, cement in praškasti delci:

$$V_P = V_v + V_{cem} + V_{praš}. \quad (9)$$

Končno je potrebno določiti še razmerje med vodo ter cementom in praškastimi delci. To razmerje določamo iterativno s preiskavami na maltah, in sicer s preiskavo razleza s posedom in s preiskavo z V-lijakom za malte, ki sta predstavljeni v (Duh, 2003). Postopek je sledeč. V vsaki iteraciji iskanja ustreznega vodo-praškastega razmerja, v/c razmerja in količine superplastifikatorja v malti najprej iz rezultatov preiskave razleza s posedom določimo relativni razlez Γ_m po formuli:

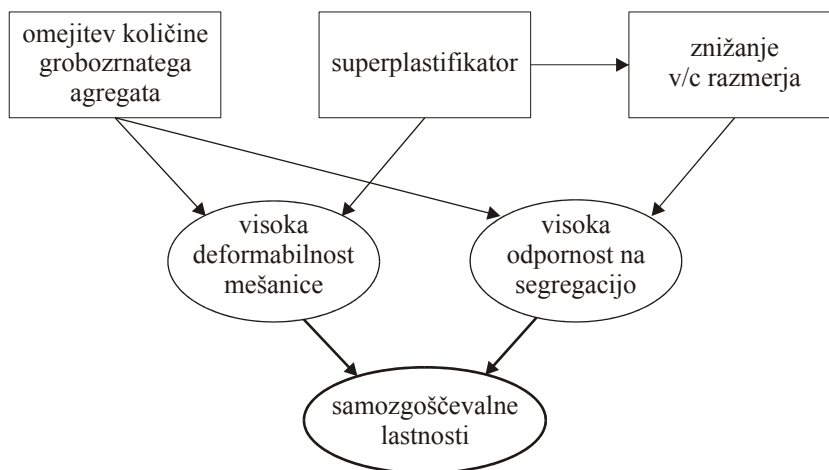
$$\Gamma_m = \left(\frac{d_m}{d_0} \right)^2 - 1, \quad (10)$$

kjer je d_m povprečna vrednost dveh meritev razleza malte v dveh pravokotnih smereh pri izpustu skozi prisekan stožec s premerom dna $d_0 = 100$ mm. Nato iz preiskave z V-lijakom za malte določimo relativni čas iztekanja R_m :

$$R_m = \frac{10}{t_{izt}}, \quad (11)$$

kjer je t_{izt} čas iztekanja malte iz V-lijaka, v sekundah. Postopek ponavljamo toliko časa, dokler ne dosežemo predlaganih pogojev: $\Gamma_m = 5$ in $R_m \in [0,9, 1,1]$, oz. prevedeno v absolutne vrednosti, dokler

ne dosežemo razleza s posedom $d_m \approx 250$ mm in obenem časa iztekanja $t_{izt} \in (9, 11)$ s. Ko pogojem zadostimo, dobljena razmerja pri samozgoščevalni malti predstavljajo začetne vrednosti za betonsko SCC mešanico. Sestavo le-te ponovno rahlo spreminjamo v smeri, da zadostimo pogojem navedenim v preglednici (Preglednica 2.1).



Slika 3.1: Splošen pristop k doseganju samozgoščevalnih lastnosti sveže betonske mešanice (povzeto po Ouchi, *et al.*, 1998)

Fig. 3.1: General approach for achieving self-compactability of fresh concrete mixture (adopted from Ouchi, *et al.*, 1998)

Na podlagi t.i. splošne metode za projektiranje SCC mešanic je bilo razvitih še veliko drugih metod, in sicer z raznimi spremembami in/ali dodatki z namenom, da bi bile uporabne tudi za različne vrste sestavnih materialov. Detajlno so predstavljene v (Skarendahl, Petersson, 2000). Od teh je morda vredno omeniti t.i. CBI metodo, ki so jo razvili na Švedskem (Petersson, Billberg, 1999, *cit. po* Skarendahl, Petersson, 2000). Od splošne metode se najbolj razlikuje v načinu določitve deleža agregata. Njene prednosti bi naj bile:

- upoštevanje zrnastostne sestave agregata kot celote;
- metoda je uporabna za vse velikosti grobozrnatega in drobnozrnatega agregata;
- upoštevanje dejanskih pogojev vgrajevanja, vključno z razmerjem med velikostjo agregatnih zrn in velikostjo najmanjše odprtine, skozi katero mora betonska mešanica steči.

Metodo CBI smo na primeru tujih izkušenj predstavili v (Duh, 2003). Podrobneje je opisana v diplomski nalogi Sandre Petan (2002). V preglednici (Preglednica 3.1) so podane okvirne vrednosti deležev sestavnih materialov, ki jih lahko pričakujemo pri sestavi SCC mešanice.

Preglednica 3.1: Okvirne vrednosti deležev materialov za SCC mešanico (Skarendahl, Petersson, 2000)

Table 3.1: Approximate proportions of materials for SCC mixture (Skarendahl, Petersson, 2000)

Material	Delež	Količina (kg/m ³)
grobozrnati agregat	30-34% V_B	750-920
drobnozrnati agregat	40-50% V_M	710-900
pasta	34-40% V_B	
cement + praškasti delci		450-600
voda		150-200
voda (brez uporabe sredstva za kontrolo viskoznosti)		155-175

3.2.1 Materiali

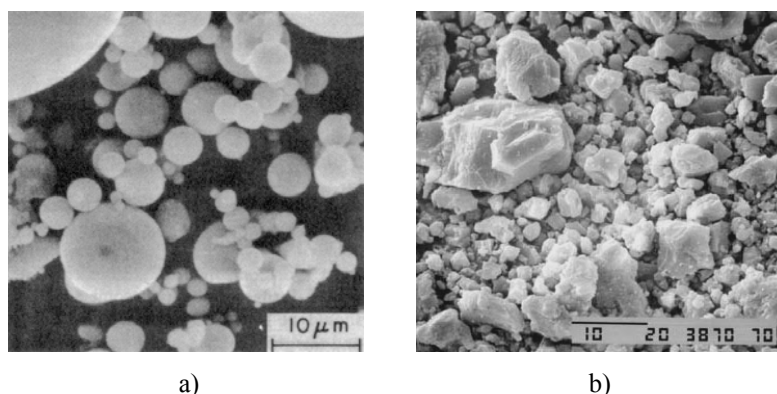
Za izdelavo SCC mešanice se uporabljajo enaki materiali kot za običajne betonske mešanice. Detajlno so opisani v (Duh, 2003). V nadaljevanju so predstavljeni le praškasti materiali in kemijski dodatki, ki jih uporabljamo za aerirane in neaerirane SCC mešanice.

3.2.1.1 Praškasti materiali

Med praškaste materiale poleg cementa štejemo še reaktivne in inertne fine delce, ki imajo velikost bodisi manjšo ali nekoliko večjo od tipičnih cementnih zrn. Kot največje zrno za praškaste delce se v Evropi običajno uporablja 0,075 mm ali 0,125 mm, na Japonskem pa 0,09 mm. Razlog za razliko so različne odprtine standardnih sit v posameznih državah. Reaktivni praškasti materiali so mikrosilika, mleta granulirana žlindra in elektrofiltrski pepel. Med inertne praškaste materiale pa spadajo zmleti polnilni materiali iz apnenca, dolomita, kremenca, odpadnega stekla, ipd. Dodatni praškasti materiali so lahko že sestavni del cementa, sicer jih za izdelavo SCC dodamo posebej, ko mešamo beton.

Praškasti materiali imajo zaradi svoje finosti veliko specifično površino. Zato moramo pri pripravi betonske mešanice dodati večjo količino vode, da zagotovimo ustrezno vgradljivost betona. Posledica tega je povečanje prostornine paste v betonski mešanici, ki mora imeti takšno viskoznost, da ima svež beton ustrezno obdelavnost in je hkrati odporen na segregacijo. Pri tem ni pomemben le prostorninski delež praškastih delcev v pasti, ampak tudi njihova oblika in zrnavostna sestava. Poleg tega je za izdelavo SCC mešanice potrebno zagotoviti učinkovito dispergiranje finih delcev v mešanici, kar pa je odvisno tudi od načina mešanja betonske mešanice, in sicer od vrstnega reda dodajanja sestavin in kemijskih dodatkov.

Praškasti materiali, ki se uporabljajo za SCC mešanice, morajo omogočiti čim večjo zbitost vseh delcev v pasti pri najmanjši možni skupni površini delcev z namenom, da se zmanjša potreba po vodi za zahtevano obdelavnost. Najugodnejša oblika praškastih delcev je okrogla, saj kroglasti delci zmanjšajo notranje trenje v pasti, poleg tega pa je njihova skupna površina pri dani prostornini najmanjša. Z vidika oblike delcev bi bila torej najprimernejša elektrofiltrski pepel (Slika 3.2a) in mikrosilika, sledijo pa pretežno kockasti delci apnenčevih (Slika 3.2b), dolomitnih ter kremenčevih mok. Enostavna in dovolj učinkovita metoda za oceno vpliva oblike in deleža različnih praškastih materialov na obdelavnost paste je preiskava razleza s posedom.



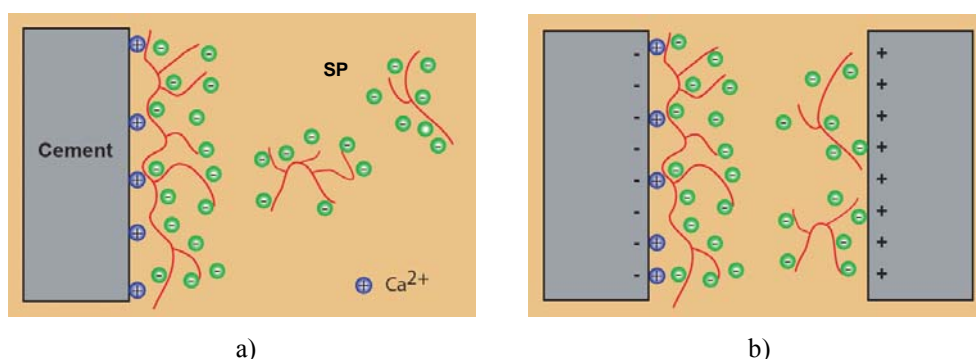
Slika 3.2: SEM slike: a) elektrofiltrski pepel (Mehta, Monteiro, 2006); b) apnenčeva moka
Fig. 3.2: Scanning electron micrographs of: a) fly ash (Mehta, Monteiro, 2006); b) limestone powder

3.2.1.2 Superplastifikatorji

Superplastifikator (v nadaljevanju SP) je kemijski dodatek za uravnavanje reoloških lastnosti sveže betonske mešanice. Omogoča:

- zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti betonske mešanice;
- izboljšanje obdelavnosti betonske mešanice ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode;
- počasnejši padec obdelavnosti betonske mešanice s časom.

SP je površinsko aktivna snov, ki se adsorbira na površino cementnih zrn (Slika 3.3a) in povzroča disperzijo le-teh z elektrostatičnim (Slika 3.3b) in steričnim ali prostorskim odbojem. Cementna zrna s sprejetim negativnim električnim nabojem se medsebojno odbijajo in dispergirana struktura cementnih zrn se stabilizira. Posledica negativnega naboja je tudi nastanek orientiranih molekul vode na površini cementnih zrn, ki delujejo kot neko mazivo med delci, kar povečuje obdelavnost svežega betona. Nastanek steričnega odboja povzročijo stranske verige SP, ki prostorsko preprečujejo, da bi se cementni delci združevali. Prostorski odboj ima veliko večji in tudi dalj časa trajajoč učinek kot elektrostatični odboj (Mehta, Monteiro, 2006).

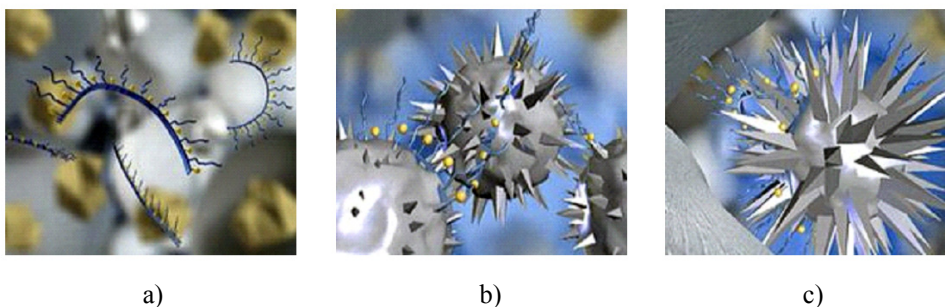


Slika 3.3: Shematični prikaz delovanja SP: a) adsorpcija SP na površino cementnih zrn; b) elektrostatični odboj cementnih zrn (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 3.3: Mechanism of superplasticizer action: a) surface adsorption of superplasticizer; b) electrostatic repulsion of cement particles (Mehta, Monteiro, 2006)

Poznamo več vrst superplastifikatorjev. Predstavljeni so v diplomski nalogi Sandre Petan (2002). Izdelavo SCC mešanic so omogočili SP nove generacije, ki imajo veliko močnejši učinek kot običajni SP. Običajni SP na bazi melamin-sulfonatov in naftalen-sulfonatov lahko »utekočinijo« betonsko mešanico za 15-30 minut in pri tem zmanjšajo potrebo po vodi za 5-25%. SP na bazi polikarboksilatov, ki so SP nove generacije, pa lahko vzdržujejo tekoče stanje betonske mešanice dlje časa, tj. 120-180 minut, količina potrebne zamesne vode pa se zmanjša za 25-40%. Čas vzdrževanja obdelavnosti betona je odvisen tudi od kompatibilnosti SP in mešanice praškastih delcev. Če le-ti niso kompatibilni, se v prvih 15 minutah po zamešanju opazi očitna izguba konsistence betonske mešanice. Običajni SP in SP nove generacije se razlikujeta v kemijski sestavi. SP nove generacije je zgrajen iz ene glavne polimerne verige ter iz krajših stranski verig z negativnimi karboksilatnimi skupinami in dolgih stranskih verig iz polietilen oksidov. Običajni SP ima namesto dolgih stranskih verig kratke verige, ali pa jih sploh nima (Petan, 2002).

Delovanje SP nove generacije je prikazano na sliki (Slika 3.4). V nasprotju z molekulami običajnega SP imajo molekule SP nove generacije daljše stranske verige (Slika 3.4a). V začetni fazi je delovanje SP nove generacije (Slika 3.4b) enako delovanju običajnega SP (Slika 3.3), s pričetkom hidratacije pa se dolge stranske verige molekul SP nove generacije v suspenziji razporedijo tudi okoli kristalov – produktov hidratacije in tako prostorsko preprečujejo združevanje že delno hidratiziranih cementnih zrn (Slika 3.4c). Obdelavnost betonske mešanice je s tem občutno podaljšana.



Slika 3.4: Shematični prikaz delovanja SP nove generacije: a) molekule SP nove generacije; b) adsorpcija na površino cementnih zrn; c) učinkovitejši sterični odboj že delno hidratiziranih cementnih zrn (Petan, 2002)

Fig. 3.4: Mechanism of new generation superplasticizers action: a) longer surfactant chains; b) adsorption; c) more effective steric repulsion of partially hydrated cement particles (Petan, 2002)

Učinek superplastifikatorja je odvisen od vrste in količine cementa, od v/c razmerja, sestave agregata in od količine samega SP. Velja še omeniti, da boljša disperzija cementnih zrn (zaradi delovanja SP) pri cementnih kompozitih z nizkim v/c razmerjem pripomore k povečanju stopnje hidratacije cementa. To je vidno v povečani hidratacijski toploti. Posledica tega je praviloma večja gostota strjene betonske mešanice (Petan, 2002).

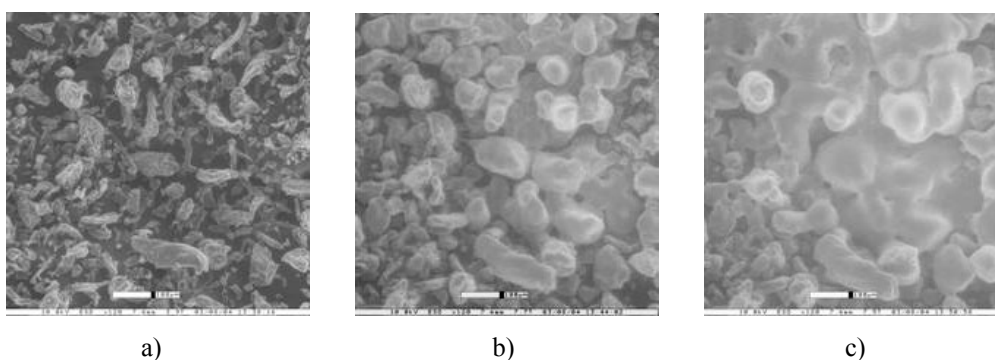
3.2.1.3 Sredstva za kontrolo viskoznosti

Sredstva za kontrolo viskoznosti so kemijski dodatki, ki povečajo stabilnost mešanic na bazi cementa. Tovrstni dodatki lahko zmanjšajo nevarnost ločitve heterogenih sestavin betona med transportom, vgrajevanjem in zgoščevanjem ter zagotavljajo dodatno stabilnost do začetka strjevanja. Pri SCC mešanicah jih uporabljamo za zmanjševanje potrebne količine praškastih delcev v mešanici ali za

zagotovitev ustreznih samozgoščevalnih lastnosti v primeru večjega nihanja lastnosti sestavin. Pri SCC mešanica brez sredstva za kontrolo viskoznosti se namreč zelo pogosto srečujemo s problemi, ki izhajajo iz relativno velikega nihanja vlažnosti drobnozrnatega agregata.

Poznamo več vrst sredstev za kontrolo viskoznosti. Podrobneje so predstavljeni v (Duh, 2003). Najbolj znan je biopolimer »welan gum«. Njegova vključitev v mešanico na bazi cementa kontrolira izcejanje vode, saj se dolgoverižne molekule polimera adhezijsko povežejo z vodnimi molekulami in tako adsorbirajo del zamesne vode, kot je prikazano na sliki (Slika 3.5). Takšno zadrževanje vode poveča viskoznost mešanice in njeno napetost na meji tečenja. Mešanica postane navidezno strjena vse dokler se adsorbirana voda ponovno ne sprosti bodisi zaradi agitiranja, črpanja ali vibriranja mešanice. (Mehta, Monteiro, 2006).

V betonskih mešanica z dodatkom superplastifikatorja, ki kažejo nagnjenost k segregaciji, je uporaba sredstva za kontrolo viskoznosti zelo pogosta. Z ustrezno kombinacijo SP in sredstva za kontrolo viskoznosti lahko dobimo stabilno betonsko mešanico.



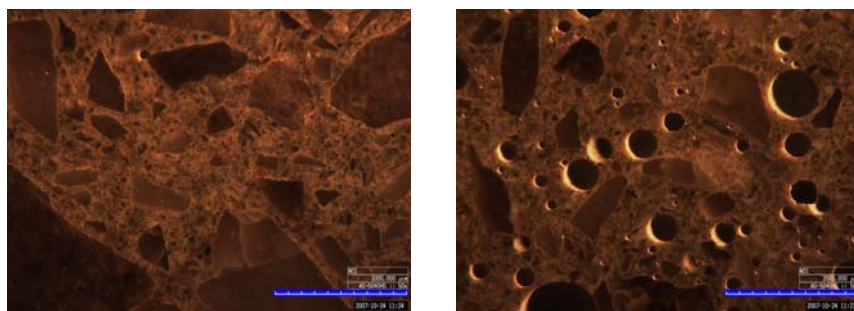
Slika 3.5: ESEM slike biopolimera »welan gum«: a) suhi delci pri 70% RH; b) stanje po 5 min pri 100% RH; c) stanje po 12 min pri 100% RH. Dolžina skale je 100 μm (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 3.5: ESEM images of biopolymer welan gum: a) at 70% RH (dry particles); b) after 5 minutes at 100% RH; c) after 12 minutes at 100% RH. Scale bar length is 100 μm (Mehta, Monteiro, 2006)

3.2.1.4 Aeranti

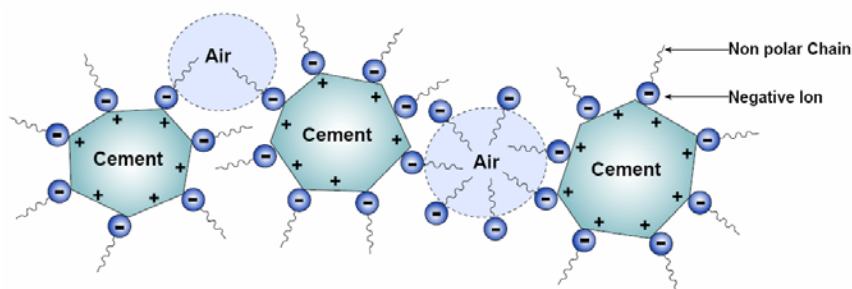
Aeranti so kemijski dodatki, s katerimi v strukturo betona vnesemo zračne mehurčke velikosti od 10 μm do več milimetrov (Slika 3.6, desno). Zračni mehurčki se praviloma enakomerno porazdelijo po volumnu cementne paste, pri čemer njihova medsebojna razdalja v najboljših primerih ni večja od 0,25 mm. Takšna struktura betona omogoča povečanje njegove zmrzlinke odpornosti. Vnešene zračne pore namreč prekinejo mrežo finih kapilar, kar zmanjša kapilarno vpijanje vode, poleg tega pa ima voda, ki v primeru izpostavljenosti betona mrazu zamrzne, dovolj prostora za neovirano širjenje (Mehta, Monteiro, 2006).

Na sliki (Slika 3.7) je prikazan mehanizem delovanja aeranta. Molekula aeranta je sestavljena iz polarne hidrofilne glave in nepolarne hidrofobne verige. Z vnašanjem aeranta v cementno pasto pride do nastanka zračnih mehurčkov na sledeč način. Polarne skupine molekule aeranta se orientirajo proti vodni fazi in zmanjšajo površinsko napetost vode. Hidrofobne verige se orientirajo v stran od vodne



Slika 3.6: Prerez neaeriranega betona (levo) in aeriranega betona (desno). Dolžina skale je 2 mm
 Fig. 3.6: Section of non-aerated concrete (left) and aerated concrete (right). Scale bar length is 2 mm

faze in formirajo se zračni mehurčki. Nastali polarni obroči zračnih mehurčkov preprečujejo, da bi se mehurčki združili, obenem pa se zaradi svojega negativnega naboja adsorbirajo na površino cementnih zrn, kar omogoča, da ostajajo v cementni pasti tudi med mešanjem betona (Hewlett, 1998). Zaradi velikega števila tako vnešenih mehurčkov se lahko opazno poveča delež zraka v betonu, kar vpliva tudi na zmanjšanje njegove tlačne trdnosti. Slednje lahko kompenziramo z manjšanjem v/c razmerja, saj imajo zračni mehurčki v sveži betonski mešanici podoben učinek kot superplastifikator.



Slika 3.7: Mehanizem delovanja aeranta (Mehta, Monteiro, 2006)
 Fig. 3.7: Mechanism of air entrainment (Mehta, Monteiro, 2006)

3.2.2 Projektiranje lastnih SCC mešanic

Prvi cilj v fazi projektiranja betonskih mešanic je bil sprojektirati čim bolj ekonomično in učinkovito SCC mešanico iz različnih materialov domačih proizvajalcev. Pri tem smo uporabili dve vrsti agregata iz domačih nahajališč, drobljen apnenčev agregat in naravni separiran prod, oba z največjim zrnem 16 mm, cement CEM II/A-S 42,5 R, tri vrste apnenčevih mok, kremenčevo mivko ter kemijske dodatke slovenskega proizvajalca. Vsi materiali so podrobneje opisani v (Duh, 2003).

Najprej smo s sejalnimi analizami določili optimalne kombinacije vseh frakcij grobozrnatega in vseh frakcij drobnazrnatega agregata, posebej. Razmerje med grobozrnatim in drobnazrnatim agregatom smo izbrali po splošni metodi za projektiranje SCC mešanic. Metoda CBI nas je glede na izbrane zahteve (svetla odprtina armaturnega koša betonske varnostne ograje »New Jersey«, 55 mm) privedla do podobnega razmerja med grobozrnatim in drobnazrnatim agregatom kot splošna metoda. Pri drobljenem agregatu smo pregrebo sestavo drobnazrnatega agregata (frakcija 0/4) uspeli korigirati z

dodajanjem drobljenega agregata frakcije 0/2. V primeru naravnega separiranega proda smo za doseganje želene obdelavnosti sveže SCC mešanice morali dodati kremenčevo mivko frakcije 0/1, kar je bilo iz ekonomskega vidika manj ugodno kot pri varianti z drobljenim agregatom, smo pa pri tej mešanici uspeli izločiti potrebo po apnenčevi moki.

Po določitvi optimalnih kombinacij vseh uporabljenih frakcij za vsako vrsto agregata, ki so natančneje predstavljene v (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2001), smo opravili preiskave razleza s posedom na cementnih pastah s predvidenimi praškastimi delci. Tako smo najprej izmed treh različnih vrst apnenčevih mok izbrali najugodnejšo, glede na njeno sposobnost zapolnjevanja. Pri tem smo upoštevali tudi ekološko-ekonomski vidik, saj so apnenčeve moke pridobljene z odpraševanjem zaradi velike finosti delcev ekološko oporečen material. Rezultati teh preiskav so navedeni v (Petan, 2002). Z izbranimi praškastimi materiali in drobnozrnatim agregatom smo nato opravili preiskave razleza s posedom in preiskave z V-lijakom na maltah. S tem smo določali razmerje med praškastimi delci, v/c razmerje in količino kemijskih dodatkov za doseganje samozgoščevalnih lastnosti malte. Številne izkušnje pri tovrstnem projektiranju SCC malt smo podali v (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2001) in v (Duh, 2003). Na tem mestu smo se tudi odločili za projektiranje dveh vrst SCC mešanic iz drobljenega agregata, in sicer prva SCC mešanica, pri kateri zagotovimo odpornost na segregacijo s povečano količino praškastih delcev (oznaka LN), in druga SCC mešanica, pri kateri zagotovimo odpornost na segregacijo z dodatkom sredstva za kontrolo viskoznosti (oznaka LGN). SCC mešanice iz naravnega separiranega proda smo označili s TN. Končno je sledil prenos receptur za SCC malte na recepture za SCC betonske mešanice, pri čemer so bile praviloma potrebne še rahle spremembe, da smo dosegli želene samozgoščevalne lastnosti.

Na analogen način smo poskušali sprojektirati tri sorodne aerirane SCC mešanice. Prva je bila torej aerirana SCC mešanica (oznaka LA) iz drobljenega agregata in z relativno velikim deležem apnenčeve moke, druga aerirana SCC mešanica (oznaka LGA) je bila iz drobljenega agregata z manjšo količino apnenčeve moke in z dodatkom sredstva za kontrolo viskoznosti, tretja aerirana SCC mešanica (oznaka TA) pa je bila iz naravnega separiranega proda z dodatkom kremenčeve mivke. Pri projektiranju aeriranih SCC malt in betonskih mešanic je dodaten parameter predstavljala količina dodanega aeranta, saj imajo zračni mehurčki v sveži mešanici betona podoben učinek kot superplastifikator. Primer iterativnega postopka projektiranja betonske mešanice LA iz izhodiščne recepture, določene iz sprojektirane recepture za SCC malto, je prikazan v preglednici (Preglednica 3.2). Iz preglednice je razvidno, da je projektiranje aeriranih SCC betonov zelo kompleksno, saj je pri naknadnem dodajanju bodisi superplastifikatorja, aeranta in/ali vode pri dobljenih rezultatih preiskav potrebno upoštevati dvoje. In sicer prvič, da SCC mešanica s časom izgublja samozgoščevalne lastnosti, kot bo predstavljeno v nadaljevanju, in drugič, da je učinek naknadno dodanih kemijskih dodatkov na reološke lastnosti mešanice praviloma manjši kot v primeru prvotnega dodajanja. Režim mešanja SCC mešanice je namreč sledeč:

- 1 minuta mešanja suhih komponent betonske mešanice (agregat, praškasti delci in cement);
- 1 minuta mešanja s 75% zamesne vode;
- 4 minute mešanja z dodajanjem kemijskih dodatkov s preostalimi 25% zamesne vode v naslednjem vrstnem redu: superplastifikator, aerant, sredstvo za kontrolo viskoznosti (aerant pri tem zmešamo z delom zamesne vode v razmerju $m_a : m_v = 1 : 9$).

Za mešanje betonskih mešanic smo uporabljali protitočni laboratorijski mešalec kapacitete 50 litrov, pri katerem smo kemijske dodatke dodajali med mešanjem skozi loputo na pokrovu mešalca (Slika

3.8, desno). Za mešanje malt in cementnih past smo uporabili standardni mešalec za malte in paste kapacitete 5 litrov (Slika 3.8, levo), pri čemer je režim mešanja za malte sledeč:

- 30 sekund mešanja paste (voda, vsi kemijski dodatki, cement in praškasti delci) na hitrosti 1;
- 30 sekund mešanja na hitrosti 1 z enakomernim dodajanjem drobnozrnatega agregata;
- 3 minute mešanja malte na hitrosti 2.

Preglednica 3.2: Primer zadnje faze projektiranja aerirane SCC mešanice (mešanica LA)

Table 3.2: Example of the last phase of aerated SCC mix design (mix LA)

Mešanica	Δt^* (min)	SP (%pr)	Aerant (%c)	d_{sec} (mm)	T_{500} (s)	t_{izl} (s)	p_{γ}^{**} (%)
LA1:	0	0,62	0,17	660	6,3	7,3	13,2
- dodamo SP	15	0,64	0,17	580	6,7	-	-
- dodamo SP	20	0,65	0,17	618	4,8	-	17,3
LA2:	0	0,64	0,15	680	5,2	6,9	13,7
- dodamo SP	15	0,66	0,15	665	5,0	-	15,2
- dodamo SP	23	0,68	0,15	675	4,1	-	15,0
- dodamo SP	30	0,70	0,15	670	4,6	-	14,1
- dodamo SP	38	0,72	0,15	680	4,3	-	13,4
- dodamo SP	45	0,74	0,15	695	4,0	-	13,9
LA3	0	0,70	0,11	748	4,2	-	10,3
LA4 [†]	0	0,70	0,12	[†] 768	4,5	[†] 11,1	[†] 7,1
LA5 [†]	0	0,70	0,11	[†] 768	4,4	[†] 11,0	[†] 7,1
LA6	0	0,68	0,11	760	3,9	8,3	8,9
LA7	0	0,66	0,11	753	3,9	9,1	7,6
LA8	0	0,64	0,11	755	3,8	8,2	9,3
LA9	0	0,62	0,11	728	4,1	-	10,8

* starost sveže SCC mešanice (merjeno od zaključka prvotnega zamešanja)

** poroznost sveže betonske mešanice določena iz njene prostorninske mase po enačbi (13)

[†] mešanica je rahlo segregirala



Slika 3.8: Standardni mešalec za malte in paste (levo) in protitočni mešalec za betone (desno)

Fig. 3.8: Standard mortar and paste mixer (left) and lab concrete mixer (right)

Iz preglednice (Preglednica 3.2) je razvidna tudi kompleksnost medsebojnega delovanja kemijskih dodatkov. Mešanica LA1 nakazuje na odvisnost učinka aeranta od količine dodanega SP. Pri več primerih aeriranih SCC mešanic smo opazili, da se učinek aeranta veča z večanjem količine dodanega SP. Za ta pojav bi bila možna fizikalna razlaga, da je za mehanizem tvorjenja zračnih mehurčkov potrebna dovolj tekoča pasta betona. Pri mešanicah LA4 in LA5, ki sta rahlo segregirali, pa lahko opazimo ravno obraten učinek. In sicer, če SP predoziramo, je učinek aeranta ponovno manjši. Tokrat je fizikalna razlaga prekomerno odzračenje sveže betonske mešanice v fazi segregacije. Do podobnih rezultatov so prišli tudi tuji raziskovalci, npr. Du in Folliard (2005). Ko smo torej pri enakem v/c razmerju in enakem deležu aeranta linearno manjšali delež SP s korakom 0,2%pr, so aerirane SCC mešanice (LA6-9) izkazovale vedno večjo stabilnost, čas iztekanja t_{izt} je padel na pričakovanih 7-9 s, razlez d_{sc} se je ustrezno manjšal in v sveži mešanici je ostajalo vedno več zračnih por, kar je razvidno iz večanja poroznosti p_v . Iz rezultatov preiskav je prav tako razvidno, da ima tudi prekomerna količina dodanega aeranta (mešanici LA1 in LA2) negativen vpliv na delovanje SP. Pri tako močno aeriranih mešanicah betona ($p_v > 13\%$) z večanjem SP nismo uspeli bistveno povečati razlezanja mešanice. Še več, pri enakih količinah dodanega SP in pri precej nižji količini dodanega aeranta (mešanice LA6-9) smo dobivali skoraj 100 mm večje razleze. Pasta premočno aerirane betonske mešanice izgleda precej penasta in s tem očitno omejuje razlezanje mešanice. Sicer z dodajanjem aeranta (v manjših količinah) sposobnost razlezanja sveže betonske mešanice povečujemo. Približno enake hitrosti razlezanja (čas T_{500}) in iztekanja (čas t_{izt}) pri vseh mešanicah, razen pri tistih, ki so rahlo segregirale, potrjujejo, da količini dodanega SP in aeranta bistveno ne vplivata na hitrost tečenja mešanice. Na to hitrost namreč v precej večji meri vpliva v/c razmerje, ki je bilo pri vseh mešanicah enako. V preglednici (Preglednica 3.3) smo združili vse opazke medsebojnih vplivov in posamičnih učinkov kemijskih dodatkov na lastnosti sveže SCC mešanice iz vseh opravljenih preiskav v fazi projektiranja. Pri tem plus pomeni »poveča«, minus »zmanjša«, vrednost v oklepaju pomeni, da je učinek v manjši meri, a ne zanemarljivi, oznaka +/- pomeni, da kemijski dodatek deluje ugodno v potrebni smeri, oznaki večje in manjše pa pomenita, da je naveden vpliv tako velik, da vrednost obravnavane lastnosti sveže SCC mešanice pade izven zahtevanega območja za obdelavnost SCC mešanice (Preglednica 2.1).

Preglednica 3.3: Medsebojni vplivi in posamični učinki kemijskih dodatkov
Table 3.3: Interaction and effects of chemical admixtures

Kemijski dodatek / vpliv	d_{sc}	T_{500}	t_{izt}	p	učinek aeranta	učinek SP
SP:	+	(-)	(-)	(-)	+	
- premajhna količina	<	(>)	(>)		-	
- predozacija	>	(<)	(>)		-	
aerant:	(+)	(+)	(-)	+*		
- predozacija	-	+	-	(+)*		-
sredstvo za kontrolo viskoznosti	-	+	+/-		(-)	-
večanje v/c razmerja:	(+)	-	-	(+)	(+)	(+)
- prenizko v/c razmerje	(<)	>	>		-	-
- previsoko v/c razmerje	(>)	<	<	>†		

* ne v smislu poroznosti cementnega kamna temveč v deležu zračnih por

† v smislu previsoke poroznosti cementnega kamna, kar poslabša karakteristike betona

Lastnosti svežih betonskih mešanic smo določali s preiskavami navedenimi v poglavju 2.2.2. Delež zraka v sveži mešanici smo merili s porozimetrom v skladu s SIST EN 12350-7 (2001) ali posredno preko merjenja mase sveže mešanice v zvrhano napolnjeni posodi porozimetra m_{sk} . Ker sta masa posode m_{pos} in njena prostornina V_{pos} znani, lahko najprej določimo dejansko prostorninsko maso sveže betonske mešanice γ_{dej} :

$$\gamma_{dej} = \frac{m_{sk} - m_{pos}}{V_{pos}} \quad (12)$$

Nato iz izraza (13) izračunamo dejanski delež zraka p_γ v sveži betonski mešanici.

$$p_\gamma = \left(1 - \frac{(1 - p_{proj}/100)\gamma_{dej}}{\gamma_{proj}} \right) \times 100 \quad (13)$$

Pri merjenju poroznosti sveže aerirane SCC mešanice, bodisi posredno ali neposredno, moramo biti zelo pozorni. Mešanica z naknadnim mešanjem namreč izgublja delež zraka, kot kaže primer v preglednici (Preglednica 3.4). Zato je potrebno določati delež zraka, ki ga lahko pričakujemo v strjenem betonu, na tisti šarži, ki jo brez naknadnega mešanja vgradimo v kalupe, oz. na gradbišču iz vzorca betonske mešanice tik pred vgrajevanjem. Lastne preiskave so pokazale, da naknadno mešanje (tudi manj kot eno minuto) sveže aerirane SCC mešanice zmanjša delež zraka, relativno gledano, za 15-25%.

Preglednica 3.4: Vpliv naknadnega dodajanja aeranta in naknadnega mešanja na delež zraka v sveži aerirani SCC mešanici

Table 3.4: Effect of air-entraining agent addition after primary mixing and effect of additional mixing on air content in fresh aerated SCC mixture

Režim mešanja (čas mešanja)	Delež zraka
po prvotnem mešanju (6 min)	8%
po dodanem aerantu	17%
po naknadnem mešanju (1 min)	13%
po naknadnem mešanju (1 min)	10%
po naknadnem mešanju (1 min)	8%
po naknadnem mešanju (1 min)	7%

Pri projektiranju aeriranih SCC mešanic smo opazili tudi vpliv temperature okolice in/ali zamesne vode v času mešanja na učinek delovanja aeranta. Preiskave so pokazale, da smo za enak delež zraka poleti pri temperaturah sveže betonske mešanice $T_b > 20^\circ\text{C}$ potrebovali precej večjo količino aeranta kot pozimi pri $T_b < 20^\circ\text{C}$. V primeru obravnavane mešanice LA iz preglednice (Preglednica 3.2) smo za doseganje deleža zraka 8-10% poleti potrebovali 0,17% aeranta, pozimi pa le 0,11%. Du in Folliard (2005) vpliv temperature na učinek kemijskega dodatka aeranta razlagata preko sprememb v viskoznosti sveže betonske mešanice in preko sprememb v hitrosti hidratacije pri različnih temperaturah. In sicer, pri nižjih temperaturah pričakujemo počasnejšo hidratacijo, kar pomeni manjše število produktov hidratacije v zgodnji fazi in zato več preostalih prostih molekul aeranta za tvorjenje zračnih mehurčkov. Tako lahko pri nizkih temperaturah sveže betonske mešanice ($4-21^\circ\text{C}$) pri enaki količini dodanega aeranta pričakujemo do, relativno gledano, 40% večji delež zraka, medtem ko pri

višjih temperaturah betonske mešanice (21-38°C) do 25% manjši delež zraka kot v primeru $T_B \approx 20^\circ\text{C}$ (Dodson, *cit. po* Du, Folliard, 2005).

Na učinek delovanja aeranta v sveži betonski mešanici vpliva tudi vrsta mineralnega dodatka, kar bo predstavljeno v nadaljevanju tega poglavja. Kar se tiče prve faze projektiranja neaeriranih in aeriranih SCC mešanic z različnimi vrstami agregatov so v preglednici (Preglednica 3.5) podane sestave teh betonov. Lastnosti betonskih mešanic v svežem stanju, njihove karakteristike v strjenem stanju, medsebojne primerjave, ipd. smo objavili v obsežnem poročilu (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004a), odpornost aeriranih SCC proti zmrzovanju in tajanju v ali brez prisotnosti soli pa v (Bokan-Bosiljkov, Duh, Žarnić, 2005). Prve izkušnje s projektiranjem SCC mešanic so objavljene v poročilu (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2001).

Preglednica 3.5: Sestave sprojektiranih SCC mešanic v prvi fazi (vrednosti v kg/m^3)
Table 3.5: Compositions of first phase SCC mixtures (values in kg/m^3)

Sestavina	Neaerirane SCC			Aerirane SCC		
	LN	LGN	TN	LA	LGA	TA
drobljen agregat	1558	1691	-	1530	1585	-
naravni separirani prod	-	-	1663	-	-	1606
kremenčeva mivka	-	-	178	-	-	165
apnenčeva moka	247	167	-	158	108	-
cement	395	404	396	383	391	413
voda	173	162	158	151	147	149
superplastifikator (%pr)	0,60	0,70	1,20	0,55	0,55	1,25
aerant (%c)	-	-	-	0,10	0,14	0,07
sredstvo za kontrolo viskoznosti (%c)	0,02	0,18	-	0,04	0,14	-
v/c razmerje	0,44	0,40	0,40	0,40	0,38	0,36
prostornina paste (m^3)	0,423	0,388	0,314	0,363	0,345	0,309
delež zraka*	2,6%	1,9%	3,7%	8,5%	9,6%	6,2%

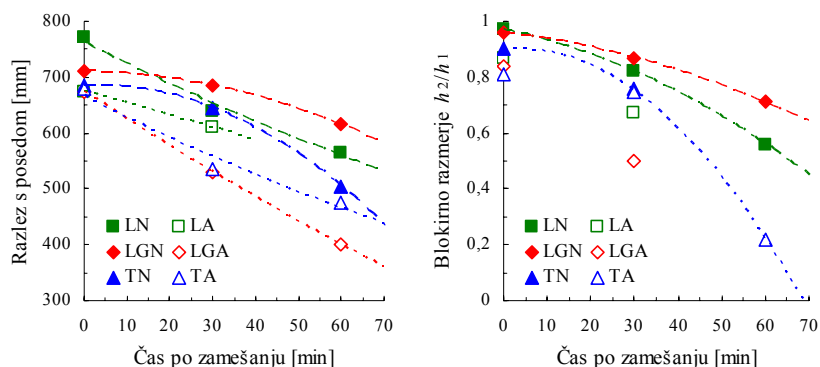
* določen s preiskavo s porozimetrom (SIST EN 12350-7, 2001)

3.2.3 Časovno spreminjanje obdelavnosti svežih SCC mešanic

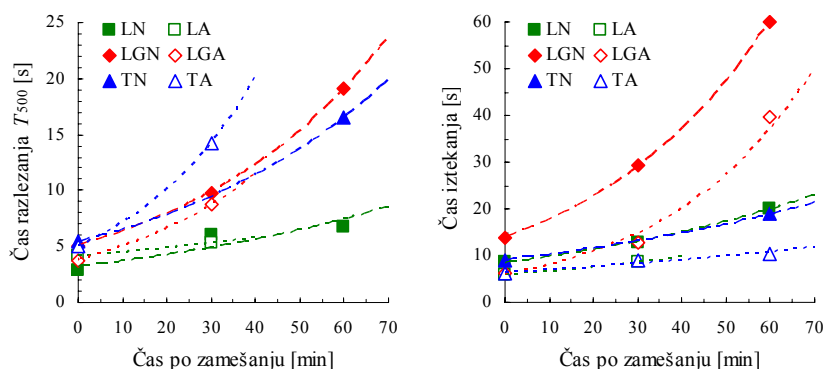
Na diagramih (Slika 3.9)-(Slika 3.10) je prikazano časovno spreminjanje obdelavnosti svežih SCC mešanic. Iz diagramov je razvidno, da se tako sposobnost razlezanja kot tudi viskoznost svežih SCC mešanic s časom spreminjata približno eksponentno. Kljub temu večina sprojektiranih mešanic po 30 minutah po zamešanju še izpolnjuje zahteve glede obdelavnosti SCC mešanic (Preglednica 2.1). To pomeni, da so sprojektirane SCC mešanice primerne za uporabo v obratih za izdelavo prefabrikatov, manj primerne pa za transportne betone. Pri tem je potrebno poudariti, da smo z rezultati, prikazanimi na diagramih (Slika 3.9)-(Slika 3.10), na varni strani. Mešanice so v času med preiskavami mirovale. V primeru agitiranja bi lahko pričakovali manjše padce samozgoščevalnih lastnosti.

Velja še omeniti, da lahko z naknadnim dodajanjem kemijskih dodatkov samozgoščevalne lastnosti sveže betonske mešanice ohranjamo tudi do 45 ali več minut po zamešanju, kot je bilo prikazano na

primeru SCC mešanice LA2 v preglednici (Preglednica 3.2). Pri tem bi bilo sicer nujno potrebno preveriti morebitne vplive takšnega dodajanja na nastalo mikrostrukturo betona.



Slika 3.9: Časovno spreminjanje obdelavnosti svežih SCC mešanic (razlezanje)
Fig. 3.9: Decrease of SCC mixtures workability (flow) with time



Slika 3.10: Časovno spreminjanje obdelavnosti svežih SCC mešanic (viskoznost)
Fig. 3.10: Decrease of SCC mixtures workability (viscosity) with time

3.2.4 Izbira SCC mešanic za nadaljnje preiskave

Izmed zgoraj navedenih SCC mešanic se je kot najbolj ekonomična in po večini lastnosti tudi najbolj učinkovita SCC mešanica izkazala mešanica LN. Le-to smo izbrali za nadaljnje preiskave.

Prvi cilj druge faze projektiranja SCC mešanic je bila optimizacija sestave izbrane mešanice LN. Iz preglednice (Preglednica 3.5) je razvidno, da smo pri takšni sestavi mešanice potrebovali vsaj minimalno količino sredstva za kontrolo viskoznosti. Zaradi nekaterih opaženih slabih posledic dodajanja tega kemijskega dodatka smo želeli mešanico optimizirati tako, da za njeno stabilnost in odpornost na segregacijo ne bi več potrebovali sredstva za kontrolo viskoznosti. To je pomenilo dvoje, ali znižati v/c razmerje ali povečati količino praškastih delcev v mešanici. Ker smo s skupno količino praškastih delcev (cement + apnenčeva moka) bili že na zgornji priporočeni meji po splošni metodi (Okamura, *et al.*, 1995, *cit. po* Skarendahl, Petersson, 2000), smo poskusili z nižanjem v/c razmerja. Pri tem smo pričakovali zmanjšanje hitrosti razlazezanja in iztekanja SCC mešanice, a bi odsotnost

sredstva za kontrolo viskoznosti to zmanjšanje lahko kompenzirala. V preglednici (Preglednica 3.6) so prikazani rezultati projektiranja optimizirane LN. Iz rezultatov preiskav prvega poskusa (mešanica LN1) je lepo razvidno, da je pri pre nizko izbranem v/c razmerju tudi z znatnim povečevanjem količine dodanega SP zahtevano obdelavnost sveže SCC mešanice zelo težko doseči. Razlez je z naknadnim dodajanjem SP ostajal zgolj približno enak in premajhen, mešanica je bila tudi prepočasna in vedno bolj »lepljiva«. Pomanjkanje vode v mešanici je bilo očitno. Po nekaj iteracijah se je izkazalo, da je bilo za izločitev potrebe po sredstvu za kontrolo viskoznosti potrebno zmanjšati v/c razmerje samo iz 0,44 na 0,43 (mešanice LN3-LN5), kar tudi potrjuje relativno veliko občutljivost svežih SCC mešanic na količino zamesne vode. Sestava optimizirane mešanice LN je pod oznako LN-43 podana v preglednici (Preglednica 4.1) v 4. poglavju.

Preglednica 3.6: Projektiranje optimizirane SCC mešanice LN brez sredstva za kontrolo viskoznosti
Table 3.6: SCC mix design of optimal LN mixture without viscosity agent

Mešanica	Δt^* (min)	v/c razmerje	SP (%pr)	d_{sc} (mm)	T_{500} (s)	t_{izt} (s)
LN1:	0	0,40	0,63	550	6,3	-
- dodamo SP	4	0,40	0,66	520	7,1	-
- dodamo SP	8	0,40	0,69	505	-	-
- dodamo SP	12	0,40	0,72	525	6,8	-
- dodamo SP	16	0,40	0,75	500	-	-
- dodamo SP	20	0,41	0,80	520	6,5	-
- dodamo SP	24	0,41	0,85	525	6,5	-
- dodamo SP	28	0,41	0,90	540	6,7	-
- dodamo SP	32	0,41	0,95	555	6,4	-
- dodamo SP	36	0,41	1,00	550	6,5	-
- dodamo vodo	40	0,43	1,00	~600	-	†10,0
LN2:	0	0,42	0,65	~500	9,0	-
- dodamo SP	5	0,42	0,70	575	7,0	-
- dodamo SP	10	0,42	0,75	645	5,0	13,0
- dodamo vodo	20	0,43	0,75	625	5,0	12,0
LN3	0	0,43	0,72	715	5,0	15,0
LN4	0	0,43	0,73	750	5,0	14,5
LN5	0	0,43	0,72	765	5,5	14,5

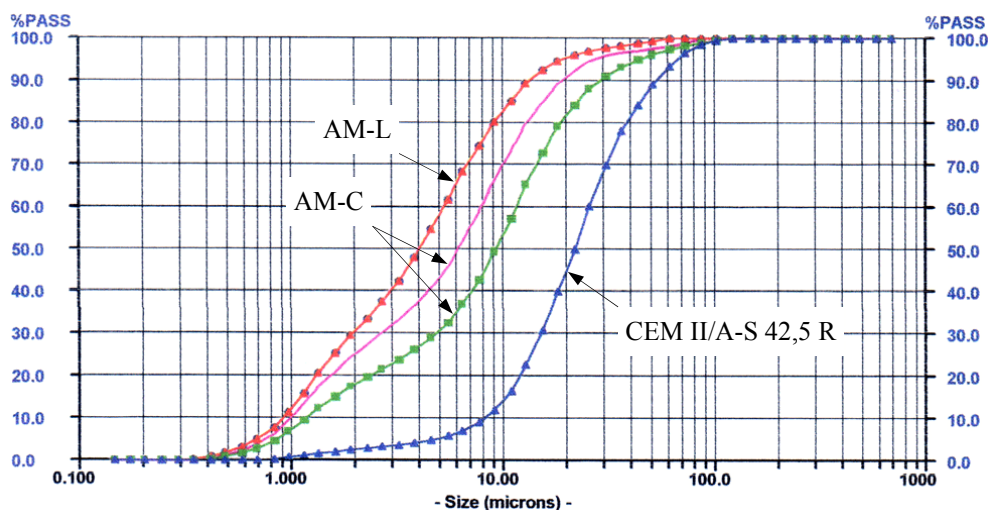
*starost sveže SCC mešanice (merjeno od zaključka prvotnega zamešanja)

†od tod naprej smo merili čas iztekanja in razlezanja na 0,5 s natančno

Drugi cilj te faze projektiranja SCC mešanic je bil optimizirati tudi aerirano različico izbrane mešanice LN, tj. mešanico LA. Tokrat smo lahko za izločitev potrebe po sredstvu za kontrolo viskoznosti povečali količino praškastih delcev, nekoliko pa smo zmanjšali tudi v/c razmerje, in sicer iz 0,40 na 0,39. Sestava optimizirane mešanice LA pri različnih deležih vnešenega zraka je podana v preglednici (Preglednica 4.2) v 4. poglavju.

Končni cilj te faze projektiranja je bila parametrična študija mehanskih in obstojnostnih karakteristik aeriranih SCC mešanic z različnimi deleži zraka in z različnimi vrstami apnenčevih mok. Ta študija je

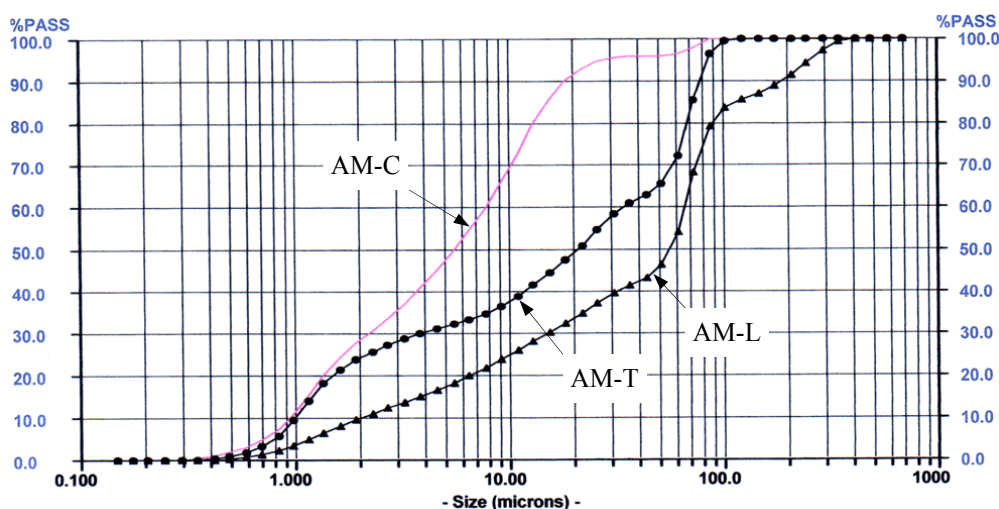
predstavljena v 4. in v 5. poglavju. V tem poglavju se bomo osredotočili na projektiranje teh SCC mešanic. Med projektiranjem se je izkazalo, da z eno izmed apnenčevih mok (oznaka AM-C) ni bilo moč zamešati aerirane SCC mešanice z več kot 5% deležem zraka. Z večanjem količine aeranta se je mešanica po zamešanju kvečjemu bolj odzračila. Tokrat vzrok za prekomerno odzračenje ni bila segregacija. Du in Folliard (2005) kot možen zaviralni učinek na delovanje aeranta v sveži betonski mešanici navajata večanje finosti uporabljenih praškastih delcev. Večja finost delcev pomeni več delcev pri enaki masi, kar bi lahko bil vzrok za to, da ostane na voljo manj prostih molekul aeranta za tvorjenje zračnih mehurčkov. Molekule aeranta so namreč površinsko aktivne snovi in se adsorbirajo na površino pozitivno nabitih delcev, kot je bilo prikazano na sliki (Slika 3.7). Prvotne preiskave zrnastvne sestave uporabljenih apnenčevih mok pokažejo obratno sliko. Apnenčeva moka AM-C, s katero smo pri enaki dozaciji aeranta dobivali nižje deleže zraka kot npr. pri uporabi druge vrste apnenčeve moke (oznaka AM-L), izgleda manj fina (Slika 3.11).



Slika 3.11: Rezultati prvotne analize zrnastvne sestave uporabljenih apnenčevih mok in cementa
 Fig. 3.11: First results of particle size distribution analysis of used limestone powders and cement

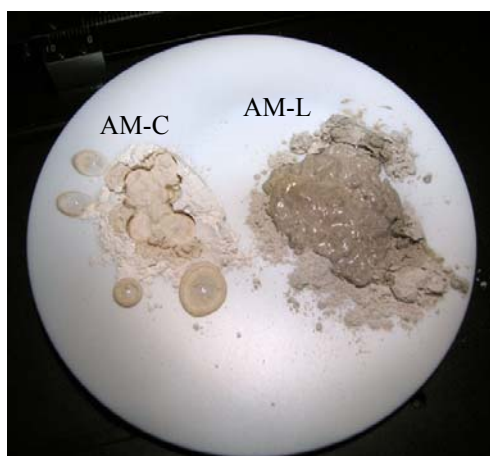
Ponovno opravljene analize zrnastvne sestave istih šarž uporabljenih apnenčevih mok so pokazale pričakovane rezultate (Slika 3.12). Za apnenčevo moko AM-C, ki je namensko mleta, so bili rezultati skoraj enaki kot pri prvotni analizi, pri vzorcu apnenčeve moke AM-L, ki je pridobljena z odpraševanjem, pa so rezultati analize tokrat kazali na precej manjšo finost delcev. Razlog za to je najverjetneje v nepravilno izvedeni prvotni preiskavi zrnastvne sestave uporabljenih apnenčevih mok, ki je potekala na Naravoslovno-tehniški fakulteti v Ljubljani, na Oddelku za geotehnologijo in rudarstvo. In sicer, v primeru da vzorca preiskovanega materiala med preiskavo ne mešamo, se lahko večji delci posedejo in dobljen rezultat ne predstavlja dejanske zrnastvne krivulje materiala. Če je torej zrnastvna sestava uporabljene šarže apnenčeve moke AM-C dejansko bolj fina od zrnastvne sestave moke AM-L, bi zgornja hipoteza neugodnega vpliva večje finosti delcev na delovanje aeranta lahko razložila dobljene nižje deleže zraka pri SCC mešanicah z apnenčevo moko AM-C. Še vedno pa s to tezo ne razložimo, zakaj s povečanjem količine aeranta, s čimer bi tudi pri teh SCC mešanicah moralo ostati na voljo dovolj prostih molekul aeranta za tvorjenje zračnih mehurčkov, deleža zraka ne uspemo povečati. Tokrat poskušamo iskati vzroke v smeri opazke močnega odzračanja teh betonskih mešanic. Problema se lotimo na ta način, da majhna vzorca obeh omenjenih apnenčevih mok pod

mikroskopom izpostavimo vodi, oz. bolje rečeno vodnim kapljicam. Pri tem opazimo bistveno razliko med mokama. In sicer, »problematična« apnenčeva moka AM-C je od moke AM-L precej bolj »hidrofobna«. Veliko vodnih kapljic, ki smo jih kanili na vzorec moke AM-C, se je odbilo in skotalilo vstran od vzorca moke (Slika 3.13, levo), medtem ko je moka AM-L vodne kapljice absorbirala v trenutku, ko so padle nanjo (Slika 3.13, desno). Glede na to, da imajo tudi obroči nastalih zračnih mehurčkov v cementni pasti sveže betonske mešanice hidrofilni obroč, je možno, da prihaja do podobnega »odboja« zračnih mehurčkov od delcev apnenčeve moke AM-C v sveži betonski mešanici, kar lahko vodi v močno odzračenje mešanice. Še ena razlaga za prekomerno odzračenje bi lahko bila nekompatibilnost uporabljenega aeranta s to vrsto moke. Če zaključimo, projektiranje in mešanje aeriranih SCC mešanic z različnimi vrstami praškastih materialov ni trivialna naloga. Stabilnost sistema vnešenih zračnih por v sveži betonski mešanici je problem ekstremno kompleksne narave (Du, Folliard, 2005). Preostale izkušnje s projektiranjem aeriranih SCC mešanic smo predstavili v (Duh, Žarnić, Bokan-Bosiljkov, 2006).



Slika 3.12: Rezultati ponovno opravljene analize zrnastostne sestave uporabljenih apnenčevih mok
Fig. 3.12: Final results of particle size distribution analysis of used limestone powders

Za nadaljnje preiskave mehanskih lastnosti in obstojnosti izbranih SCC mešanic v sklopu doktorske disertacije je bilo potrebno zamešati veliko število čim bolj enakih SCC mešanic. Že v primeru uporabe istih šarž vseh frakcij agregata, apnenčevih mok, cementa in kemijskih dodatkov raztros obdelavnosti zaporedoma zamešanih SCC mešanic ni zanemarljiv. Ta raztros je prikazan v naslednjem poglavju, v preglednici (Preglednica 3.7), in sicer na primeru vgrajevanja različnih aeriranih SCC mešanic v AB elemente varnostne ograje tipa »New Jersey«. V primeru ponovnega zamešanja neke SCC mešanice iz novih pošiljk šarž ali v drugačnih temperaturnih pogojih, je praviloma potrebno količine kemijskih dodatkov ponovno določiti. Kljub temu se je izkazalo, da je z nekaj izkušnjami pri tem potrebnih kvečjemu 3 do 5 iteracij. K že navedenim ugotovitvam v tem poglavju bi še dodali, da je v primeru novih šarž drobnozrnatega agregata z večjim deležem praškastih delcev potrebno količino dodanega SP povečati, in obratno. Preostale izkušnje s projektiranjem SCC mešanic z različnimi vrstami agregata iz domačih nahajališč in z mineralnim dodatkom elektrofiltrski pepel smo opisali v (Trtnik, 2004), (Vetřih, 2004) in (Turk, 2005).



Slika 3.13: Preskus »hidrofilnosti« uporabljenih apnenčevih mok
 Fig. 3.13: Hydrophilic test of used limestone powders with water drops

3.2.5 Lastne izkušnje z vgrajevanjem SCC v večje AB elemente v laboratoriju in v betonarnah

V Konstrukcijsko prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani smo iz različnih SCC betonskih mešanic izdelali štiri skrajšane (dolžina 1 meter) AB varnostne ograje tipa »New Jersey« (Slika 3.14). Za takšen volumen smo potrebovali 8 laboratorijskih mešalcev betona.



Slika 3.14: Skrajšana AB varnostna ograja »New Jersey«: a) izdelan opaž; b) končni izdelek
 Fig. 3.14: Shortened New Jersey concrete barrier: a) manufactured formwork; b) finished element

V preglednici (Preglednica 3.7) je prikazana ponovljivost aeriranih SCC mešanic v laboratorijskih pogojih s konstitutivnimi materiali iz istih šarž. Koeficient variacije za razlez s posedom d_{SCC} je v povprečju le 3%, medtem ko je koeficient variacije za čas razlezanja T_{500} v povprečju kar 13%. Pri tem je potrebno upoštevati, da je vpliv človeka na rezultate metode merjenja časa pri razlezanju relativno velik. Ker smo v laboratoriju imeli na voljo le en mešalec, je med vgrajevanjem posamezne šarže (Slika 3.15) minilo približno 10 minut. Kot je bilo že navedeno v poglavju 2.2.3, se zaradi tiksotropičnosti sveže SCC mešanice pri tako velikih časovnih intervalih med posameznimi fazami večfaznega vgrajevanja SCC betona posamezni sloji ne mešajo več popolnoma (Slika 2.6). To je moč

opaziti na površini tako izdelanega elementa (Slika 3.14b). Preiskave z ultrazvokom so sicer pokazale, da je ta stik enako kompakten kot preostali predeli betona. Detajli so podani v (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004a).

Preglednica 3.7: Raztros obdelavnosti večkrat zamešanih SCC mešanic iz istih šarž sestavnih materialov
Table 3.7: Deviation in properties of repeatedly mixed SCC mixtures from the same parcels of materials

SCC mešanica	Lastnost	Zaporedna številka zamešane mešanice								\bar{X}	V_x
		1	2	3	4	5	6	7	8		
TA	d_{sc} (mm)	722	713	709	668	720	743	723	668	708	4%
	T_{500} (s)	3,9	3,6	5,2	7,1	4,4	4,9	3,4	5,6	4,8	26%
LGA	d_{sc} (mm)	678	675	683	685	680	698	688	698	686	1%
	T_{500} (s)	4,1	4,2	4,6	4,3	4,6	4,7	5,0	4,3	4,5	7%
LA1	d_{sc} (mm)	710	705	723	735	713	738	665	713	713	3%
	T_{500} (s)	3,0	4,0	3,3	3,6	3,7	3,2	4,1	3,5	3,6	11%
LA2	d_{sc} (mm)	688	713	625	663	665	658	713	713	680	5%
	T_{500} (s)	3,4	3,2	4,1	3,8	4,1	3,6	3,2	3,3	3,6	10%



Slika 3.15: Večfazno vgrajevanje SCC mešanic v laboratoriju
Fig. 3.15: Multi-layer casting of SCC mixtures in the laboratory

Poskus prenosa sprojektiranih SCC mešanic v laboratoriju na različne tipe betonskih mešalcev večjih kapacitet v realnih pogojih smo opravili v dveh betonarnah, in sicer v obratu GOBI podjetja Primorje d.d. iz Ajdovščine in v betonarni CGP Novo mesto. V slednji smo imeli na voljo več-kubični ponvasti mešalec z navpičnimi osmi mešanja (Slika 3.16, levo), v obratu GOBI podjetja Primorje d.d. pa mešalec z vodoravno osjo mešanja s prostornino 2 m³. Pri neposrednem prenosu receptur iz laboratorija, z upoštevanjem podatka o vlažnosti agregata v silosih, smo praviloma dobivali premajhne razleze s posedom (Slika 3.16, desno). Vzrokov za to je lahko več. Pri aeriranih SCC mešanicah smo prav tako dobivali nižje deleže zraka kot v laboratoriju. To bi lahko pomenilo, da z večanjem količine zamešane betonske mešanice učinek kemijskih dodatkov upada. Ustrezne samozgoščevalne lastnosti SCC mešanic v betonarnah smo praviloma dobili s povečanim deležem SP in aeranta glede na laboratorijsko recepturo za 50 litrov. Podobne spremembe glede učinka kemijskih dodatkov smo opazili že v laboratoriju, in sicer pri prenosu receptur iz 20-25 litrov na 40-50 litrov betona.



Slika 3.16: Betonski mešalec v betonarni CGP Novo mesto (levo) in premajhen razlez s posedom (desno)

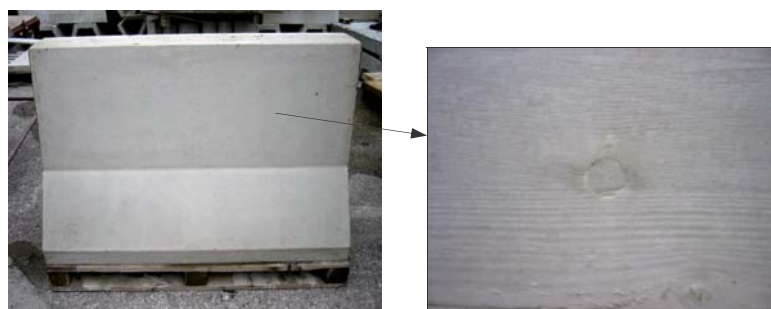
Fig. 3.16: Concrete mixer in CGP Novo mesto (left) and low slump flow (right)

V betonarni CGP Novo mesto smo v sklopu diplomske naloge Franca Turka (2005) vgradili SCC mešanico iz izhodiščne mešanice LN v skrajšan element AB varnostne ograje »New Jersey« (Slika 3.17). Izdelan AB element je bil odlične kvalitete, z zelo ostrimi robovi, površina v stiku z leseno opažno desko pa je popolnoma prevzela strukturo deske (Slika 3.18, desno). V obratu GOBI podjetja Primorje d.d. iz Ajdovščine smo imeli priložnost vgraditi SCC mešanico v originalen element AB varnostne ograje »New Jersey« (Slika 3.19). Ponovno se je pokazalo, da je pri večfaznem vgrajevanju SCC potrebno zagotoviti kontinuirno vgrajevanje betona v element, sicer je stik med dvema slojema betona, vgrajenima v časovnem intervalu več kot deset minut, opazen.



Slika 3.17: Vgrajevanje SCC mešanice v eni fazi, betonarna CGP Novo mesto

Fig. 3.17: Casting of designed SCC mixture in concrete plant CGP Novo mesto



Slika 3.18: Izdelan AB element odlične kvalitete, betonarna CGP Novo mesto

Fig. 3.18: Finished element of high quality, at concrete plant CGP Novo mesto



Slika 3.19: Izdelan AB element »New Jersey« v obratu GOBI podjetja Primorje d.d. iz Ajdovščine
Fig. 3.19: Finished full scale SCC element at concrete plant GOBI-Primorje from Ajdovščina

3.3 Projektiranje primerljivih vibriranih betonskih mešanic

Zadnji cilj projektiranja betonskih mešanic je bil projektiranje primerljivih vibriranih betonskih mešanic, tako aeriranih kot tudi neaeriranih, z ali brez apnenčeve moke. V prvi fazi smo izhajali iz recepture, ki se uporablja v enem izmed slovenskih obratov za izdelavo prefabrikatov. Gre za mešanico brez kakršnihkoli kemijskih ali mineralnih dodatkov, s primerljivim v/c razmerjem in količino cementa glede na projektirane neaerirane SCC mešanice. Njena sestava in lastnosti v svežem stanju so podane v preglednici (Preglednica 3.8) pod oznako LV. Iz te mešanice smo sprojektirali tudi aerirano betonsko mešanico pri istem v/c razmerju (oznaka LVA). Pri tem je iz rezultatov preiskav konsistence obravnavanih svežih betonskih mešanic (Preglednica 3.8, spodaj) lepo razvidno, da vnešene zračne pore povečujejo tudi obdelavnost vibriranih betonskih mešanic. Mešanica LVA je imela precej večji razlez in posed kot njej sorodna LV brez dodatka aeranta. Ta razlika je še toliko bolj očitna, ker smo mešanico LVA sprojektirali tako, da smo delež zraka večali na račun agregata. Poleg primerljivega v/c razmerja smo namreč želeli zadržati tudi enako količino cementa v mešanici.

V drugi fazi projektiranja betonskih mešanic, to so aerirane SCC mešanice z različnimi deleži zraka in z različnimi vrstami mineralnih dodatkov, smo sprojektirali tudi neaerirane in aerirane mešanice običajnega vibriranega betona z ali brez dodatka apnenčeve moke AM-L. Sestave teh mešanic so podane v 4. poglavju v preglednici (Preglednica 4.1). Zaradi želje po čimbolj primerljivih betonskih mešanicah, glede na sprojektirane aerirane SCC mešanice, smo tokrat izbrali nižje v/c razmerje (0,39). Tako smo tudi pri vibriranih mešanicah bili primorani dodati superplastifikator. S tem smo dosegli ustrezno kohezivnost vibrirane betonske mešanice in mehkoplastično konsistenco (posed $\Delta h = 100-150$ mm in razlez $d_{VB} = 420-480$ mm), da smo tudi v tem pogledu čim bližje SCC mešanicam. Preiskave so pokazale, da je za to potrebno dodati relativno veliko količino SP, in sicer 0,30-0,45%pr, kar je samo enkrat manj kot pri SCC mešanicah. Primerljive deleže zraka smo pri aeriranih vibriranih mešanicah dosegali z nekoliko manjšo količino aeranta kot pri SCC mešanicah.

Pri mešanju aeriranih vibriranih betonskih mešanic se je prav tako izkazalo, da naknadno dodajanje kemijskih dodatkov nima enakega učinka kot dodajanje med prvotnim zamešanjem in da obdelavnost vibriranega betona z dodatkom SP s časom upada. Iz rezultatov preiskav v preglednici (Preglednica

3.9) je namreč razvidno, da ima mešanica LVA2 takoj po zamešanju razlez in posed precej večji kot po sestavi enaka mešanica LVA1 po 40 minutah po prvotnem zamešanju. Pri tem je prav tako moč opaziti, da je delež vnešenega zraka v aerirani vibrirani mešanici precej manj odvisen od naknadnega mešanja in starosti mešanice kot je bilo to pri aeriranih SCC mešanicah. Do problema stabilnosti sistema zračnih por pri vibriranem betonu pride kasneje, in sicer pri vgrajevanju, saj ga je za ustrezno zgostitev mešanice v kalupu ali v opažu potrebno vibrirati (za vgrajevanje lastnih vzorcev smo uporabili vibracijsko mizico). Z vibriranjem se delež vnešenega zraka v sveži betonski mešanici praviloma močno manjša (Slika 3.20), pri tem pa je lahko vprašljiva tudi nastala mikrostruktura sistema zračnih por. Le-ta je natančneje predstavljena v 5. in v 6. poglavju.

Preglednica 3.8: Sestave in lastnosti vibriranih betonskih mešanic iz prve faze (vrednosti v kg/m³)

Table 3.8: Composition and characteristics of the first phase concrete mixtures (values in kg/m³)

Sestavina / lastnost	LV	LVA
drobljen agregat	1804	1648
cement	399	400
voda	179	180
aerant (%c)	-	0,06
v/c razmerje	0,45	0,45
prostornina paste (m ³)	0,346	0,343
prostornina paste z zrakom (m ³)	0,369	0,423
razlez* (mm)	343	437
posed† (mm)	20	60
delež zraka‡	2,3%	7,6%

* določen po standardu SIST EN 12350-5 (2001)

† določen po standardu SIST EN 12350-2 (2001)

‡ določen s preiskavo s porozimetrom (SIST EN 12350-7, 2001)

Preglednica 3.9: Projektiranje aerirane vibrirane mešanice z v/c = 0,39

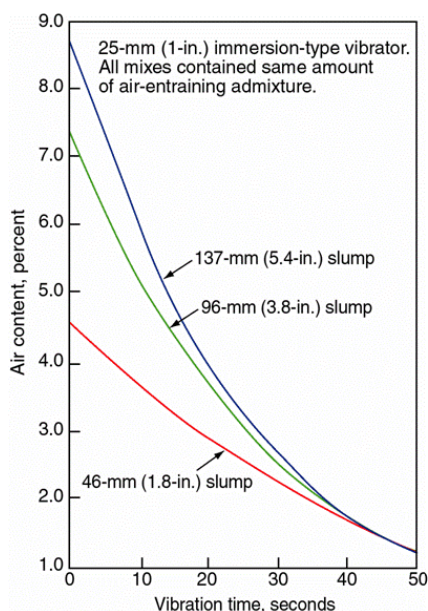
Table 3.9: Ordinary aerated concrete mix design at w/c ratio of 0.39

Mešanica	Δt^* (min)	Aerant (%c)	SP (%opr)	d_{VB} (mm)	Δh (mm)	p_v^{**} (%)
LVA1:	0	0,02	0,20	275	40	-
- dodamo SP	10	0,02	0,24	280	40	-
- dodamo SP	20	0,02	0,30	313	55	-
- dodamo SP	30	0,02	0,38	373	80	-
- dodamo SP	40	0,02	0,46	420	125	6,8
LVA2	0	0,02	0,46	535	230	6,5
LVA3	0	0,04	0,36	530	230	7,6
LVA4	0	0,05	0,28	453	165	8,3

* starost sveže betonske mešanice (merjeno od zaključka prvotnega zamešanja)

** poroznost sveže betonske mešanice določena iz prostorninske mase po enačbi (13)

Iz diagrama na sliki (Slika 3.20) je prav tako razvidno, da se tudi pri vibriranih mešanica učinek aeranta večja z večanjem obdelavnosti sveže betonske mešanice. Vse tri predstavljene betonske mešanice namreč vsebujejo enako količino aeranta, delež vnešenega zraka pa je pri bolj plastičnih mešanica, tj. pri mešanica z večjim posedom (*ang.* slump), precej večji.



Slika 3.20: Manjšanje deleža vnešenega zraka pri vibriranju sveže betonske mešanice (PCA, 2003)

Fig. 3.20: Decrease of entrained air content with fresh mixture vibration time (PCA, 2003)

Pri projektiranju aeriranih in neaeriranih vibriranih betonov z apnenčevo moko smo zaradi želje po neposredni primerjavi z SCC mešanica izbrali enako količino moke kot pri SCC mešanica, tj. 250 kg/m³. Pri tem se sicer zavedamo, da s takšno sestavo betonske mešanice prekoračimo priporočeno največjo količino finih delcev, podano v SIST EN 206-1 (Preglednica 3.10). Izkazalo se je, da je pri tako veliki količini mineralnega dodatka za doseganje mehkoplastične konsistence potrebno dodati veliko količino superplastifikatorja (več kot 0,40%pr). Pri tem je bila sveža mešanica betona tako kohezivna in »lepljiva«, da je bil laboratorijski mešalec med mešanjem na meji svoje moči. Na takšni mešanici je bilo prav tako zelo težko izvajati potrebne preiskave. Probleme smo imeli tudi z aeriranjem te mešanice in se zato zadovoljili z deležem zraka 4-5%. Mešanica se je sicer z uporabo vibracijske mizice izjemno lepo vgradila.

Preglednica 3.10: Največja priporočena količina finih delcev v betonski mešanici (SIST EN 206-1, 2003)

Table 3.10: Recommended maximum of powder content in concrete mixture (SIST EN 206-1, 2003)

Količina cementsa C (kg/m ³)	Največja priporočena količina finih delcev (kg/m ³)
≤ 300	400
350	450
≥ 350	$450 + (C - 350)$

Obsežne preiskave smo opravili tudi na vibriranih betonih z zamenjavo dela cementa z apnenčevo moko, in sicer z 0%, 10% in 20% zamenjavo. Izkušnje s projektiranjem tovrstnih betonov smo podali v poročilu (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004b). Pri tem projektiranju smo vzdrževali konstantno v/c razmerje, kar pomeni, da se je količina zamesne vode zmanjševala. Zanimivo bi bilo opraviti tudi preiskave pri konstantni količini zamesne vode ob zgoraj navedenih zamenjavah dela cementa z apnenčevo moko.

4 MEHANSKE LASTNOSTI SCC IN VIBRIRANIH BETONOV Z APNENČEVO MOKO

4.1 Uvod

Sistematične preiskave dolgoročnih lastnosti v strjenem stanju tako SCC kot tudi vibriranih betonov z večjim deležem apnenčeve moke so v Sloveniji šele na začetku. Razloga za to sta mladost SCC betona na eni strani in na drugi relativno pozna uveljavitev standarda SIST EN 206-1 kot slovenskega standarda, leta 2003, s katerim je vključevanje mineralnih dodatkov tipa I, kamor spada tudi apnenčeva moka, končno omogočeno tudi v Sloveniji. Bivši jugoslovanski standardi vključevanja apnenčeve moke v beton niso dovoljevali.

Prisotnost finih apnenčevih delcev v betonu ima tako s fizikalnega kot tudi s kemijskega vidika pomemben vpliv na lastnosti betona v svežem in strjenem stanju. Apnenčevi delci predstavljajo mesta za nukleacijo kristalov kalcijevega hidroksida in C-S-H gela v začetnem obdobju hidratacije cementa in tako pospešijo hidratacijo klinkerskih mineralov, še posebno alita (C_3S). Rezultat so višje zgodnje trdnosti betonov, ki vsebujejo fine apnenčeve delce (Péra, Husson, Guilhot, 1999; Bonavetti, *et al.*, 2000). Vključitev apnenčeve moke izboljša tudi spakiranost praškastih delcev v betonski mešanici. Rezultat tega je praviloma večja stabilnost sveže betonske mešanice, izboljšana obdelavnost (Nehdi, Mindess, Aïtcin, 1998; Nehdi, 2000; Ghezal, Khayat, 2002) in povečana gostota hidratizirane paste ter stičnega območja med hidratizirano pasto in večjimi zrni agregata ali armaturo (Trägårdh, 1999; Billberg, 1999b; Heikal, El-Didamony, Morsy, 2000). Zaradi posledično bolj finega in zavitega sistema por cementne paste vključitev apnenčeve moke modificira tudi spreminjanje vsebnosti vlage v betonu in s tem vpliva na velikost deformacij betona zaradi krčenja in lezenja (Belaribi, Pons, Perrin, 1997). V primerjavi z betoni brez večje količine finih apnenčevih delcev z enakim v/c razmerjem in enako vrsto portland cementa imajo betoni z večjim deležem apnenčeve moke ustrezne zrnivosti običajno izboljšane trdnostne karakteristike (Sonerbi, *et al.*, 2000; Petersson, 2001). Modul elastičnosti in deformacije zaradi krčenja in lezenja so lahko pri betonih z vključeno apnenčevo moko večji, enaki ali manjši (Gram, Piiparinen, 1999; Bui, Montgomery, 1999; Persson, 2001). Rezultati tujih raziskovalcev se zelo razlikujejo, saj te karakteristike niso odvisne le od učinka apnenčeve moke, ampak tudi od prostorninskega deleža hidratizirane paste v betonu. Ob tem je potrebno tudi poudariti, da raziskovalci primerljivost betonskih mešanic pojmujejo na različne načine. Nekateri za primerljivost zadržijo enako v/c razmerje, drugi enako razmerje med vodo in vsemi praškastimi delci, tretji enak delež paste ali stopnjo obdelavnosti v času vgrajevanja, itd. Tako se zaključki seveda močno razlikujejo. Morda bi bilo najbolj smotno za primerljivost betonskih mešanic vzeti enak trdnostni razred in enako stopnjo obdelavnosti, kar pa iz vidika projektiranja ni enostavna naloga.

Lastne preiskave mehanskih karakteristik aeriranih in neaeriranih betonov z dodatkom apnenčeve moke, ki so predstavljene v tem poglavju, smo osnovali na enakem v/c razmerju in čim bolj primerljivi količini cementa v betonski mešanici.

4.2 Betonske mešanice in materiali

Projektiranje betonskih mešanic in uporabljeni materiali so predstavljeni v 3. poglavju. Izmed več različnih vrst SCC mešanic smo za to poglavje eksperimentalnih preiskav izbrali najbolj učinkovito

SCC mešanico, katero smo naknadno še optimizirali tako, da smo izločili potrebo po sredstvu za kontrolo viskoznosti. Iz le-te smo sprojektirali dve neaerirani SCC mešanici: LN-43 z v/c razmerjem 0,43 in LN-39 z v/c razmerjem 0,39. Njeni sestavi sta podani v preglednici (Preglednica 4.1). Pri v/c razmerjih 0,43 in 0,39 ter čimbolj primerljivi količini cementa smo sprojektirali tudi dve neaerirani vibrirani betonski mešanici brez apnenčeve moke (mešanici LV-43 in LV-39). Pri v/c razmerju 0,39 pa še eno neaerirano vibrirano betonsko mešanico z apnenčevo moko (mešanica LVM) in dve aerirani vibrirani betonski mešanici z (mešanica LVMA) in brez apnenčeve moke (mešanica LVA8). Tudi sestave teh mešanic so podane v preglednici (Preglednica 4.1). V preglednici so podane tudi lastnosti betonskih mešanic v svežem stanju in pripadajoči koeficienti variacije V_x , v primeru, da je bilo mešanico za izdelavo vseh preizkušancev za načrtovane preiskave potrebno zamešati večkrat.

Preglednica 4.1: Sestave in lastnosti sprojektiranih SCC in vibriranih mešanic (vrednosti v kg/m^3)
Table 4.1: Composition and characteristics of the designed SCC and vibrated mixtures (values in kg/m^3)

Sestavina / lastnost	Neaerirane SCC mešanice		Neaerirane vibrirane mešanice			Aerirane vibrir. mešanice	
	LN-43	LN-39	LV-43	LV-39	LVM	LVMA	LVA8
drobljen agregat	1577	1539	1819	1790	1533	1514	1695
apnenčeva moka AM-L	249	262	-	-	261	258	-
cement CEM II/A-S 42,5 R	398	433	397	432	432	426	409
voda	171	169	171	168	168	166	159
superplastifikator	4,8	4,5	1,6	1,4	3,1	2,8	1,1
	0,74%pr	0,64%pr	0,40%pr	0,33%pr	0,45%pr	0,41%pr	0,28%pr
aerant	-	-	-	-	-	0,28	0,20
						0,07%c	0,05%c
v/c razmerje	0,43	0,39	0,43	0,39	0,39	0,39	0,39
delež paste (%)	42,3	43,6	33,7	34,5	43,5	42,9	32,7
delež zraka* (%)	2,1	2,1	2,5	2,7	2,6	3,8	7,9
	$V_x = 20\%$						
razlez s posedom d_{sc} (mm)	739	710	-	-	-	-	-
	$V_x = 3\%$						
čas razlezanja T_{500} (s)	4,8	5,8	-	-	-	-	-
	$V_x = 12\%$						
čas iztekanja t_{izt} (s)	14,1	15,2	-	-	-	-	-
	$V_x = 8\%$						
razlez d_{VB} (mm)	-	-	410	435	590	505	453
posed Δh (mm)	-	-	80	135	-	225	165

*določen iz prostorninske mase svežega betona v kalupih, po enačbi (13)

V preglednici (Preglednica 4.2) so podane sestave sprojektiranih aeriranih SCC mešanic z različnimi deleži zraka od 4-12% in z enako vrsto apnenčeve moke (mešanice LA4, LA6, LA8, LA10 in LA12) ter aerirane SCC mešanice z enakim deležem zraka ($4\pm 1\%$) in z različnimi vrstami apnenčevih mok (mešanice LA4, TA4 in CA4). K slednjim je dodana tudi sprojektirana neaerirana SCC mešanica z elektrofiltrskim pepelom, ki je imela ($4\pm 1\%$) delež zraka. Pri tej smo za vezivni faktor uporabljenega elektrofiltrskega pepela k_{EF} privzeli vrednost 0,4 in določili količino zamesne vode m_v preko vodo-vezivnega razmerja enakega 0,39:

$$\frac{m_v}{m_{vez}} = \frac{m_v}{m_c + 0,4m_{EF}} = 0,39 \Rightarrow m_v = 0,39(m_c + 0,4m_{EF}) . \quad (14)$$

Preglednica 4.2: Sestave in lastnosti sprojektiranih aeriranih SCC mešanic (vrednosti v kg/m³)
Table 4.2: Composition and characteristics of the designed aerated SCC mixtures (values in kg/m³)

Sestavina / lastnost	LA12	LA10	LA8	LA6	LA4	TA4	CA4	EF
drobljen agregat	1407	1429	1437	1467	1500	1499	1499	1472
apnenčeva moka AM-L	240	244	245	250	256	-	-	-
apnenčeva moka AM-T	-	-	-	-	-	255	-	-
apnenčeva moka AM-C	-	-	-	-	-	-	255	-
elektrofiltrski pepel	-	-	-	-	-	-	-	214
cement CEM II/A-S 42,5 R	396	403	405	413	422	422	422	396
voda	155	157	158	161	165	165	165	188
superplastifikator	3,9	4,0	4,0	4,1	4,2	5,2	4,4	4,2
aerant	0,62%pr 0,22%c	0,62%pr 0,17%c	0,62%pr *0,17%c	0,62%pr *0,16%c	0,62%pr 0,13%c	0,76%pr 0,10%c	0,65%pr 0,23%c	0,68%pr
v/c razmerje	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	†0,48
delež paste (%)	39,9	40,5	40,8	41,6	42,5	42,5	42,5	43,6
delež zraka‡ (%)	10,4	9,0	8,5	6,6	4,5	4,5	4,5	4,5
razlez s posedom d_{sc} (mm)	740	720	650	770	730	710	700	770
čas razlezanja T_{500} (s)	4,2	4,1	5,8	3,4	4,4	3,6	3,9	4,7
čas iztekanja t_{iz} (s)	6,9	7,1	9,0	10,4	10,2	9,4	11,0	10,8

* skupna količina dodanega aeranta med in po zamešanju betonske mešanice

† določeno preko izraza (14), tako da je vodo-vezivno razmerje enako 0,39

‡ določen iz prostorninske mase svežega betona v kalupih, po enačbi (13)

4.3 Priprava preizkušancev

Za izdelavo betonskih preizkušancev smo uporabljali izključno jeklene kalupe. Takoj po vgrajevanju betona v laboratorijskih pogojih (praviloma $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$) smo kalupe pokrili s polivinilom, da smo dosegli čim višjo relativno vlažnost (Slika 4.1, levo). Po enem dnevu odležavanja v teh pogojih smo preizkušance razkalupili in jih dali v vodo s kontrolirano temperaturo (praviloma $T_N = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$) v posebni komori (Slika 4.1, desno). Pred preiskavami smo vzorce površinsko osušili, preverili njihove dimenzije s kljunastim merilom (Slika 4.2, levo) in opravili kontrolo kvalitete vgrajenega betona z ultrazvočno metodo (Slika 4.2, desno). Metoda je natančneje opisana v (Duh, 2003).



Slika 4.1: Nega betonskih preizkušancev takoj po vgrajitvi v kalupe (levo) in po razkalupiranju (desno)

Fig. 4.1: Curing of concrete specimens after casting (left) and after demoulding (right)



Slika 4.2: Preverjanje dimenzij betonskih preizkušancev (levo) in ultrazvočna metoda (desno)

Fig. 4.2: Verification of specimen dimensions (left) and ultrasonic method (right)

4.4 Tlačna trdnost

Tlačno trdnost betona f_{cc} smo določali na kockah z robom 15 cm po postopku predpisanem v standardu SIST EN 12390-3 (2002). Porušno silo smo določali s pomočjo tlačne preše, pri čemer smo rezultate zajemali tudi z računalnikom (Slika 4.3). Rezultati preiskav so prikazani na diagramih (Slika 4.4) in (Slika 4.9). Pri tem oznaka LN-44 pomeni SCC mešanico LN z v/c razmerjem 0,44 (Preglednica 3.5) in LV-45 vibrirano mešanico LV z v/c razmerjem 0,45 (Preglednica 3.8). Če se najprej osredotočimo na diagram na sliki (Slika 4.4), lahko opazimo, da je izmed vseh betonskih mešanic z v/c oz. vodo-vezivnim razmerjem 0,39 najvišjo tlačno trdnost izkazal beton EF. Rezultat ne preseneča, saj je kljub korekciji v/c razmerja po izrazu (14) ta mešanica še vedno vsebovala največji delež veziva, in sicer ob predpostavki $k_{EF} = 0,4$:

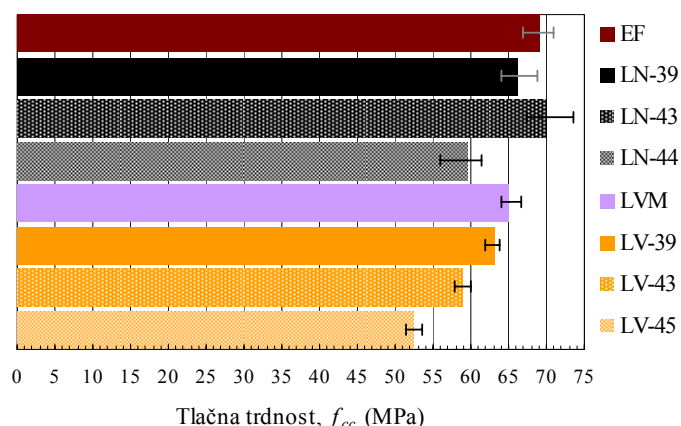
$$m_{vez} = m_c + 0,4m_{EF} = 482 \text{ kg/m}^3. \quad (15)$$

Tlačna trdnost betona namreč ni odvisna le od v/c razmerja (Slika 4.5a), temveč tudi od količine veziva (Slika 4.5b), kot sta nazorno pokazala tudi Korošak in Šušteršič (2007). Sicer močno odvisnost tlačne trdnosti od v/c razmerja potrjujejo tudi rezultati naših preiskav na diagramu (Slika 4.4), in sicer manjše v/c razmerje – večja tlačna trdnost. Pri tem odstopa edino SCC mešanica LN-43, ki bi morala praviloma izkazati manjšo tlačno trdnost kot LN-39. Razlogov za to je lahko več. Mešanici sta bili zamešani iz različnih šarž sestavnih materialov, ne velja pa zanemariti tudi različnih temperaturnih



Slika 4.3: Tlačna preša z računalniškim zajemanjem podatkov

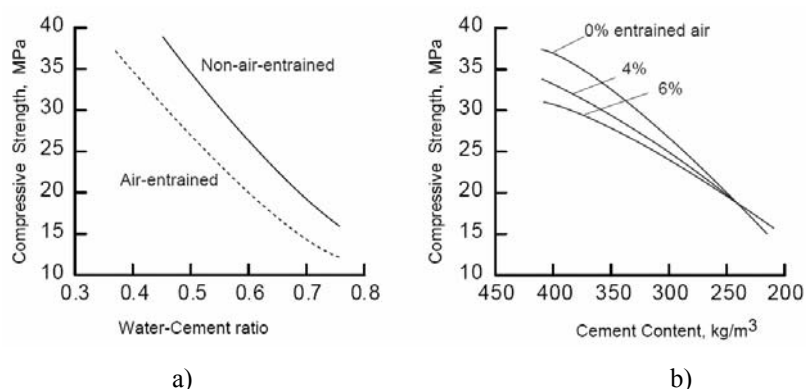
Fig. 4.3: Compression machine with data capturing device



Slika 4.4: 28-dnevna tlačna trdnost SCC in vibriranih betonov z in brez apnenčeve moke

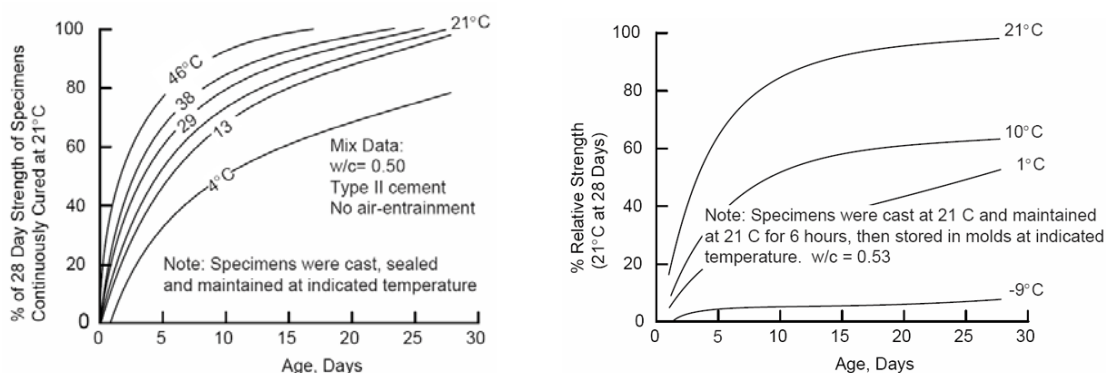
Fig. 4.4: 28-day compressive strength of SCC and vibrated concrete with and without limestone powder

pogojev v času mešanja in negovanja teh dveh mešanic. Mešanica LN-39 je bila zamešana in vgrajena pri $T \approx 15^\circ\text{C}$ ter negovana v vodi pri $T_N \approx 15^\circ\text{C}$, medtem ko mešanica LN-43 pri kontrolirani $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in $T_N = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Tlačna trdnost betona pri starosti 28 dni je namreč še vedno nekoliko odvisna od temperature betonske mešanice v času mešanja in vgrajevanja ter od temperature nege, kot nakazujeta diagrama na sliki (Slika 4.6). Iz diagrama na sliki (Slika 4.4) je prav tako razvidno, da vse betonske mešanice z dodatkom apnenčeve moke (LVM in vse LN-) v strjenem stanju pri starosti 28 dni izkazujejo precej višjo tlačno trdnost kot primerljive mešanice brez apnenčeve moke (vse LV-). Vključitev apnenčeve moke očitno res izboljša spakiranost praškastih delcev v betonski mešanici in s tem poveča gostoto hidratizirane paste ter stičnega območja med hidratizirano pasto in večjimi zrni agregata. Pri tem je seveda potrebno dodati zadostno količino superplastifikatorja, sicer mešanica ni kohezivna. Če še enkrat podrobno pogledamo sestavo vibrirane betonske mešanice z apnenčevo moko (LVM) v preglednici (Preglednica 4.1), lahko opazimo, da se od SCC mešanice z apnenčevo moko



Slika 4.5: Tlačna trdnost betona v odvisnosti od: a) v/c razmerja; b) količine cementa v betonski mešanici (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 4.5: Compressive strength of concrete in relation to: a) water-cement ratio; b) cement content in concrete mixture (Mehta, Monteiro, 2006)

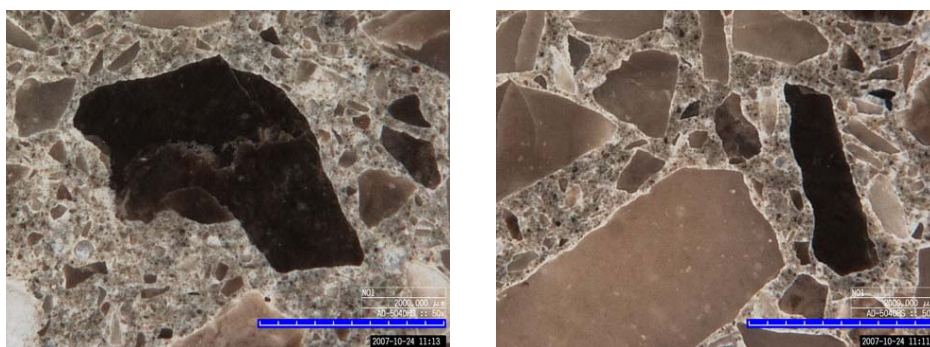


Slika 4.6: Odvisnost tlačne trdnosti betona od temperature zamešanja in nege (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 4.6: Compressive strength of concrete at different curing regimes (Mehta, Monteiro, 2006)

(LN-39) dejansko razlikuje le v količini dodanega superplastifikatorja. In sicer, za ustrezno kohezivnost mešanice LVM smo morali dodati 0,45%pr superplastifikatorja. V primeru, da bi dodali še malenkost večjo količino superplastifikatorja (0,64%pr), bi dejansko dobili samozgoščevalno mešanico LN-39. Na tem mestu bi kot zanimivost lahko dodali, da je morda tudi SCC nastal »po pomoti«, kot veliko drugih iznajdb (npr. tudi aeriranje betonskih mešanic, ki je predstavljeno v 5. poglavju).

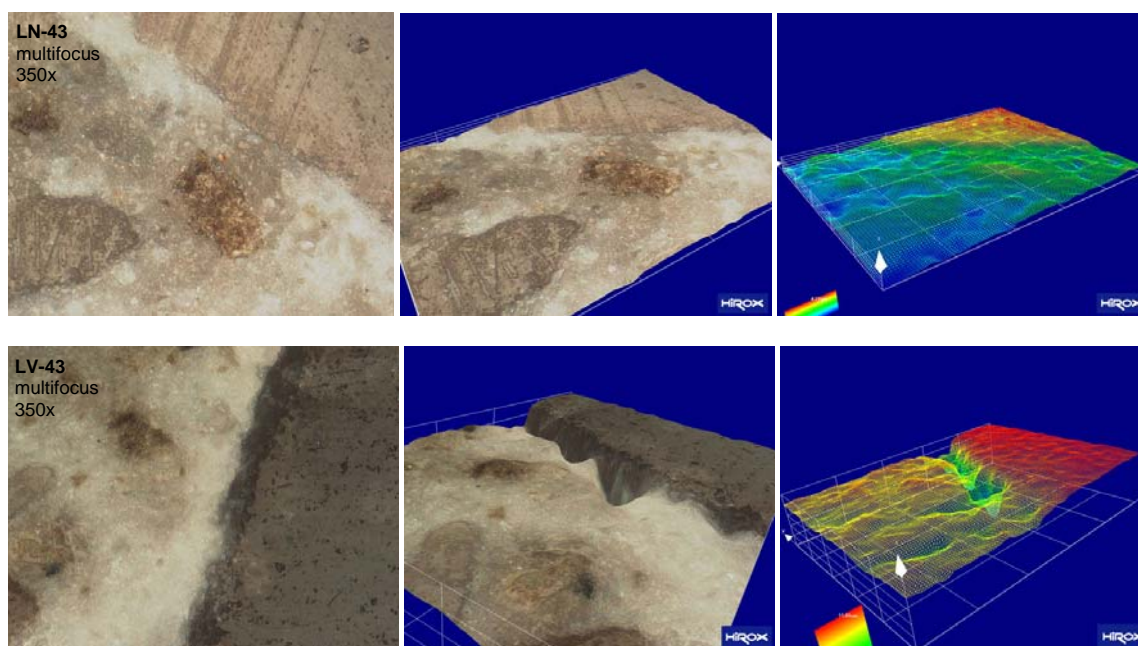
Iz diagrama na sliki (Slika 4.4) je tudi razvidno, da SCC mešanica LN-39 kljub skoraj popolnoma enaki sestavi kot vibrirana betonska mešanica LVM dosega še za odtenek višjo tlačno trdnost v strjenem stanju. Poleg nekoliko večje količine SP pri mešanici LN-39 je razlika med tema dvema mešanicama tudi v načinu vgrajevanja. Medtem, ko je izjemno težko obdelavno svežo betonsko mešanico LVM potrebno nekako spraviti iz mešalca v kalup in jo v njem vibrirati toliko časa, da se ustrezno zgosti, se na drugi strani izjemno lahko obdelavno SCC mešanico LN-39 dobesedno samo »vlije« v kalupe, kjer se samo zaradi delovanja lastne teže sama zgosti, odzrači in skoraj popolnoma znivelira. Pri tem ni le prednost SCC mešanice v boljši obdelavnosti temveč očitno tudi v nastali mikrostrukturi, da le-ta izkazuje višjo tlačno trdnost kot njej sorodna vibrirana betonska mešanica. Če primerjamo mikrostrukturi SCC mešanice LN-43 (Slika 4.7, levo) in vibrirane betonske mešanice LV-43 (Slika 4.7, desno), lahko opazimo nekakšne bele oborine okoli večjih zrn agregata skoraj izključno



Slika 4.7: Mikrostruktura SCC betona LN-43 (levo) in vibriranega betona LV-43 (desno)

Fig. 4.7: Microstructure of SCC LN-43 (left) and vibrated concrete LV-43 (right)

pri vibrirani mešanici. Če pogledamo ta stična območja med hidratizirano pasto in agregatnimi zrnji poglobljeje (Slika 4.8), lahko opazimo, da so te bele oborine pri vzorcu vibriranega betona vdolbine oz. mikro-jarki okoli agregatnih zrn. Zaradi vibriranja ima namreč voda v sveži betonski mešanici tendenco, da potuje proti vibrirajočim agregatnim zrnom. Tako pride v stičnem območju med cementnim kamnom in agregatnimi zrnji do povišanega v/c razmerja in posledično manj goste mikrostrukture z oslabiljenimi mehanskimi karakteristikami. Pri izdelavi obruskov betonskih vzorcev, prikazanih na sliki (Slika 4.8), so se tako ta oslabiljena stična območja pri vibriranem betonu (Slika 4.8, spodaj) v veliki meri izdolbla, medtem ko so pri SCC betonu ostala skoraj nedotaknjena.

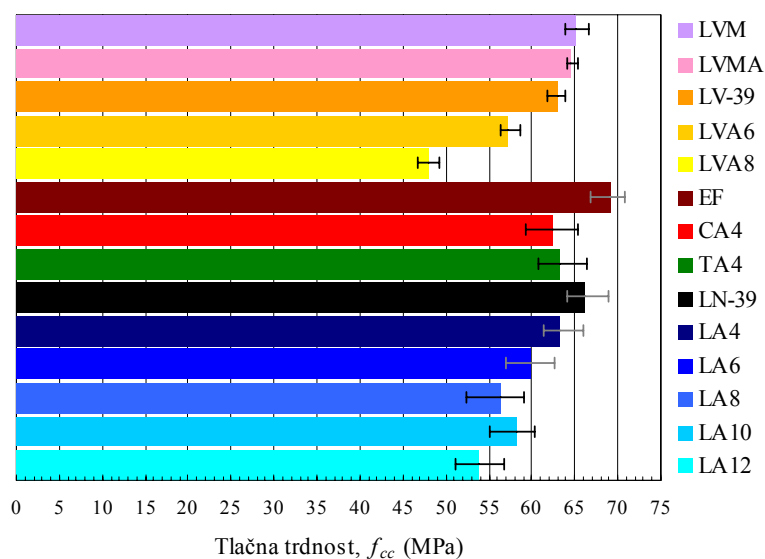


Slika 4.8: Stična območja med cementnim kamnom in agregatnimi zrnji pri SCC LN-43 (zgoraj) in pri primerljivem vibriranem betonu LV-43 (spodaj). Mikroskopske in digitalizirane slike (na desni) so rezultat topografske mikroskopske analize po patentu HIROX (2002)

Fig. 4.8: Transition zones between bulk cement paste and aggregate of SCC LN-43 (upper) and comparable vibrated concrete LV-43 (bottom). Photomicrographs and digital images (on the right) are the results of topographic microscopical analysis patented by HIROX (2002)

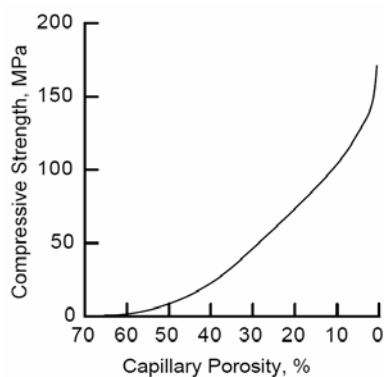
Stično območje med cementnim kamnom in agregatnimi zrnji je v splošnem »najšibkejši člen« v betonu. Zaradi tega praviloma oslabiljenega območja pride do porušitve betona pri relativno majhnih napetostih glede na mehanske karakteristike obeh glavnih komponent (Mehta, Monteiro, 2006). Ker je v primeru SCC zaradi izločitve potrebe po vibriranju sveže mešanice to stično območje očitno manj oslabiljeno, so tlačne trdnosti SCC višje od primerljivih vibriranih betonov.

Iz rezultatov preiskav tlačne trdnosti drugega sklopa betonskih mešanic, to so aerirane in neaerirane mešanice z v/c razmerjem 0,39, prikazanih na diagramu (Slika 4.9), je lepo razvidna odvisnost tlačne trdnosti betona od deleža zraka v betonu. Pri tem sicer na prvi pogled izstopa aerirana SCC mešanica LA10 s projektiranim 10% deležem zraka. Glede na monotono padajočo zvezo med poroznostjo in tlačno trdnostjo agregata in/ali cementnega kamna (Slika 4.10) bi namreč pričakovali, da bo imela

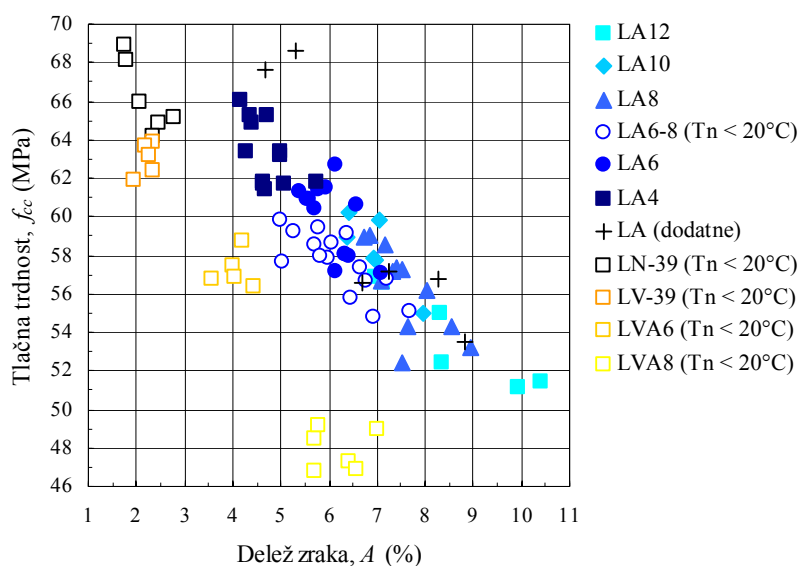


Slika 4.9: 28-dnevna tlačna trdnost SCC in vibriranih betonov z v/c razmerjem 0,39
 Fig. 4.9: 28-day compressive strength of SCC and vibrated concrete at w/c ratio of 0.39

mešanica LA10 nižjo tlačno trdnost kot mešanica LA8 s projektiranim 8% deležem zraka, in ne obratno, kot je razvidno iz diagrama (Slika 4.9). Razlog za to je sledeč. Pri mešanicah LA je bil primarni cilj vgraditi preizkušance za preiskavo odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju, tj. kocke z robom 10 cm. Preostale dele mešanic smo vgradili v kalupe 15x15x15 cm za preiskave tlačne trdnosti betona. Kot je bilo predstavljeno v 3. poglavju, v preglednici (Preglednica 3.4), aerirane SCC mešanice v primeru naknadnega mešanja praviloma močno izgubljajo delež zraka. Stabilnost sistema vnešenih zračnih mehurčkov v mešanico je pri tem odvisen od številnih dejavnikov. Tako so zamešane aerirane SCC mešanice delež zraka izgubljale različno hitro. Po izračunu deleža zraka iz prostorninske mase vgrajenega betona v kalupih 15x15x15 cm se je izkazalo, da so imeli vzorci mešanice LA10 v povprečju manjši delež zraka ($A = (7,0 \pm 0,6)\%$) kot vzorci mešanice LA8 ($A = (7,6 \pm 0,5)\%$) in so zato tudi izkazali višjo tlačno trdnost. Če izrišemo diagram tlačnih trdnosti posameznih preizkušancev glede na njihov dejanski delež zraka, je dobljena zveza monotono padajoča (Slika 4.11).



Slika 4.10: Odnos med poroznostjo kamna ali cementnega kamna in njegovo trdnostjo (Mehta, Monteiro, 2006)
 Fig. 4.10: Porosity-strength relation for aggregates and normally cured cements (Mehta, Monteiro, 2006)



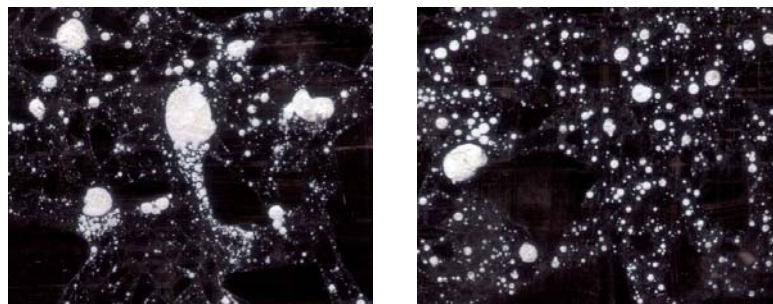
Slika 4.11: Tlačne trdnosti posameznih betonskih preizkušancev v odvisnosti od deleža zraka
Fig. 4.11: Compressive strength of concrete samples in relation to their total air content

Iz diagrama na sliki (Slika 4.11) je ponovno razvidno, da je mešanica LN-39 dosegla nekoliko nižje tlačne trdnosti kot bi pričakovali glede na izkazano približno linearno naraščanje tlačne trdnosti z manjšanjem deleža zraka v tem območju. Kot že rečeno, ta mešanica je bila zamešana, vgrajena in negovana pri nižjih temperaturah kot preostale mešanice LA. Če bi iz diagrama na sliki (Slika 4.11) napovedali tlačno trdnost tega SCC betona pri $A = 2\%$, bi bil rezultat $f_{cc} \approx 72$ MPa, kar bi tudi ustrezalo pričakovani tlačni trdnosti betona LN-39, če bi jo morali napovedati iz diagrama na sliki (Slika 4.4). Na tlačno trdnost betona znižanje temperature mokre nege T_N očitno deluje neugodno. To potrjujejo tudi vzorci mešanice aeriranega SCC LA6-8, ki so bili negovani pri $T_N \approx 15^\circ\text{C}$ (Slika 4.11, votli krogi). Le-ti so izkazali tudi do 10% nižjo 28-dnevno tlačno trdnost v primerjavi z vzorci enake SCC mešanice, ki so bili negovani pri $T_N = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Če analiziramo še velikost upada tlačne trdnosti betona glede na delež zraka, lahko iz diagrama na sliki (Slika 4.11) ocenimo, da je pri konstantnem v/c razmerju ta upad relativno velik. Za obravnavano SCC mešanico LA znaša približno 2,5 MPa na 1% zraka. Ker aerant oz. vnešeni zračni mehurčki na obdelavnost sveže betonske mešanice sicer učinkujejo podobno kot superplastifikator, bi lahko za doseganje enake obdelavnosti sveže betonske mešanice njeno v/c razmerje tudi manjšali. S tem bi deloma kompenzirali izgubo tlačne trdnosti na račun povečanja deleža vnešenega zraka. Iz slike (Slika 4.5a) je razvidno, da bi teoretično pri nekem aeriranem betonu lahko celo zadržali tlačno trdnost, če bi obenem v/c razmerje znižali za približno 0,1 (npr. iz 0,5 na 0,4).

Končno je iz diagrama na sliki (Slika 4.11) tudi razvidno, da je upad tlačne trdnosti vibriranega betona LVA z večanjem deleža zraka precej večji kot v primeru SCC mešanic LA. Znaša namreč približno 3,8 MPa na 1% zraka. Razlog za to je lahko večja gostota matrice cementnega kamna pri SCC mešanicah LA zaradi dodatka apnenčeve moke, ki je v sestavi vibriranih mešanic LVA ni. Pri analizi mikrostrukture teh betonov, ki je natančneje predstavljena v 5. poglavju, pa lahko opazimo tudi pojav močnega kopičenja zračnih mehurčkov pri mešanicah LVA (Slika 4.12, levo), kar bi lahko prav tako imelo neugoden učinek na tlačno trdnost betona. Do tega je prišlo najverjetneje zaradi vibriranja teh

betonskih mešanic. Pri aeriranih SCC mešanicah z uporabo enakih materialov do tega pojava namreč ni prišlo (Slika 4.12, desno). Vse kaže, da ima vibriranje neugoden učinek tudi na vnašanje zračnih por v beton. Namen slednjega je izboljšanje obstojnostnih karakteristik betona.



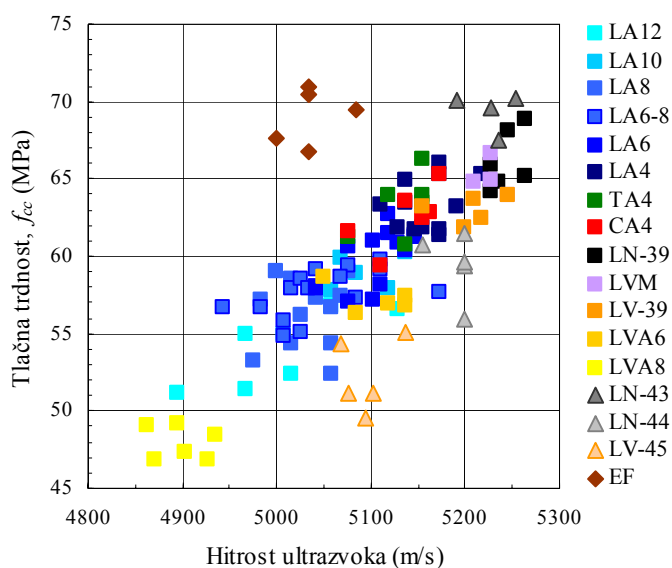
Slika 4.12: Kontrastirana površina prereza aeriranega vibriranega betona LVA8 (levo) in aeriranega SCC betona LA8 (desno). Sliki sta zajeti z optičnim čitalcem pri 1200 dpi. Širina slike je 3000 μm

Fig. 4.12: Contrast enhanced surfaces of a vibrated air-entrained concrete specimen (left) and an air-entrained SCC specimen (right). Images are captured with flatbed scanner at 1200 dpi. Images width is 3000 μm

Dobljene relativno visoke tlačne trdnosti obravnavanih SCC in vibriranih betonov sovpadajo tudi z rezultati opravljene ultrazvočne metode. Vse vrednosti v_{UZ} , določene iz meritev časa potovanja ultrazvoka t_{UZ} pri znani razdalji l_{UZ} po enačbi (16), so namreč bile tako za neaerirane kot tudi za aerirane betone krepko višje od 4570 m/s, kar bi naj pomenilo odlično kvaliteto betona (Preglednica 4.3). Najmanjša izmerjena vrednost je znašala $v_{UZ} = 4862$ m/s (vzorec betona LVA8), največja pa 5263 m/s (vzorec betona LN-39). Vsi rezultati ultrazvočne metode v povezavi s tlačno trdnostjo pripadajočih betonskih vzorcev so podani na diagramu (Slika 4.13). Iz diagrama je razvidna približno linearna zveza med izmerjeno hitrostjo ultrazvoka skozi betonske vzorce in njihovo tlačno trdnostjo, in sicer za vse SCC mešanice, ne glede na tip apnenčeve moke, pri v/c razmerju 0,39. K tej zvezi sovpadajo tudi vse vibrirane mešanice z ali brez apnenčeve moke in z v/c razmerjem 0,39. Mešanice s podobno sestavo, a z višjim v/c razmerjem (LN-44 in LV-45), padejo nekoliko pod izkazano linearno zvezo, kar nakazuje na to, da je za natančno napovedovanje tlačne trdnosti iz meritev z ultrazvokom najverjetneje potrebno poznati v/c razmerje betonske mešanice. Pri tem je verjetno potrebno poznati tudi sestavne materiale betonske mešanice, na kar nakazujejo dobljeni rezultati za beton EF, ki prav tako ne sovpadajo z izkazano zvezo med tlačno trdnostjo betonov z ali brez apnenčeve moke in hitrostjo ultrazvočnih valov skozi (Slika 4.13).

Preglednica 4.3: Ocena kvalitete betona z ultrazvočno metodo
Table 4.3: Estimation of concrete quality from ultrasonic method

Izmerjena hitrost ultrazvoka (m/s)	Pričakovana kvaliteta betona
> 4570	odlična
3660-4570	v splošnem dobra
3050-3660	vprašljiva
2130-3050	v splošnem slaba
< 2130	zelo slaba

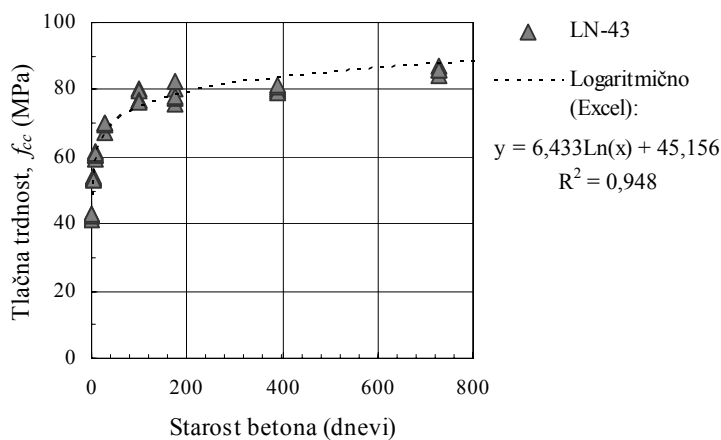


Slika 4.13: Zveza med tlačno trdnostjo betonskih vzorcev in hitrosti potovanja ultrazvoka skozi njih
Fig. 4.13: Compressive strength of concrete samples in relation to the velocity of ultrasonic sound through them

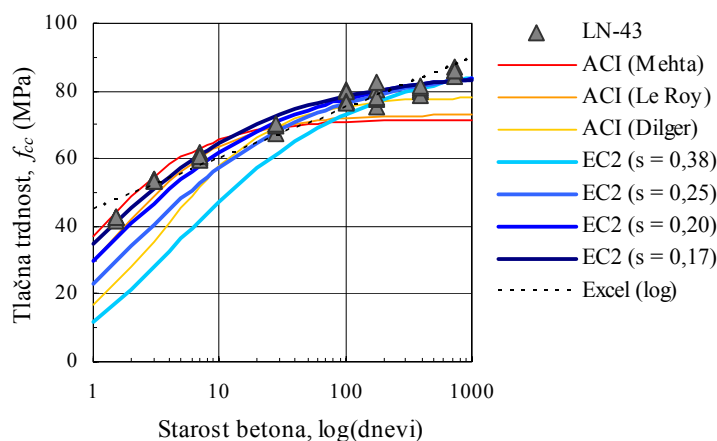
$$v_{UZ} = l_{UZ} / t_{UZ} \quad (16)$$

4.4.1 Časovni razvoj tlačne trdnosti SCC z apnenčevo moko

Za določitev računskega modela za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti SCC z apnenčevo moko smo izbrali SCC mešanico LN-43. Rezultati meritev tlačne trdnosti LN-43 pri 1, 3, 7 in 28 dnevih, 3 in 6 mesecih ter pri 1 in 2 letih so prikazani na diagramu (Slika 4.14). Diagramu je dodana tudi logaritmična krivulja, ki se po izračunu programa Excel najboljše prilega izkazanemu časovnemu naraščanju tlačne trdnosti.



Slika 4.14: Tlačna trdnost SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različni starosti betona
Fig. 4.14: Compressive strength SCC with limestone powder (LN-43) at different age



Slika 4.15: Znani računski modeli za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti betona

Fig. 4.15: ACI and EN models for concrete compressive strength evolution

Če to logaritmčno krivuljo pogledamo še enkrat na logaritemski časovni skali (Slika 4.15, črtkana črta), kjer krivulja dobi obliko premice, lahko opazimo, da v začetnem (1-3 dni) in v končnem (365 dni in več) delu diagrama ne ustreza časovnemu razvoju tlačne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko. Le-ta je na logaritemski časovni skali še vedno rahlo ukrivljen. To pomeni, da potrebujemo ustrežnejši računski model za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti SCC z apnenčevo moko. Tako poskusimo z računskim modelom iz Evrokoda 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005):

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}; \quad \beta_{cc}(t) = e^{s(1-\sqrt{28/t})}; \quad (17)$$

kjer je $f_{cm}(t)$ povprečna tlačna trdnost betona pri starosti t dni, $\beta_{cc}(t)$ je koeficient časovnega razvoja tlačne trdnosti betona, f_{cm} povprečna tlačna trdnost betona pri 28 dneh in s koeficient, ki je odvisen od vrste veziva. In sicer, za hitrovezoče cemente visoke trdnosti (CEM 42,5 R, CEM 52,5 N in CEM 52,5 R) je $s = 0,20$, za običajno in hitrovezoče cemente (CEM 42,5 N oz. CEM 32,5 R) je $s = 0,25$, za počasivezoče cemente (CEM 32,5 N) je $s = 0,38$. Če določimo vse te EC2 krivulje časovnega razvoja tlačne trdnosti betona tako, da 1-letna in 2-letna tlačna trdnost sovpadata z izkazano tlačno trdnostjo obravnavanega SCC z apnenčevo moko (Slika 4.15, svetlo modre krivulje), lahko opazimo, da dodatek relativno velike količine apnenčeve moke (250 kg/m^3) nekoliko poviša zgodnje tlačne trdnosti glede na pričakovane po EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) z uporabo hitrovezočih cementov visoke trdnosti. Tako smo z metodo najmanjših kvadratov ocenili vrednost za s in dobili računski model za časovni razvoj tlačne trdnosti SCC z apnenčevo moko:

$$f_{cm}^{SCC_{am}}(t) = e^{0,17(1-\sqrt{28/t})} f_{cm} . \quad (18)$$

Pri tem je statistika H^{χ^2} iz preizkušanja skladnosti (test χ^2) računskega modela z dejanskimi rezultati meritev tudi najmanjša (Preglednica 4.4), kar pomeni, da se ta model od vseh preizkušenih najbolj sklada z dejanskim izkazanim časovnim razvojem tlačne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko (LN-43). Preizkusili smo namreč tudi tri ACI računске modele, ki temeljijo na izrazu:

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \frac{t}{\alpha' + \beta' t}; \quad (19)$$

kjer je α' koeficient, ki je odvisen od vrste veziva, in β' koeficient, ki je odvisen od pogojev nege. Prvi ACI računski model smo vzeli iz (Mehta, Monteiro, 2006), ki bi naj veljal za visokotrdne betone:

$$f_{cm}^{HSC}(t) = f_{cm} \frac{t}{0,89 + 0,97t} \quad (20)$$

Iz diagrama na sliki (Slika 4.15) je razvidno, da ta model uspe dobro napovedati časovni razvoj tlačne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko samo v časovnem obdobju $t < 28$ dni. Pri večjih starostih betona model ACI (Mehta) podcenjuje izkazano tlačno trdnost SCC LN-43. Kot drugi ACI model smo preizkusili Le-Royev model (Le Roy, *et al.*, 1996, *cit. po* Saje, 2001):

$$f_{cm}^{HPC}(t) = f_{cm} \frac{t}{1,4 + 0,95t} \quad (21)$$

Tudi ta model pri večjih starostih betona podcenjuje tlačno trdnost obravnavanega SCC z apnenčevo moko. Kot zadnji ACI računski model smo preizkusili tudi Dilgerjev model (Dilger, *et al.*, 1997, *cit. po* Saje, 2001):

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \frac{t}{\gamma_f + \alpha_f t} \quad (22)$$

kjer je $\gamma_f = 28(1 - \alpha_f)$ in $\alpha_f = 1,03 - \frac{1}{3} v/c$ razmerja. Za obravnavan SCC LN-43 to pomeni $\gamma_f = 3,17$ in $\alpha_f = 0,89$, kar pa je že zelo blizu ACI modela za običajen beton z normalnim portlandskim cementom ASTM vrste I (ACI 209, 1992, *cit. po* Mehta, Monteiro, 2006):

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \frac{t}{4 + 0,85t} \quad (23)$$

Dilgerjev model zato, podobno kot EC2 modeli pri $s > 0,20$, pri starostih betona $t < 28$ dni podceni tlačno trdnost SCC z apnenčevo moko.

Preglednica 4.4: Vrednosti statistike H^{χ^2} pri preizkušanju skladnosti različnih računskih modelov z dejanskimi rezultati meritev tlačne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih

Table 4.4: Values of statistic H^{χ^2} from accordance test (χ^2 -test) of different models and the results of compressive strength tests on discussed SCC with limestone powder (LN-43) at different age

	EC2 ($s = 0,38$)	EC2 ($s = 0,25$)	ACI (Mehta)	EC2 ($s = 0,20$)	Excel (log)	EC2 ($s = 0,17$)
H^{χ^2}	171,1	41,6	23,4	10,7	6,9	2,9

4.5 Natezna trdnost SCC z apnenčevo moko

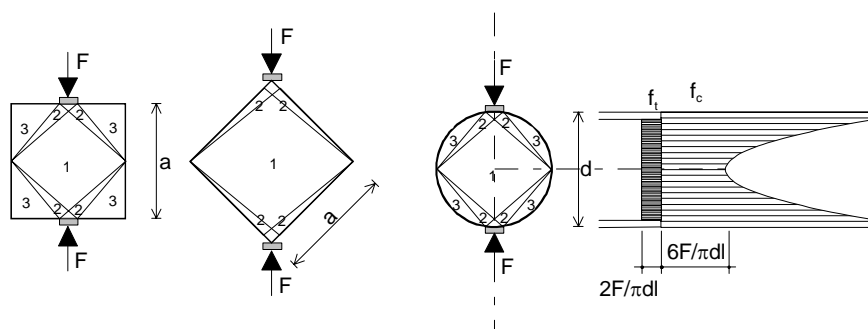
Natezno trdnost betona smo določali na betonskih kockah z robom 15 cm s preiskavo cepilne natezne trdnosti $f_{ct,sp}$ v skladu s SIST EN 12390-6 (2001). Pri tem smo upoštevali izraz za oceno osne natezne trdnosti betona f_{ct} iz Evrokoda 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005), in sicer:

$$f_{ct} = 0,9f_{ct,sp} \quad (24)$$

Rezultati izmerjene cepilne in ocenjene osne natezne trdnosti SCC z apnenčevo moko (LN-43) so prikazani v preglednici (Preglednica 4.5). Če izračunamo pričakovano natezno trdnost betona po EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) pri tlačni trdnosti $f_{ck,cube} = f_{cc} = 69,3$ MPa, ki smo jo izmerili na vzorcih LN-43 pri starosti $t = 28$ dni (glej poglavje 4.4), dobimo $f_{ctm} = 4,3$ MPa, kar je približno 20% več, kot je dosegel obravnavan SCC z apnenčevo moko. Do zelo podobnih rezultatov so prišli tudi Parra, Valcuende in Benlloch (2007). Z različnimi količinami dodatka apnenčeve moke so pri SCC mešanicah dobivali v povprečju 18% nižje cepilne natezne trdnosti kot pri običajnih vibriranih betonih z enako tlačno trdnostjo. Glede na to, da EFNARC v (The European Guidelines..., 2005) navaja, da lahko v istem trdnostnem razredu betona pri SCC pričakujemo enako natezno trdnost kot pri vibriranem betonu, bi bilo smiselno preizkusiti tudi SCC betone z drugimi vrstami ali manjšimi količinami mineralnega dodatka. Dinakar, Babu in Santhanam (2007) namreč podajajo rezultate z v povprečju 17% višjo cepilno natezno trdnostjo SCC z elektrofiltirskim pepelom kot pri običajnem vibriranem betonu z enako tlačno trdnostjo. Še več, Georgiadis, Anagnostopoulos in Sideris (2007) navajajo nekoliko višjo cepilno natezno trdnost SCC v primerjavi z vibriranim betonom pri enaki tlačni trdnosti tudi v primeru uporabe apnenčeve moke kot mineralnega dodatka k SCC, a pri približno enkrat manjših količinah ($100-140$ kg/m³) kot v našem primeru (250 kg/m³). Za doseganje ustreznih SCC lastnosti pri toliko nižji količini dodatnega praškastega materiala je bila dodana večja količina superplastifikatorja in uporabljeno nekoliko višje v/c razmerje. Končno bi bilo smiselno preveriti tudi vplive človeškega faktorja, stanja preizkušanca (RH, T) in raznih imperfekcij uporabljene opreme za izvajanje preizkusa cepilne natezne trdnosti. V primeru, da ne pride do predvidenega napetostnega stanja v preizkušancu, kot kaže skica (Slika 4.16), je namreč lahko natezna trdnost betona, ocenjena iz meritve tlačne sile F_{sp} pri cepilni porušitvi preko izraza (25), napačna. V izrazu (25) je h_{sp} višina preizkušanca in l_{sp} dolžina raznosa sile F_{sp} .

Preglednica 4.5: Ocenjena natezna trdnost SCC z apnenčevo moko (LN-43)
Table 4.5: Estimated tensile strength of SCC with limestone powder (LN-43)

	Številka preizkušanca					\bar{X}	V_x
	1	2	3	4	5		
$f_{ct,sp}$ (MPa)	3,5	3,6	3,6	4,2	3,9	3,8	8%
f_{ct} (MPa)	3,2	3,2	3,2	3,8	3,5	3,4	8%



Slika 4.16: Napetostno stanje v betonskem preizkušancu pri cepilnem nateznem preizkusu (Žarnić, *et al.*, 2008)
Fig. 4.16: Stress state in concrete specimen at splitting tensile strength (Žarnić, *et al.*, 2008)

$$f_{ct,sp} = \frac{2F_{sp}}{\pi h_{sp} l_{sp}} \quad (25)$$

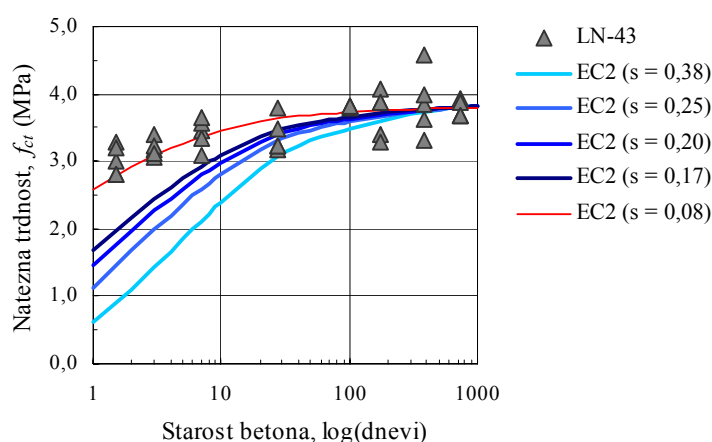
4.5.1 Časovni razvoj natezne trdnosti SCC z apnenčevo moko

Časovni razvoj natezne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko (LN-43) je prikazan na sliki (Slika 4.17). K diagramu so dodani tudi računski modeli za napovedovanje časovnega razvoja natezne trdnosti betona iz Evrokoda 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005):

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^s \cdot f_{ctm} ; \quad (26)$$

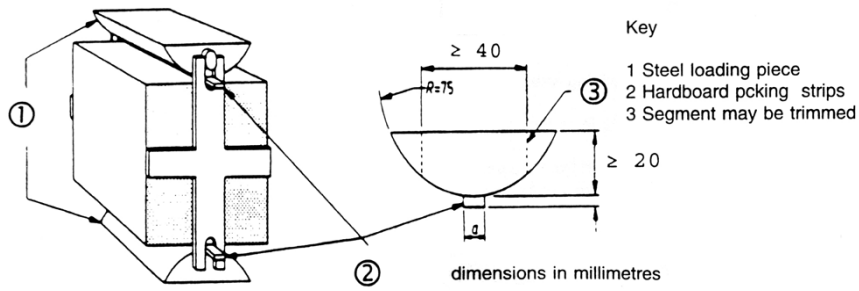
kjer je f_{ctm} povprečna natezna trdnost betona, $\lambda = 1$ za $t < 28$ in $\lambda = 2/3$ za $t \geq 28$. Za EC2 računske modele so izbrane enake vrednosti koeficienta s kot v poglavju 4.4.1 (Slika 4.17, modre krivulje) in dodatna vrednosti $s = 0,08$ (Slika 4.17, rdeča krivulja), ki se po metodi najmanjših kvadratov najbolje prilega rezultatom preiskave cepilne natezne trdnosti SCC LN-43 prevedenih na osno natezno trdnost f_{ct} po izrazu (24). Ta računski model je označen z rdečo barvo, ker dejanski razvoj natezne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko bolj verjetno ustreza računskemu modelu z višjim s , kot npr. 0,17. Zgodnje (1, 3 in 7-dnevne) relativno visoke natezne trdnosti, ki smo jih izmerili s cepilnim nateznim preizkusom na betonskih kockah z robom 15 cm so lahko v veliki meri posledica zaklinjanja zaradi uporabe ravnih jeklenih trakov širine 20 mm, kot kaže skica (Slika 4.16, levo). Pri višjih starostih betona je bil prvi »pok« ob natezni porušitvi betona veliko bolj očiten. Pri le-tem smo sicer odčitali silo F_{sp} . Da bi se tej nejasnosti izognili, bi bilo potrebno preiskave ponoviti z opremo, ki je predpisana v SIST EN 12390-6 (2001), in sicer v primeru betonskih kock ali prizem namesto ravnih jeklenih trakov ukrivljene jeklene elemente in lesene deščice širine < 20 mm, kot kaže skica (Slika 4.18). Pri tem do zaklinjanja najverjetneje ne bi prišlo.

Iz rezultatov na sliki (Slika 4.17) bi sicer lahko sklepali, da z določitvijo prave vrednosti koeficienta s za računski model napovedovanja časovnega razvoja natezne trdnosti SCC z apnenčevo moko lahko vzamemo računski model, ki je predpisan v EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005).



Slika 4.17: Časovni razvoj natezne trdnosti obravnavanega SCC z apnenčevo moko (LN-43)

Fig. 4.17: Tensile strength evolution of SCC with limestone powder (LN-43)



Slika 4.18: Ukrivljeni jekleni elementi za obremenitev pri cepilnem preizkusu (SIST EN 12390-6, 2001)

Fig. 4.18: Curved loading piece for splitting test (SIST EN 12390-6, 2001)

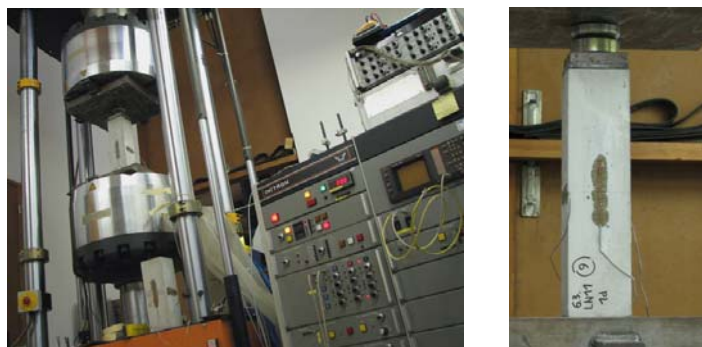
4.6 Statični modul elastičnosti

Statični modul elastičnosti betona smo določali na betonskih prizmah dimenzij 10x10x40 cm po postopku predpisanem v standardu DIN 1048 Teil 5 (1991). Preiskave smo opravili v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani na servohidravličnem preizkuševalnem stroju Instron (Slika 4.19, levo). Tipični postopek obremenjevanja je prikazan na sliki (Slika 4.20). Deformacije smo merili neposredno na preizkušancu, in sicer preko nalepljenih merilnih lističev, dveh v vzdolžni smeri in dveh v prečni smeri, na nasproti si ležečih stranicah preizkušanca, kot kaže slika (Slika 4.19, desno).

Iz rezultatov preiskav smo določali statični modul elastičnosti betona E_c po enačbi (27) in sekantni modul elastičnosti betona E_{cm} po enačbi (28). Pri tem je ε_v povprečna vzdolžna deformacija betonskega preizkušanca, σ_c pa napetost pri tlaku. Definiciji E_c in E_{cm} sta grafično prikazani na sliki (Slika 4.21). Rezultati so navedeni v preglednici (Preglednica 4.6).

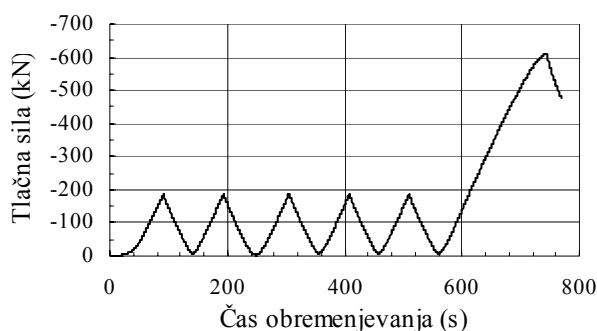
$$E_c = \frac{1/3 f_{cm} - 0,5 \text{ MPa}}{\varepsilon_v(\sigma_c = 1/3 f_{cm}) - \varepsilon_v(\sigma_c = 0,5 \text{ MPa})} \quad (27)$$

$$E_{cm} = \frac{0,4 f_{cm}}{\varepsilon_v(\sigma_c = 0,4 f_{cm})} \quad (28)$$



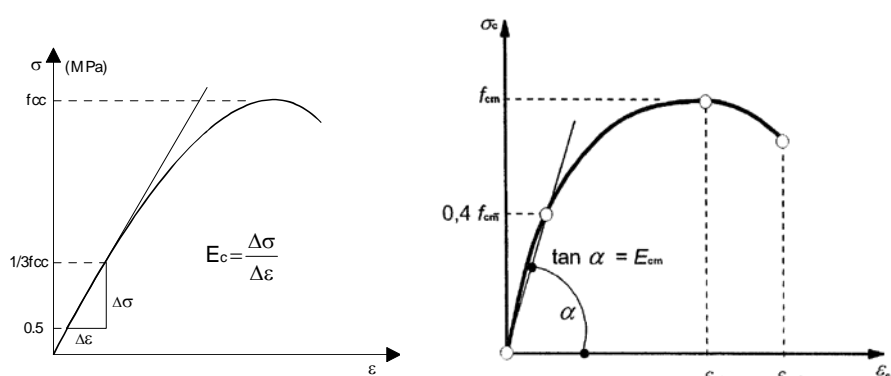
Slika 4.19: Preizkuševalni stroj z računalniško krmiljenim obremenjevanjem (levo) in preizkušane (desno)

Fig. 4.19: Testing machine with loading controlled system (left) and concrete specimen (right)



Slika 4.20: Tipični postopek obremenjevanja za določanje statičnega modula elastičnosti betona

Fig. 4.20: Typical loading procedure for determination of concrete static modulus of elasticity



Slika 4.21: Definicija statičnega (levo) in sekantnega (desno) modula elastičnosti betona

Fig. 4.21: Definition of static (left) and secant (right) modulus of elasticity of concrete

Preglednica 4.6: Statični in sekantni modul elastičnosti SCC z apnenčevo moko (LN-43)

Table 4.6: Static and secant modulus of elasticity of SCC with limestone powder (LN-43)

Modul elastičnosti SCC	Številka preizkušanca					\bar{X}	V_x
	1	2	3	4	5		
E_c (GPa)	44,9	45,1	44,2	44,6	43,5	44,5	1%
E_{cm} (GPa)	42,7	42,7	42,0	42,8	42,4	42,5	1%
E_c / E_{cm}	1,05	1,06	1,05	1,04	1,03	1,05	1%

Iz rezultatov v preglednici (Preglednica 4.6) je razvidno, da je raztros rezultatov relativno majhen. Iz razmerja med statičnim in sekantnim modulom elastičnosti lahko opazimo, da za obravnavan SCC statični modul elastičnosti, določen po enačbi (27), ustreza definiciji tangentnega modula elastičnosti po EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005), ki je $E_c = 1,05E_{cm}$. Če pri izkazani tlačni trdnosti obravnavanega SCC ($f_{ck,cube} = 69,3$ MPa) iz EC2 preberemo še pričakovan modul elastičnosti za tak beton ($E_{cm} = 38,3$ GPa), lahko opazimo, da ima obravnavan SCC z apnenčevo moko približno 10% večji modul elastičnosti. Ker je modul elastičnosti močno odvisen tudi od vrste uporabljenega agregata, je iz te primerjave sicer težko sklepati, da je dobljen modul elastičnosti SCC z apnenčevo moko večji od navedenega v EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) zaradi dodatka apnenčeve moke. Izmerjeni statični

elastični moduli elastičnosti običajnih vibriranih betonov iz enakega agregata ter brez apnenčeve moko, ki smo jih navedli v (Duh, 2003; Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004a in 2004b), pa z zgornjim niso primerljivi, ker so ti betoni izkazali precej nižjo tlačno trdnost od LN-43. Za primerjavo bi potrebovali vibrirane betonske mešanice iz enakega materiala in z enakimi tlačnimi trdnostmi. Tuji raziskovalci na tem področju (Georgiadis, Anagnostopoulos, Sideris, 2007; Dinakar, Babu, Santhanam, 2007) navajajo tudi izkazane manjše statične module elastičnosti SCC z različnimi vrstami mineralnega dodatka v primerjavi z običajnimi vibriranimi betoni. Kot najverjetnejši razlog za to navajajo nekoliko večji delež paste pri SCC v primerjavi z vibriranim betonom.

4.6.1 Časovni razvoj modula elastičnosti

Podobno kot pri razvoju računskega modela za napovedovanje časovnega razvoja tlačne in natezne trdnosti SCC z apnenčevno moko smo tudi za računski model časovnega spreminjanja modula elastičnosti tovrstnih SCC opravili preiskave sovisnosti napetosti in deformacij v betonu pri tlaku še na 1, 3 in 7 dni, 3 in 6 mesecev ter 1 in 2 leti starih vzorcih betona LN-43. Iz dobljenih rezultatov, ki so prikazani na diagramu (Slika 4.25), smo po formulah (27) in (28) določali E_c in E_{cm} v odvisnosti od starosti betona. Rezultati so podani v preglednicah (Preglednica 4.7)-(Preglednica 4.9).

Preglednica 4.7: Statični modul elastičnosti (v GPa) SCC z apnenčevno moko (LN-43) pri različnih starostih
Table 4.7: Static modulus of elasticity (in GPa) of SCC with limestone powder (LN-43) at different age

Starost betona (dnevi)	Številka preizkušanca					\bar{X}	V_x
	1	2	3	4	5		
1	-	35,1	34,9	34,4	34,5	34,7	1%
3	41,3	-	41,1	41,2	40,3	41,0	1%
7	41,3	41,8	42,6	42,7	43,0	42,3	2%
28	44,9	45,1	44,2	44,6	43,5	44,5	1%
100	47,0	46,5	-	-	46,2	46,6	1%
176	46,2	44,8	45,6	47,2	-	46,0	2%
390	47,6	47,2	47,2	46,8	46,7	47,1	1%
727	47,5	47,8	47,5	47,8	-	47,6	0%

Preglednica 4.8: Sekantni modul elastičnosti (v GPa) SCC z apnenčevno moko (LN-43) pri različnih starostih
Table 4.8: Secant modulus of elasticity (in GPa) of SCC with limestone powder (LN-43) at different age

Starost betona (dnevi)	Številka preizkušanca					\bar{X}	V_x
	1	2	3	4	5		
1	-	32,3	31,3	31,9	31,9	31,9	1%
3	39,2	-	40,2	38,5	38,2	39,0	2%
7	40,5	39,7	40,7	40,5	40,7	40,4	1%
28	42,7	42,7	42,0	42,8	42,4	42,5	1%
100	45,4	44,9	-	-	45,2	45,2	1%
176	44,4	43,8	43,8	45,7	-	44,5	2%
390	46,4	46,3	46,8	45,6	45,9	46,2	1%
727	46,1	46,9	45,7	46,0	-	46,2	1%

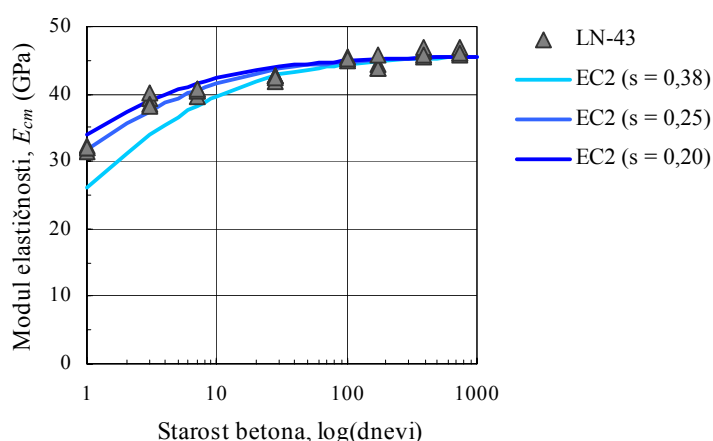
Preglednica 4.9: Razmerje med statičnim in sekantnim modulom elastičnosti SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih

Table 4.9: Ratio of static to secant modulus of elasticity of SCC with limestone powder (LN-43) at different age

Starost betona (dnevi)	Številka preizkušanca					\bar{X}	V_x
	1	2	3	4	5		
1	-	1,09	1,11	1,08	1,08	1,09	1%
3	1,05	-	1,02	1,07	1,06	1,05	2%
7	1,02	1,05	1,05	1,05	1,06	1,05	1%
28	1,05	1,06	1,05	1,04	1,03	1,05	1%
100	1,03	1,03	-	-	1,02	1,03	1%
176	1,04	1,02	1,04	1,03	-	1,03	1%
390	1,03	1,02	1,01	1,03	1,02	1,02	1%
727	1,03	1,02	1,04	1,04	-	1,03	1%

Iz rezultatov v preglednicah (Preglednica 4.7)-(Preglednica 4.9) je razvidno, da modul elastičnosti SCC z apnenčevo moko s časom nekoliko narašča, medtem ko razmerje med statičnim in sekantnim modulom elastičnosti s starostjo betona v povprečju nekoliko pada. Na diagramu (Slika 4.22) je časovni razvoj E_{cm} za obravnavan SCC z apnenčevo moko (LN-43) prikazan tudi grafično. K diagramu so dodani trije predlagani računski modeli časovnega spreminjanja modula elastičnosti betona glede na različne vrste veziva. Iz diagrama je razvidno, da lahko tudi za časovno spreminjanje modula elastičnosti SCC z apnenčevo moko uporabimo EC2 model (SIST EN 1992-1-1, 2005) z vrednostjo koeficienta $s = 0,25$:

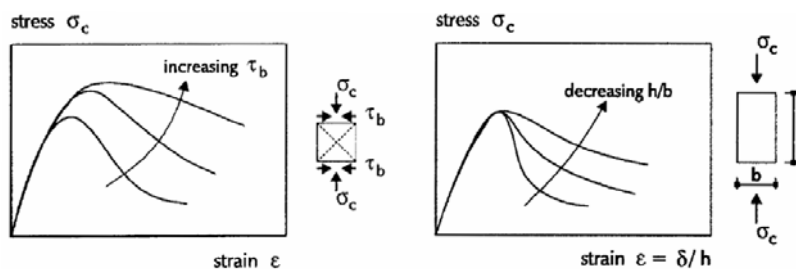
$$E_{cm}(t) = \left(e^{0,25(1-\sqrt{28/t})} \right)^{0,3} E_{cm} . \quad (29)$$



Slika 4.22: Časovni razvoj statičnega modula elastičnosti SCC z apnenčevo moko (LN-43)
Fig. 4.22: Evolution of secant modulus of elasticity of SCC with limestone powder (LN-43)

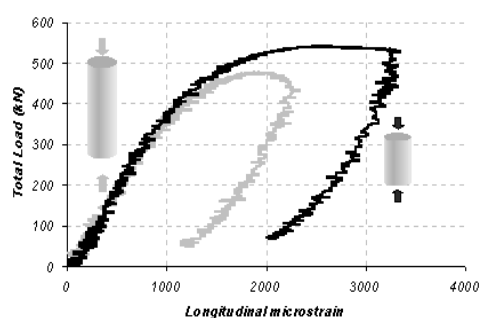
4.7 Duktilnost

Za projektiranje AB konstrukcij je poznavanje sovisnosti med napetostmi in deformacijami betona zelo pomembno (RILEM..., 2000). Številne preiskave tujih raziskovalcev na tem področju so pokazale, da sta največja dosežena napetost f_{cm} in nadaljnja oblika σ - ε krivulje (t.i. mehčanje) močno odvisni od geometrije betonskega preizkušanca ter od robnih pogojev preiskave. Kotsovos (1983, *cit. po* RILEM..., 2000) je pokazal, da ima trenje τ_b med obremenilno ploščo in betonskim preizkušancem pomemben vpliv na izkazan f_{cm} in duktilnost, kot kaže skica (Slika 4.23, levo). Povečanje τ_b bi naj vodilo v bolj duktilno obnašanje betonskega preizkušanca. Van Mier (1984, *cit. po* RILEM..., 2000) je pokazal, da na izkazano mehčanje betonskega preizkušanca pri enosnem tlaku močno vpliva tudi njegova vitkost. Bolj vitek preizkušanelec bo izkazal manj duktilno obnašanje kot manj vitek preizkušanelec iz enakega betona (Slika 4.23, desno). Bonfiglioli in Pascale (2000) sta pokazala, da vitkost betonskega preizkušanca vpliva tudi na doseženo f_{cm} . Bolj vitki preizkušanci so pri enosnem tlaku izkazali manjšo porušno deformacijo ε_{cu1} in tudi manjšo tlačno trdnost f_{cm} ter deformacijo pri tej napetosti ε_{c1} , kot kaže slika (Slika 4.24).



Slika 4.23: Vpliv podpiranja (levo) in vitkosti betonskega preizkušanca (desno) na njegovo obnašanje pri enosnem tlaku (RILEM..., 2000)

Fig. 4.23: Effect of boundary restraint (left) and concrete specimen slenderness (right) on the compressive stress-strain behaviour (RILEM..., 2000)

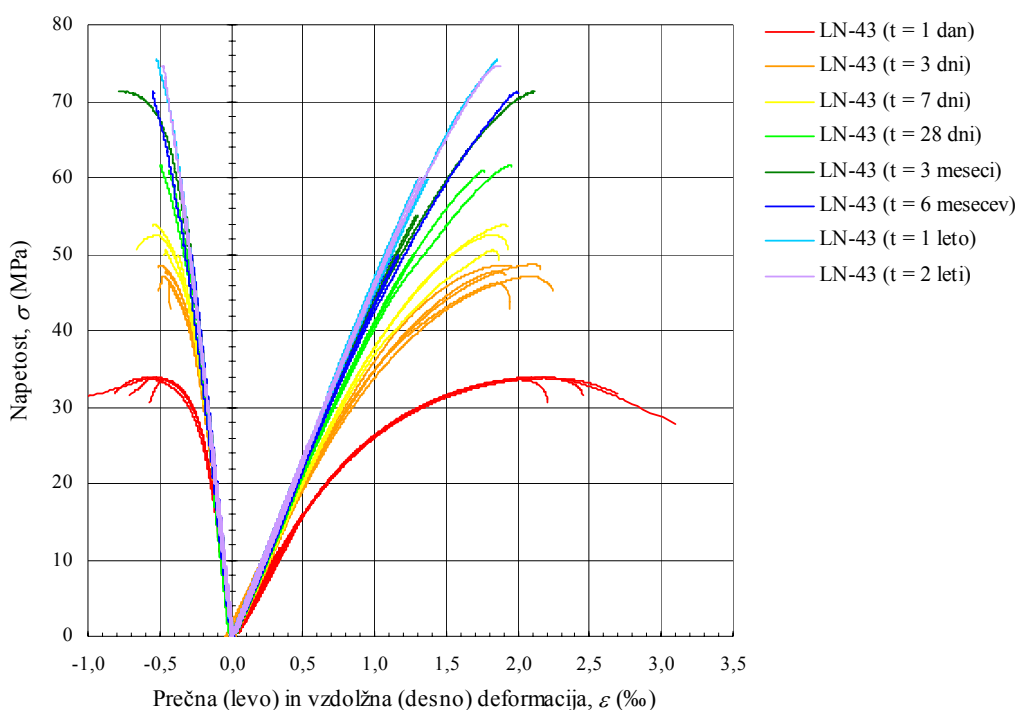


Slika 4.24: Odnos med vzdolžno deformacijo in tlačno silo (Bonfiglioli, Pascale, 2000)

Fig. 4.24: Longitudinal microstrain vs. total load (Bonfiglioli, Pascale, 2000)

Za določanje duktilnosti betona bi torej najprej potrebovali validirano in standardizirano metodo. Ker metoda, s katero so bile v Evrokodu 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) določene mejne deformacije betona ε_{cu1} in ε_{c1} v posameznem trdnostnem razredu, ni navedena, je te vrednosti težko primerjati z dobljenimi rezultati lastnih preiskav. Kot že rečeno, lastne preiskave enosnega tlaka smo opravili na

prizmah dimenzij 10x10x40 cm, kar je sicer za določitev duktilnosti zelo neugoden primer. RILEM (2000) v svojih zadnjih priporočilih namreč navaja kot maksimalno razmerje med višino in širino betonskega preizkušanca za določanje duktilnosti betona z enosnim tlakom $h_{pr}/b_{pr} = 2$, oz. še natančneje priporoča prizme dimenzij 10x10x20 cm ali valje s premerom 10 cm in višino 20 cm. Rezultati lastnih preiskav so prikazani na sliki (Slika 4.25). Iz diagrama na sliki (Slika 4.25) je lepo razvidno, da pri starosti betona 1 dan uporabljene dimenzije preizkušanca 10x10x40 cm ($h_{pr}/b_{pr} = 4$) še ne predstavljajo problema pri določanju duktilnosti. Še vedno pa iz zgoraj navedenih razlogov (Slika 4.24) pričakujemo nižje vrednosti za f_{cm} , ε_{c1} in ε_{cu1} , kot so pričakovane za obravnavan SCC (LN-43). Pri višjih starostih betona rezultati enoosne tlačne preiskave potrdijo pričakovane probleme pri ocenjevanju deformacij ε_{c1} in ε_{cu1} pri tako vitki geometriji preizkušancev. Iz diagrama na sliki (Slika 4.25) je razvidno, da je v območju napetosti blizu tlačne trdnosti oz. deformacije ε_{c1} prišlo do predčasne porušitve bodisi zaradi prepoznega ali prepočasnega nižanja tlačne sile s preizkuševalnim strojem ali zaradi uklona preizkušanca, na kar nakazujejo tudi do 50% razlike v izkazanih vzdolžnih deformacijah na nasprotnih stranicah preizkušancev pri porušitvi δ_{ε_v} . Te razlike vzdolžnih δ_{ε_v} in prečnih δ_{ε_p} deformacij pri posameznih preizkušancih so podane v preglednicah (Preglednica 4.10) in (Preglednica 4.11). Za deformacije, prikazane na diagramu (Slika 4.25) so vzeta povprečja med obema vzdolžnima δ_{ε_v} in prečnima δ_{ε_p} deformacijama na posameznem preizkušancu. V preglednici (Preglednica 4.12) so navedene tudi dosežene maksimalne tlačne napetosti pri preizkušancih dimenzij 10x10x40 cm $\sigma_{c,max}$ v primerjavi s tlačno trdnostjo tega betona f_{cm} , določeno na preizkušancih dimenzij 15x15x15 cm. Kot pričakovano, so vitke prizme dosegale nižjo tlačno trdnost kot kocke iz enakega betona (LN-43), in sicer v povprečju 0,91 f_{cm} .



Slika 4.25: Odnos med napetostmi in deformacijami za SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri enosnem tlaku pri različnih starostih betona

Fig. 4.25: Relationship of stress and strain for SCC with limestone powder (LN-43) subjected to uniaxial compression at different age

Če iz dobljenih rezultatov, pri katerih ni prišlo do predčasne porušitve zaradi vitke geometrije preizkušancev, poskušamo oceniti duktilnost obravnavanega SCC z apnenčevo moko (LN-43), dobimo vrednosti $\varepsilon_{cl} \approx 2,2\%$ in $\varepsilon_{cu1} \approx 3,1\%$. Iz diagrama na sliki (Slika 4.25) je tudi razvidno, da s staranjem betona naraščata le tlačna trdnost f_{cm} in statični modul elastičnosti betona E_{cm} , medtem ko deformacija pri tlačni trdnosti betona ε_{cl} ostaja približno enaka. Za natančnejšo oceno ε_{cl} bi bilo potrebno preiskave ponoviti na manj vitkih preizkušancih dimenzij 10x10x20 cm. Ker vemo, da smo z uporabljenim vitko geometrijo preizkušancev na t.i. »varni strani«, lahko sklepamo, da je pričakovana deformacija pri tlačni trdnosti SCC z apnenčevo moko večja od 2,2%, kar ustreza predpisani vrednosti za ε_{cl} v EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) za pripadajoč trdnostni razred običajnega vibriranega betona C 55/67, ki znaša $\varepsilon_{cl} = 2,5\%$. Kot že rečeno, za oceno nadaljnje oblike krivulje σ - ε in porušne deformacije ε_{cu1} bi bilo potrebno opraviti preiskave še na preizkušancih dimenzij 10x10x20 cm. Pri starosti betona 1 dan sicer porušna deformacija obravnavanega SCC z apnenčevo moko z upoštevanjem vitkosti preizkušancev najverjetneje ustreza predpisani vrednosti za ε_{cu1} v EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) za pripadajoč trdnostni razred običajnega vibriranega betona, ki znaša $\varepsilon_{cu1} = 3,5\%$.

Preglednica 4.10: Razlika med vzdolžnima deformacijama na nasprotnih stranicah posameznega preizkušanca

Table 4.10: Difference between longitudinal strains on opposite sides of each specimen

Starost betona (dnevi)	Številka preizkušanca					\bar{X}
	1	2	3	4	5	
1	-	17%	7%	22%	42%	22%
3	5%	-	10%	13%	11%	10%
7	5%	0%	2%	6%	5%	4%
28	9%	5%	11%	22%	38%	17%
100	51%	15%	-	-	9%	25%
176	29%	32%	3%	34%	-	25%
390	19%	34%	3%	1%	6%	13%
727	10%	13%	8%	13%	-	11%

Preglednica 4.11: Razlika med prečnima deformacijama na nasprotnih stranicah posameznega preizkušanca

Table 4.11: Difference between transversal strains on opposite sides of each specimen

Starost betona (dnevi)	Številka preizkušanca					\bar{X}
	1	2	3	4	5	
1	-	19%	22%	35%	50%	32%
3	29%	-	1%	43%	5%	20%
7	46%	46%	34%	7%	67%	40%
28	21%	17%	24%	18%	28%	22%
100	9%	30%	-	-	125%	55%
176	32%	9%	35%	3%	-	20%
390	14%	19%	10%	14%	12%	14%
727	1%	21%	1%	17%	-	10%

Preglednica 4.12: Razlika med doseženimi maksimalnimi tlačnimi napetostmi pri vitkih prizmah in tlačno trdnostjo betona (LN-43)

Table 4.12: Difference between maximum achieved compressive stress for slender prisms and compressive strength of concrete (LN-43)

Starost betona (dnevi)	1	3	7	28	100	176	390	727
$\sigma_{c,max}$ (MPa)	33,8	47,6	52,3	61,2	71,3	71,2	75,5	74,6
f_{cm} (MPa)	*34,9	53,7	60,4	69,3	78,4	77,8	80,0	85,8
$\sigma_{c,max}/f_{cm}$	0,97	0,89	0,87	0,88	0,91	0,92	0,94	0,87

* vrednost je ocenjena iz računskega modela časovnega razvoja tlačne trdnosti SCC LN-43 (18)

Deformacije pri enosnem tlaku smo merili tudi v prečni smeri zaradi želje po oceni Poissonovega koeficienta SCC z apnenčevo moko, in sicer preko zveze:

$$\nu = \frac{\varepsilon_p(\sigma_c = 1/3 f_{cm})}{\varepsilon_v(\sigma_c = 1/3 f_{cm})} \quad (30)$$

Rezultati so prikazani v preglednici (Preglednica 4.13). Poissonov koeficient s starostjo SCC z apnenčevo moko nekoliko narašča. Pri 28 dnevih je znašal $\nu^{LN-43} = 0,23$, kar je nekoliko več kot navajata EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) za običajni vibriran beton, $\nu = 0,2$, in Gradbeniški priručnik (Berdajs, *et al.*, 1998), $\nu = 0,16-0,20$ pri tlačni obremenitvi.

Preglednica 4.13: Poissonov koeficient SCC z apnenčevo moko (LN-43) pri različnih starostih betona
Table 4.13: Poisson's ratio of SCC with limestone filler (LN-43) at different age

Starost betona (dnevi)	Številka preizkušanca					\bar{X}	V_x
	1	2	3	4	5		
1	-	0,20	0,19	0,21	0,22	0,20	6%
3	0,24	-	0,24	0,22	0,22	0,23	5%
7	0,23	0,22	0,24	0,23	0,23	0,23	4%
28	0,22	0,22	0,22	0,22	0,25	0,23	6%
100	0,23	0,23	-	-	0,25	0,24	5%
176	0,24	0,27	0,22	0,25	-	0,25	7%
390	0,26	0,26	0,25	0,24	0,25	0,25	2%
727	0,26	0,26	0,24	0,24	-	0,25	4%

V (Duh, 2003; Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004a in b) smo podali tudi rezultate enosnih tlačnih preiskav aeriranih SCC in običajnih vibriranih betonov. Iz teh rezultatov smo lahko sicer določili le statični modul elastičnosti E_{cm} in Poissonov koeficient betona ν , saj smo preizkušance (prizme 10x10x40 cm) obremenjevali le do približno $0,8f_{cm}$. Te rezultate z zgornjimi ni smiselno primerjati, ker so betoni dosegali različne tlačne trdnosti.

4.8 Krčenje

V sklopu eksperimentalnega preizkušanja lastnosti SCC mešanic smo opravili tudi meritve celotnega krčenja SCC iz prvotne faze projektiranja (Preglednica 3.5) in običajnega vibriranega betona brez apnenčeve moke (Preglednica 3.8). Rezultati so podani v (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004a). SCC betoni so izkazali nekoliko (5-10%) večje krčenje kot vibriran beton. Razlog za to bi lahko bil dodatek apnenčeve moke, ki pospeši hidratacijo cementa. Intenzivnejša hidratacija cementa pomeni hitrejšo porabo vode v betonu, kar ima za posledico večje avtogeno krčenje (Saje, 2001). Nekoliko večje krčenje pri SCC bi lahko bilo tudi posledica večje količine paste. Manj agregata namreč nudi manjši odpor krčenju cementne paste (Saje, 2001).

Opravili smo tudi meritve celotnega krčenja vibriranih betonov, pri katerih smo del cementa zamenjali z apnenčevo moko. Rezultate teh preiskav smo objavili v (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004b). Ker je bila pri vzdrževanem konstantnem v/c razmerju količina cementa zaradi zamenjave z apnenčevo moko vedno manjša, je bilo tudi celotno krčenje betona nekoliko manjše. Pri konstantnem v/c razmerju se z manjšanjem količine veziva namreč manjša tudi krčenje betona (Slika 2.7).

Piérard, Dieryck in Desmyter (2005) so opravili preiskave krčenja SCC mešanic z relativno veliko količino apnenčeve moke (240 kg/m^3) ločeno, tako da so ocenili delež avtogenega krčenja in delež krčenja zaradi sušenja glede na celotno krčenje betona. Rezultati celotnega krčenja sovpadajo z našimi rezultati ($\sim 0,35\%$ oz. $\sim 350 \mu\text{m/m}$). Nadalje, bistvene razlike v celotnem krčenju SCC z apnenčevo moko in vibriranega betona brez apnenčeve moke prav tako ni, je pa pri tem izjemno velika razlika v deležu avtogenega krčenja in krčenja zaradi sušenja. Izkazalo se je, da je delež avtogenega krčenja glede na celotno krčenje močno odvisno od v/c razmerja. SCC in vibrirani betoni z nizkim v/c razmerjem so izkazali precej večje avtogeno krčenje ter sorazmerno manjše krčenje zaradi sušenja kot SCC in vibrirani betoni z višjim v/c razmerjem. Precej večje avtogeno krčenje visokotrdnih betonov z nizkim v/c razmerjem navaja in razloži tudi Saje v svoji doktorski disertaciji (2001). Ker imajo SCC mešanice praviloma nizko v/c razmerje, lahko tudi iz tega razloga pričakujemo rahlo povečano krčenje SCC, če ne celotno, pa zagotovo avtogeno, kar pomeni, da je SCC v prvih dneh nujno potrebno negovati z vodo, da čimbolj zmanjšamo neugodne posledice krčenja betona.

5 OBSTOJNOST SCC IN VIBRIRANIH BETONOV Z APNENČEVO MOKO

5.1 Uvod

Pri projektiranju AB konstrukcij projektanta v glavnem zanimajo le mehanske lastnosti betona, praksa pa velikokrat pokaže, da pride do nevarnosti predčasne porušitve AB konstrukcij zaradi slabih obstojnostnih karakteristik (Mehta, Monteiro, 2006). V primeru, da slabo odporen beton proti zmrzovanju in tajanju izpostavimo zmrzali, se bodo namreč s časom oslabile tudi njegove mehanske karakteristike. Na resnost problema obstojnosti AB konstrukcij opozarja tudi dejstvo, da v razvitih državah preko 40% vseh gradbenih del predstavljajo sanacije in vzdrževanje obstoječih objektov (Mehta, Monteiro, 2006). Kaže, da smo priča ogromni potrošnji sredstev zaradi slabe ozaveščenosti bodisi gradbenih inženirjev ali izvajalcev glede pomembnosti obstojnostnih karakteristik betona.

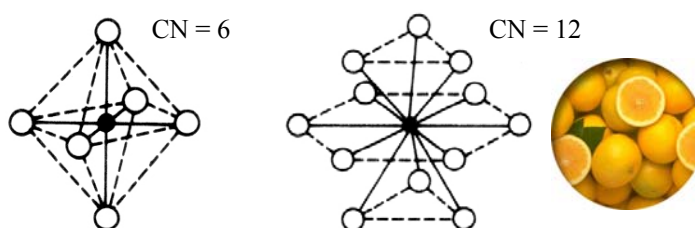
Obstojnost betonov z vključenim večjim deležem apnenčevih finih delcev je še relativno slabo raziskano področje. Rezultati do sedaj opravljenih preiskav kažejo, da sta notranja odpornost betona z vključenim večjim deležem apnenčevih finih delcev proti zmrzovanju in tajanju ter napredovanje karbonatizacije enaki kot pri betonu brez dodanih apnenčevih finih delcev, če sta trdnost in poroznost obeh vrst betonov enaki (Ranc, R., *et al.*, 1991). Kaže pa, da je lahko v določenih primerih pomembno zmanjšana odpornost tovrstnih betonov proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilnih soli, njihova obstojnost v morskem okolju in njihova odpornost na delovanje sulfatov, še posebej, če je delež vključenih apnenčevih finih delcev relativno velik (Ranc, *et al.*, 1991; Irassar, Bonavetti, Gonzalez, 2003). Končni produkt hidratacije trikalcijskega aluminata (C_3A) iz cementa in $CaCO_3$ iz apnenčeve moke je mono-karboaluminat, ki velja za nestabilnega v sulfatnem okolju in v okolju s prisotnostjo kloridov (Bonavetti, Rahhal, Irassar, 2001). Večina raziskovalcev tudi ugotavlja, da se odpornost površine tovrstnih betonov proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilnih soli slabša z večanjem finosti dodane apnenčeve moke, a so mnenja ponovno zelo deljena (Audenaert, Boel, De Schutter, 2002 in 2005; Persson, 2003a; Zhu, Bartos, 2003). Pri tem je potrebno opozoriti na dejstvo, da se lahko apnenčeve moke med seboj razlikujejo tudi po mineraloški sestavi in površinskih lastnostih delcev, ki jih raziskovalci praviloma ne navajajo.

Na obstojnostne karakteristike betona ima pomemben vpliv tudi temperatura mokre nege, ki je prav tako ne bi smeli zanemarjati (Friebert, 2004). Ponovno je potrebno poudariti, da samo enako v/c razmerje še ni zadosten pogoj za primerljivost betonskih mešanic. Pri tem je pomembna tudi konsistenca oz. stopnja obdelavnosti betonske mešanice v času vgrajevanja, kvaliteta vgrajevanja, itd. Dokler vseh teh dejavnikov, ki vplivajo na obstojnost betona, ne identificiramo in končno tudi kontroliramo, so lahko dobljeni rezultati preiskav tudi posledica kakšnega drugega vpliva kot npr. le spremembe finosti uporabljene apnenčeve moke. Končno je potrebno še navesti, da za preizkušanje obstojnosti betona v različnih agresivnih okoljih v svetu ali v Evropi ni enotnih metod preiskav. Tako ni rečeno, da so rezultati različnih raziskovalcev neposredno primerljivi. Z različnimi metodami namreč ni rečeno, da preiskujemo enako lastnost materiala.

Lastne preiskave obstojnostnih karakteristik aeriranih in neaeriranih betonov z dodatkom apnenčeve moke, ki so predstavljene v tem poglavju, smo osnovali na enakem v/c razmerju, primerljivi količini veziva v betonski mešanici in čim bolj primerljivi stopnji obdelavnosti v času vgrajevanja. V primeru odstopanj od teh pogojev smo mešanice ustrezno označili za pomoč pri diskusiji rezultatov.

5.2 Odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju

Beton je precej bolj porozen material kot izgleda na prvi pogled. Poroznost običajnega cementnega kamna je približno 30%. Ulm (2005) je na CMMC konferenci v Glasgowu zelo nazorno predstavil poroznost cementnega kamna z nizko ali visoko gostoto. Prostorsko porazdelitev produktov hidratacije cementa v cementnem kamnu z nizko gostoto je primerjal s prostorsko porazdelitvijo naključno porazdeljenih pomaranč v neki posodi, pri čemer bi naj bilo koordinacijsko število enako $CN = 6$ (Slika 5.1, levo) in gostota matrice cementnega kamna le 64% (36% poroznost). Porazdelitev produktov hidratacije cementa v cementnem kamnu z visoko gostoto pa je primerjal s porazdelitvijo kar najbolj učinkovito porazdeljenih pomaranč v posodi, pri čemer je $CN \approx 12$ (Slika 5.1, desno) in gostota matrice cementnega kamna 74% (26% poroznost).

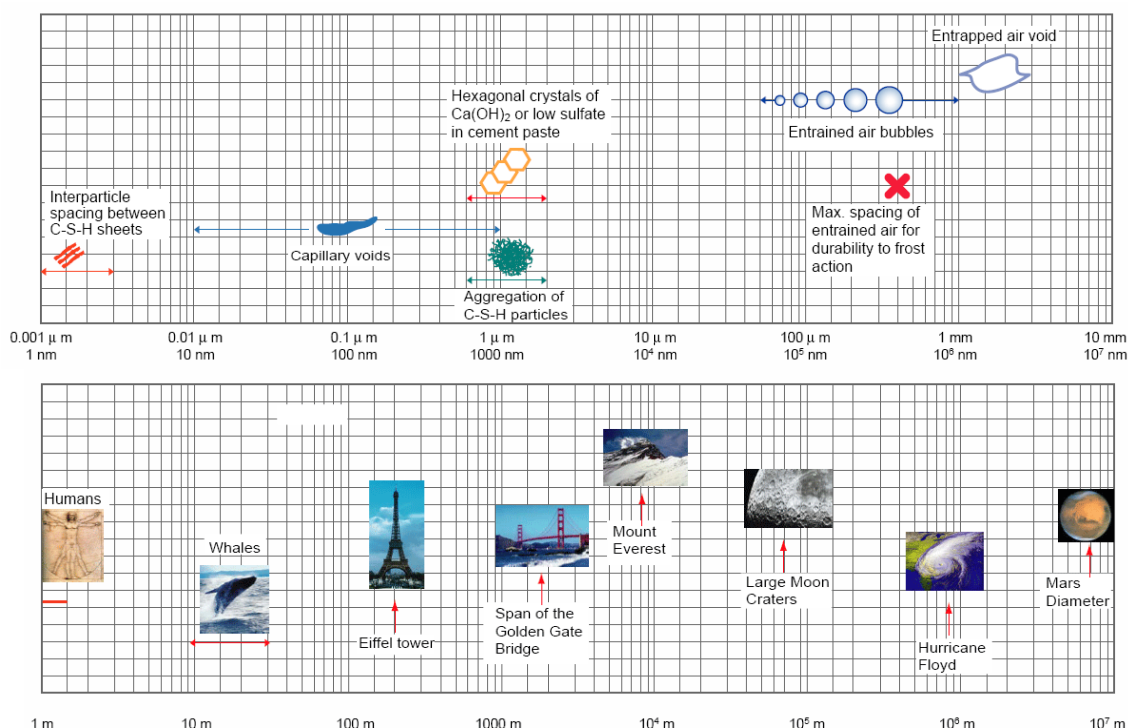


Slika 5.1: Koordinacijsko število in pripadajoča koordinacijska geometrija cementnega kamna z nizko (levo) in visoko (desno) gostoto (Shackelford, 1990)

Fig. 5.1: Coordination number and coordination geometry of low density (left) and high density (right) hydrated cement paste (Shackelford, 1990)

S poroznostjo cementnega kamna v strjenem betonu mislimo na kapilarne pore dimenzij 0,01-10 μm in na gel pore, ki so manjše od 10 nm (St John, Poole, Sims, 1998). Za lažjo predstavbo velikosti vseh vrst por, odprtih in produktov hidratacije v betonu sta Mehta in Monteiro (2006) predstavila ta razmerja na človeku bolj predstavljaljivih dimenzijah (Slika 5.2). Iz primerjalnega diagrama na sliki (Slika 5.2) je lepo razvidno, kako majhne so gel pore in kapilarne pore v primerjavi z človeškemu očesu že vidnimi nekaterimi večjimi vnešenimi porami, ki nastanejo zaradi delovanja aeranta, in lunke, ki predstavljajo zajet zrak v matrici betona praviloma zaradi slabega zgostitve mešanice v času vgrajevanja. Gre za enaka razmerja kot med velikostjo človeka in živali ter velikostjo večjih kraterjev na Luni in premera Marsa.

Tako porozna matrica običajnega betona je tudi eden glavnih vzrokov za relativno slabo obstojnost betona v raznih agresivnih okoljih. Kapilare cementnega kamna omogočajo vdor vode tako v matrico betona kot tudi v zrna agregata, pri tem pa lahko pride še do transporta morebitnih agresivnih ionov v beton (Mehta, Monteiro, 2006). Eden takšnih agresivnih vplivov, kateremu smo priča tudi v Sloveniji, je zmrzal v ali brez prisotnosti talilnih soli. Prvič, gre za neugoden vpliv zmrzovanja vode v kapilarah betona, kar povzroča hidravlični pritisk v betonu (Mehta, Monteiro, 2006). Voda ima v trdnem stanju (led) namreč približno 9% večji volumen kot v tekočem stanju. In drugič, kristalizacija soli povzroča še dodatne notranje pritiske v betonu. Posledica teh pritiskov je razpokanje in luščenje betona, kot kaže primer na sliki (Slika 5.3). Gre za najbolj neugodno stopnjo izpostavljenosti betona po SIST EN 206-1 (2003), in sicer XF4 (vodoravne betonske površine, izpostavljene vlagi, sredstvom za tajanje in zmrzovanju). Ostale stopnje izpostavljenosti betona so navedene v (Mehle, 2004).



Slika 5.2: Razmerja med velikostmi odprtin v cementnem kamnu betona (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 5.2: Dimensional range of solids and pores in a hydrated cement paste (Mehta, Monteiro, 2006)

Glavni ukrepi za povečanje odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju so:

- izdelava betona optimalne poroznosti, kar dosežemo z optimalno količino vode za vgrajevanje betona (čim manjše v/c razmerje) in z ustrezno nego betona;
- dodajanje aeranta sveži betonski mešanici, s čemer se v beton vnesejo majhni zračni mehurčki, ki v strjenem betonu predstavljajo območja, kamor se lahko voda iz kapilar v času zmrzovanja širi;
- preprečevanje vdora vode v matrico betona z uporabo vodoneprepustnih površinskih premazov.

SIST EN 206-1 (2003) in SIST 1026 (2004) v ta namen npr. za najvišjo stopnjo izpostavljenosti XF4 priporočata v/c razmerje manjše ali enako 0,45, vsebnost cementa (vrste CEM I) $m_c \geq 340 \text{ kg/m}^3$, trdnostni razred vsaj C30/37 in vsebnost zraka $A = 5\text{-}7\%$ v primeru največjega zrna agregata $D_{\max} = 16 \text{ mm}$.

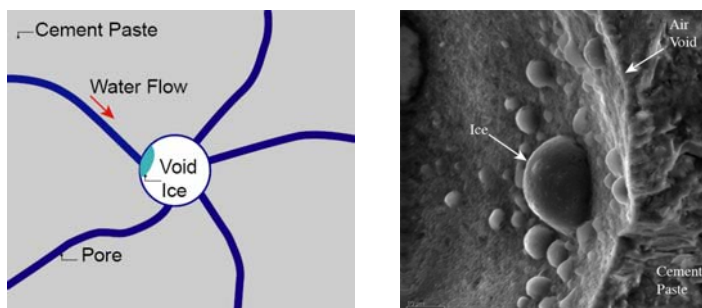


Slika 5.3: Primer luščenja betona zaradi zmrzovanja in tavanja v prisotnosti talilnih soli (PCA, 2003)

Fig. 5.3: Example of salt frost scaling of concrete pavement (PCA, 2003)

V sklopu lastnih preiskav odpornosti SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko proti zmrzovanju in tajanju v ali brez prisotnosti soli smo se osredotočili na ukrep aeriranja sveže betonske mešanice pri priporočenih mejnih vrednostih za sestavo betona po SIST EN 206-1 (2003) in SIST 1026 (2004), in sicer za najvišjo stopnjo izpostavljenosti XF4.

Koncept aeriranja betonske mešanice bi naj bil iznajden po naključju, nekje v prvi polovici 20. stol., ko bi naj nek uporabljen kemijski dodatek za mletje cementa povzročil tvorjenje majhnih zračnih mehurčkov v betonski mešanici, katera se je kasneje v strjenem stanju izkazala za močno odporno proti zmrzali (Du, Folliard, 2005). Tak uspeh je s seboj sicer prinesel tudi določene nejasnosti in težave glede doseganja ustrezne stopnje aeriranosti betonskih mešanic v različnih pogojih s katerimi se gradbena praksa srečuje. Du in Folliard (2005) sta tako v svojem delu navedla številne parametre, ki pomembno vplivajo na mehanizem delovanja aeranta v sveži betonski mešanici. Večino teh vplivov smo pri lastnem projektiranju aeriranih SCC in vibriranih betonskih mešanic opazili tudi sami. Navedeni so v 3. poglavju. Prve znanstvene razlage koncepta aeriranih betonov je podal Powers. V svojem delu (1958, *cit. po* Mehta, Monteiro, 2006) razlaga, da se z ustrezno uporabo kemijskega dodatka aeranta med mešanjem betona v cementni pasti tvorijo t.i. vnešene zračne pore, ki po strditvi betona služijo kot območja za sprostitev hidravličnega pritiska zaradi prehajanja in zmrzovanja vode v kapilarah betona (Slika 5.4). Ta mehanizem bi naj bil tem bolj učinkovit, čim večje je število vnešenih zračnih por in čim bolj enakomerno so le-te razpršene po celotnem volumnu. Le tako je med zmrzovanjem betona pot prehajanja vode skozi matrico cementnega kamna do z vodo nezasičenih zračnih por čim krajša in zato tudi nastala napetost po Darcyjevem zakonu posledično manjša. Takšno obliko sistema zračnih por lahko dosežemo le s pravilno uporabo ustreznega kemijskega dodatka aeranta (Hewlett, 1998).



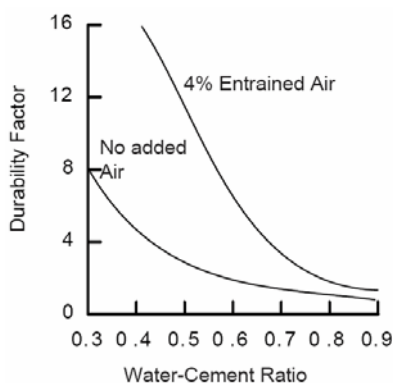
Slika 5.4: Mehanični ugodnega učinka vnešenih zračnih por v betonu (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 5.4: Mechanism of entrained air voids in concrete at freezing (Mehta, Monteiro, 2006)

Učinkovitost aeriranja betona v odvisnosti od v/c razmerja je prikazana na sliki (Slika 5.5). Iz diagrama na sliki (Slika 5.5) je moč opaziti, da že relativno nizka stopnja aeriranja ($A \approx 4\%$) močno poveča odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju, ter, da je tudi neaeriran beton pri zelo nizkem v/c razmerju (okoli 0,3) dovolj odporen proti zmrzali.

Prvi cilj lastnih preiskav je bil preveriti vpliv apnenčeve moke, dodane k mešanici betona, na odpornost takšnega betona proti zmrzovanju in tajanju. Drugi cilj je bil preveriti, kako na zmrzlinsko odpornost betona vpliva način vgrajevanja sveže betonske mešanice, tj. z ali brez vibriranja (SCC mešanice). Tretja faza preiskav je bila parametrična študija vpliva stopnje aeriranosti ($A = 2-12\%$) in vrste mineralnega dodatka na odpornost SCC proti zmrzovanju in tajanju. V zadnji fazi smo preverili

tudi vpliv temperature in trajanja mokre nege betona na njegovo zmrzlinsko odpornost. Vsaka izmed navedenih faz je v nadaljevanju zaradi preglednosti predstavljena v svojem podpoglavju.



Slika 5.5: Odpornost aeriranega in neaeriranega betona proti zmrzovanju in tajanju v odvisnosti od v/c razmerja (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 5.5: Frost durability of aerated and non-aerated concrete in relation to w/c ratio (Mehta, Monteiro, 2006)

5.2.1 Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju

Preiskave notranje odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju smo opravili na betonskih prizmah dimenzij 10x10x40 cm po postopku, ki je predpisan v SIST 1026 (2004). Preizkušance smo izdelali iz aeriranih SCC mešanic LA, LGA in TA (Preglednica 3.5) ter iz aerirane vibrirane mešanice LVA (Preglednica 3.8). Po opravljenih 100 ciklih zmrzovanja in tajanja iz rezultatov ultrazvočne metode, natančneje opisane v (Duh, 2003), nismo opazili bistvenih razlik med SCC betoni z ali brez apnenčeve moke in vibriranim betonom brez apnenčeve moke. Rezultati preiskav so objavljeni v (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004a).

Preiskave notranje odpornosti betona proti zmrzovanju in tajanju smo opravili tudi na vzorcih iz vibriranih betonskih mešanic, pri katerih smo pri enakem v/c razmerju zamenjali del cementa z apnenčevo moko. Tudi pri teh preizkušancih po 100 ciklih zmrzovanja in tajanja nismo opazili bistvenih razlik. Rezultati so podani v (Bokan-Bosiljkov, *et al.*, 2004b).

5.2.2 Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju

Preiskave odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju (v nadaljevanju OSMO odpornost) v in brez prisotnosti talilnih soli smo opravili na betonskih kockah z robom 10 cm po postopku predpisanem v SIST 1026 (2004). Rezultate prvotnih preiskav na SCC mešanicah LA, LGA in TA (Preglednica 3.5) in na vibriranih mešanicah LVA (Preglednica 3.8) z ali brez zamenjave dela cementa z apnenčevo moko smo objavili v (Duh, Mehle, Bokan-Bosiljkov, 2004; Duh, Bokan-Bosiljkov, 2005 in 2006). Pri tem je potrebno opozoriti, da so lahko nekateri rezultati preiskav posledica drugih dejavnikov kot teh, ki smo jih želeli preiskati in katere smo v teh prispevkih tudi navedli. Tekom teh in nadaljnjih preiskav smo namreč ugotovili, da lahko na rezultate preiskave OSMO odpornosti betona predpisane v SIST 1026 (2004) pomembno vplivajo tudi nekateri dejavniki, ki v standardu niso navedeni. Le-te navajamo v nadaljevanju. Po opravljeni validaciji postopka, ki smo jo podrobno

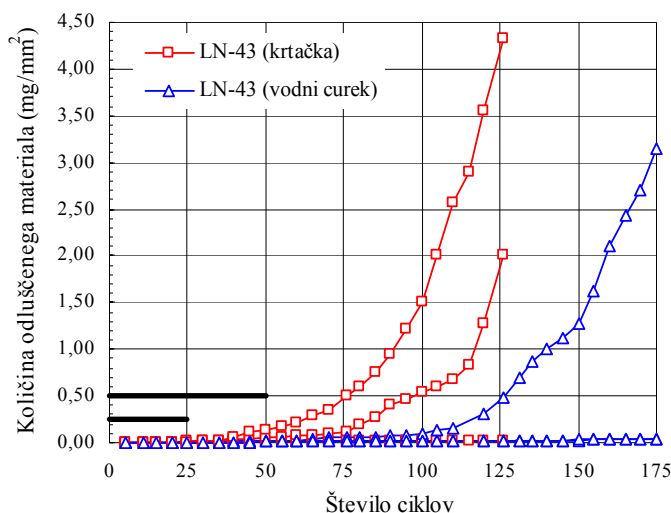
opisali v (Pezdirc, 2005), smo večino zgornjih preiskav ponovili. V nadaljevanju so predstavljeni le rezultati validirane OSMO preiskave.

5.2.2.1 Dejavniki, ki lahko pomembno vplivajo na rezultate preiskave OSMO odpornosti betona predpisane v SIST 1026 (2004)

Prvi pomemben dejavnik, ki v standardu SIST 1026 (2004) ni naveden, je način odstranjevanja odlučenega materiala s preiskovane površine betonskega vzorca. Z vodnim curkom (Slika 5.6, levo) praviloma odstranimo manj materiala kot če si pri tem npr. pomagamo še s čopičem. Poleg tega v primeru uporabe čopiča s tršimi ščetinami oz. krtačke (Slika 5.6, desno) s preiskovane površine odstranimo tudi tiste dele materiala, ki se deloma še držijo matrice betona. Pri tem najverjetneje tudi spremenimo površinsko napetost testne površine vzorca, ki je za vdor vode in kloridov očitno pomembna. Na diagramu (Slika 5.7) so prikazani rezultati preiskave OSMO odpornosti 6 betonskih vzorcev izdelanih iz iste šarže betona, pri katerih smo 3 vzorce čistili samo s curkom vode in preostale 3 s krtačko. Ostali pogoji preiskave so bili enaki.



Slika 5.6: Odstranjevanje odlučenega materiala pri OSMO preiskavi s curkom vode (levo) ali s krtačko (desno)
Fig. 5.6: Removal of scaled material in the salt frost scaling test with a jet of water (left) or with a brush (right)



Slika 5.7: Rezultati preiskave OSMO odpornosti SCC betona (LN-43) v odvisnosti od načina odstranjevanja odlučenega materiala

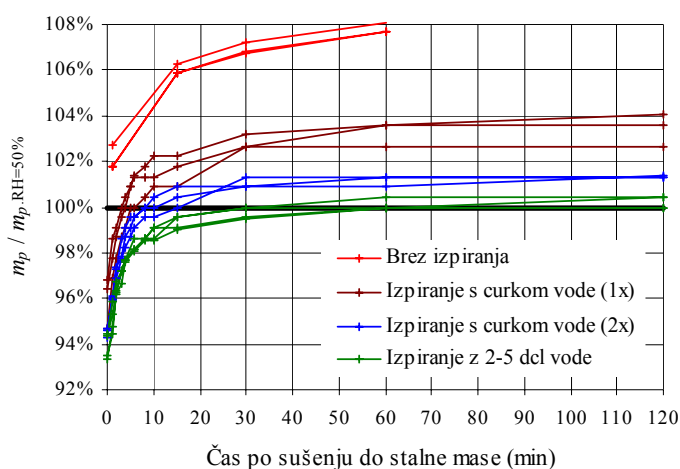
Fig. 5.7: Results of the salt frost scaling test on SCC (LN-43) in relation to the type of removal of the scaled material

Iz diagrama (Slika 5.7) je razvidno, da je uporaba krtačke v povprečju pospešila luščenje površine betona zaradi zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli. Izkazalo se je, da z uporabo ščetke prej odstranimo površinsko plast betonskega vzorca, ki je pri SCC zelo kvalitetna. Po tem, ko je se ta vrhnja plast v večini odlušči, je nadaljnje luščenje matrice betona skoraj neodvisno od načina odstranjevanja odluščenega materiala, kot je razvidno iz skoraj enakih maksimalnih naklonov krivulj na diagramu (Slika 5.7). Črni črti na diagramu predstavljata predpisani mejni vrednosti luščenja po 25 in 50 ciklih pri posameznih preizkušancih, ki znašata $0,25 \text{ mg/mm}^2$ in $0,50 \text{ mg/mm}^2$ (SIST 1026, 2004).

Drugi pomemben dejavnik, ki v standardu SIST 1026 (2004) ni naveden, je vlažnost filtrskega papirja za zbiranje odluščenega materiala. V času tehtanja filtrskega papirja z odluščenim materialom po sušenju v sušilniku mora biti filtrski papir enako vlažen kot v času tehtanja filtrskega papirja brez materiala. Sicer v rezultat, ki bi naj predstavljal samo odluščen material m_d :

$$m_d = m_{p+d} - m_p \quad (31)$$

štejemo tudi razliko v masi filtrskega papirja pri različnih vlažnostih. Glede na to, da tipičen filtrski papir tehta okoli 2 grama, približno 6% razlika v masi pri $RH = 50\%$ in pri stalni masi (Slika 5.8, zelene črte) znaša približno 120 mg, kar pa glede na tipične količine odluščenega materiala m_d ni zanemarljivo.



Slika 5.8: Časovno naraščanje mase filtrskega papirja, pri $RH \approx 50\%$, po vzetju iz sušilnice v odvisnosti od načina izpiranja soli iz zmrzovalnega medija

Fig. 5.8: Weight increase of a filter paper, at $RH \approx 50\%$, after drying to zero mass in relation to amount of washing out the de-icing salts from the freezing medium

Tretji dejavnik, ki lahko pomembno vpliva na rezultate določanja odluščenega materiala m_d in v SIST 1026 (2004) ni naveden, je sol iz zmrzovalnega medija v primeru preiskave OSMO odpornosti betona v prisotnosti soli. Če to sol po zbiranju odluščenega materiala ne odstranimo, lahko kristalizira na filtrskem papirju in v veliki meri doprinese h končni masi m_d , če jo določamo po formuli (31). Preiskava namreč pokaže, da filtrski papir, na katerem je ostala tudi sol iz zmrzovalnega medija, nase veže vlago iz okolice v precej večji meri kot če bi soli v času filtriranja ustrezno izprali. Iz diagrama

na sliki (Slika 5.8, rdeče črte) je razvidno, da je lahko ta razlika v vpiti vlagi in v vsebnosti soli tudi več kot 8%, kar glede na tipično maso filtrskega papirja (~2000 mg) pomeni vsaj 160 mg dodatne mase. Tipične količine odluščene materiala m_d pa so pri začetnih čiščenjih lahko tudi manjše od 50 mg. Soli je v času filtriranja odluščene materiala iz preiskovane površine betonskega vzorca zato nujno potrebno odstraniti.

Pri lastnih preiskavah OSMO odpornosti betona smo za zmrzovalni medij uporabljali 3% raztopino NaCl. Za odstranjevanje odluščene materiala s preiskovane površine betonskega vzorca smo uporabljali ščetko s kratkimi in relativno trdimi ščetinami ter vodo v curku (Slika 5.6). Takoj po filtriranju raztopine z odluščnim materialom smo filtrski papir izpirali z 2-5 dcl vode (Slika 5.9a), da smo izločili soli zmrzovalnega medija iz odluščene materiala in iz sten filtrskega papirja. Filtrski papir z odluščnim materialom smo tehtali 45-60 minut po sušenju do stalne mase, da smo dosegli enako vlažnost filtrskega papirja kot v času tehtanja njegove nominalne mase $m_{p, RH=50\%}$, obenem pa smo za kontrolo previdno tehtali tudi samo odluščene delce m_d kot kaže slika (Slika 5.9b). Stalna masa delcev m_d se v tem času zaradi relativne vlage v zraku ni bistveno spremenila.



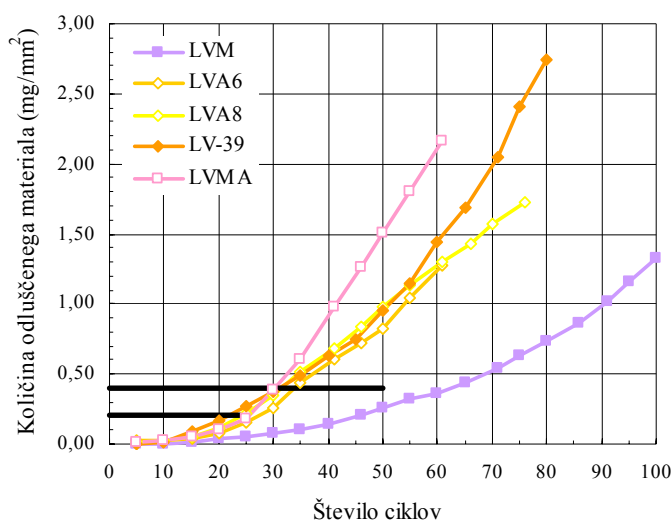
Slika 5.9: Validirana preiskava OSMO odpornosti: a) izpiranje soli iz filtrskega papirja z 2-5 dcl vode; b) tehtanje filtriranih odluščnih delcev, posušenih do stalne mase, posebej

Fig. 5.9: Validated procedure of salt frost scaling: a) washing out the de-icing salts from the filter paper with 2-5 dcl of water; b) weighing of scaled material alone after drying to its zero mass

5.2.2.2 Vpliv dodatka apnenčeve moke na OSMO odpornost betona

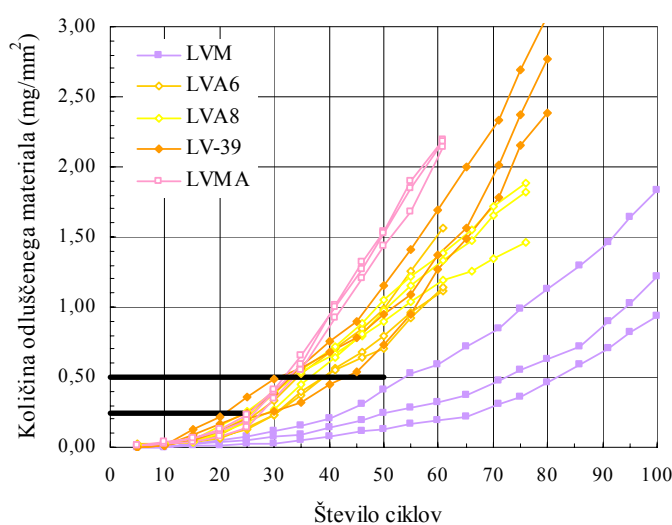
Za določanje vpliva dodane relativno velike količine apnenčeve moke betonski mešanici na njeno OSMO odpornost smo opravili preiskave na aeriranih in neaeriranih vibriranih betonskih mešanicah z ali brez apnenčeve moke (LVMA, LVA8, LVM in LV-39). Sestave in lastnosti svežih betonskih mešanic so podane v preglednici (Preglednica 4.1). Rezultati preiskave OSMO odpornosti betonov so prikazani na sliki (Slika 5.10) in posamično po vzorcih na sliki (Slika 5.11). Pri tem je betonska mešanica LVA6 ena izmed LVA8 mešanic, pri kateri je preiskava s porozimetrom (SIST EN 12350-7, 2001) pokazala le 6% delež zraka. Na diagramih so označene tudi predpisane mejne vrednosti za količino odluščene materiala po 25 in 50 ciklih, ki so navedene v preglednici (Preglednica 5.1).

Iz diagrama na sliki (Slika 5.10) je razvidno, da je izmed obravnavanih betonov po SIST 1026 (2004) OSMO odporen le beton LVM, pri katerem je bila količina odluščene materiala po 50 ciklih zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli manjša od predpisane meje $0,40 \text{ mg/mm}^2$. Gre za neaeriran vibriran beton z dodatkom apnenčeve moke. To potrjujejo tudi rezultati za posamezne vzorce tega



Slika 5.10: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke
Fig. 5.10: Salt frost scaling of aerated and non-aerated vibrated concretes with or without limestone powder

betona, ki so prikazani na diagramu (Slika 5.11). Luščenje vseh vzorcev betona LVM je bilo namreč pri 50 ciklih pod predpisano mejo $0,50 \text{ mg/mm}^2$. Rezultati so nepričakovani, saj tuja literatura navaja praviloma slabšo OSMO odpornost betonov z vključenim večjim deležem apnenčevih delcev. Rezultati za OSMO odpornost sorodnega aeriranega betona z apnenčevo moko (LVMA) so potemtakem prav tako nepričakovani. Vnešene zračne pore v tej mešanici betona bi naj OSMO odpornost betona še povečale. Iz diagrama (Slika 5.10) je lepo razvidno, da je bil ta beton izmed vseh obravnavanih v tem poglavju najmanj OSMO odporen. Površina vzorcev tega betona se je zaradi zmrzovanja in tajanja v prisotnosti talilnih soli luščila najhitreje. Po 60 ciklih se je izkazalo, da je bila matrica tega betona že tako oslABLJENA (Slika 5.12a), da je zmrzovalni medij v času tajanja v celoti pronical skozi oslABLJEN del matrice betona ob nameščenem vodotesnem okvirju za zadrževanje

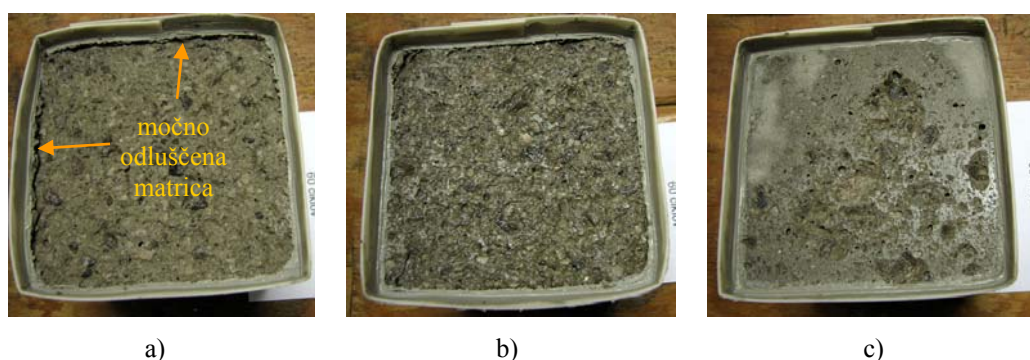


Slika 5.11: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke
Fig. 5.11: Salt frost scaling of aerated and non-aerated vibrated concretes with or without limestone powder

Preglednica 5.1: Merila za ocenjevanje odpornosti površine strjenega betona proti zmrzovanju/tajanju, količina odluščene materiala v mg/mm^2 (SIST 1026, 2004)

Table 5.1: Criterion for estimation of freeze-thaw resistance of hardened concrete surface, amount of scaled material in mg/mm^2 (SIST 1026, 2004)

	Osnovne mejne vrednosti po 25 ciklih	Dovoljeno prese-ganje osnovnih mejnih vrednosti	Največje dovoljene mejne vrednosti po 50 ciklih
Povprečje	0,20	0,35	0,40
Posamezna vrednost	0,25	0,40	0,50

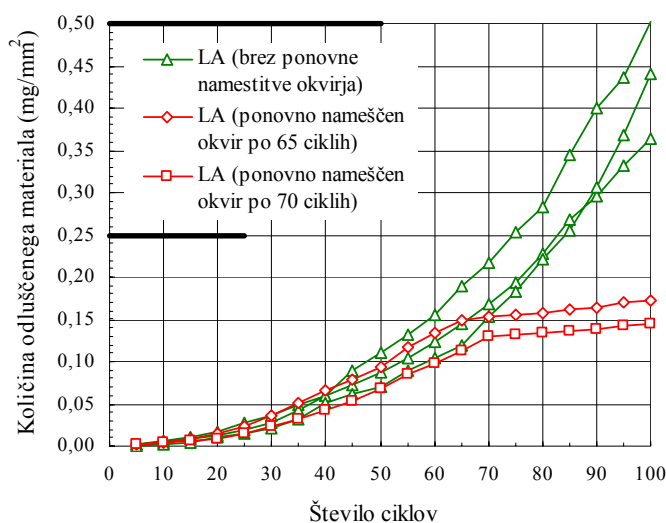


Slika 5.12: Površine vzorcev po 60 ciklih zmrzovanja/tajanja v prisotnosti soli: a) LVMA; b) LVA8; c) LVM

Fig. 5.12: Surface of concrete samples after 60 salt frost cycles: a) LVMA; b) LVA8; c) LVM

zmrzovalnega medija. Preiskavo smo za te vzorce zato bili primorani zaključiti. Nova montaža vodotesnega okvirja v tem trenutku se je namreč v številnih predhodnih poskusih izkazala kot neustrezna rešitev. Prednamaz, ki je potreben za vodotesni stik med okvirjem in površino betona, zaradi že tako oslabiljene matrice betona (zaradi številnih ciklov zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli) pri ponovnem nanosu v veliki meri pronica v matrico betona in očitno deluje kot impregnacija. Takšna nehote »impregnirana« matrica betona je skoraj popolnoma hidrofobna in se v primeru nadaljevanja preiskave OSMO odpornosti skoraj ne lušči več, kot kaže primer na diagramu (Slika 5.13, rdeči krivulji). Takšne rezultate ne smemo upoštevati, saj pri tem ne preiskujemo več originalen beton, temveč impregniran beton. Rezultati sicer nakazujejo na izjemno učinkovitost takšne impregnacije (TKK-jev prednamaz KVZ 16) betona.

Če nadaljujemo z diskusijo rezultatov iz diagramov (Slika 5.10)-(Slika 5.11), razlogi za navedene nepričakovane rezultate so lahko kvaliteta vgrajenega betona in/ali lastnosti sveže betonske mešanice v času vgrajevanja. Iz preglednice (Preglednica 4.1) je lepo razvidno, da je mešanica LVM med vsemi obravnavanimi mešanici v tem poglavju dosegla največji razlez. Vsebovala je tudi največ superplastifikatorja (za doseganje primerljive kohezivnosti mešanice). Zaradi dodatka relativno velike količine apnenčeve moke ima ta betonska mešanica (LVM) pri enakem v/c razmerju in količini cementa zagotovo bolj gosto matrico cementnega kamna kot primerljiva betonska mešanica brez apnenčeve moke (LV-39). To pomeni večjo vodotesnost betona LVM in zato tudi višjo OSMO odpornost. Če apnenčevi delci torej povzročijo tvorbo mono-karboaluminata, ki bi naj veljal za nestabilnega v okolju s prisotnostjo kloridov (Bonavetti, Rahhal, Irassar, 2001), je vpliv dodatka apnenčeve moke na povečanje vodotesnosti betona očitno tako velik, da je končno tak beton bolj

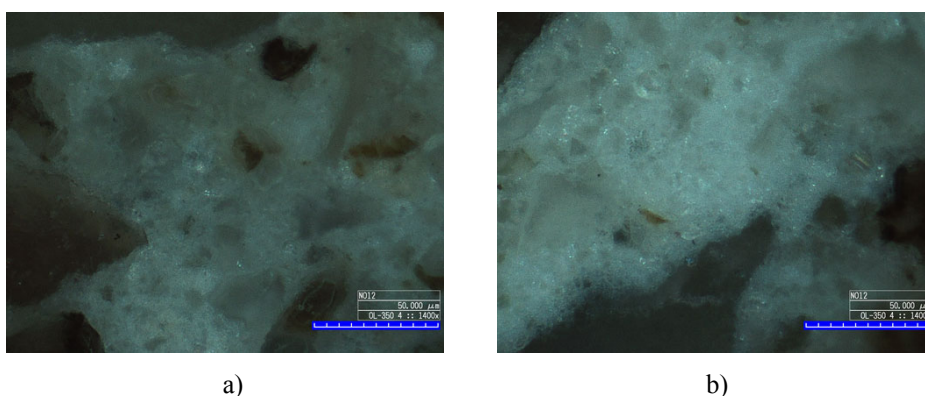


Slika 5.13: Primer rezultatov nadaljnje OSMO preiskave s ponovno nameščenim vodotesnim okvirjem
Fig. 5.13: Example of results of further salt frost scaling of concrete with new set up of sealing frame

OSMO odporen. Preden lahko to hipotezo potrdimo, je potrebno preskusiti še druge vrste apnenčevih mok. Ta preizkus je predstavljen v nadaljevanju. Razlog za tako nizko OSMO odpornost betona LVMA, ki je aerirana različica mešanice LVM, je lahko v slabi kvaliteti vgrajenega betona. V času vgrajevanja vzorcev iz te mešanice smo imeli tehnične težave z vibracijsko mizico. Mešanico smo kljub temu vgradili s pomočjo vibracijske igle, ki je bila sicer prevelika za dimenzije naših preizkušancev (10x10x10 cm). Slabša kvaliteta vgrajenega betona praviloma pomeni manj homogeno matrico cementnega kamna, s tem manjšo vodotesnost betona in končno slabše pogoje za obstojnost takšnega betona. To hipotezo smo želeli preveriti z mikroskopsko analizo. Primerjava mikrostrukture tako vgrajenih betonov LVM in LVMA je prikazana na slikah (Slika 5.14)-(Slika 5.15) pri polarizirani svetlobi in z mikroskopsko tehniko »temno polje« (*ang.* dark field). Mikroskopske slike so zajete pri enakih nastavitvah osvetlitve in so zato medsebojno primerljive. Nekoliko svetlejša matrica cementnega kamna pri betonu LVMA v primerjavi z betonom LVM na obeh slikah (Slika 5.14)-(Slika 5.15) bi lahko pomenila večjo poroznost ali nekoliko različno sestavo. Za določitev kemijske sestave hidratiziranih cementnih past obeh betonov bi bilo potrebno opraviti kemijsko analizo z elektronskim mikroskopom. Poroznost strjenih betonov pa bi lahko preverili precej enostavneje, in sicer z testom vodovpojnosti betona. Če je OSMO odpornost betona res v tolikšni meri odvisna od poroznosti betona kot nakazujejo rezultati preiskav, bi lahko hitro oceno OSMO odpornosti betona predstavljal test vodovpojnosti. 50 ciklov OSMO preiskave namreč pomeni 50 delovnih dni plus 28 dni, da so vzorci betona nared za preiskavo, tj. skupaj približno 3 mesece dela. Ker je želja v praksi preveriti ustreznost vgrajenega betona čimprej, da se gradbena dela lahko nadaljujejo, bi lahko bila ta opazka zelo dragocena. Povezavo med vodovpojnostjo in OSMO odpornostjo betona smo zaradi relativno poznega spoznanja sicer opravili samo na zadnji seriji preizkušancev, ki so predstavljeni v poglavju 5.2.2.6.

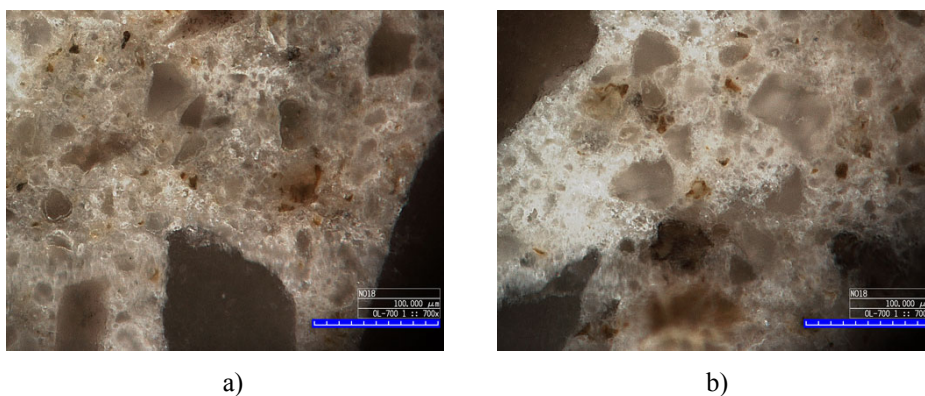
Če analiziramo še aeriran (LVA8, LVA6) in neaeriran (LV-39) vibriran beton brez apnenčeve moke, lahko na diagramih (Slika 5.10) in (Slika 5.11) opazimo bistveno razliko med potekom luščenja teh betonov. Medtem, ko količina odluščenega materiala pri neaeriranih betonih s cikli zmrzovanja/tajanja narašča približno kvadratično, je to naraščanje pri aeriranih betonih precej bolj linearno. Slednje sovпада tudi z načinom luščenja betonov. Izkazalo se je, da se aerirani betoni luščijo precej bolj enakomerno po celotni površini preizkušanca (Slika 5.12b), medtem ko se neaerirani betoni pričnejo

luščiti bolj na koncentriranih mestih in tudi v precej večjih kosih, kot je to za opaziti v primeru aeriranih betonov. Ker želimo čim daljšo življenjsko dobo AB konstrukcij, izpostavljenih zmrzovanju in tajanju v ali brez prisotnosti soli, je aeriranje betona očitno dobra naložba, čeprav so rezultati v začetnih ciklih približno enaki. Kaže pa, da je pogoj za to kvalitetna in čim manj porozna matrica cementnega kamna, sicer učinek vnešenih zračnih por ne pride do izraza. Glede na to, da se je ta razlika med aeriranimi in neaeriranimi betoni pokazala šele po 60-70 ciklih zmrzovanja/tajanja, bi bilo za bolj realno oceno OSMO odpornosti betona potrebno opraviti več kot le 25 ali 50 ciklov, kolikor jih predpisuje SIST 1026 (2004).



Slika 5.14: Mikroskopski sliki cementnega kamna: a) betona LVM; b) betona LVMA. Sliki sta zajeti pri polarizirani svetlobi. Dolžina skale je 50 μm

Fig. 5.14: Photomicrographs of hydrated cement paste: a) of concrete LVM; b) of concrete LVMA. Micrographs are captured at polarized light. Scale bar length is 50 μm



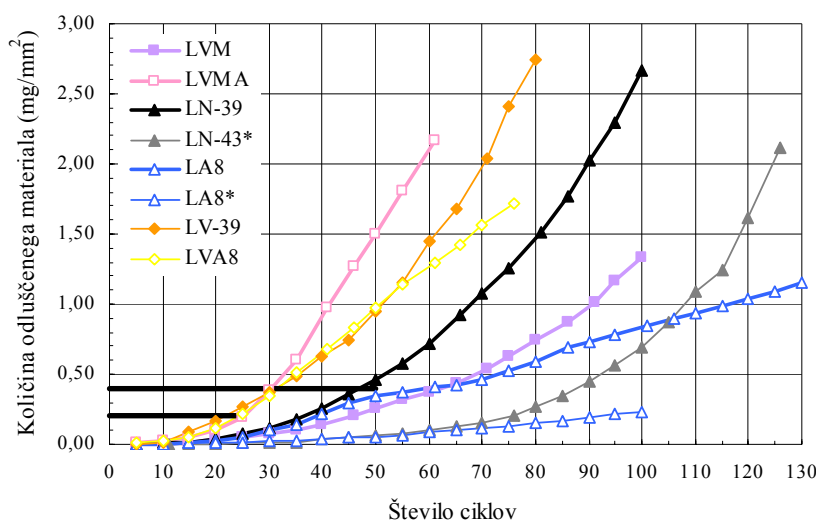
Slika 5.15: Mikroskopski sliki cementnega kamna: a) betona LVM; b) betona LVMA. Sliki sta zajeti z mikroskopsko tehniko »temno polje«. Dolžina skale je 100 μm

Fig. 5.15: Photomicrographs of hydrated cement paste: a) of concrete LVM; b) of concrete LVMA. Micrographs are captured with dark field microscopy. Scale bar length is 100 μm

5.2.2.3 Vpliv načina vgrajevanja sveže betonske mešanice na OSMO odpornost betona

Za določitev vpliva načina vgrajevanja sveže betonske mešanice na OSMO odpornost betona smo opravili OSMO preiskave na aeriranih in neaeriranih mešanicah samozgoščevalnega in vibriranega

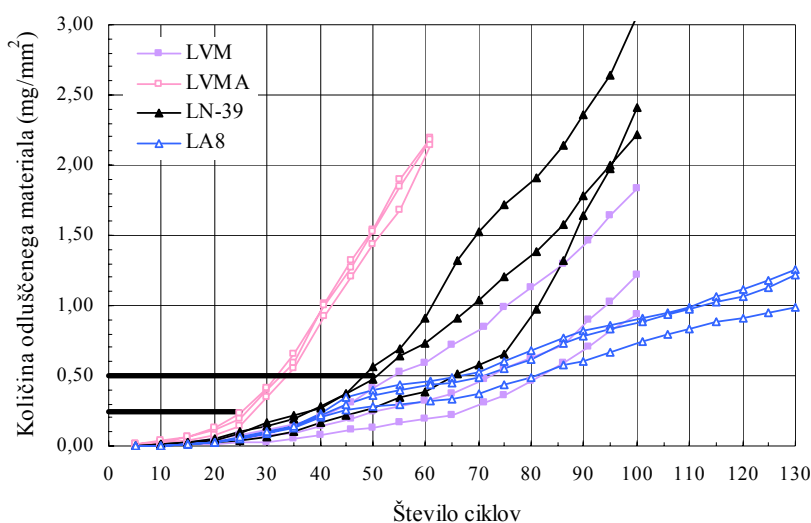
betona z apnenčevo moko (LA8, LN-39, LVMA in LVM). Gre za betonske mešanice s praktično enako sestavo, ki je podana v preglednicah (Preglednica 4.1) in (Preglednica 4.2), razen količine dodanega superplastifikatorja. Iz slednjega razloga je bilo potrebno mešanici LVM in LVMA vibrirati za ustrezno zgostitev pri vgrajevanju, mešanici LN-39 in LA8 pa sta samozgoščevalni in za vgraditev vibriranje ni bilo potrebno. Rezultati preiskav OSMO odpornosti teh betonov so prikazani na diagramih (Slika 5.16) in (Slika 5.17). Diagramom so dodane tudi mejne vrednosti za ocenjevanje odpornosti površine strjenega betona proti zmrzovanju/tajanju po SIST 1026 (2004) ter preostale primerljive betonske mešanice za neposredno primerjavo, pri katerih zvezdica označuje betone s kontrolirano temperaturo v času mešanja in vgrajevanja $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ ter v času mokre nege $T_N = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Ostali obravnavani betoni so bili zamešani, vgrajeni in negovani v vodi pri nekontrolirani temperaturi od 15°C do 19°C (te vrednosti smo ocenili na podlagi meritev temperature v laboratoriju v prihodnjem letu ob istem času in pri čimbolj enakih pogojih).



Slika 5.16: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko
Fig. 5.16: Salt frost scaling of aerated and non-aerated SCC and vibrated concretes with limestone powder

Iz diagrama (Slika 5.16) je razvidno, da so betoni vgrajeni z vibriranjem (vsi betoni, ki v oznaki vsebujejo črko V) v povprečju izkazali precej manjšo OSMO odpornost kot SCC betoni, pri katerih je potreba po vibriranju izločena. Vibriranje ima namreč neugoden učinek tako na homogenost cementnega kamna, predvsem v stičnem območju z agregatnimi zrnji, kot tudi na enakomernost porazdelitve vnešenih zračnih por, kot je predstavljeno v poglavju 4.4 na slikah (Slika 4.8) in (Slika 4.12). Gre za zelo verjetna razloga za izkazano nižjo OSMO odpornost vibriranih betonov. Pri tem sicer odstopa vibrirana mešanica z apnenčevo moko LVM, ki je izkazala višjo OSMO odpornost kot sorodna SCC mešanica z apnenčevo moko LN-39. Če pogledamo rezultate OSMO preiskave za posamezne vzorce (Slika 5.17), lahko sicer opazimo, da tako velike razlike, ki jo nakazujejo povprečne vrednosti na sliki (Slika 5.16), med vzorci mešanic LVM in LN-39 ni (glede na izkazan raztros rezultatov). Razlog za nekoliko slabšo OSMO odpornost SCC LN-39 v primerjavi z ostalimi betoni je lahko tudi dejstvo, da je bil zamešan, vgrajen in negovan v vodi kot zadnji v vrsti, kar je v ne popolnoma kontroliranih pogojih v laboratoriju v tistem letu pomenilo najnižjo temperaturo zamešane in vgrajene betonske mešanice T_B in tudi nadaljnje mokre nege T_N , ki sta znašali približno 15°C ali manj. Diagramu na sliki (Slika 5.16) smo iz tega razloga dodali še rezultate preiskave OSMO

odpornosti SCC LN-43, pri katerem sta bili temperaturi T_B in T_N kontrolirani in sta znašali $(20\pm 2)^\circ\text{C}$. SCC LN-43 je kljub nekoliko višjemu v/c razmerju v primerjavi z LN-39 in LVM (Preglednica 4.1) izkazal precej večjo OSMO odpornost kot omenjena betona. Temperatura sveže betonske mešanice T_B in temperatura mokre nege betona T_N očitno zelo močno vpliva na OSMO odpornost betona. To potrjuje tudi primerjava rezultatov preiskave OSMO odpornosti aeriranega SCC LA8, ki je pri $T_B = (20\pm 2)^\circ\text{C}$ in $T_N = (20\pm 2)^\circ\text{C}$ izkazal v povprečju približno 4-krat večjo OSMO odpornost kot v primeru nižjih T_B in T_N , od 15°C do 19°C (Slika 5.16). V obeh primerih je sicer aeriran SCC LA8 izmed vseh obravnavanih betonov izkazal največjo OSMO odpornost, kar se ponovno pokaže šele po daljšem času izpostavljenosti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli. Tudi pri samozgoščevalnem aeriranem betonu količina odlučenega materiala s cikli zmrzovanja/tajanja narašča precej bolj linearno kot pri neaeriranem SCC, kjer je to naraščanje približno kvadratično.



Slika 5.17: OSMO odpornost aeriranih in neaeriranih SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko

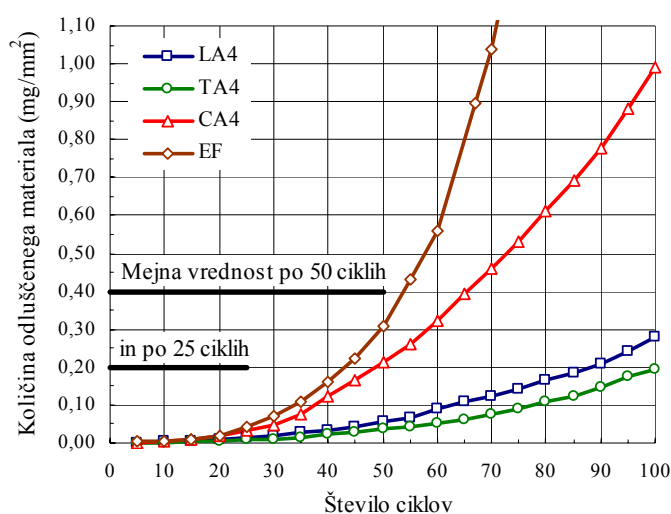
Fig. 5.17: Salt frost scaling of aerated and non-aerated SCC and vibrated concretes with limestone powder

5.2.2.4 Vpliv vrste mineralnega dodatka na OSMO odpornost SCC

Parametrična analiza vpliva vrste mineralnega dodatka na OSMO odpornost SCC je bila opravljena na aeriranih SCC mešanicah LA4, TA4 in CA4 s tremi različnimi vrstami apnenčevih mok, ki so podrobno predstavljene v poglavju 3.2.4, ter na neaerirani SCC mešanici EF z elektrofiltrskim pepelom. Sestave mešanic in njihove lastnosti v svežem stanju so podane v preglednici (Preglednica 4.2). Iz preglednice je razvidno, da smo primerljivost mešanic osnovali na enakem vodo-vezivnem razmerju (0,39), primerljivi količini cementa $m_c = (416\pm 13) \text{ kg/m}^3$, primerljivi količini mineralnega dodatka $V_{\text{praš}} = (92\pm 2) \text{ l/m}^3$ in na primerljivem deležu zraka $p_\gamma = (4,5\pm 0,1)\%$, pri čemer za takšen delež zraka v mešanici EF nismo potrebovali aeranta. Ob tem smo mešanice projektirali tudi tako, da so dosegale čim bolj primerljivo obdelavnost v času vgrajevanja, in sicer razlez s posedom $d_{\text{sc}} = (728\pm 31) \text{ mm}$, čas razlezanja $T_{500} = (4,2\pm 0,5) \text{ s}$ in čas iztekanja $t_{\text{izt}} = (10,4\pm 0,7) \text{ s}$. Napetost na meji tečenja in plastična viskoznost cementne paste namreč neposredno vplivata na oblikovanje sistema vnešenih zračnih por in na njihovo stabilnost v sveži betonski mešanici (Du, Folliard, 2005).

Preiskave tlačne trdnosti obravnavanih mešanic (Slika 4.9) so pokazale, da so mešanice primerljive tudi v tem pogledu. 28-dnevna tlačna trdnost je znašala $f_{cc} = (64,5 \pm 3,0)$ MPa, pri čemer je nekoliko izstopala le mešanica EF, saj je bilo pri le-tej dejansko veziva nekoliko več (482 kg/m^3) kot pri ostalih mešanicah (422 kg/m^3).

Rezultati preiskave OSMO odpornosti obravnavanih betonov so prikazani na sliki (Slika 5.18). Iz diagrama na sliki (Slika 5.18) je razvidno, da ima lahko vrsta mineralnega dodatka na OSMO odpornost SCC zelo velik vpliv. Še več, že samo različne vrste enakega mineralnega dodatka lahko močno vplivajo na OSMO odpornost SCC. SCC mešanica CA4 z apnenčevo moko AM-C je namreč izkazala približno 4-krat nižjo OSMO odpornost kot SCC mešanici LA4 in TA4 z apnenčevima mokama AM-L oziroma AM-T. Rezultati ponovno opravljenih analiz zrnovostne sestave uporabljenih apnenčevih mok se skladajo z že predstavljenimi rezultati v poglavju 3.2.4 (Slika 3.12). Kaže, da sta apnenčevi moki AM-L in AM-T manj fini kot apnenčeva moka AM-C, ki je namensko mleta. To se sicer sklada z zaključki nekaterih tujih raziskovalcev, ki opažajo nižjo OSMO odpornost SCC z bolj finimi apnenčevimi mokami, a bi pri tem radi dodali, da je takšno sklepanje le iz podatka o zrnovostni sestavi apnenčevih mok morda prenašlo. Apnenčeve moke se namreč lahko med seboj razlikujejo tudi po mineraloški sestavi, prav tako pa ne velja zanemariti njihovih površinskih lastnosti, za katere najverjetneje ne moremo trditi, da so pogojene s finostjo. Močno različne površinske lastnosti AM-L in AM-C smo predstavili v poglavju 3.2.4 s testom hidrofilnosti mok (Slika 3.13). Še ena razlika med mešanico CA4 in mešanicama LA4 in TA4 je tudi v skoraj dvakrat večji količini dodanega aeranta za doseganje primerljivega deleža zraka, kar ima morda prav tako neugoden učinek na OSMO odpornost v prisotnosti soli. Morda je kljub doseženemu enakemu deležu zraka struktura sistema vnešenih zračnih por v betonu CA4 neučinkovita. Na to nakazuje tudi še slabša OSMO odpornost SCC mešanice EF, pri kateri za izbran delež zraka aeranta niti nismo potrebovali. Da bi odgovorili na to vprašanje, je ponovno potreben vpogled v mikrostrukturo betona. Samo iz podatka o deležu zraka v sveži betonski mešanici je namreč nemogoče sklepati na strukturo sistema zračnih por v betonu, ki bi naj po Powersu (1958, *cit. po* Mehta, Monteiro, 2006) imela ključno vlogo pri OSMO odpornosti betona. 4% delež zraka lahko namreč pomeni npr. 100 relativno velikih lunckerjev v nekem volumnu betona ali milijon majhnih zračnih mehurčkov.



Slika 5.18: OSMO odpornost SCC z različnimi vrstami mineralnega dodatka
Fig. 5.18: Frost scaling of SCC with different types of mineral addition

Metoda, s katero lahko v strjenem betonu preverimo obliko sistema vnešenih zračnih por, je linijska mikroskopska metoda (v nadaljevanju LMA), predpisana v SIST EN 480-11 (2005). Gre za kvantitativno stereološko metodo, pri kateri z mikroskopom analiziramo ustrezno pripravljeno površino strjenega betona. Zaradi svoje neposredne narave velja za najnatančnejšo izmed obstoječih metod za določanje porazdelitve zračnih por v strjenem betonu (St John, Poole, Sims, 1998). Njena negativna lastnost je dolgotrajnost in zahteva po visoki natančnosti izvajalca. Zaradi njene izjemne uporabnosti smo se odločili, da jo poskušamo avtomatizirati. To nam je omogočilo tudi dejstvo, da je danes že skoraj osnovna računalniška oprema tako močno razvita, da je takšna avtomatizacija možna že na zelo ekonomičen način. Avtomatizacija LMA je zaradi svoje obsežnosti predstavljena v posebnem poglavju, v poglavju št. 6. Če nadaljujemo, rezultati LMA (SIST EN 480-11, 2005) so naslednji. Skupni delež zraka v strjenem betonu A določen iz izmerjene skupne dolžine vseh tetiv T_a , ki nastanejo pri preseku dvodimenzionalnih krožnih sledi zračnih por z linijami izbranega testnega sistema skupne dolžine T_{tot} na testni površini betonskega vzorca, in sicer po izrazu:

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}} . \quad (32)$$

Specifična površina sistema zračnih por α , tj. ocenjena skupna površina vseh zračnih por deljena z njihovo skupno prostornino. Določi se preko izmerjenega števila presekanih zračnih por z izbranim testnim sistemom N :

$$\alpha = \frac{4N}{T_a} . \quad (33)$$

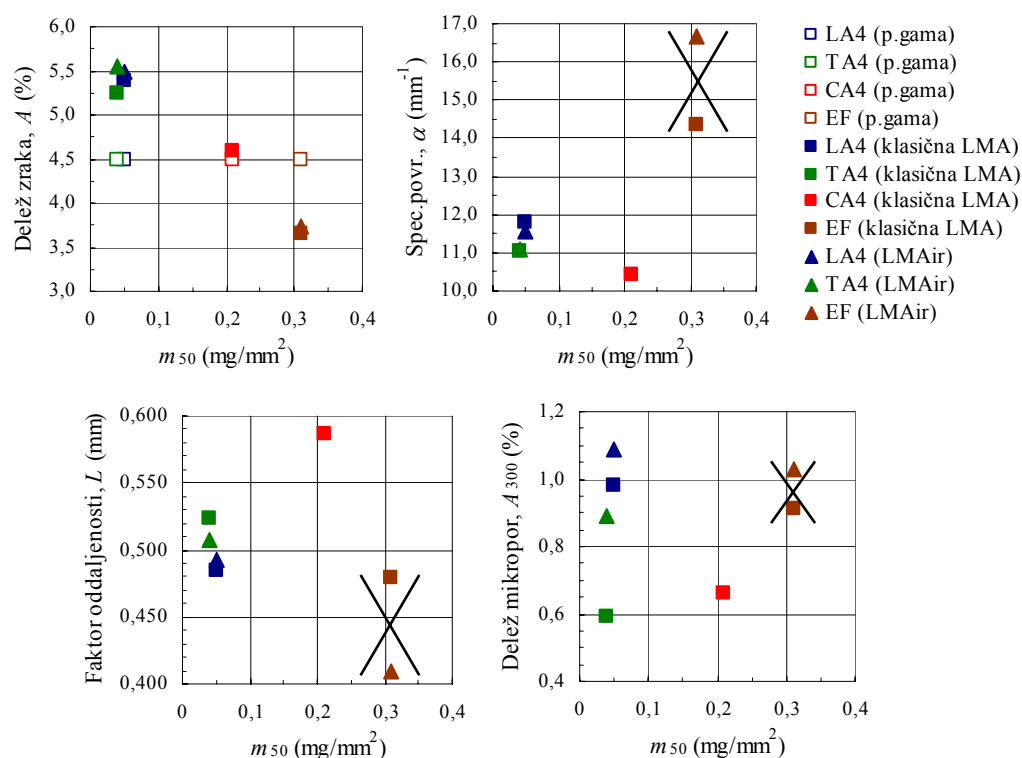
In končno, faktor oddaljenosti \bar{L} , ki bi naj predstavljal največjo razdaljo od poljubne točke v matrici cementnega kamna do najbližje zračne pore:

$$\bar{L} = \frac{3 \left[1,4(1+R)^{1/3} - 1 \right]}{\alpha} , \text{ za } R > 4,342 , \quad (34)$$

$$\bar{L} = \frac{P \cdot T_{tot}}{400 \cdot N} = \frac{P \cdot T_a \cdot 100}{A \cdot 400N} = \frac{R}{\alpha} , \text{ za } R \leq 4,342 , \quad (35)$$

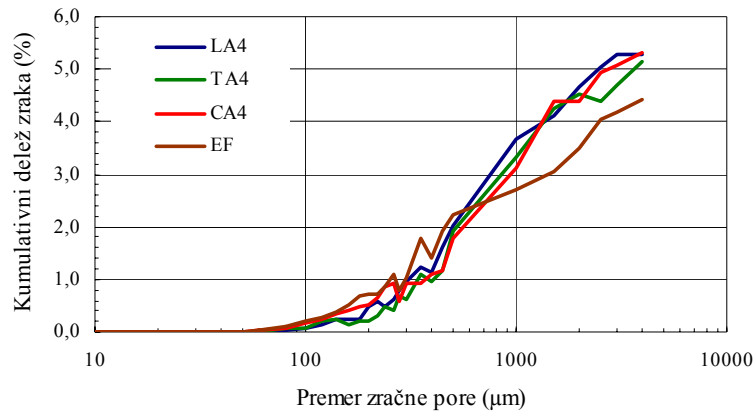
kjer je $R = P/A$ in P volumski delež paste (brez zraka) v betonu. SIST EN 480-11 (2005) podaja tudi možnost ocene velikostne porazdelitve zračnih por v strjenem betonu in deleža mikro-por A_{300} , ki predstavlja delež vseh zračnih por s premerom manjšim od 300 μm . Rezultati validirane klasične LMA in avtomatizirane LMAir pri večjem testnem sistemu so za obravnavane betone prikazani na sliki (Slika 5.19). Pri tem smo kumulativno količino odlučene materiala po 50 ciklih preiskave OSMO odpornosti betona označili z m_{50} . Iz rezultatov na diagramu (Slika 5.19, levo zgoraj) je razvidno, da delež zraka, ki smo ga določili na sveži mešanici bodisi s porozimetrom ali iz prostorninske mase vgrajenega betona p_y ne ustreza dejanskemu deležu zraka v strjenem betonu. Razlog za takšno razhajanje je lahko zgolj pričakovana relativno velika napaka omenjenih dveh metod ali dejstvo, da se sistem vnešenih zračnih por tekom vgrajevanja in/ali hidratacije cementa lahko nekoliko spremeni. Iz diagrama na sliki (Slika 5.19, levo zgoraj) je prav tako razvidno, da šele dejanski deleži zraka v strjenem betonu A , določeni z LMA, sovpadajo z izkazano OSMO odpornostjo obravnavanih betonov. In sicer, večji kot je delež zraka, manjše je luščenje površine betona zaradi zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli. Tudi preostali parametri LMA po večini sovpadajo z izkazano OSMO odpornostjo betonov. In sicer, večja specifična površina sistema zračnih

por α in obenem manjši faktor oddaljenosti \bar{L} pri betonih LA4 in TA4 pomeni, da je v cementnem kamnu teh betonov več manjših zračnih por kot pri betonu CA4 z manjšim α in večjim \bar{L} . To do neke mere potrjuje tudi delež mikropor A_{300} , ki je pri CA4 mešanici v povprečju manjši kot pri mešanicah LA4 in TA4.

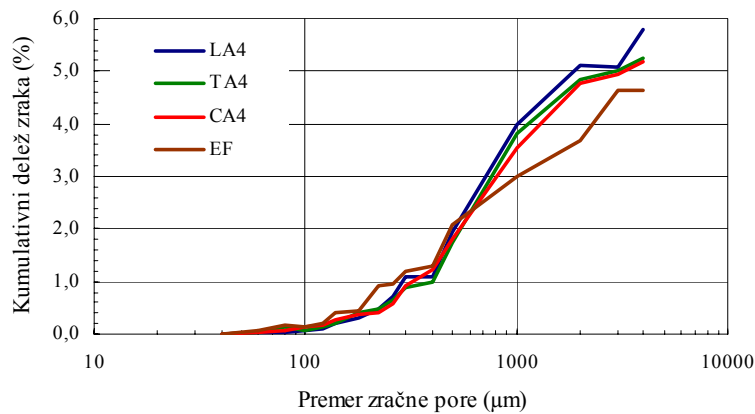


Slika 5.19: Delež zraka določen iz prostorninske mase betona p_γ in LMA parametri za obravnavane betone
 Fig. 5.19: Air content obtained from fresh concrete density and LTM parameters for discussed concrete mixes

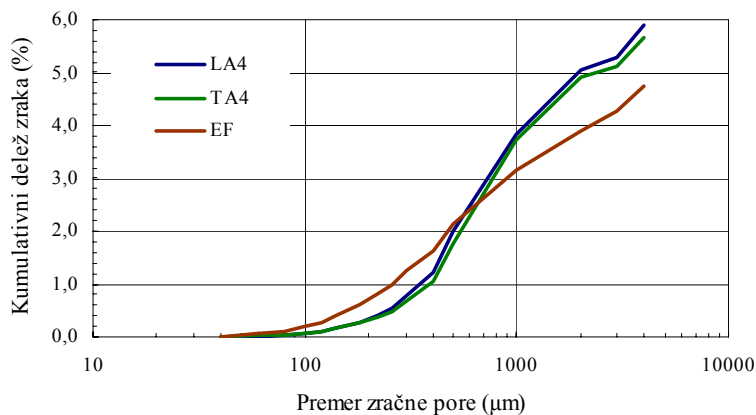
Vse kaže, da bi lahko OSMO odpornost obravnavanih betonov zelo dobro ocenili iz rezultatov opravljene LMA. S tem bi očitno lahko prihranili 3 ali več mesecev dela, ki ga imamo s tipično OSMO preiskavo. Pri tem moramo biti sicer zelo pozorni, da pri LMA štejemo resnično samo zračne pore. V primeru betona EF z dodatkom elektrofiltrskega pepela, katerega delci so prav tako sferičnih oblik (Slika 3.2a), so bili tudi vsi bodisi prerezani in votli ali izdolbljeni delci elektrofiltrskega pepela nehote šteti kot zračne pore. Ker LMA ponuja tudi oceno porazdelitve zračnih por, bi to napako morda lahko preverili na primerjavi porazdelitev zračnih por obravnavanih betonov. Ocenjene porazdelitve s klasično LMA so prikazane na sliki (Slika 5.20). Ker je ta ocena zelo občutljiva na velikost izbranega testnega sistema T_{tot} , kot je natančneje predstavljeno v poglavju 6.2, so s klasično LMA ocenjene porazdelitvene funkcije velikosti zračnih por (Slika 5.20) premalo natančne. Ob tem prav tako niso monotono naraščajoče, kar kaže na napako v sistemu. Res, z minimalno velikostjo testnega sistema (2400 mm) predpisano v SIST EN 480-11 (2005), ki si jo iz časovnega vidika z ročno izvedbo LMA še lahko privoščimo, imamo za LMA oceno porazdelitve zračnih por, ki je natančno predstavljena v poglavju 6.3.5.1, premalo podatkov. Z razvitim avtomatiziranim sistemom LMAir, ki je predstavljen v poglavju 6.3.4, si lahko privoščimo izbiro precej večje velikosti testnega sistema. Ocenjene porazdelitve zračnih por z LMAir pri $T_{tot} \approx 10.000$ mm so prikazane na sliki (Slika 5.21).



Slika 5.20: Ocenjene porazdelitve zračnih por s klasično ročno LMA ($T_{tot} \approx 2400$ mm) za obravnavane betone
 Fig. 5.20: Manual LTM estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes ($T_{tot} \approx 2400$ mm)

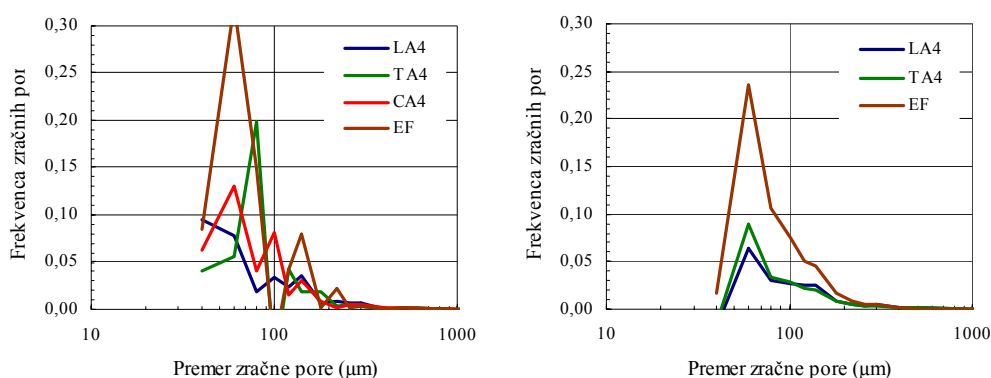


Slika 5.21: Ocenjene porazdelitve zračnih por z LMAir ($T_{tot} \approx 10.000$ mm) za obravnavane betone
 Fig. 5.21: LMAir estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes ($T_{tot} \approx 10.000$ mm)



Slika 5.22: Ocenjene porazdelitve zračnih por z PMAir (celotna površina vzorca) za obravnavane betone
 Fig. 5.22: PMAir estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes (whole specimen surface)

Porazdelitvene funkcije so pri tem že monotono naraščajoče, še vedno pa so nekoliko stopničaste. Z razvito planarno metodo, ki je navedena v poglavju 6.3.5 in vgrajena v prototipno aplikacijo PMAir, lahko ocenimo porazdelitev zračnih por v betonu na podlagi podatkov iz celotne površine preizkušanca, tj. na podlagi vseh dvodimenzionalnih sledi zračnih por na obravnavanem prerezu betona in ne le na podlagi tistih, ki jih naključno sekajo linije linijskega testnega sistema v primeru klasične LMA ali avtomatizirane LMAir. Rezultat je temu tudi primeren. Na diagramu (Slika 5.22) so prikazane ocenjene porazdelitve zračnih por z avtomatizirano PMAir. Morda še bolj nazorna razlika med linijsko in planarno analizo je v primeru primerjave gostote verjetnosti velikosti zračnih por v betonu, kot kažeta diagrama na sliki (Slika 5.23).



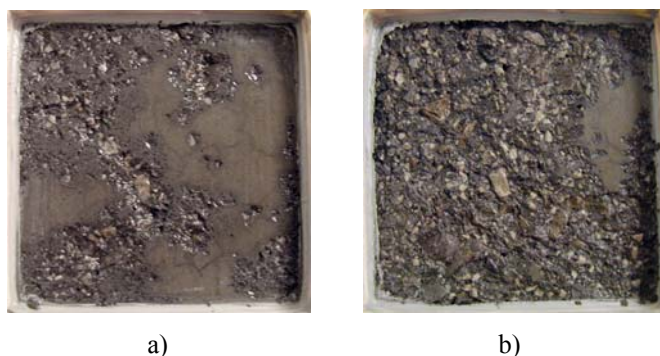
Slika 5.23: Ocenjene porazdelitve zračnih por z LMAir (levo) in PMAir (desno) za obravnavane betone
Fig. 5.23: LMAir (left) and PMAir (right) estimation of air-void distributions of discussed concrete mixes

Iz diagrama na sliki (Slika 5.22) oz. še bolj nazorno iz diagrama na sliki (Slika 5.23) je razvidno, da je pri betonu EF v primerjavi z ostalimi betoni res identificiranih precej več tetiv ali krožnih sledi, ki so v resnici najverjetneje predstavljale bodisi prerezane in votle ali izdobljene delce elektrofiltrskega pepela, katerega delci so prav tako sferičnih oblik teh velikosti (Slika 3.2a). Rezultate LMA za EF beton smo na diagramih na sliki (Slika 5.19) zato tudi prečrtali. Potrebno bi bilo iz tako dobljene porazdelitve »zračnih por« za beton EF statistično izločiti znavostno krivuljo uporabljenega elektrofiltrskega pepela in parametre LMA oceniti še enkrat. Kvalitativno bi to zagotovo pomenilo zmanjšanje parametrov α in A_{300} ter povečanje \bar{L} , kar sovпада z izkazano slabšo OSMO odpornostjo betona EF.

Iz diagrama na sliki (Slika 5.18) je ponovno moč opaziti približno kvadratično naraščanje količine odlučene materiala z večanjem števila ciklov zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli. To pomeni, da bo npr. beton, ki je po 50 ciklih zmrzovanja/tajanja sicer še tik pod predpisano največjo dovoljeno mejno vrednostjo ($0,40 \text{ mg/mm}^2$), že po naknadnih 25 ciklih zmrzovanja/tajanja to mejno vrednost lahko presegele tudi za 3 do 4-krat. Pri tem bo površina betona že zelo močno poškodovana, kar je lepo razvidno iz fotografirane površine takega betona (Slika 5.24). Gre za obravnavan SCC EF. Iz tega razloga bi bilo smiselno opraviti več kot le predpisanih 25 ali 50 ciklov, da bi lahko bolj verodostojno ocenili OSMO odpornost betona.

Iz zgornjih rezultatov je prav tako razvidno, da zgolj izpolnitev zahtev SIST EN 206-1 (2003) glede sestave betona (maksimalno v/c razmerje ter minimalna količina cementa) in najmanjšega deleža zraka v svežem betonu, določenega s porozimetrom ali iz prostorninske mase svežega betona, pri stopnjah

izpostavljenosti XF2 in XF4 še ne zagotavlja, da bo tak beton res odporen proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli. Zato bi veljalo razmisliti o dodatnih kriterijih, in sicer določitev dejanskega deleža zraka A v strjenem betonu z metodo LMA (SIST EN 480-11, 2005) in faktorja oddaljenosti vnešenih zračnih por \bar{L} , s čimer bi lahko v praksi enostavno in relativno hitro kontrolirali primere neustrezno aeriranega betona, sedaj, ko je avtomatizirana izvedba LMA na voljo.



Slika 5.24: Primer poškodovane površine po standardu SIST 1026 (2004) še OSMO odpornega betona EF: a) po 50 ciklih zmrzovanja/tajanja ($0,31 \text{ mg/mm}^2$); b) po 75 ciklih zmrzovanja/tajanja ($1,38 \text{ mg/mm}^2$)

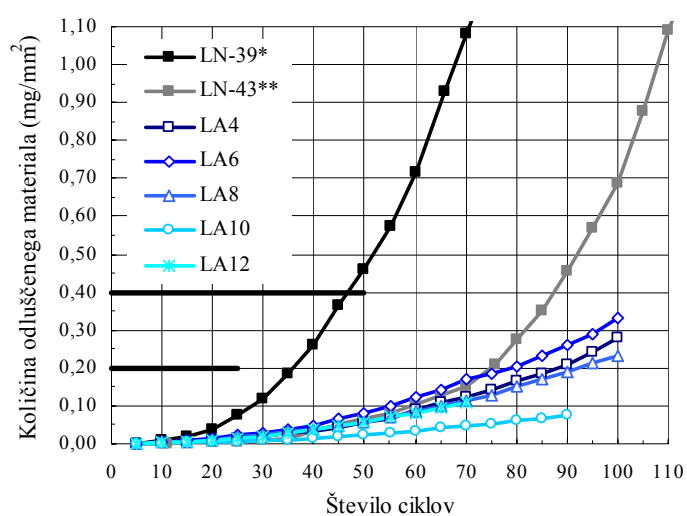
Fig. 5.24: Example of deteriorated surface of concrete EF, which is still considered as resistant to frost scaling by SIST 1026 (2004) definition: a) after 50 frost cycles (0.31 mg/mm^2); b) after 75 frost cycles (1.38 mg/mm^2)

5.2.2.5 Vpliv stopnje aeriranosti na OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko AM-L

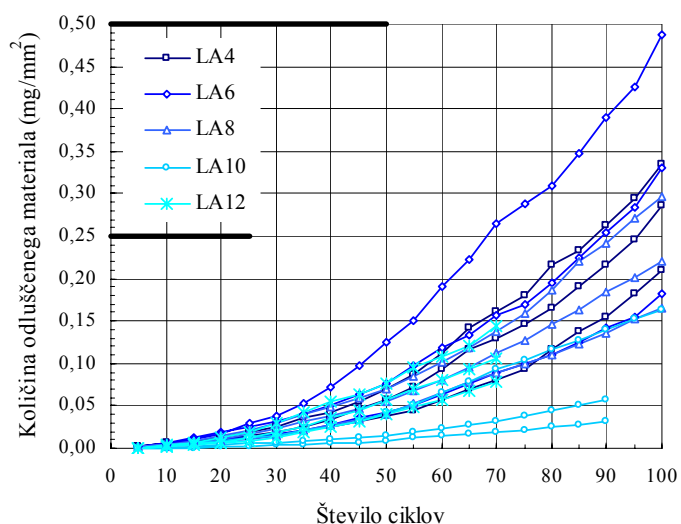
Za oceno vpliva stopnje aeriranosti na OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko smo opravili parametrično študijo, kjer je bil parameter delež zraka v sveži betonski mešanici, in sicer od 2% (ne aerirana SCC mešanica LN) do 12% (aerirane SCC mešanice LA) s korakom 2%. Projektiranje SCC mešanic LA je predstavljeno v poglavju 3.2. Njihove sestave in lastnosti v svežem stanju so podane v preglednici (Preglednica 4.2), mehanske lastnosti v strjenem stanju pa na diagramih (Slika 4.9) in (Slika 4.11). Rezultati preiskave OSMO odpornosti teh betonov so prikazani na diagramu (Slika 5.25). Tokrat je z eno zvezdico označena betonska mešanica, ki je bila zamešana in vgrajen pri $T_B \approx 15^\circ\text{C}$ in negovana v vodi pri $T_N \approx 15^\circ\text{C}$ (LN-39). Z dvema zvezdicama je označena betonska mešanica izdelana pri kontroliranih pogojih $T_B = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in $T_N = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ (LN-43), preostale mešanice so bile izdelane pri nekontrolirani temperaturi od 19°C do 26°C (te vrednosti smo ocenili na podlagi meritev temperature v laboratoriju v prihodnjem letu ob istem času in pri čim bolj enakih pogojih).

Iz diagrama na sliki (Slika 5.25) je razvidno, da delež vnešenega zraka v beton na njegovo OSMO odpornost ne vpliva v tako veliki meri kot vrsta mineralnega dodatka (Slika 5.18) ali temperatura sveže betonske mešanice T_B in temperatura nege T_N , kot je predstavljeno v poglavju 5.2.2.3 na diagramu (Slika 5.16). Če pogledamo rezultate OSMO preiskave za posamezne preizkušance obravnavanih betonov (Slika 5.26), je iz relativno velike razpršenosti rezultatov celo težko trditi, da delež vnešenega zraka v nekem območju (od 4-8%) statistično značilno sploh vpliva na OSMO odpornost aeriranega SCC z apnenčevo moko. Opazno večjo OSMO odpornost je dosegel le aeriran SCC LA10 s celotnim deležem zraka $(10 \pm 1)\%$. SCC LA12, pri katerem bi zaradi največjega deleža zraka pričakovali tudi največjo OSMO odpornost, je izkazal približno enako OSMO odpornost kot sorodni SCC betoni LA8, LA6 in LA4 s celotnimi deleži zraka $(8 \pm 1)\%$, $(6 \pm 1)\%$ oz. $(4 \pm 1)\%$. To bi

lahko bila posledica neugodnega učinka rahle predozacije aeranta, na katero opozarjajo nekateri avtorji (Muravljov, 2000). Tudi za SCC LA8 bi načeloma pričakovali večjo razliko v OSMO odpornosti v primerjavi s sorodnima LA6 in LA4 kot kažejo rezultati na diagramih (Slika 5.25) in (Slika 5.26). Razlog za to bi lahko bil neugoden učinek bodisi naknadnega dodajanja majhne količine aeranta po že zamešani mešanici betona za doseganje želenega deleža zraka (Preglednica 4.2) ali posledično večje starosti sveže betonske mešanice v času vgrajevanja. SCC mešanica LA8 je namreč v primerjavi z ostalimi mešanici v času vgrajevanja imela opazno manjši razlez s posedom d_{sc} in nekoliko večji čas razlezanja T_{500} (Preglednica 4.2), ki sta bila že na meji zahtevanih samozgoščevalnih lastnosti za SCC (Preglednica 2.1). Na morebitni neugoden učinek naknadnega dodajanja aeranta k že zamešani betonski mešanici nakazuje tudi nekoliko slabša OSMO odpornost SCC LA6 v primerjavi z SCC LA4.

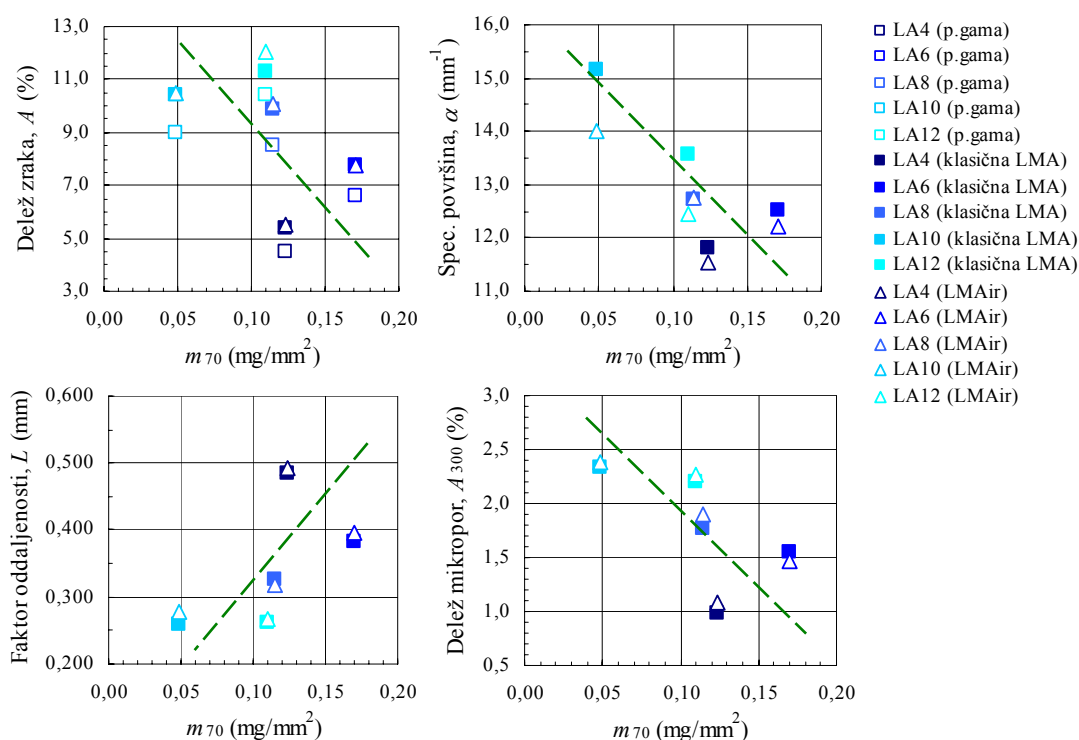


Slika 5.25: OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko AM-L in z različnim deležem zraka
 Fig. 5.25: Frost scaling of SCC with limestone powder AM-L at different total air content



Slika 5.26: OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko AM-L in z različnim deležem zraka (posamezno)
 Fig. 5.26: Frost scaling of SCC with limestone powder AM-L at different total air content (all specimens)

Pri mešanici LA6 je verjetno zaradi naknadnega dodajanja aeranta prišlo do rahle segregacije, na kar nakazuje velik razlez s posedom d_{scc} in hitro razlezanje T_{500} pri relativno počasnem iztekanju iz V-lijaka t_{izt} (Preglednica 4.2). Rezultati OSMO odpornosti posameznih vzorcev te mešanice (LA6) so bili prav tako najbolj razpršeni (Slika 5.26). Da bi preverili zgornji opazki neugodnega vpliva predoziranja aeranta (LA12) ali naknadnega dodajanja aeranta k že zamešani mešanici (LA8, LA6) na OSMO odpornost takšnega betona, opravimo LMA tudi za te betone, kar je predstavljeno v nadaljevanju. Če se za trenutek vrnemo še k diagramu (Slika 5.25), lahko ponovno opazimo, da se je učinek aeriranja (sicer skoraj neodvisno od stopnje aeriranja) na OSMO odpornost betona videl šele po določenem času (po 70 ciklih zmrzovanja in tajanja), kot je bilo že razloženo v prejšnjih podpoglavjih tega poglavja.

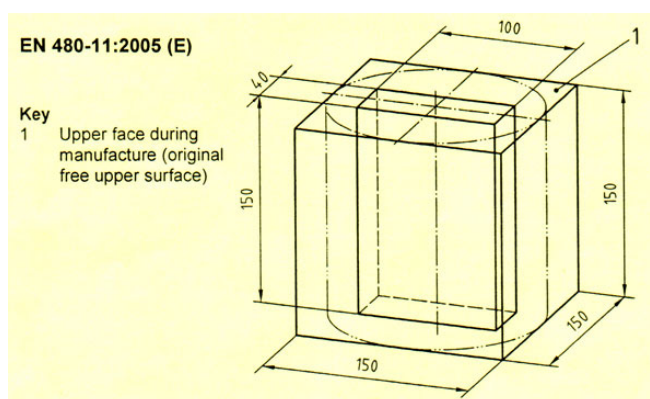


Slika 5.27: LMA parametri za obravnavane betone v povezavi s količino odluščenega materiala po 70 ciklih
 Fig. 5.27: LTM parameters for discussed concrete mixes in relation to scaled material after 70 frost cycles

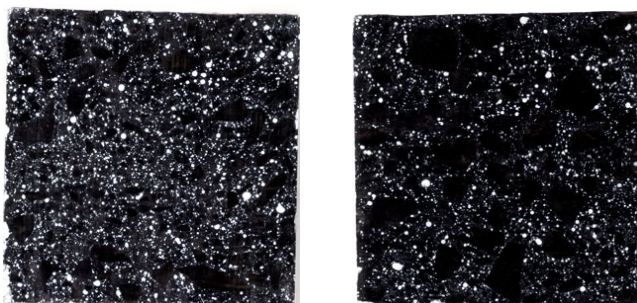
Rezultati LMA za obravnavane betone v tem podpoglavju v povezavi z OSMO odpornostjo betona so prikazani na diagramih na sliki (Slika 5.27). Iz diagramov je razvidna približna zveza med LMA parametri in dejansko količino odluščenega materiala po 70 ciklih zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli m_{70} (Slika 5.27, zelena črtkana črta). In sicer, večji kot so delež zraka v strjenem betonu A , delež mikropor A_{300} in specifična površina sistema zračnih por α (kar pomeni veliko število majhnih zračnih por) večja je OSMO odpornost betona, ter, manjša kot je povprečna medsebojna oddaljenost med zračnimi porami \bar{L} večja je OSMO odpornost betona. Kaže tudi, da je parameter α izmed vseh LMA parametrov najboljši pokazatelj OSMO odpornosti betona. Pokaže tudi opazen neugoden učinek predoziranja aeranta ali prevelikega deleža zraka v betonski mešanici (LA12) na njeno OSMO odpornost. Iz diagramov na sliki (Slika 5.27) je namreč lepo razvidno, da je sistem vnešenih zračnih por pri mešanici LA12 manj ugoden, saj je specifična površina zračnih por α relativno nizka pri sicer

ustrezno nizkem faktorju oddaljenosti \bar{L} . Parameter α prav tako identificira manj ustrezno obliko sistema zračnih por pri betonu LA8, ki je prav tako izkazal nekoliko nižjo OSMO odpornost kot bi za približno 8% skupni delež zraka pri tej mešanici lahko pričakovali. Iz diagramov na sliki (Slika 5.27) je namreč lepo razvidno, da je kljub skoraj enakemu deležu zraka kot pri betonu LA10 specifična površina zračnih por v betonu LA8 precej nižja kot pri betonu LA10. Kaže, da bi lahko bil parameter α morda boljši kriterij kot \bar{L} in/ali A za oceno OSMO odpornosti betona.

Med izvajanjem mikroskopske analize LMA smo pri nekaterih vzorcih opazili nekoliko manj zračnih por ob robovih vzorcev kot v njihovi sredici. Slednje nas je opozorilo na dejstvo, da vnešene zračne pore morda niso enakomerno porazdeljene po celotnem volumnu betonskega vzorca. LMA parametri se namreč ocenjujejo po zakonih stereologije, natančneje predstavljenih v 6. poglavju, iz enega samega prereza skozi betonski vzorec. Po navodilih standarda SIST EN 480-11 (2005) smo vedno analizirali prerez v sredici betonskega preizkušanca, kot kaže slika (Slika 5.28). Ker se pri preiskavi OSMO odpornosti betona preiskuje površina betona in ne njegova sredica, smo se zaradi zgornje opazke odločili, da preverimo sistem zračnih por tudi na prerezu tik pod preiskovano površino betonskih vzorcev. Po izvedenem kontrastiranju preiskovane površine betonskih vzorcev, ki je potrebno za avtomatizirano izvedbo LMA (glej poglavje 6.3.1), je bila razlika v količini zračnih por na prerezu ob preiskovani površini in na prerezu v sredici vzorca pri nekaterih betonih vidna že s prostim očesom, kot kaže primer na sliki (Slika 5.29).

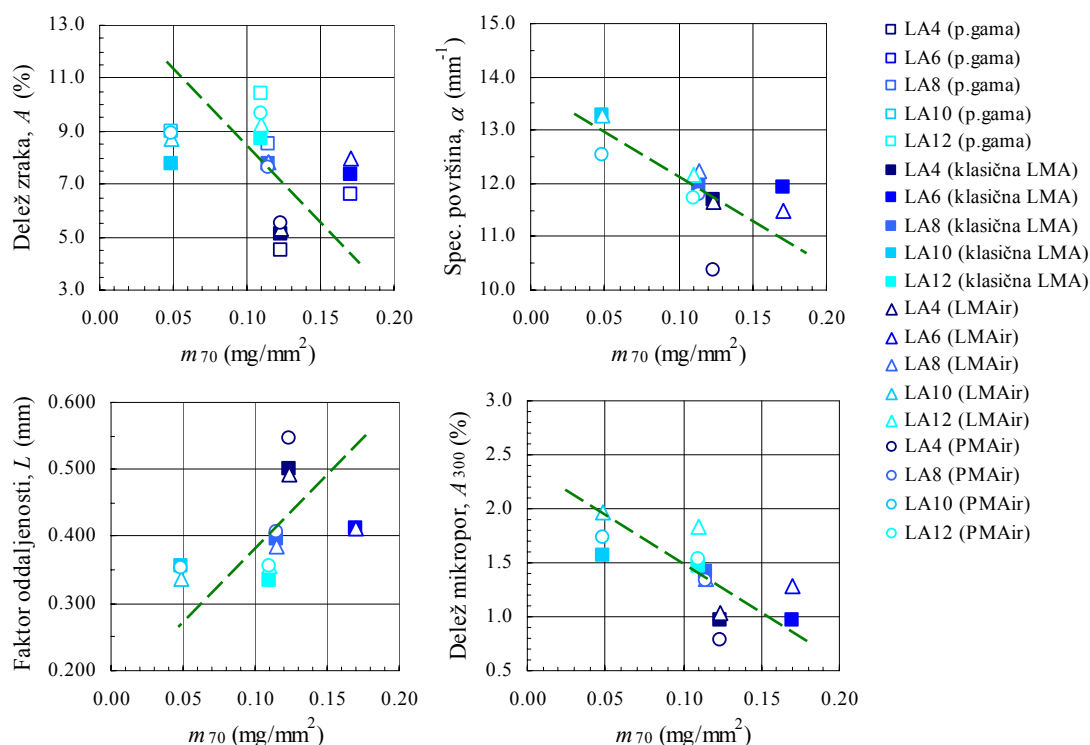


Slika 5.28: Približne dimenzije vzorca izrezanega iz betonskega preizkušanca (SIST EN 480-11, 2005)
Fig. 5.28: Production of specimen from concrete sample, approximate dimensions (SIST EN 480-11, 2005)



Slika 5.29: Prerez betonskega vzorca LA8 v sredici (levo) in ob preiskovani površini (desno)
Fig. 5.29: Middle section (left) and a section near the test surface (right) of a LA8 sample

Rezultati ponovno izvedene LMA na prerezih tik pod površino, na kateri je potekala OSMO preiskava, so prikazani na diagramih na sliki (Slika 5.30). Rezultati se sicer skladajo z opazko manjšega števila zračnih por ob površinah betonskih vzorcev, kar pomeni nekoliko manjše A , A_{300} in α ter večji \bar{L} . A ker to velja za skoraj vse obravnavane betonske vzorce, so zveze med LMA parametri in količino odlučenega materiala, prikazane na sliki (Slika 5.30), približno enake tistim, ki smo jih ocenili iz prerezov v sredini betonskih vzorcev (Slika 5.27).

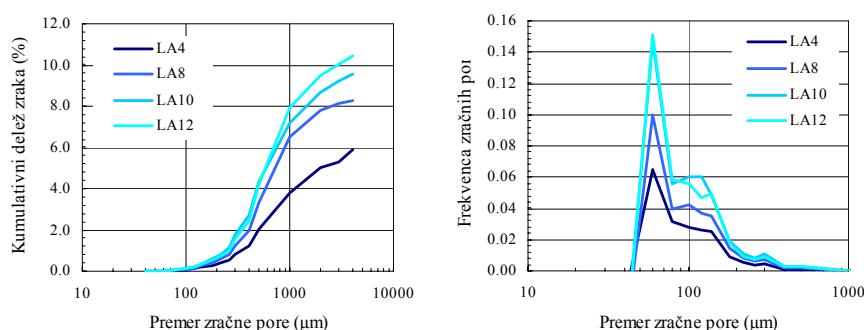


Slika 5.30: LMA parametri za prereze ob OSMO površini v povezavi s količino odlučenega materiala
Fig. 5.30: LTM parameters for sections near test surface in relation to scaled material after 70 frost cycles

Na sliki (Slika 5.31) so prikazane tudi porazdelitve zračnih por v obravnavanih betonih določene z avtomatiziranim sistemom PMAir. Le-te tokrat ne pokažejo kakšno nenavadno odstopanje pri betonih LA12, LA8 in LA6, ki so izkazali nekoliko nižje OSMO odpornosti kot bi bilo glede na mešanici LA4 in LA10 za pričakovati. Iz tega lahko sklepamo, da OSMO odpornost betona ni odvisna samo od strukture sistema zračnih por v strjenem betonu. V nadaljevanju bomo pokazali, da je OSMO odpornost betona tudi v primeru ustreznega aeriranja še vedno v tesni zvezi s poroznostjo cementnega kamna, katero pa s klasično LMA ni moč identificirati.

Končno je potrebno še navesti, da so vsi aerirani SCC z apnenčevo moko, obravnavani v tem poglavju, izkazali visoko OSMO odpornost kljub relativno visokim faktorjem oddaljenosti \bar{L} (250-500 μm). Za običajne betone je namreč splošno priporočeno, da faktor oddaljenosti za ustrezno OSMO odpornost betona ne bi smel preseči mejo 200 ali 250 μm (Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001). Razlog za takšno razhajanje bi lahko bil v močno izboljšani matrici cementnega kamna pri SCC v primerjavi z običajnimi betoni, zaradi katere SCC tudi pri višjih \bar{L} (tudi do 500 μm) lahko izkaže visoko OSMO odpornost. Enake smernice najdemo tudi v PCA poročilu (Pinto, Hover, 2001), kjer so za visokotrdne

betone pri v/c razmerjih nižjih od 0,35 za ustrezno OSMO odpornost prav tako dovoljeni faktorji oddaljenosti do 550 μm . To tudi ponovno dokazuje, da samo na podlagi opravljene analize LMA (SIST EN 480-11, 2005) ni moč sklepati na OSMO odpornost betona. Pri tem je potrebno navesti še dejstvo, da je v SIST EN 480-11 (2005) zelo nejasno definirana spodnja meja velikosti odprtlin v cementnem kamnu, ki bi še naj predstavljale vnešene zračne pore in ki jih je potrebno šteti v račun LMA parametrov. Pri tako definirani metodi lahko z upoštevanjem odprtinic manjših od 10 μm , ki bi naj že predstavljale kapilarne pore (St John, Poole, Sims, 1998), dobimo zelo majhne faktorje oddaljenosti \bar{L} (tudi manjše od 100 μm), kar je tudi velikokrat razvidno iz rezultatov tujih avtorjev na tem področju. Problem je v tem, da s tem štejemo odprtince v matrici betona, ki v primeru izpostavljenosti vlagi najverjetneje vsebujejo vodo in ne predstavljajo več območij, kamor bi se lahko voda v času zmrzovanja širila. Tako določen majhen \bar{L} (in posledično visok α) zato še ne pomeni, da bo beton res OSMO odporen.



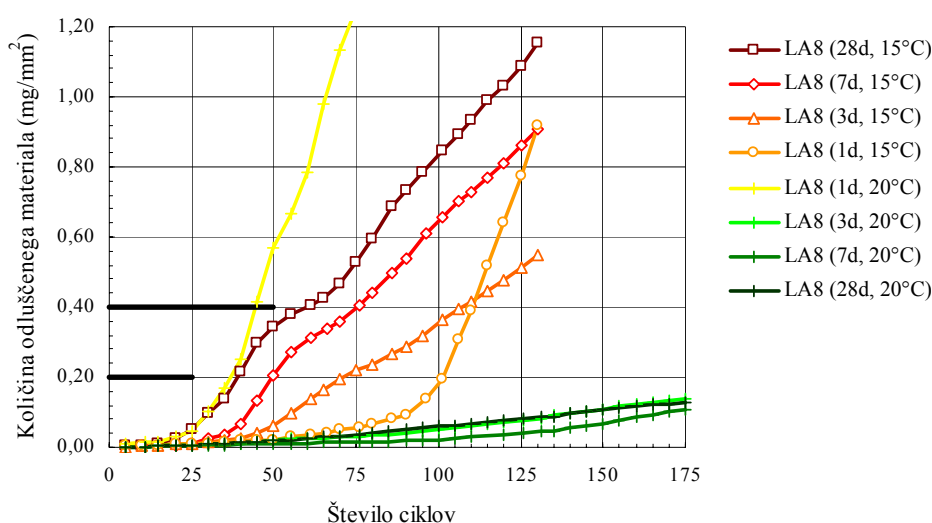
Slika 5.31: Porazdelitve zračnih por za obravnavane betone ocenjene z avtomatizirano PMAir
Fig. 5.31: PMAir estimation of air-void distribution of discussed concrete mixes

5.2.2.6 Vpliv temperature in trajanja mokre nege SCC z apnenčevo moko na njegovo OSMO odpornost

Za določitev vpliva režima nege betona na njegovo OSMO odpornost smo izbrali aerirano SCC mešanico LA8. Njena sestava in lastnosti v svežem stanju so podane v preglednici (Preglednica 4.2). Režim nege pri prvi seriji betonskih vzorcev (oranžno-rdeče oznake) mešanice LA8 je bil sledeč. Mešanica je bila zamešana in vgrajena pri temperaturi $T \approx 15^\circ\text{C}$. Nato so vzorci odležavali 1 dan v kalupih pri $\text{RH} \approx 100\%$ in $T \approx 15^\circ\text{C}$. Vzorce smo nato vzeli iz kalupov in pri treh naključno izbranih nadaljevali z moko nego, pri temperaturi vode $T_N \approx 15^\circ\text{C}$, 28 dni, pri treh naključno izbranih vzorcih 7 dni, pri treh 3 dni, preostale 3 vzorce pa smo dali takoj v komoro na zrak s kontrolirano temperaturo $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in vlago $\text{RH} = (75 \pm 5)\%$, kamor so po hladni mokri negi ($T_N \approx 15^\circ\text{C}$) bili dani tudi preostali vzorci. Režim pri drugi seriji vzorcev (rumeno-zelene oznake) mešanice LA8 je bil enak kot pri prvi seriji z razliko temperature v času mešanja, vgrajevanja in odležavanja prvi dan $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in temperature mokre nege $T_N = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Rezultati preiskave OSMO odpornosti obravnavanih betonskih vzorcev so prikazani na diagramu (Slika 5.32). Iz diagrama je lepo razvidno, kako velik vpliv imata temperatura in trajanje mokre nege na OSMO odpornost betona. Če najprej analiziramo vpliv temperature, lahko opazimo, da so betonski vzorci, ki so bili največ časa na relativno nizki temperaturi T in $T_N \approx 15^\circ\text{C}$ (LA8/28d, 15°C), četudi vseh 28 dni v mokri negi, izkazali najnižjo OSMO odpornost. Nekoliko večjo OSMO odpornost so izkazali betonski vzorci (LA8/7d, 15°C), ki so zadnjih 21 dni odležavali, sicer na zraku, v komori pri

višji temperaturi $T = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in $\text{RH} = (75 \pm 5)\%$. Še nekoliko večjo OSMO odpornost so izkazali betonski vzorci (LA8/3d, 15°C), ki so v toplejši komori odležavali 25 dni. V prvih 75 ciklih zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli pa so skoraj največjo OSMO odpornost izkazali vzorci (LA8/1d, 15°C), ki sploh niso bili deležni hladne mokre nege ($T_N \approx 15^\circ\text{C}$), ampak so takoj po vgraditvi in odležavanju 1 dan v kalupih pri $T \approx 15^\circ\text{C}$ bili dani v toplejšo komoro z relativno visoko vlago. Nekje v območju 100 ciklov zmrzovanja/tajanja so se ti vzorci pričeli luščiti zelo intenzivno in po približno 130 ciklih zmrzovanja/tajanja presegli količino luščenja preostalih betonskih vzorcev, ki so bili negovani v hladni vodi 3, 7 ali 28 dni. Kaže, da je bila matrica cementnega kamna pod očitno kvalitetnim površinskih slojem, ki se je slej kot prej odluščil, zaradi odsotnosti četudi hladne mokre nege manj kvalitetna kot pri betonih LA8/3d, 7d, 28d 15°C .

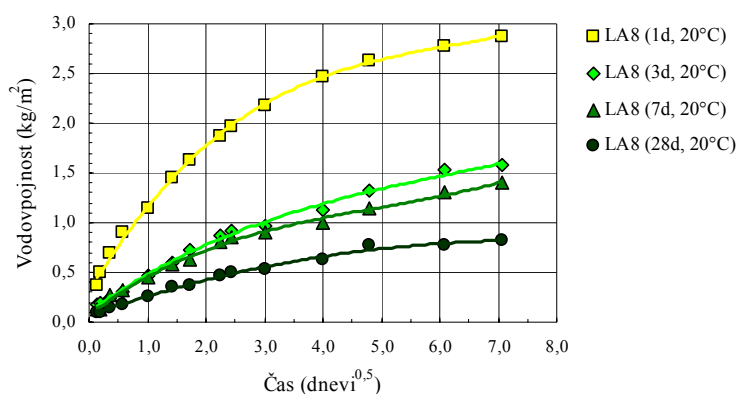


Slika 5.32: OSMO odpornost aeriranega SCC z apnenčevno moko (LA8) v odvisnosti od režima nege
 Fig. 5.32: Frost scaling of aerated SCC with limestone powder (LA8) at different curing regimes

Rezultati na diagramu (Slika 5.32) prav tako nakazujejo, kako velik vpliv ima na OSMO odpornost ustrežna temperatura v času mešanja in vgrajevanja betonske mešanice T ter temperatura nadaljnje mokre nege T_N . Betonski vzorci druge serije pri kontrolirani T in $T_N = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ so pri vsaj 3 dnevni mokri negi izkazali znatno večjo OSMO odpornost kot vzorci prve serije pri T in $T_N \approx 15^\circ\text{C}$. Slednji so imeli tudi nekoliko slabše mehanske lastnosti, kot je predstavljeno v poglavju 4.4 na diagramu (Slika 4.11). Iz rezultatov druge serije vzorcev na diagramu (Slika 5.32, rumeno-zelene krivulje) je prav tako očitna tudi pomembnost mokre nege v prvih dneh pri SCC z apnenčevno moko, ki pospeši hidratacijo cementa. Betonski vzorci, ki niso bili deležni mokre nege (LA8/1d, 20°C) so izkazali celo najmanjšo OSMO odpornost od vseh obravnavanih betonov v tem poglavju. Sicer podaljšana mokra nega na 7 ali 28 dni ni bistveno izboljšala OSMO odpornosti obravnavanega SCC z apnenčevno moko. Kar se tiče OSMO odpornosti, bi lahko rekli, da za SCC z apnenčevno moko zadošča mokra nega betona prvih nekaj dni. Pri tem pa je zelo pomembno, da se s temperaturo v času mešanja in betoniranja ter s temperaturo mokre nege čim bolj približamo 20°C .

Na zadnji seriji betonskih vzorcev (rumeno-zelene oznake) smo opravili tudi preizkus vodovpojnosti betona s kapilarnim srkom. Postopek preiskave je natančno opisan v (Mehle, 2004). Za preiskavo smo izdelali dodatne 4 serije 4 betonih vzorcev, ki so bili izpostavljeni enakemu režimu nege kot betonski

vzorci, na katerih smo opravili preiskavo OSMO odpornosti. Rezultati preiskave vodovpojnosti s kapilarnim srkom so prikazani na diagramu (Slika 5.33). Iz diagrama je razvidno, da betonski vzorci (LA8/1d, 20°C) brez mokre nege približno 2-krat hitreje vpijajo vodo s kapilarnim srkom kot preostali vzorci, ki so bili negovani v vodi 3, 7 ali 28 dni. Pri tem opazimo tudi bistveno razliko v načinu vpijanja vode. Medtem ko v vodi negovani vzorci (Slika 5.34, desne tri kolone) vpijajo vodo predvsem v površinskem sloju, vzorci brez mokre nege vpijajo vodo v notranjost (Slika 5.34, leva kolona), kar je za OSMO odpornost betona zagotovo slabše. Temu ustrezni so tudi rezultati opravljene preiskave OSMO odpornosti, prikazani na (Slika 5.32). Opazka iz poglavja 5.2.2.2 je potrjena. Bolj vodovpojen beton je manj OSMO odporen kot beton, ki nudi večji odpor proti vpijanju vode s kapilarnim srkom.



Slika 5.33: Vodovpojnost aeriranega SCC z apnenčevo moko (LA8) v odvisnosti od režima nege
Fig. 5.33: Water absorption of aerated SCC with limestone powder (LA8) at different curing regimes

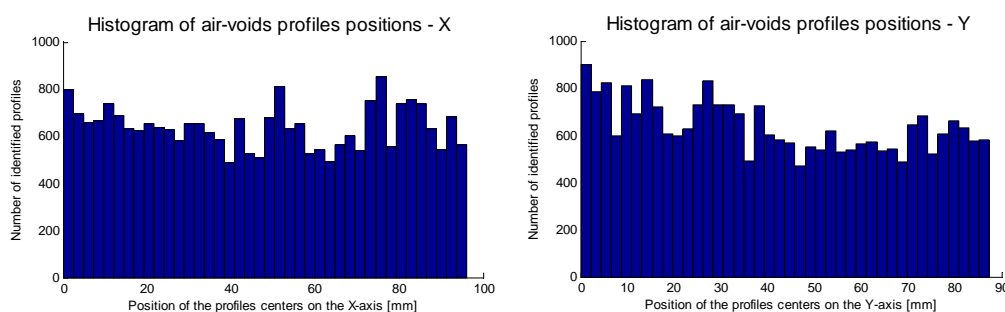


Slika 5.34: Rezultati testa vodovpojnosti betona s kapilarnim srkom po nekaj dneh
Fig. 5.34: Results of concrete water absorption test after few days

Če zaključimo, OSMO odpornost betona bi najverjetneje lahko ocenili, če bi ob opravljeni linijski mikroskopski analizi (SIST EN 480-11, 2005) opravili še test vodovpojnosti betona. Obe preiskavi sta precej hitrejši kot dejanski preizkus OSMO odpornosti betona, kar bi lahko predstavljalo pomemben korak naprej pri gradnji AB konstrukcij izpostavljenih zmrzali in talilnim solem.

5.2.2.7 Razvoj novih parametrov metode LMA

Kot že navedeno, je k rezultatom metode LMA potrebno pristopiti previdno. To dokazuje tudi dejstvo, da obstoječi parametri metode SIST EN 480-11 (2005) ne identificirajo morebitnih zgostitev vnešenih zračnih por, ki na OSMO odpornost betona delujejo neugodno. V primeru aeriranega vibriranega betona LVA8, kjer je do takšnih zgostitev vnešenih zračnih por prišlo v veliki meri (Slika 4.12, levo), so bili rezultati LMA namreč še vedno ugodni ($A = 8,6\%$, $\alpha = 19,4 \text{ mm}^{-1}$ in $\bar{L} = 0,196 \text{ mm}$), medtem ko je bil beton po kriterijih SIST 1026 (2004) OSMO neodporen (Slika 5.10, rumena krivulja). Na ta problem opozarjata tudi Zalocha in Kasperkiewicz (2005). Iz tega razloga smo v sklopu aplikacije PMAir razvili nov parameter, s katerim si lahko pomagamo pri oceni enakomernosti porazdelitve zračnih por po matrici betona, kot je predstavljeno v poglavju 6.3.5.2. Gre za izris frekvence krožnih sledi zračnih por na preiskovanem prerezu obravnavanega betonskega vzorca. Rezultati za beton LVA8 so prikazani na sliki (Slika 5.35). Iz diagramov je razvidno, da tako v vodoravni (X-smer) kot v navpični smeri (Y-smer) obravnavanega prereza obstajajo območja z veliko večjim številom zračnih por kot drugje. To nakazuje na neenakomerno porazdelitev zračnih por v betonu LVA8. Še bolj nazoren prikaz bi lahko dosegli s tridimenzionalnim izrisom frekvence krožnih sledi zračnih por na preiskovanem prerezu betonskega vzorca, tj. z diagramom $f(X,Y)$ in ne ločeno $f(X)$ in $f(Y)$, kot je prikazano na sliki (Slika 5.35).



Slika 5.35: Frekvenca krožnih sledi zračnih por na preiskovanem prerezu obravnavanega vzorca (LVA8)

Fig. 5.35: Air-voids profiles frequency on the test section of the investigated concrete sample (LVA8)

Pri iskanju novega parametra, ki bi lahko glede na fizikalno naravo zmrzovanja vode v betonu opisal sistem zračnih por še bolje kot obstoječi LMA parametri, smo prišli do zanimivega rezultata. Pri študiji definicije parametra α , ki je kvocient skupne površine vseh zračnih por v betonu P_{sist} in njihove skupne prostornine V_{sist} (Slika 5.36, levo), smo pomislili na fizikalno prav tako smiseln parameter, ki bi nam za razliko od α povedal kolikšna je skupna površina vseh zračnih por v betonu P_{sist} glede na prostornino hidratizirane cementne paste brez zraka V_p (Slika 5.36, desno). Ali z drugimi besedami, kolikšna skupna površina vseh območij sprostitvev P_{sist} je na voljo z vodo zasičeni matrici betona V_p v primeru zmrzovanja. Nov parameter smo označili z α^* :

$$\alpha^* = \frac{P_{sist}}{V_p} \quad (36)$$

Predlagan parameter α^* že v osnovi spominja na Powersov faktor oddaljenosti \bar{L} , saj prav tako ob upoštevanju specifične površine sistema zračnih por α zajame tudi delež paste P in posredno tudi

delež zraka A v betonu. Če želimo zapisati formulo za določitev predlaganega α^* iz rezultatov linijske analize, moramo najprej izraziti skupno površino sistema zračnih por P_{sist} . Pomagamo si z izrazom (33), in sicer:

$$\alpha = \frac{P_{sist}}{V_{sist}} = \frac{4N}{T_a} \Rightarrow P_{sist} = \frac{4N}{T_a} V_{sist} = \frac{4N}{T_a} \frac{A}{100} \quad (37)$$

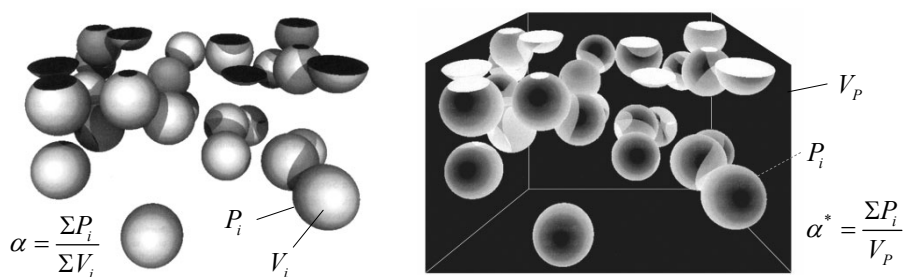
Če v zgornjem izrazu upoštevamo še formulo (32), dobimo:

$$P_{sist} = \frac{4N}{T_a} \frac{A}{100} = \frac{4N}{T_a} \frac{T_a \cdot 100}{100 T_{tot}} = \frac{4N}{T_{tot}} \quad (38)$$

Zgornji izraz vstavimo v izraz (36) in dobimo:

$$\alpha^* = \frac{P_{sist}}{V_p} = \frac{4N}{T_{tot} V_p} = \frac{4N}{T_{tot} \cdot P/100} = \frac{400N}{T_{tot} \cdot P} = \frac{1}{\bar{L}} \quad (39)$$

Če dobljen izraz primerjamo s formulo (35), lahko opazimo, da predlagan parameter α^* dejansko predstavlja inverzno vrednost faktorja oddaljenosti \bar{L} . Kot kaže, nismo našli novega parametra, ki bi lahko učinkovitost sistema zračnih por v betonu opisal bolje, temveč fizikalno razlago Powersovega faktorja oddaljenosti, ki je tudi precej lažje razumljiva ali celo bolj verjetna kot tista, ki je zapisana v SIST EN 480-11 (2005) ali v tuji literaturi, kot je prikazano na sliki (Slika 6.39). Iskanje maksimalne razdalje od poljubne točke v pasti betona do obodov zračnih por je namreč t.i. »ill-defined« vrednost, saj je lahko le-ta v neki smeri neskončna ali v praksi omejena z dimenzijami betonskega elementa (Snyder, Natesaiyer, Hover, 2001). Snyder, Natesaiyer in Hover (2001) končno prav tako navajajo, da v nasprotju s splošno razširjeno razlago Powersov faktor \bar{L} ne ocenjuje medsebojne razdalje zračnih por v betonu, niti maksimalne razdalje od poljubne točke v pasti betona do obodov zračnih por, temveč ocenjuje delež »zaščiten« paste v okolici zračnih por.



Slika 5.36: Definicija LMA parametra α (levo) in novega parametra α^* (desno)

Fig. 5.36: Definition of the LTM parameter α (left) and the new proposed parameter α^* (right)

Glede na našo izpeljavo (36)-(39) Powersov faktor torej pove, kolikšna skupna površina vseh območij možnih sprostitvev P_{sist} je na voljo z vodo zasičeni matrici betona V_p v primeru zmrzovanja. Če ob tem pogledamo še druge predlagane koncepte določanja medsebojne razdalje zračnih por v betonu, navedene v (Snyder, Natesaiyer, Hover, 2001), lahko opazimo bistveno poenostavitev, ki pa za vse vrste betonov ne vzdrži. Vsi koncepti namreč privzamejo, da je pasta betona vedno enaka. Na tem mestu pa se novodobni visokotrdni in/ali samozgoščevalni betoni od običajnih betonov močno

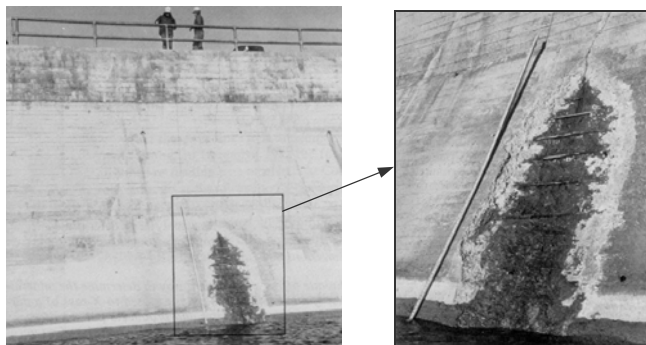
razlikujejo. Zaradi posledično nižje poroznosti cementnega kamna le-ti niso tako izpostavljeni vdoru vode v matrico betona kot običajni vibrirani betoni z višjimi v/c razmerji, četudi imajo morda večjo količino paste. Zato tudi relativno slaba korelacija Powersovega faktorja oddaljenosti \bar{L} in izkazane OSMO odpornosti betona, predstavljena v prejšnjih poglavjih in tudi v tuji literaturi. Končno bi bilo smiselno razmisliti o posodobitvi Powersovega faktorja oddaljenosti, ki bi zajel tudi kvaliteto hidratizirane cementne paste. To bi lahko dosegli z upoštevanjem dejanske poroznosti cementnega kamna, kamor lahko voda iz okolice sploh vdre, in ne z upoštevanjem celotnega volumna paste P , torej v smeri predlaganega izraza:

$$\bar{L}^* = \frac{P_p}{P_{sist}} = \frac{P_p T_{tot}}{400N} , \quad (40)$$

kjer je p_p poroznost cementnega kamna v %. Seveda bi bilo meje za posodobljen \bar{L}^* potrebno glede na rezultate preiskave OSMO odpornosti določiti ponovno in lahko bi imeli nov LMA parameter, na podlagi katerega bi bilo morda moč bolje napovedati OSMO odpornost betona. Še vedno pa je ob njem potrebno preveriti stopnjo enakomernosti porazdelitve vnešenih zračnih por po celotni matrici betona, kot je predstavljeno v začetku tega podpoglavja. Kontrola vodovpojnost betona pa je z vpeljavo p_p v formulo (40) do neke mere že zajeta, sicer je potrebno člen p_p zgolj zamenjati z $(p_p)^a$ ali z $(p_p - b)$, kjer je $a > 1$ ali $b > 0\%$.

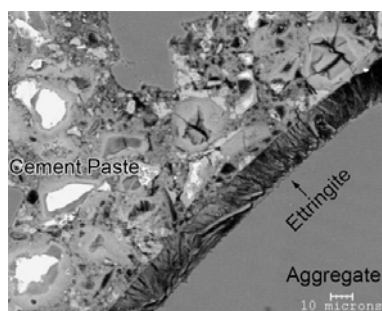
5.3 Odpornost betona proti sulfatni koroziiji

V prvi polovici prejšnjega stoletja smo že priča prvim opozorilom (1936, *cit. po* Mehta, Monteiro, 2006) glede neugodnega učinka izpostavljenosti betona sulfatom, ki se v različnih koncentracijah nahajajo v zemljini. Zaradi kemijske reakcije med sulfatnimi ioni iz okolice in hidratiziranim portland cementom v betonu pride do dveh oblik poškodb betona. Prva oblika poškodb je nabrekanje betona, kar lahko povzroči resne konstrukcijske probleme zaradi spremembe geometrije in posledičnih premikov konstrukcijskih elementov, druga oblika poškodb pa je propadanje in odpadanje matrice betona, kar povzroči izgubo mase in trdnosti betona (Slika 5.37). Tovrstne poškodbe nastanejo zaradi tvorbe sekundarnega etringita (Slika 5.38) in gipsa, kar bi naj povzročilo raztezanje (Slika 5.39) in posledično napetosti v strjenem betonu (Mehta, Monteiro, 2006). Pri nizkih temperaturah v sulfatnem okolju pričakujemo tudi tvorbo taumazita v betonu (Mielich, Öttl, 2004).

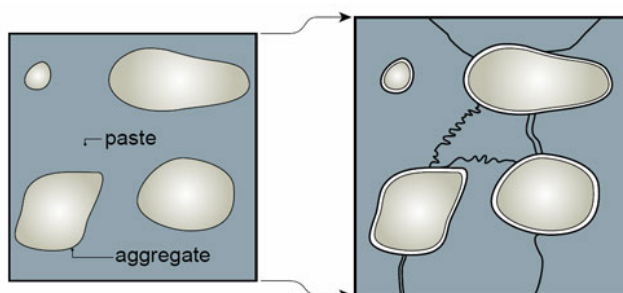


Slika 5.37: Primer propadanja betona v sulfatnem okolju (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 5.37: Sulfate attack on concrete in Fort Peck Dam (Mehta, Monteiro, 2006)



Slika 5.38: Primer tvorbe sekundarnega etringita v stičnem območju (Mehta, Monteiro, 2006)
Fig. 5.38: The example of delayed ettringite formation in the transition zone (Mehta, Monteiro, 2006)



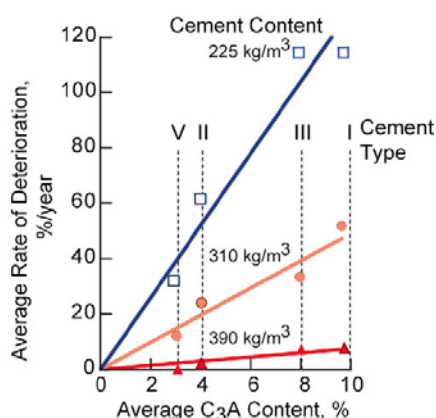
Slika 5.39: Raztezanje cementnega kamna zaradi tvorbe sekundarnega etringita (Mehta, Monteiro, 2006)
Fig. 5.39: Expansion in the paste caused by delayed ettringite formation (Mehta, Monteiro, 2006)

5.3.1 Ukrepi za povečanje odpornosti betona proti sulfatnemu napadu

Tudi za povečanje odpornosti betona proti sulfatnemu napadu je najboljši ukrep čim nižja prepustnost betona (Mehta, Monteiro, 2006). To dosežemo s povečanjem gostote cementnega kamna, torej z:

- večjim deležem cementa v betonski mešanici (Slika 5.40),
- nizkim v/c razmerjem,
- ustreznim zgoščevanjem v času vgrajevanja,
- mokro nego v prvih dneh.

Eden izmed pomembnih ukrepov za povečanje odpornosti betona proti sulfatnemu napadu je tudi uporaba sulfatno odpornih cementov. Čisti portland cement (CEM I) sestavljajo alit ali trikalcijev silikat C_3S (45-60%), belit ali dikalcijev silikat C_2S (20-30%), trikalcijev aluminat C_3A (4-12%), ki je občutljiv na sulfatno korozijo, in tetrakalcijev aluminat ferit C_4AF (10-20%). Pri tem oznaka C pomeni CaO, oznaka S pomeni SiO_2 , oznaka A pomeni Al_2O_3 in oznaka F pomeni Fe_2O_3 (Žarnić, 2003). Tisti cementi, ki vsebujejo manj C_3A , so torej sulfatno bolj odporni, kot kaže diagram na sliki (Slika 5.40). Vrste cementov po SIST EN 197-1 (2002) so natančno predstavljene v (Duh, 2003). Mešani cement (CEM V) in portland cement z mineralnimi dodatki (CEM II) žindre ali elektrofilterskega pepela bi naj veljali za sulfatno najbolj odporne vrste cementa in se priporočajo za največje stopnje izpostavljenosti betona sulfatnemu okolju (Mehta, Monteiro, 2006).



Slika 5.40: Vpliv količine in vrste cementa na sulfatno odpornost betona (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 5.40: Effects of cement content and type on sulfate resistance of concrete (Mehta, Monteiro, 2006)

Ugoden učinek uporabe cementa z dodatkom elektrofiltrskega pepela in tudi z velikimi deleži žlindre (CEM III/B) na sulfatno odpornost betona sta med drugim potrdila tudi Mielich in Öttl (2004), medtem ko navajata močno poslabšano odpornost betona proti sulfatnemu napadu v primeru dodatka apnenčeve moke. Negativen učinek dodatka apnenčeve moke navajajo tudi drugi raziskovalci (Irassar, Bonavetti, Gonzalez, 2003; Torres, *et al.*, 2003). Pri tem moramo biti zelo pozorni. Mielich in Öttl (2004) sta pri sulfatno neodporni mešanici betona z apnenčevo moko uporabila v/c razmerje 0,68, pri »primerjalnih« sulfatno odpornih betonih brez apnenčeve moke pa v/c razmerji 0,60 in 0,50. Iz takšne preiskave je nemogoče zaključiti, v kolikšni meri je na izkazano slabšo sulfatno odpornost betona vplival dodatek apnenčeve moke in v kolikšni meri povečano v/c razmerje, ki pomeni večjo poroznost in posledično večjo prepustnost cementnega kamna. Podobno lahko opazimo pri Irassarju, Bonavettiju in Gonzalezu (2003) ter pri Torresu s soavtorji (2003). Najmanj sulfatno odporen beton je bil tisti z največjim deležem zamenjave (tudi do 35%) čistega portland cementa z apnenčevo moko, pri čemer so vse mešanice imele enako vodo-praškasto razmerje. To pomeni, da je bilo v/c razmerje pri mešanicah z večjim deležem zamenjave cementa z apnenčevo moko, prav tako precej večje. Avtorji ob tem tudi ne navajajo tlačne trdnosti niti lastnosti preizkušenih betonskih mešanic v svežem stanju. Obdelavnost sveže betonske mešanice lahko močno vpliva na kvaliteto zgojitve v času vgrajevanja, kar vpliva na kvaliteto cementnega kamna in stika z agregatnimi zrni. Slednje je za obstojnost betona ključnega pomena (Mehta, Monteiro, 2006).

5.3.2 Lastne preiskave

Pri lastnih preiskavah odpornosti betona proti sulfatnemu napadu smo izbrali enako v/c razmerje (0,43) in enako količino cementa (400 kg/m³). Opravili smo primerjavo med samozgoščevalnim betonom z apnenčevo moko (LN-43) in vibriranim betonom brez apnenčeve moke (LV-43). Sestavi betonskih mešanic in lastnosti v svežem stanju so podane v preglednici (Preglednica 4.1). K preiskavi smo vključili tudi primer aeriranega SCC z apnenčevo moko (LA4) z v/c razmerjem 0,39 (Preglednica 4.2). Nekateri avtorji (Khedr, Abou-Zeid, Abadir, 2006) namreč navajajo ugoden učinek vnešenega zraka v betonsko mešanico tudi v primeru izpostavljenosti betona sulfatom. Prvič zaradi možnosti znižanja v/c razmerja za doseganje enake obdelavnosti sveže betonske mešanice in drugič zaradi prisotnosti zračnih por v strjenem betonu, ki bi naj podobno kot pri zmrzali tudi pri sulfatnem napadu nudile prostor za neovirano tvorbo sekundarnega etringita (Slika 5.41), gipsa in taumazita.



Slika 5.41: Primer neovirane tvorbe sekundarnega etringita v zračni pori (Mehta, Monteiro, 2006)

Fig. 5.41: Ettringite crystals need space to grow. They are often found in air voids (Mehta, Monteiro, 2006)

Ker so metode za določanje sulfatne odpornosti betona trenutno še v razvoju, smo se odločili, da uporabimo analogen pristop kot sta ga uporabila Mielich in Öttl (2004), s tem, da smo preiskavo opravili na vgrajenih in ne na izvrtanih betonskih vzorcih. Pri tem nas je, prvič, zanimal vpliv površinskega sloja, ki je pri SCC praviloma kvalitetnejši zaradi odsotnosti vibriranja, in drugič, hoteli smo se izogniti morebitnemu poškodovanju matrice betona v primeru vrtanja in rezanja betonskih vzorcev.

Iz vseh treh betonskih mešanic (LN-43, LV-43 in LA4) smo vgradili po 6 prizem dimenzij 10x10x30 cm in po 5 kock z robom 15 cm. Temperatura v času mešanja in vgrajevanja betona je bila $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$. Betonski vzorci so v kalupih odležavali 1 dan pri $T = (20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ in $\text{RH} > 90\%$, kot kaže slika (Slika 4.1, levo). Nato so bili vzeti iz kalupov in dani v vodo s temperaturo $T_N = (20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ (Slika 4.1, desno). Betonske kocke so odležavale v vodi do starosti 28 dni, nakar smo opravili preizkus tlačne trdnosti. Betonske prizme so bile pri starosti 2 dni vzete iz vode in nadaljnjih 12 dni odležavale na zraku v komori s kontrolirano temperaturo $T = (20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ in $\text{RH} = (75\pm 5)\%$. V tem času smo na dve nasprotni si stranici betonskih prizem pritrdili merilne čepke za merjenje deformacij s Huggenbergerjevim deformetrom (Slika 5.42, levo). Pri starosti 14 dni so bile po 3 betonske prizme iz vsake betonske mešanice dane v vodo (referenčni vzorci) s kontrolirano temperaturo $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$, preostale tri pa v 4,4% raztopino Na_2SO_4 z enako temperaturo $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ (Slika 5.43), kar predstavlja koncentracijo 29800 mg sulfatov/l. Gre za pospešen preizkus sulfatne odpornosti betona, pri katerem se uporabljajo približno 10-krat večje koncentracije sulfatov kot so kritične v naravi. In sicer, po nemškem standardu DIN 1164-10 (2004, *cit. po* Mielich in Öttl, 2004) je to 3000 mg sulfatov na 1 kg zemljine.



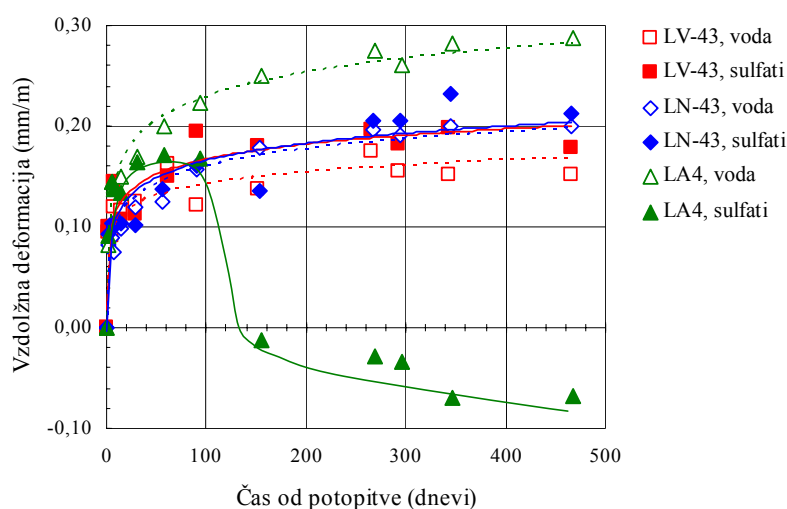
Slika 5.42: Huggenbergerjev deformeter z natančnostjo 0,0001 inče (levo) in meritve vzdolžnih deformacij betonskih prizem (desno)

Fig. 5.42: Huggenberger's deformeter with precision of 0,0001 inch (left) and measurement of deformations of concrete specimens (right)

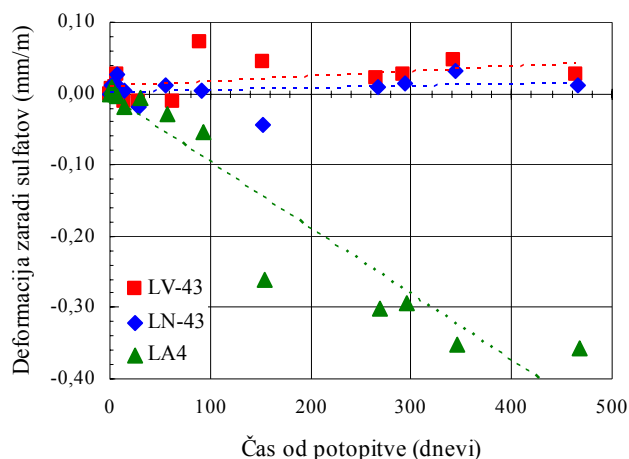


Slika 5.43: Potopitev betonskih preizkušancev v sulfatno raztopino pri $(20\pm 1)^\circ\text{C}$
 Fig. 5.43: Immersion of concrete specimens in sodium sulfate solution at $(20\pm 1)^\circ\text{C}$

Meritve deformacij betonskih prizem v vzdolžni smeri (Slika 5.42, desno) smo opravili 2, 5, 7 in 14 dni ter 1, 2, 3, 4, 5, 9 in 10 mesecev od dneva potopitve v sulfatno raztopino in v vodo. Zaboji z raztopino, vodo in vzorci so bili nato dani v hladen prostor, tako da je bila temperatura raztopine in vode $(5\pm 2)^\circ\text{C}$. Opravili smo še dve dodatni meritvi približno 12 in 16 mesecev od prvotnega dneva potopitve v sulfatno raztopino in v vodo. Rezultati meritev so prikazani na diagramu (Slika 5.44). K diagramu so dodane tudi logaritemske krivulje (metoda najmanjših kvadratov) časovnega naraščanja vzdolžnih deformacij betonskih prizem zaradi potopitve v vodo ali v sulfatno raztopino, razen za aeriran SCC (LA4), ki se je približno po 100 dneh v sulfatni raztopini pričel krčiti. Razlike v vzdolžnih deformacijah betonskih prizem potopljenih v sulfatno raztopino in v vodo bi naj predstavljale deformacije zaradi sulfatnega napada. Le-te so prikazane na diagramu (Slika 5.45). Iz diagrama na slikah (Slika 5.44) in (Slika 5.45) je lepo razvidno, da je nabrekanje SCC z apnenčevo moko (LN-43) in vibriranega betona brez apnenčeve moke (LV-43) zaradi potopitve v sulfatno raztopino tudi po približno 1 letu in pol skoraj enako nabrekanju betona zaradi potopitve v vodo, tj. zaradi vpijanja vode. Iz diagrama (Slika 5.45) je prav tako razvidno, da ni bistvene razlike med nabrekanjem teh dveh betonov kljub relativno veliki količini apnenčeve moke, ki jo vsebuje LN-43.

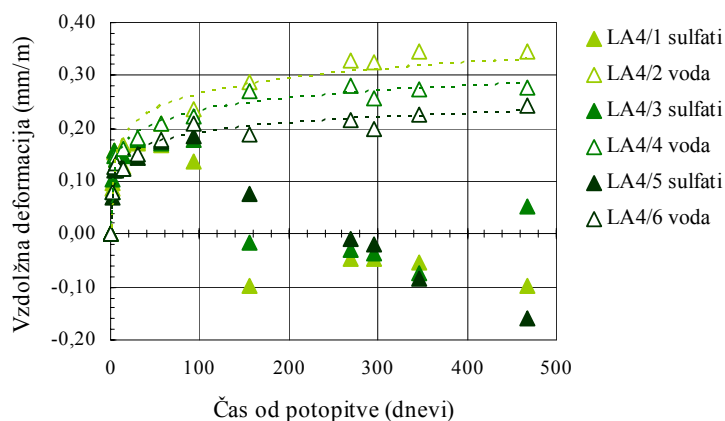


Slika 5.44: Povprečna vzdolžna deformacija betonskih prizem zaradi potopitve v vodo in v sulfatno raztopino
 Fig. 5.44: Average longitudinal deformation of concrete prisms immersed in water or sodium sulfate solution



Slika 5.45: Povprečna vzdolžna deformacija betonskih prizem zaradi sulfatnega napada
Fig. 5.45: Average longitudinal deformation of concrete prisms as a result of sulfate attack

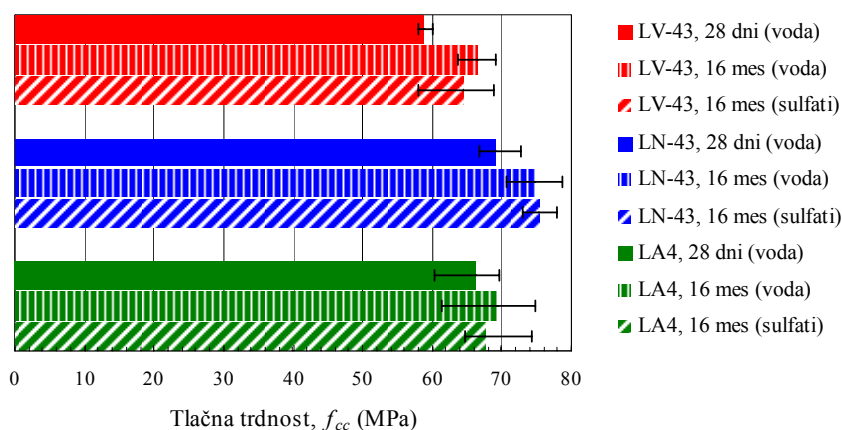
Na diagramih (Slika 5.44)-(Slika 5.45) lahko opazimo močno odstopanje vpliva sulfatov na razvoj deformacij pri aeriranem SCC LA4. Iz diagrama (Slika 5.45) je razvidno, da je sulfatni napad pri aeriranem SCC povzročil krčenje. Vzroka za to ne poznamo. Do podobnih rezultatov je prišel tudi Persson (2003b), kjer je moč razbrati izgubo mase pri aeriranem SCC potopljenem v sulfatno raztopino, a rezultatov ne komentira. Z diagramom (Slika 5.46) bi še radi pokazali, da je do krčenja prišlo pri vseh preizkušancih LA4 potopljenih v sulfatno raztopino in ne le v povprečju.



Slika 5.46: Vzdolžne deformacije posameznih betonskih vzorcev zaradi sulfatnega napada
Fig. 5.46: Longitudinal deformations of individual concrete specimens as a result of sulfate attack

Na diagramu (Slika 5.47) so prikazane tlačne trdnosti obravnavanih betonov. Prva serija rezultatov je dobljena iz preiskave tlačne trdnosti betona pri starosti 28 dni na betonskih kockah z robom 15 cm. Druga serija rezultatov je dobljena iz preiskave tlačne trdnosti betona pri starosti 16 mesecev na betonskih prizmah, ki so bile potopljene v vodo ali 4,4% raztopino Na_2SO_4 . Preiskava tlačne trdnosti betona je natančno opisana v poglavju 4.4. Iz diagrama na sliki (Slika 5.47) je lepo razviden časovni razvoj tlačne trdnosti vseh obravnavanih betonov. Glede na 28-dnevno tlačno trdnost se je s časom

najmanj povečala tlačna trdnost aeriranega SCC betona LA4, ki je sicer kljub 4% deležu zraka izkazal v povprečju 13% višjo 28-dnevno tlačno trdnost kot vibriran beton LV-43. Zaradi ugodnega učinka dodanega aeranta na obdelavnost sveže betonske mešanice smo pri SCC LA4 namreč lahko znižali v/c razmerje iz 0,43 na 0,39. S tem smo dobro kompenzirali neugoden učinek vnešenih zračnih por na tlačno trdnost betona. Aeriran SCC LA4 z v/c razmerjem 0,39 je izkazal samo 4% nižjo 28-dnevno tlačno trdnost od sorodnega neaeriranega SCC LN-43 z v/c razmerjem 0,43. Iz diagrama (Slika 5.47) je prav tako razvidno, da je tlačna trdnost betonskih vzorcev potopljenih v 4,4% raztopino Na₂SO₄ s časom narasla približno enako kot pri tistih, ki so bili v vodi. Glede na izkazan raztros rezultatov preiskave tlačne trdnosti obravnavanih betonskih vzorcev (Slika 5.47, interval označen s črno črto) je težko trditi, da je 16-mesečna izpostavljenost betona z ali brez apnenčeve moke sulfatom bistveno vplivala na njegovo tlačno trdnost. Pri neaeriranem SCC z apnenčevo moko (LN-43) je sicer za opaziti celo nekoliko večjo povprečno tlačno trdnost betonskih vzorcev, ki so bili 16 mesecev potopljeni v sulfatni raztopini, medtem ko je pri aeriranem SCC z apnenčevo moko (LA4) in pri vibriranem betonu brez apnenčeve moke (LV-43) za opaziti ravno obratno.



Slika 5.47: Tlačne trdnosti obravnavanih betonov pri različni starosti in izpostavljenosti

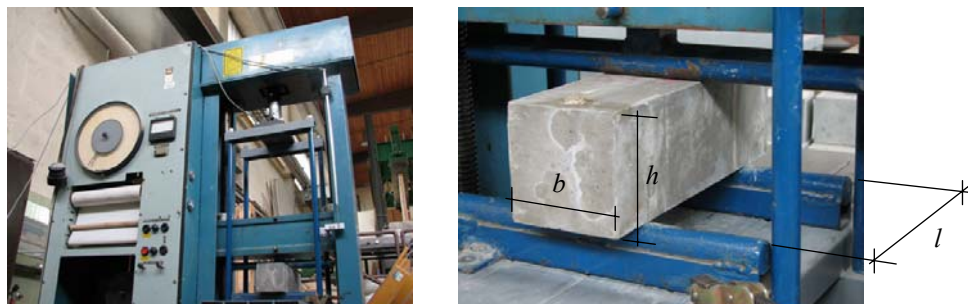
Fig. 5.47: Compressive strengths of the discussed concrete mixes at different age and different exposure

Na betonskih prizmah, ki so bile 16 mesecev potopljene v 4,4% raztopino Na₂SO₄ ali v vodi, smo opravili tudi preiskavo upogibne natezne trdnosti betona f_{cf} . Preiskavo smo opravili s tlačno prešo z nižjo kapaciteto (50 kN), kot kaže slika (Slika 5.48). Silo pri upogibni porušitvi betona F_{up} smo zajemali z računalnikom. Upogibna natezna trdnost se določi po enačbi:

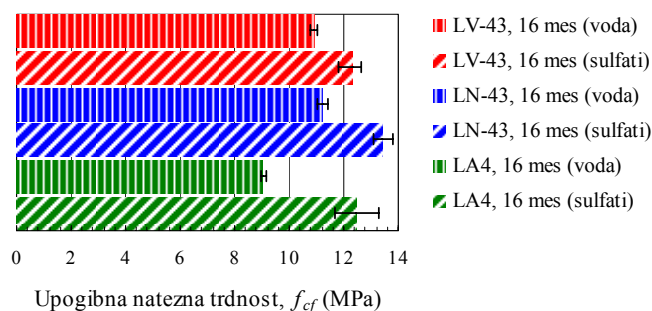
$$f_{cf} = \frac{6M_{up}}{bh^2} = \frac{3F_{up}l}{2bh^2}, \quad (41)$$

kjer je l razdalja med podporama, b širina in h višina prereza betonskega preizkušanca (Slika 5.48, desno). Sila F_{up} pri tem deluje v sredini med podporama, tj. na razdalji od podpor $l/2$. Na diagramu (Slika 5.49) so prikazani rezultati preizkusa upogibne natezne trdnosti betonskih vzorcev, ki so bili 16 mesecev izpostavljeni sulfatom ali vodi. Iz rezultatov na diagramu (Slika 5.49) je razvidno, da so betonske prizme, ki so bile 16 mesecev potopljene v sulfatni raztopini, izkazale v povprečju 24% večjo upogibno natezno trdnost kot tiste, ki so bile v vodi. Največjo razliko je ponovno moč opaziti pri betonskih preizkušancih aeriranega SCC LA4. Očitno so se pri 16 mesečni izpostavljenosti betona

4,4% raztopini Na_2SO_4 v cementnem kamnu tvorili novi kristali (sekundarni etringit in morda tudi gips) do takšne mere, da so na upogibno natezno trdnost betona vplivali ugodno.

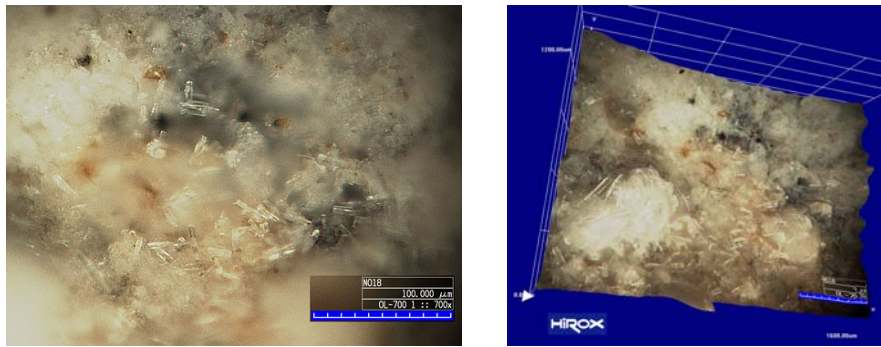


Slika 5.48: Tlačna preša (levo) za preizkus upogibne natezne trdnosti betona (desno)
Fig. 5.48: Compression machine (left) for bending tensile strength of concrete (right)



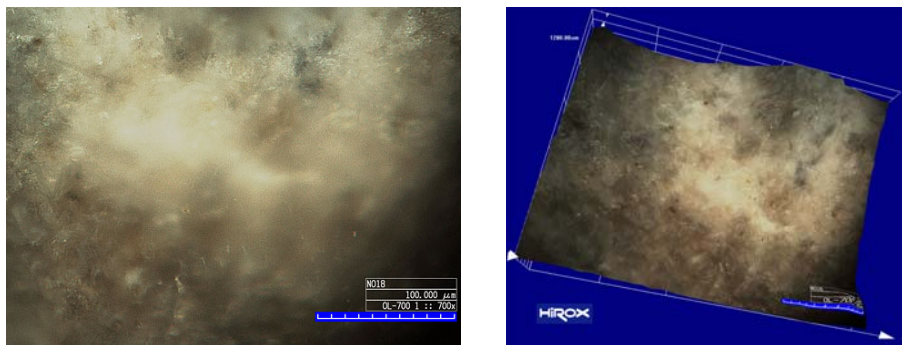
Slika 5.49: Upogibna natezna trdnost betonskih vzorcev pri 16 mesečni različni izpostavljenosti
Fig. 5.49: Bending tensile strength of concrete specimens after 16 months of different exposure

Na betonskih prizmah, ki so bile 16 mesecev potopljene v sulfatno raztopino ali v vodo, smo opravili tudi mikroskopsko analizo z optičnim mikroskopom pri povečavi 700x. Mikroskopske slike so prikazane na slikah (Slika 5.50)-(Slika 5.55). Iz slik (Slika 5.50), (Slika 5.52) in (Slika 5.54) je lepo razvidna tvorba kristalov, ki najverjetneje predstavljajo sekundarni etringit, saj jih v takšni meri in obliki pri betonskih preizkušancih, ki so bili potopljeni v vodo, ni bilo moč zaznati. Če bi želeli določiti, ali gre morda tudi za tvorbo kristalov taumazita, bi bilo potrebno opraviti mikroskopsko analizo z elektronskim mikroskopom ali z optičnim mikroskopom na zbruskih pri polarizirani svetlobi. Taumazit namreč po obliki spominja na kristale etringita, a je pod polarizirano svetlobo rumenkast, medtem ko je etringit prozorno bel (St John, Poole, Sims, 1998). Iz mikroskopskih slik je prav tako lepo razvidno, da je do najintenzivnejše tvorbe kristalov (najverjetneje sekundarni etringit) prišlo pri SCC z apnenčevo moko (Slika 5.52), a zgolj v zračnih porah tik ob površini betonskih vzorcev, ki so bili potopljeni v sulfatno raztopino. Tovrstnih kristalastih tvorb v notranjosti betonskih vzorcev LN-43 ni bilo. Pri vzorcih vibriranega betona LV-43 in aeriranega SCC LA4 je bilo moč opaziti tvorbo tovrstnih kristalov tudi globlje proti notranjosti betonskih vzorcev, a v precej manjši meri kot pri vzorcih SCC LN-43. Kaže, da je lahko tvorba kristalov zaradi kemijske reakcije med sulfatnimi ioni iz okolice in hidratizirano cementno pasto v betonu intenzivnejša v primeru dodatka apnenčeve moke, ampak je ravno v tem primeru zaradi posledično gostejše matrice cementnega kamna vdor sulfatnih ionov v notranjost betona manj intenziven.



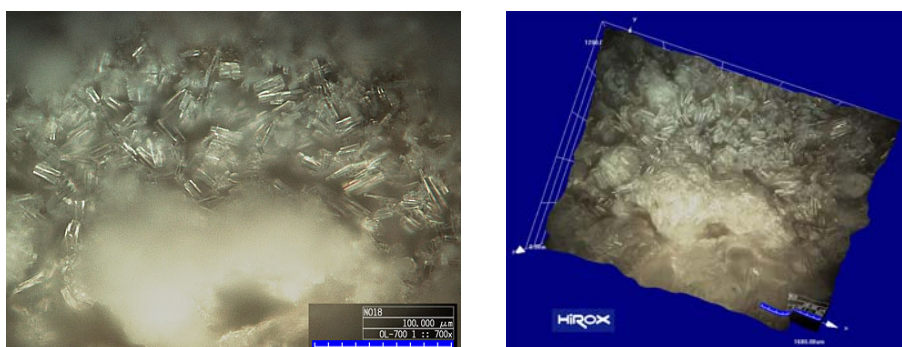
Slika 5.50: Mikroskopski sliki tvorb kristalov v zračni pori v vrhnjem sloju betonske prizme LV-43, ki je bila potopljena v sulfatno raztopino. Dolžina skale je 100 μm

Fig. 5.50: Photomicrographs of fibrous crystals in an air void near the surface of LV-43 prism, which was immersed in sodium sulfate solution. Scale bar length is 100 μm



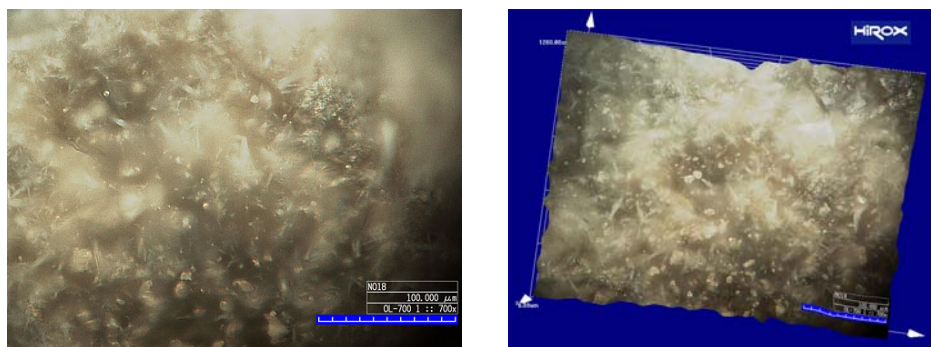
Slika 5.51: Mikroskopski sliki produktov hidratacije v zračni pori betonske prizme LV-43, ki je bila potopljena v vodo. Dolžina skale je 100 μm

Fig. 5.51: Photomicrographs of hydration products in an air void of LV-43 prism, which was immersed in water. Scale bar length is 100 μm



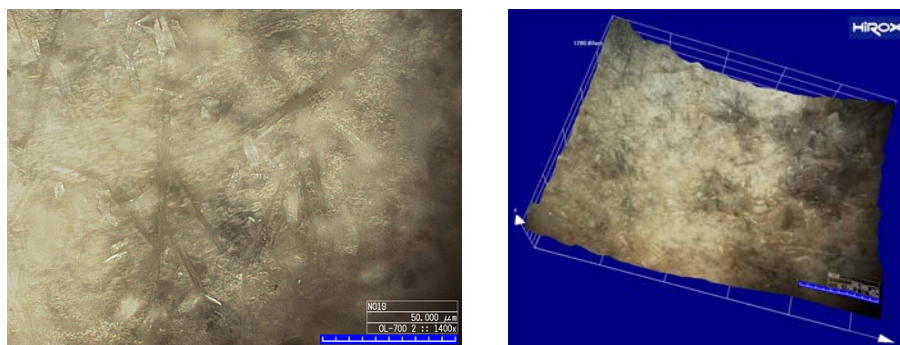
Slika 5.52: Mikroskopski sliki tvorb kristalov v zračni pori v vrhnjem sloju betonske prizme LN-43, ki je bila potopljena v sulfatno raztopino. Dolžina skale je 100 μm

Fig. 5.52: Photomicrographs of fibrous crystals in an air void near the surface of LN-43 prism, which was immersed in sodium sulfate solution. Scale bar length is 100 μm



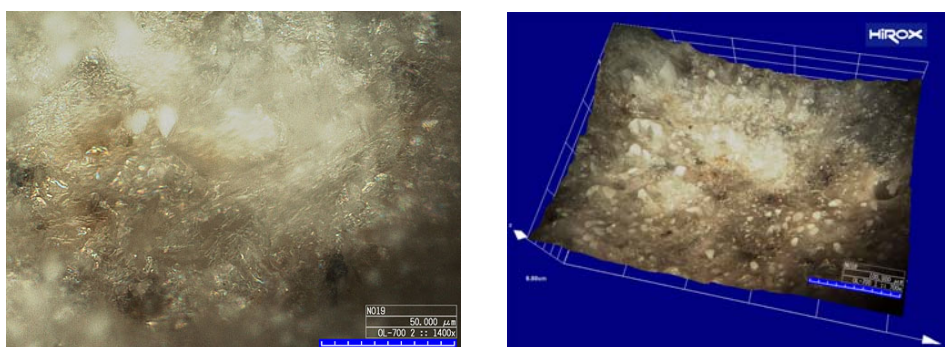
Slika 5.53: Mikroskopski sliki produktov hidratacije v zračni pori betonske prizme LN-43, ki je bila potopljena v vodo. Dolžina skale je 100 μm

Fig. 5.53: Photomicrographs of hydration products in an air void of LN-43 prism, which was immersed in water. Scale bar length is 100 μm



Slika 5.54: Mikroskopski sliki tvorbo kristalov v zračni pori v vrhnjem sloju betonske prizme LA4, ki je bila potopljena v sulfatno raztopino. Dolžina skale je 100 μm

Fig. 5.54: Photomicrographs of fibrous crystals in an air void near the surface of LA4 prism, which was immersed in sodium sulfate solution. Scale bar length is 100 μm



Slika 5.55: Mikroskopski sliki produktov hidratacije v zračni pori betonske prizme LA4, ki je bila potopljena v vodo. Dolžina skale je 100 μm

Fig. 5.55: Photomicrographs of hydration products in an air void of LA4 prism, which was immersed in water. Scale bar length is 100 μm

Za oceno dolgotrajnega učinka sulfatov na beton bi bilo potrebno preiskavo izvajati več kot 16 mesecev. Nekateri tuji raziskovalci jo izvajajo tudi do 5 let. Toliko časa pri doktorskem delu nismo imeli na voljo. Lahko pa zaključimo, da po letu in pol 20°C in 5°C izpostavljenosti približno 10-krat večjim koncentracijam sulfata kot jih najdemo v zemljinah SCC z relativno veliko količino apnenčeve moke (250 kg/m³), z v/c razmerjem 0,43 in 400 kg/m³ cementa, ni poškodovan.

Velja še omeniti, da je v tem poglavju določena upogibna natezna trdnost SCC z apnenčevo moko (LN-43) relativno visoka. Če upoštevamo zvezo med upogibno natezno trdnostjo betona f_{cf} in osno natezno trdnostjo betona f_{ct} po Muravljovu (1983), in sicer:

$$f_{cf} = (1,7 \sim 2,2)f_{ct} , \quad (42)$$

je ocena 16-mesečne natezne trdnosti SCC LN-43 nekje od 5,1 do 6,6 MPa, kar je precej več, kot smo lahko ocenili iz cepilnega nateznega preizkusa, in sicer 3,8 MPa (poglavje 4.5). Detajli preiskave, s katero so bile določene natezne trdnosti betona v različnih trdnostih razredih v Evrokodu 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005), niso znane. Primerjave z EC2 so zato nemogoče. Kaže pa, da bi z oceno natezne trdnosti betona iz upogibnega nateznega preizkusa pri obravnavanem SCC dobili vrednosti, ki jih najdemo v EC2.

6 AVTOMATIZACIJA METODE EN 480-11

6.1 Uvod

Metoda za ugotavljanje značilnosti zračnih por v strjenem betonu, predpisana v SIST EN 480-11 (2005), je v klasični izvedbi z mikroskopom zelo dolgotrajna in močno odvisna od izkušenosti ter natančnosti izvajalca. Želja po avtomatizaciji te stereološke metode je tako prisotna že od nekdaj.

Ker gre za stereološko metodo, ki temelji na zakonih geometrijske verjetnosti, smo pred načrtovanjem avtomatizacije postopka opravili validacijo metode. Določili smo njeno ponovljivost in občutljivost na merske napake, bodisi zaradi preiskovalne opreme ali izvajalca, ter ocenili natančnost dobljenih rezultatov pri predpisani minimalni velikosti testnega sistema. Šele s poznavanjem napake same metode lahko ocenimo uspešnost in ustreznost sestavljenega avtomatiziranega sistema.

6.2 Validacija metode EN 480-11

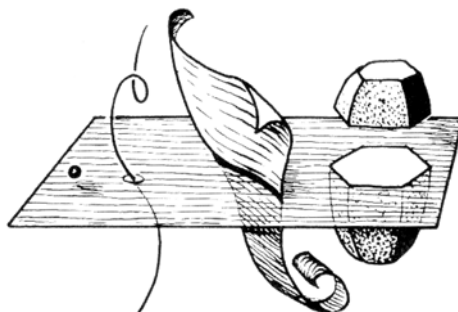
Kot že rečeno je LMA stereološka metoda. Stereološke metode in postopki omogočajo kvantitativne ocene o tridimenzionalni notranji zgradbi teles iz dvodimenzionalnih presekov skozi. Vsi tovrstni postopki so razviti na podlagi ustreznih matematičnih modelov, ki so v tesnem stiku s statistiko in verjetnostnim računom. Stereološka teorija nas pouči, da smemo iz enega ali več reprezentativnih presekov skozi objekt ocenjevati nekatere parametre, s katerimi kvantitativno opišemo lastnosti zanimivih sestavin objekta v tridimenzionalnem prostoru, če upoštevamo zakone geometrijske verjetnosti (Kališnik, 2002). Eno teh pravil je Delessejeva zveza med površinsko (arealno) in prostorninsko gostoto (Russ, Dehoff, 2000). In sicer, prostorninsko gostoto V_V neke sestavine v opazovanem objektu je moč oceniti z merjenjem površinske gostote S_S te sestavine na poljubnem prerezu skozi ta objekt. Torej:

$$V_V = S_S \quad (43)$$

Za notranjo zgradbo vsakega telesa je značilna sestavljenost iz soodvisnih delov (sestavlin, komponent, struktur) v določenem organizacijskem vzorcu. Skupnost vseh istovrstnih sestavin imenujemo faza. Posamezne faze so lahko zvezne ali pa nezvezne. V slednjem primeru največkrat govorimo o delcih (v primeru LMA o zračnih porah). Vsaka sestavina kakega telesa ima določeno prostornino, površino, dolžino in število. Za stereološko analizo telo presekamo z ravnino. Tako dobimo presek telesa. Sliko posamezne sestavine v preseku imenujemo sled ali profil. Sled tridimenzionalne sestavine je dvodimenzionalna ploskev, sled dvodimenzionalne ploskve je enodimenzionalna črta, sled enodimenzionalne črte je brezdimezionalna točka, brezdimezionalna točka pa praviloma nima sledi v presečni ravnini (Slika 6.1). Ravnina, s katero presekamo proučevano telo, imenujemo testna ravnina. Testni sistem pa imenujemo skupnost geometrijskih elementov (točk, črt in ploskev), urejenih med seboj v določen pravilen sistem, s katerim opravimo meritve (Kališnik, 2002).

Kot že navedeno v prejšnjem poglavju standard SIST EN 480-11 (2005) opisuje strukturo sistema zračnih por v strjenem betonu z naslednjimi parametri: skupni delež zraka A , specifična površina sistema zračnih por α , faktor oddaljenosti \bar{L} , porazdelitev zračnih por in delež mikro-por A_{300} . Zračna pora je definirana kot prostor zajet v cementnem kamnu in zapolnjen bodisi z zrakom ali s kakšnim drugim plinom. Med zračne pore ne šteje prostor dimenzij manjših od 1 μm , tj. poroznost

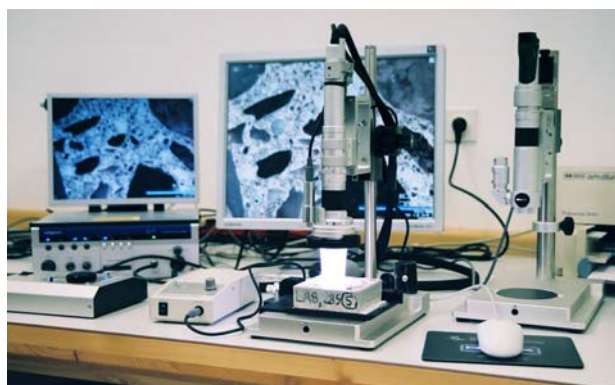
cementnega kamna. Prav tako se ne upoštevajo zračne pore, katerih presečne tetive testne črte so večje od 4 mm, ter morebitne očitne razpoke v cementnem kamnu.



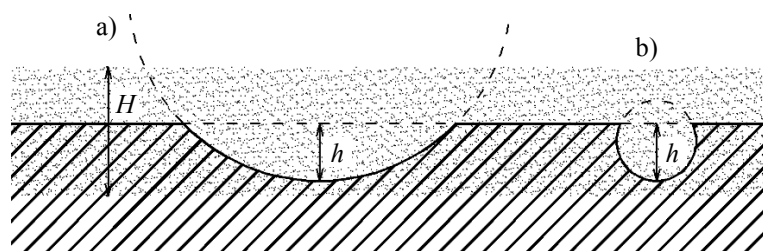
Slika 6.1: Skica preseka n -dimenzionalnih objektov, pri čemer v splošnem dobimo $(n-1)$ -dimenzionalne sledi (Kališnik, 2002)

Fig. 6.1: Section of n -dimensional objects with $(n-1)$ -dimensional profiles, in general (Kališnik, 2002)

Za namene LMA standard navaja, da bi naj bile vse zračne pore pri testni povečavi $(100 \pm 10) \times$ vidne. Rezultati naših preiskav so pokazali, da to ni nujno res. Pri mikroskopih z navpično osvetlitvijo (Slika 6.2) in visoko globinsko ostrino je skoraj nemogoče identificirati vse tiste zračne pore, ki so bodisi zaradi naključnega reza vzorca prerezane ob svojem vznožju (Slika 6.3a) ali pa so tako majhne (Slika 6.3b), da je globina njihovih kraterjev h manjša od globinske ostrine mikroskopa H pri testni povečavi. V teh primerih bosta na mikroskopski sliki obenem izostreni površina vzorca in dno kraterja zračne pore. Človeško oko tako praviloma ne bo zaznalo zadostne spremembe v ostrini med dnom kraterja zračne pore in površino vzorca, tudi pri vrtenju mikrometrskega vijaka za izostritev, tj. pri iskanju nove fokusne ravnine. Slednje je sicer zelo uporabno pri zračnih porah, ki so dovolj velike in obenem niso prisekane ob svojem vznožju. Mikro-kraterji le-teh imajo namreč globino večjo ali vsaj enako globinski ostrini mikroskopa pri testni povečavi.



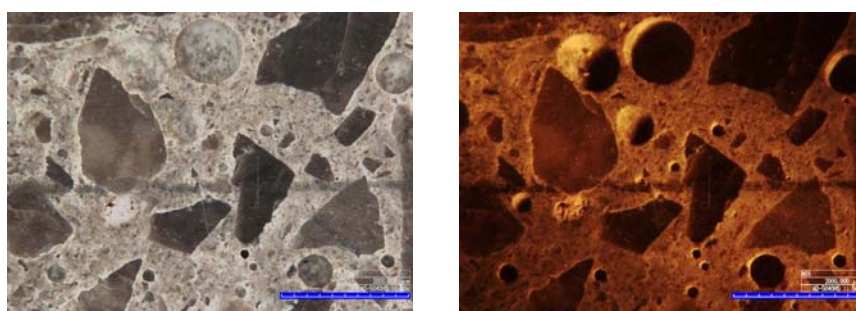
Slika 6.2: Optični mikroskop z navpično osvetlitvijo HIROX KH-3000, s katerim smo opravili LMA
Fig. 6.2: Optical microscope with vertical lighting HIROX KH-3000, which we have used for the LTM



Slika 6.3: Skica prečnega prereza polirane površine betonskega vzorca z dvema tipičnima primeroma zračnih por, pri katerih je $h < H$: a) zračna pora, prisekana ob svojem vznožju; b) zelo majhna zračna pora

Fig. 6.3: Cross-section of a polished concrete specimen surface with two typical air voids with $h < H$: a) air void cut shallow; b) very small air void

Poleg problema identifikacije zračnih por z $h < H$ nastopi še problem raznih vzorcev na polirani površini matrice cementnega kamna, ki s svojo okroglasto obliko spominjajo na zračne pore (Slika 6.4, levo). Ti vzorci nastanejo zaradi naključnega reza drobnozrnatega agregata in morebitnih praškastih delcev v betonu. Opisana problema smo rešili tako, da smo testno površino vzorca osvetlili s strani, in sicer pod čim večjim kotom odklona od navpičnice. Tako so dejanske zračne pore, tudi tiste z globino $h < H$, v svojih kraterjih dobile senco in močno osvetljen rob na nasprotni strani, vzorci v matrici cementnega kamna, ki zgolj spominjajo na zračne pore, pa ne (Slika 6.4, desno). Šele z osvetlitvijo s strani lahko govorimo o nedvoumni identifikaciji zračnih por na polirani površini betonskega vzorca pri testni povečavi. Standard SIST EN 480-11 (2005) je glede na današnjo paleto optičnih mikroskopov v tem pogledu premalo natančen, saj v zahtevah za testno opremo navaja zgolj »oprema za osvetlitev«. Glede na velikost napake zaradi nezmožnosti identificiranja zračnih por v primeru nepravilnega pristopa, ki bo prikazana v nadaljevanju, bi bilo v standard smiselno dodati stavek o pravilni uporabi te opreme za osvetlitev. Zgolj za primerjavo naj navedemo, da je v ameriški različici metode LMA (ASTM C 457, 1998) zgoraj naveden pristop z osvetlitvijo s strani zelo jasno in natančno predstavljen.



Slika 6.4: Mikroskopska slika polirane površine vzorca pri navpični osvetlitvi (levo) in pri osvetlitvi s strani (desno). Povečava zajetih slik je 50x. Dolžina skale je 2000 µm

Fig. 6.4: Photomicrograph of a polished specimen surface at vertical lighting (left) and at side lighting (right). Photomicrographs are taken at the magnification of 50x. Scale length is 2000 µm

Napaka, ki jo torej lahko naredimo z uporabo mikroskopa z navpično osvetlitvijo in visoko globinsko ostrino, je prikazana na primeru v preglednici (Preglednica 6.1). Primerjalno analizo LMA pri

navpični in stranski osvetlitvi smo opravili na naključno izbranem vzorcu aeriranega samozgoščevalnega betona pri identičnem testnem sistemu (testne črte smo zarisali na testno površino). Analizo je opravila ista oseba, in sicer najprej z navpično in po tem s stransko osvetlitvijo. Iz preglednice (Preglednica 6.1) je razvidno, da pri uporabi mikroskopa z navpično osvetlitvijo in visoko globinsko ostrino ni bilo moč identificirati 68 zračnih por od skupaj 292, kar je skoraj četrtina. Če še enkrat pogledamo skico obeh tipov zračnih por z globino $h < H$ (Slika 6.3), je statistično gledano za pričakovati, da so to v večini majhne zračne pore in ne velike naključno prisekane popolnoma ob svojem vznožju. Detajlna analiza pokaže, da je res kar 93% od vseh 68 neidentificiranih por imelo presečno tetivo manjšo od $100 \mu\text{m}$. Zato je tudi napaka v ocenjenem skupnem deležu zraka A v primeru navpične osvetlitve relativno majhna. Tako majhne pore namreč ne doprinesejo veliko k skupnemu deležu zraka v betonu. Kar se tiče vseh preostalih parametrov metode, pa je napaka v primeru neupoštevanja teh mikro-por vse prej kot zanemarljiva.

Preglednica 6.1: Primerjava rezultatov LMA pri navpični in stranski osvetlitvi
Table 6.1: Comparison of the LTM results at the vertical and side lighting

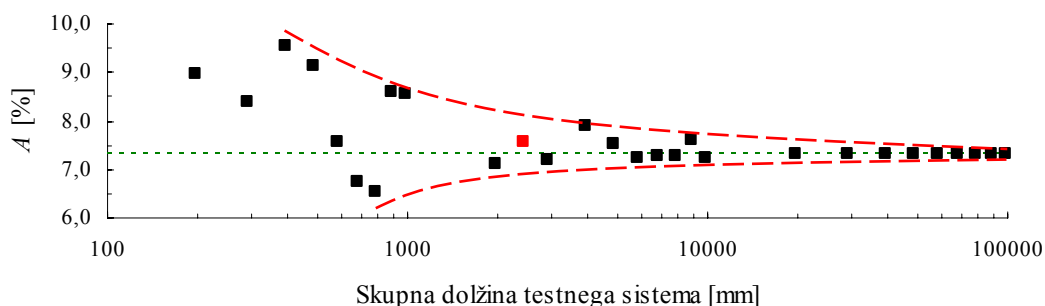
Parameter	Osvetlitev s strani	Navpična osvetlitev	Relativna napaka
A (%)	4,22	4,01	5%
α (mm^{-1})	11,58	9,34	19%
\bar{L} (mm)	0,510	0,647	27%
A_{300} (%)	0,53	0,26	51%
N	292	224	23%

Ponovljivost metode ocenimo na istem vzorcu kot zgoraj, pri čemer LMA ponovno izvede druga oseba, pri stranski osvetlitvi. Primerjava rezultatov je prikazana v preglednici (Preglednica 6.2). Iz preglednice je razvidno, da večina parametrov metode pri ročni izvedbi LMA z istim mikroskopom in identičnim testnim sistemom skoraj ni občutljiva na ponovitev. Če bi medsebojno primerjali posamezne meritve obeh izvedb LMA, bi sicer opazili, da je drugi izvajalec izmeril kar 115 presečnih tetiv v povprečju 13% daljših kot prvi ter 79 tetiv v povprečju 12% krajših (pri preostalih 30 tetivah se je meritev ujemala). Ker je metoda zastavljena tako, da se napaka v meritvah pri računu večine parametrov odšteva, je končni rezultat obeh operaterjev skoraj enak. Pri tem sicer močno izstopa parameter A_{300} . Rezultat na prvi pogled preseneča, saj bi se tudi pri oceni tega parametra napaka morala odštevati – nekaj tetiv je izmerjenih večjih kot v prvem poskusu, nekaj pa manjših. Če pogledamo definicijo parametra A_{300} podrobneje, lahko opazimo, da se vrednost zanj vzame neposredno iz računa porazdelitve zračnih por, natančneje iz močno lomljene krivulje kumulativnega deleža zraka pri minimalni velikosti testnega sistema $T_{tot}^{\min} = 2400 \text{ mm}$, predpisani v SIST EN 480-11 (2005). Tako je dobljena razlika v vrednosti A_{300} pri ponovni izvedbi LMA v veliki meri posledica lokalnih minimumov ali maksimumov omenjene krivulje. Najverjetneje bi boljšo oceno za delež mikro-por dobili že, če bi lomljeno krivuljo kumulativnega deleža zraka aproksimirali z neko bolj gladko trendno funkcijo. Tako bi se znebili ekstremnih vrednosti lokalnih minimumov in maksimumov. Zanesljivo pa do bolj točne ocene parametra A_{300} , in tudi same porazdelitve zračnih por, pridemo tako, da za analizo izberemo večji testni sistem. Vsaka dodatna testna linija dolžine 100 mm sicer predstavlja od 20 do 30 minut dodatnega dela, odvisno od stopnje aeriranosti preiskovanih betonskih vzorcev.

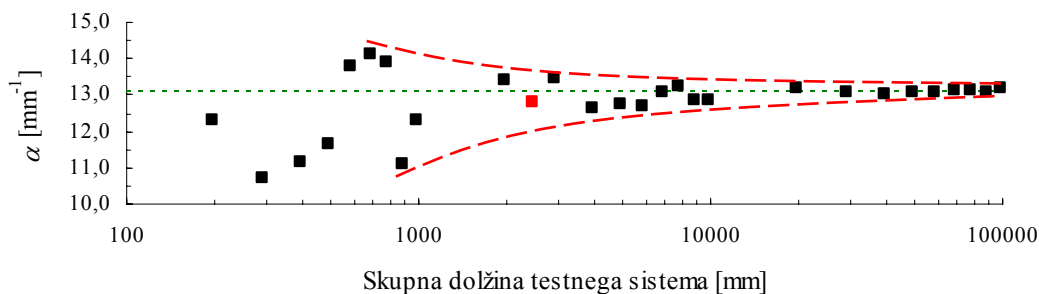
Preglednica 6.2: Primerjava rezultatov LMA dveh različnih izvajalcev
 Table 6.2: Comparison of the LTM results obtained by two different operators

Parameter	1. izvedba	2. izvedba	Relativna razlika
A (%)	4,01	4,05	1%
α (mm^{-1})	9,34	9,23	1%
\bar{L} (mm)	0,647	0,651	1%
A_{300} (%)	0,26	0,41	45%
N	224	224	0%

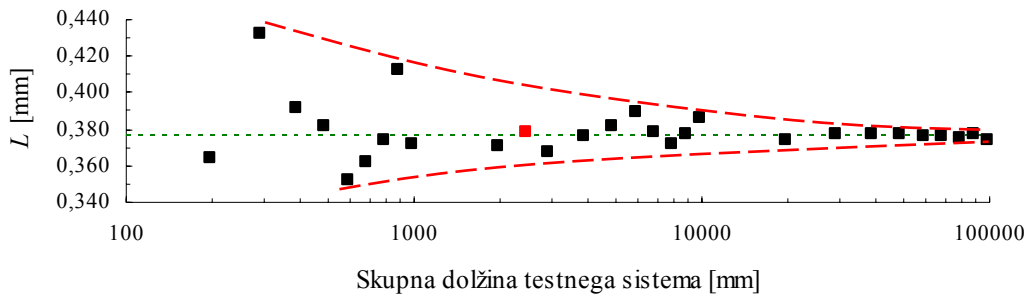
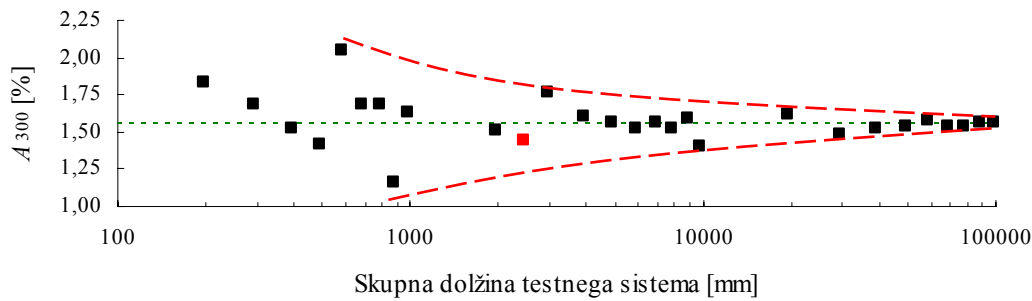
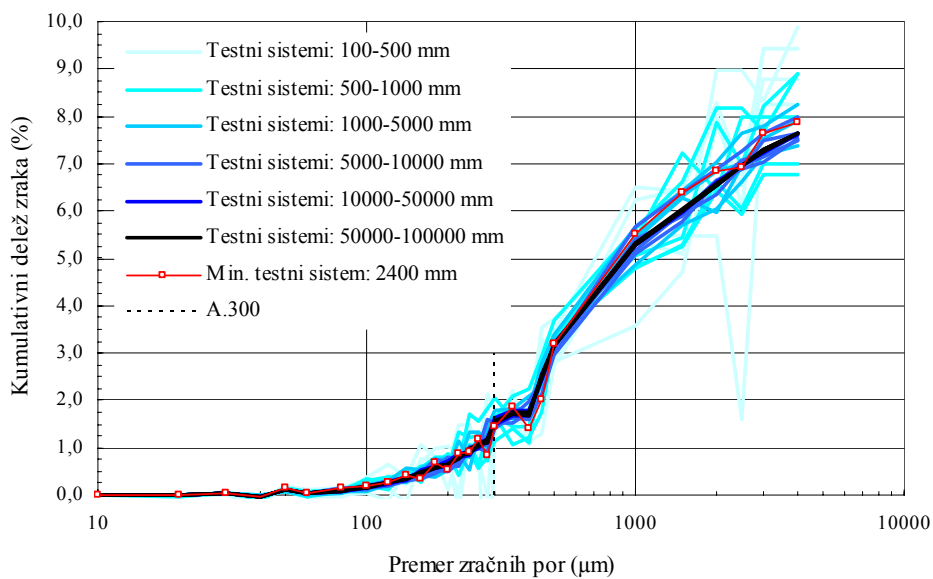
Za oceno občutljivosti parametrov metode LMA na velikost testnega sistema opravimo analizo več ponovitev LMA pri različnih velikostih testnega sistema. V ta namen smo izbrali vzorec aeriranega samozgoščevalnega betona s kvalitetno pripravljeno testno površino velikosti 100x100 mm. Analizo smo opravili z razvojno aplikacijo LMAir, ki bo predstavljena v naslednjih poglavjih. Testni sistem smo večali logaritemsko, in sicer od dveh testnih linij, dolžine približno 100 mm, do 10 linij, nato s korakom 10 linij in končno s korakom 100 linij vse do maksimalne izbrane velikosti testnega sistema 1000 linij. Testne linije so bile pri tem vedno razpršene enakomerno po celotni testni površini. Rezultati analize so prikazani na diagramih (Slika 6.5)-(Slika 6.9).



Slika 6.5: Parameter A v odvisnosti od velikosti testnega sistema
 Fig. 6.5: Dependency of the parameter A from the size of the probe system



Slika 6.6: Parameter α v odvisnosti od velikosti testnega sistema
 Fig. 6.6: Dependency of the parameter α from the size of the probe system

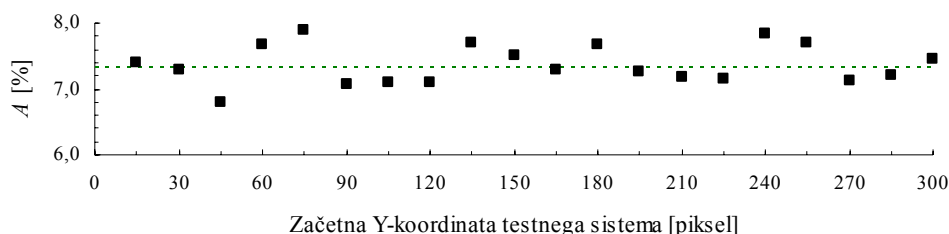
Slika 6.7: Parameter \bar{L} v odvisnosti od velikosti testnega sistemaFig. 6.7: Dependency of the parameter \bar{L} from the size of the probe systemSlika 6.8: Parameter A_{300} v odvisnosti od velikosti testnega sistemaFig. 6.8: Dependency of the parameter A_{300} from the size of the probe system

Slika 6.9: Porazdelitev zračnih por v odvisnosti od velikosti testnega sistema

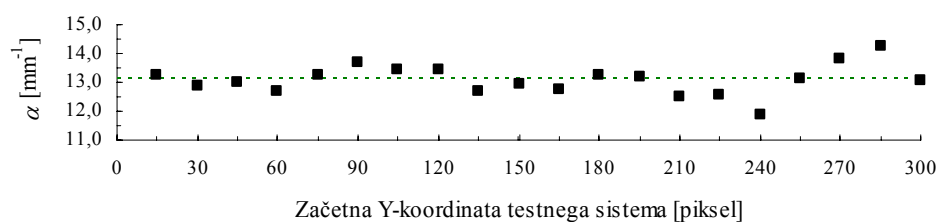
Fig. 6.9: Dependency of the air void distribution from the size of the probe system

Iz diagramov na slikah (Slika 6.5)-(Slika 6.9) je razvidno, da so ocene parametrov LMA pri predpisani minimalni skupni dolžini testnega sistema 2400 mm (rdeč kvadrateg) dobre. Ker smo pri vsaki izbrani velikosti testnega sistema opravili samo po eno analizo LMA pri naključno izbranem položaju testnih linij na testni površini, bi bilo dobljene rezultate bolj smiselno interpretirati preko približnih ovojnic ekstremnih vrednosti (rdeče črtkane krivulje). Šele tako lahko opazimo, da se odstopanja od pričakovanih vrednosti (za kar smo privzeli povprečje zadnjih petih vrednosti pri opravljeni analizi) ne »umirijo« vse do velikosti testnega sistema nekje nad 10.000 mm, kar je vsaj 4-krat več kot je minimalna predpisana velikost testnega sistema. Razlog za tako nizko postavljen T_{tot}^{min} je najverjetneje v dolgotrajnosti postopka klasične ročne izvedbe LMA. Že za izbrano minimalno velikost testnega sistema za eno preiskavo porabimo približno 10-20 ur natančnega mikroskopiranja, odvisno od stopnje aeriranosti preiskovanih betonskih vzorcev. Za 4-krat večji testni sistem bi torej porabili 40-80 ur. Gre torej za precej logičen povod za postavitev minimalne velikosti testnega sistema na relativno nizko vrednost. Glede na to, da pa napaka metode pri tem ni zanemarljivo majhna, bi bilo v standard smiselno dodati pričakovano relativno napako ocen LMA parametrov pri minimalni velikosti testnega sistema. Naj ponovno dodamo, da je pričakovana natančnost rezultatov LMA pri minimalni velikosti testnega sistema v sorodnem ameriškem standardu ASTM C 457 (1998) jasno podana.

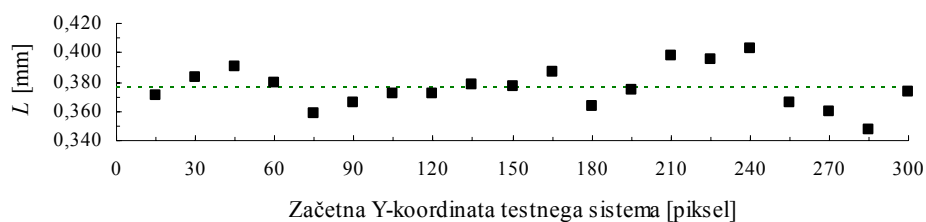
Da bi ocenili pričakovano natančnost rezultatov LMA pri minimalni velikosti testnega sistema tudi za postopek analize, ki je predpisan v našem standardu SIST EN 480-11 (2005), je potrebno analizo opraviti na čim večjem številu primerov različne postavitve testnih linij, katerih skupna dolžina je vedno 2400 mm. S sistemom LMAir smo tako na istem vzorcu kot zgoraj opravili 20 ponovitev analize LMA. Pri tem medsebojne razdalje med testnimi linijami nismo spreminjali, da smo dosegli čim bolj enakomerno analizo celotne površine vzorca. Premikali smo le globalni položaj testnega sistema, vsakič za 15 pikselov navzdol po testni površini. Rezultati analiz so prikazani na diagramih (Slika 6.10)-(Slika 6.14).



Slika 6.10: Parameter A v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm
Fig. 6.10: Dependency of the parameter A from the position of the probe system at its minimum size

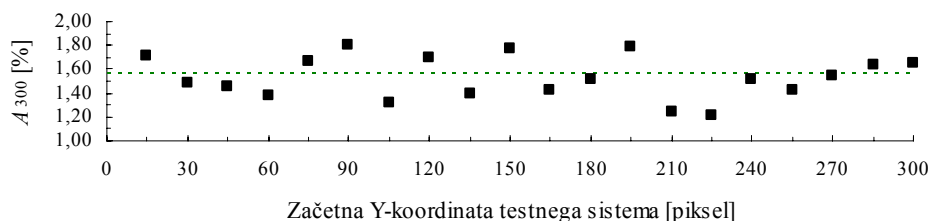


Slika 6.11: Parameter α v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm
Fig. 6.11: Dependency of the parameter α from the position of the probe system at its minimum size



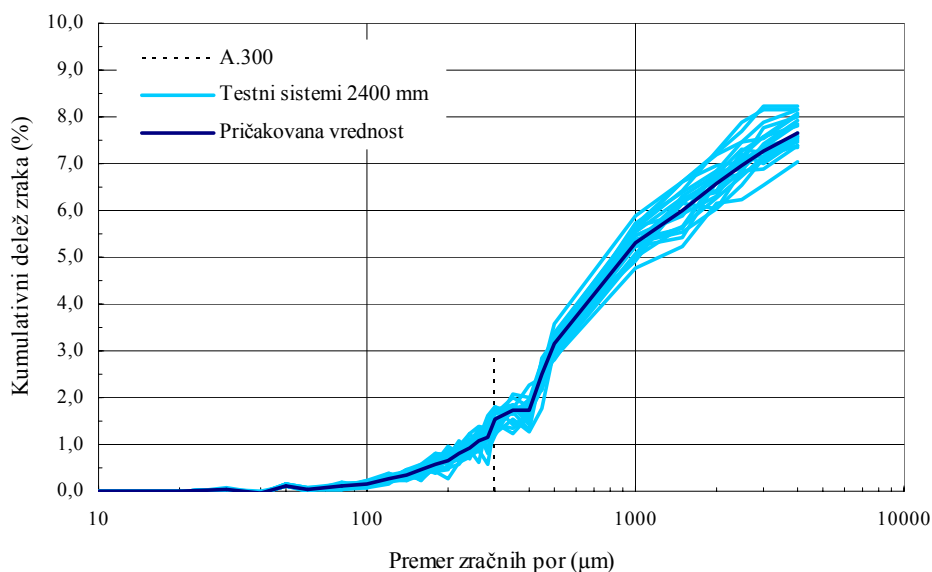
Slika 6.12: Parameter \bar{L} v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm

Fig. 6.12: Dependency of the parameter \bar{L} from the position of the probe system at its minimum size



Slika 6.13: Parameter A_{300} v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm

Fig. 6.13: Dependency of the parameter A_{300} from the position of the probe system at its minimum size



Slika 6.14: Porazdelitev zračnih por v odvisnosti od položaja testnega sistema pri minimalni velikosti 2400 mm

Fig. 6.14: Dependency of the air void distribution from the position of the probe system at its minimum size

Iz diagramov na slikah (Slika 6.10)-(Slika 6.14) je razvidno, da je metoda LMA pri predpisani minimalni velikosti testnega sistema še vedno precej odvisna od izbire položaja testnega sistema. Opazimo lahko tudi, da smo s pristopom ovojnic na diagramih (Slika 6.5)-(Slika 6.9) dobro ocenili interval pričakovanih vrednosti parametrov LMA pri minimalni velikosti testnega sistema. Npr. za

parameter A je zgornja analiza 20 ponovitev LMA potrdila interval pričakovanih vrednosti od približno 7% do 8%, itn. V preglednici (Preglednica 6.3) so prikazane statistike ocen vseh parametrov LMA. Pri interpretaciji dobljenih rezultatov moramo biti ponovno pozorni. Koeficient variacije V_X namreč v primeru normalno porazdeljene spremenljivke X zajema samo 68% vseh pričakovanih vrednosti. Če koeficient variacije pomnožimo z 2, s tem zajamemo že 96% vseh pričakovanih vrednosti. Šele vrednost $2V_X$ torej pokaže dejansko odstopanje skoraj vseh pričakovanih vrednosti od povprečne vrednosti \bar{X} , ali z drugimi besedami, šele vrednost $2V_X$ nam pove, kolikšno odstopanje od pričakovane prave vrednosti posameznega parametra lahko pričakujemo, ko analizo LMA opravimo samo enkrat pri minimalni velikosti testnega sistema. Glede na to, da ta odstopanja, kot že pričakovano, niso majhna, bi bilo smiselno za analizo LMA vzeti vsaj enkrat večji testni sistem. V tem vidimo še dodaten motiv za poskus avtomatizacije postopka, s čimer bi si to najverjetneje lahko privoščili.

Preglednica 6.3: Pričakovana natančnost dobljenih ocen parametrov LMA pri minimalnem testnem sistemu
Table 6.3: Precision and bias of the obtained LTM parameters at the minimum size of the probe system

Parameter	\bar{X}	min[X]	max[X]	var[X]	σ_X	V_X	$2V_X$
A (%)	7,37	6,80	7,90	0,0895	0,299	4,1%	8,1%
α (mm ⁻¹)	13,07	11,85	14,24	0,2741	0,524	4,0%	8,0%
\bar{L} (mm)	0,376	0,348	0,403	0,0002	0,014	3,7%	7,5%
A_{300} (%)	1,53	1,21	1,81	0,0324	0,180	11,7%	23,5%

V prispevkih (Duh, *et al.*, 2006) in (Duh, Žarnić, Bokan-Bosiljkov, 2007) smo predstavili tudi oceno občutljivosti metode LMA na velikost testnega sistema manjšega od minimalne predpisane vrednosti, s klasično ročno izvedbo LMA dveh različnih operaterjev, ter oceno občutljivosti LMA na položaj testnega sistema, pri minimalni predpisani velikosti, pri različnih deležih zraka v betonski mešanici.

6.3 Avtomatizacija metode EN 480-11

V zadnjih treh desetletjih je bilo v svetu predstavljenih več delno ali popolnoma avtomatiziranih sistemov, pri katerih človeka zamenja mehanizacija in analizator slike (Chatterji, Gudmundsson, 1977; Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001; Dequiedt, *et al.*, 2001; Zhang, Ansari, Vitillo, 2005; Jakobsen, *et al.*, 2006). Primer takšnega sistema je tudi danski RapidAir 457 (Slika 6.15). Gre za mehansko avtomatizacijo premikov preiskovanega vzorca pod mikroskopom in/ali glave mikroskopa ter računalniško avtomatizacijo štetja natančno določenih podatkov na zajeti sliki.

Kljub na prvi pogled popolni rešitvi problema, večina tujih raziskovalcev ugotavlja, da je za popolno zaupanje tako izmerjenim podatkom in dobljenim rezultatom metode človeški nadzor še vedno potreben. Še več, nekateri avtorji (Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001) celo zaključujejo, da takšna avtomatizirana analiza slike ne uspe pravilno oceniti določenih parametrov metode. Problem v največji meri predstavlja težavna priprava preiskovane površine betonskega vzorca, z namenom, da bi dosegli nedvoumno identifikacijo zračnih por v matrici cementnega kamna.



Slika 6.15: RapidAir 457 – analizator zračnih por (RapidAir, 2006)

Fig. 6.15: RapidAir 457 – Air void analyzer (RapidAir, 2006)

Kljub vsem dvomom je razvoj avtomatizacije tovrstnih stereoloških metod tekom zadnjih desetletij ostal zanimiv. Prihranek v času, potrebnem za izvedbo analize, je namreč ogromen. Končno, nedavni razvoj optičnih čitalcev z visoko resolucijo ponudi veliko novih možnosti na tem področju (Peterson, Sutter, Van Dam, 2002; Zalocha, Kasperkiewicz, 2005; Carlson, *et al.*, 2006). Ne le, da zajemanje slike z optičnim čitalcem popolnoma izloči potrebo po relativno počasni naravi človeške ali mehanske roke, tudi izjemno draga mehanizacija in mikroskop nista več potrebna. Nadalje, možnost naenkratnega zajema celotne preiskovane površine vzorca z optičnim čitalcem (Slika 6.16) omogoča tudi precej lažjo uporabo planarnih stereoloških metod. Slednje ponujajo možnost hitrejšega izvajanja analize slike in natančnejšega ocenjevanja stereoloških parametrov. Ob vseh teh prednostih se nam v fazi lastnega poskusa avtomatizacije postopka LMA porodi tudi ideja o avtomatizaciji izbire prave threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por. Posledični razvoj računalniških aplikacij, ki smo ju poimenovali LMAir in PMAir, je podrobno predstavljen v naslednjih poglavjih.



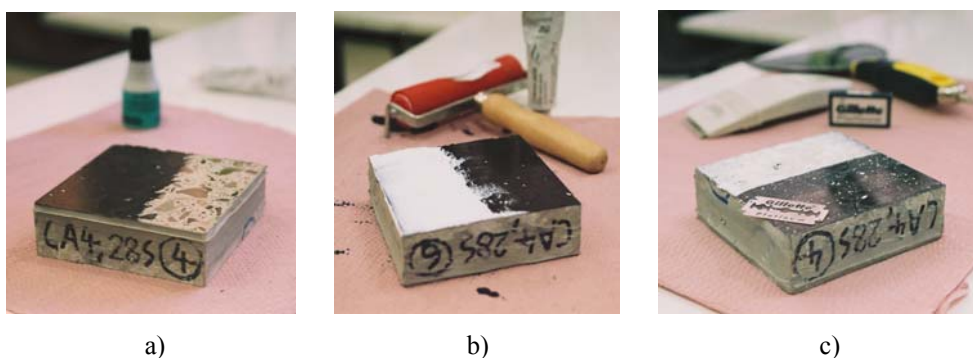
Slika 6.16: Naenkratno zajemanje celotne preiskovane površine vzorca z optičnim čitalcem z visoko resolucijo

Fig. 6.16: Scanning the whole specimen test surface at once with high-resolution flatbed scanner

6.3.1 Identifikacija problema avtomatizacije

Če želimo neko kvantitativno stereološko metodo avtomatizirati, moramo zagotoviti nedvoumno identifikacijo iskane faze v obravnavanem sistemu. V primeru metode EN 480-11 so to zračne pore v matrici strjenega betona. Standard SIST EN 480-11 (2005) v ta namen priporoča postopek (v nadaljevanju kontrastiranje), s katerim povečamo kontrast med zračnimi porami in vsemi preostalimi fazami betona, tj. cementni kamen in agregat. Postopek je sledeč. Ustrezno polirano preiskovano

površino betonskega vzorca premažemo s črnilom netopnim v vodi (Slika 6.17a). Vzorec osušimo v sušilnici, priporočeno pri 50°C vsaj 4h. Nato na preiskovano površino naneseemo kontrastno sredstvo bele barve (standard priporočja cinkovo pasto) tako, da se le-to čim boljše vtire v zračne pore (Slika 6.17b). Vzorec zamrznemo in nato odstranimo odvečno kontrastno sredstvo iz preiskovane površine. Pri tem standard priporočja dodaten nanos mavca v prahu, ki ga vtisnemo v predhodno naneseeno kontrastno sredstvo. S tem dosežemo ponovno ekspanzijo cinkove paste v zračnih porah, ki se je med zmrzovanjem skrčila. Veliko tujih raziskovalcev namesto cinkove paste uporablja barijev sulfat (BaSO_4), ki se med zmrzovanjem naj ne bi skrčil. Končno odvečen material odstranimo s strgalom. Lastne izkušnje so pokazale, da je najbolje uporabiti zelo ostro strgalo, npr. britvico (Slika 6.17c). Razlika med uporabo običajnega strgala in britvice je lepo razvidna iz slike (Slika 6.18).

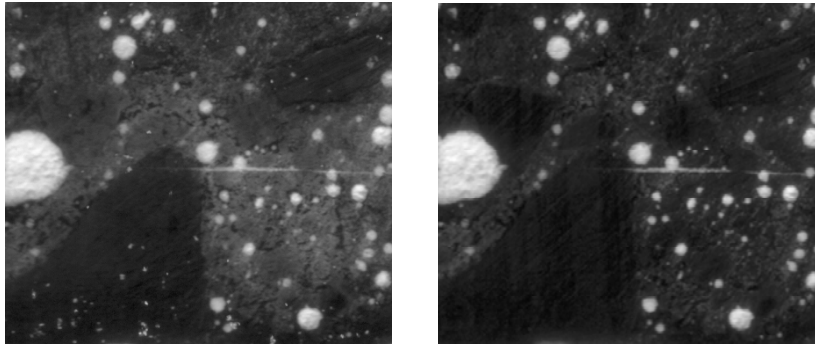


Slika 6.17: Faze kontrastiranja preiskovane površine betonskega vzorca: a) nanos črnila; b) nanos kontrastnega sredstva; c) odstranitev odvečnega materiala s strgalom

Fig. 6.17: Procedure of the concrete test surface contrast enhancement: a) applying ink; b) covering with contrast material; c) removing the excess material with a scraper

Iz slike (Slika 6.18) je lepo razviden tudi prvi problem, na katerega naletimo pri poskusu avtomatizacije postopka LMA. Kontrastno sredstvo namreč ne zapolni le zračne pore v matrici cementnega kamna, temveč tudi vse razpoke, mikro-razpoke, raze in morebitne pore v agregatu. Nedvoumna identifikacija iskane faze tako ni zagotovljena.

Drugi problem nastopi, ko moramo avtomatiziranemu sistemu, bodisi posredno ali neposredno, podati threshold vrednost za identifikacijo iskane faze. Iz slike (Slika 6.18) je razvidno, da površina betona kljub kontrastiranju še vedno ni popolnoma črno-bela. Sestavljena je iz temnejših sivin, ki predstavljajo agregatna zrna in cementni kamen, ter svetlejših sivin, ki v večini predstavljajo zračne pore. Če to threshold vrednost izberemo preveč konzervativno, tj. previsoko, se avtomatiziran sistem bodisi ne bo ustavil pri zračnih porah, ki niso popolnoma bele, ali pa jih ne bo upošteval v celoti. Rezultat bo podcenjevanje dejanskega stanja. V nasprotnem primeru bo rezultat avtomatizirane LMA na nevarni strani, saj bo vsaka svetlejša lisa na površini identificirana kot zračna pora.

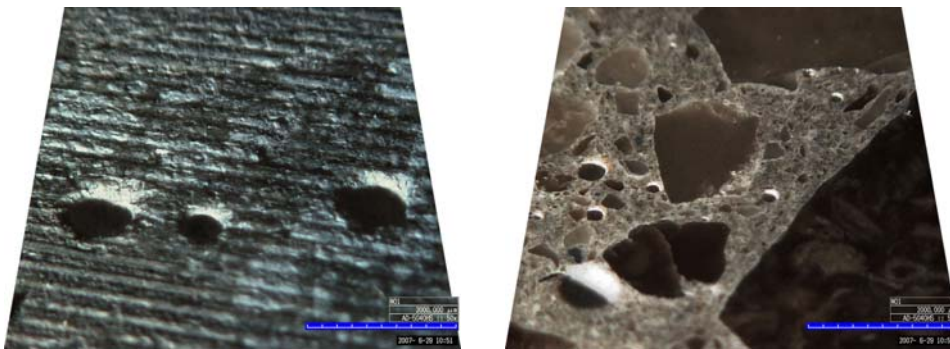


Slika 6.18: Kontrastirana površina betonskega vzorca s končno uporabo običajnega strgala (levo) in britvice (desno). Sliki sta zajeti z optičnim čitalcem pri enakih nastavitvah svetlosti in kontrasta

Fig. 6.18: Contrast enhanced surface of a concrete specimen with the final use of an ordinary scraper (left) and a razor blade (right). The images are obtained with a flatbed scanner at equal brightness and contrast settings

6.3.2 Ideje za rešitev problema kontrastiranja

Številne preiskave so pokazale, da je za kvalitetno kontrastiranje najpomembnejša predpriprava preiskovane površine betonskega vzorca. In sicer, ustrezno brušenje, kot kaže slika (Slika 6.19, desno). Standard SIST EN 480-11 (2005) v tej fazi predpisuje uporabo diamantne žage, za prvotno rezanje vzorca na predpisane dimenzije, in karborundne bruse za grobo in fino brušenje preiskovane površine vzorca. Tipične uporabljene velikosti zrna brusov bi naj bile 120, 60, 30, 16 in 12 μm . Šele v sorodnem ameriškem standardu ASTM C 457 (1998) je moč najti strokovne različice teh oznak brusov. Ameriški standard tako priporoča, podobno, bruse z velikostjo zrna 150, 75, 35, 17,5, in 12,5 μm oz. v strokovnih oznakah številke brusov 100, 220, 320, 600 in 800. Velja še omeniti, da je nasploh celoten postopek priprave vzorcev za preiskavo v ameriškem standardu napisan bolj natančno in precej bolj uporabno kot v evropskem.

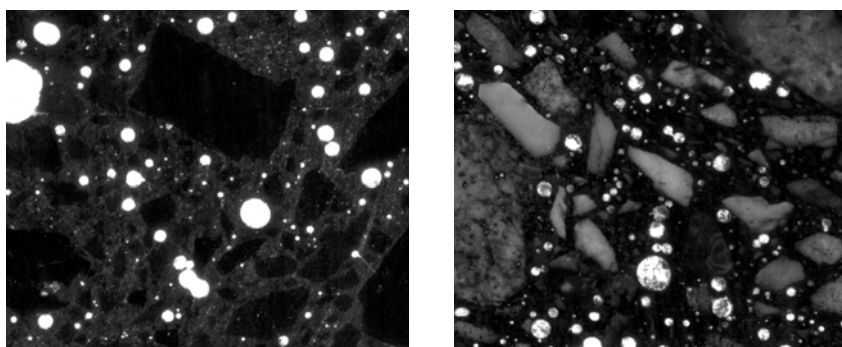


Slika 6.19: Neustrezno (levo) in ustrezno (desno) brušena površina betonskega vzorca. Sliki sta zajeti s tridimenzionalno tehniko optičnega mikroskopa Hirox (2002), pri povečavi 50x. Dolžina skale je 2000 μm

Fig. 6.19: Unsuitably (left) and suitably (right) lapped specimen surface. Photomicrographs of 3-D optical microscopy, patented by Hirox (2002), are taken at the magnification of 50x. Scale length is 2000 μm

Tekom preiskav se je pokazalo, da za tak način kontrastiranja, kot je opisan v poglavju 6.3.1, betonskih vzorcev ni priporočljivo brusiti s preveč finimi brusmi. Poliranje povzroči problem pregladke

površine agregatnih zrn. Tako v končni fazi strganja odvečnega materiala iz kontrastirane površine vzorca v veliki meri postrgamo tudi črnilo iz pregladke površine agregatnih zrn. Dodatna neugodna posledica tega je »zapackanje« velikega števila zračnih por, kot je razvidno iz slike (Slika 6.20, desno). Nedvoumna identifikacija zračnih por tako ni zagotovljena. Po drugi strani seveda želimo čim večjo gladkost cementnega kamna, da bi bili robovi nastalih mikro-kraterjev zračnih por čim bolj razpoznavni. Poiskati je torej potrebno nek kompromis med opisanima nasprotujočima si željama. Za lastne preiskave smo končno izbrali naslednji vrstni red brusov: 60, 120, 220, 320, 400 in 500. Pri tem so bili uporabljeni brusni firme TENAX, v Podjetju za pridobivanje, predelavo in montažo naravnega kamna Mineral d.d.

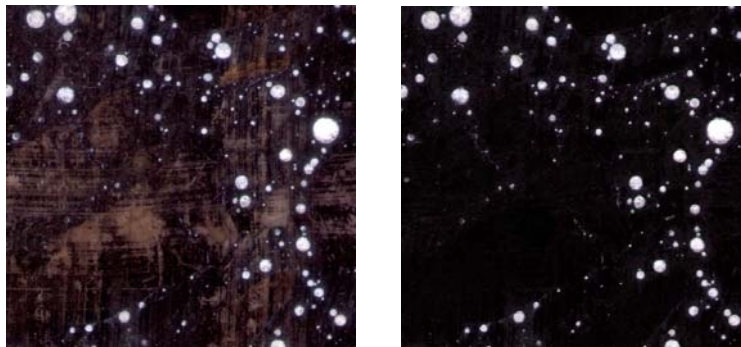


Slika 6.20: Rezultat kontrastiranja brušene (levo) in polirane (desno) površine betona. Sliki sta zajeti z optičnim čitalcem pri ločljivosti 1200 dpi in pri enakih nastavitvah svetlosti in kontrasta

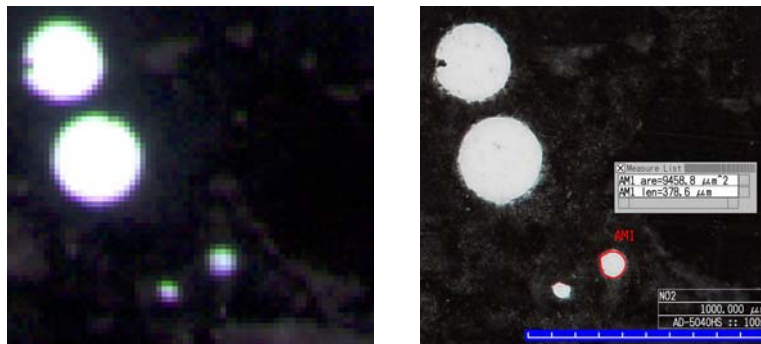
Fig. 6.20: The result of contrast enhancement of ground (left) and polished (right) concrete surface. The images are obtained with a flatbed scanner at resolution of 1200 dpi, with equal brightness and contrast settings

Delno rešitev problema pregladke površine agregatnih zrn pri poliranih vzorcih smo sicer dosegli z naslednjim pristopom. Če sliko kontrastirane površine poliranega vzorca zajamemo z barvnim modelom RGB (Slika 6.21, levo), lahko s korekcijo intenzitete barve ustreznih RGB kanalov zmanjšamo svetlost odseva agregatnih zrn, ki zaradi svoje geološke sestave ponavadi izkazujejo neko barvo. Tako zatemnjene površine agregatnih zrn praviloma ne motijo več identifikacije najmanjših zračnih por, ki izkazujejo zelo nizek kontrast, kot je razvidno iz slike (Slika 6.21, desno). Pri tem moramo biti pozorni, da ne zatemnimo barv, ki nastanejo ob robovih belo-kontrastiranih zračnih por zaradi kromatične aberacije optičnih čitalcev (Slika 6.22). Do podobne posledice kromatične aberacije pride tudi v primeru zajemanja slike z barvnim modelom sivin (*grayscale*).

Omembe vredno je morda tudi takojšnje čiščenje preiskovane površine betonskega vzorca po brušenju. Lastne izkušnje so pokazale, da je izpihovanje ostankov brušenja iz površine z zrakom pod pritiskom, kot priporoča standard SIST EN 480-11 (2005), zadostno, a samo če je opravljeno takoj po brušenju. V primeru, da se ostanki brušenja v mikro-kraterjih zračnih por zasušijo, jih je sicer še vedno moč v veliki meri izprati z uporabo ustrezne ultrazvočne kopeli, kot kaže primer na sliki (Slika 6.23). Za lastne preiskave smo v takšnih primerih uporabili ultrazvočno kopel UZ-Č-300 pri frekvenci 40 kHz in visokofrekvenčni moči 300 W. Končno se je izkazalo, da majhne količine ostankov ne ovirajo kvalitetnega kontrastiranja, saj uporabljeno kontrastno sredstvo dovolj dobro zapolni še tako majhne vdolbinice na preiskovani površini.

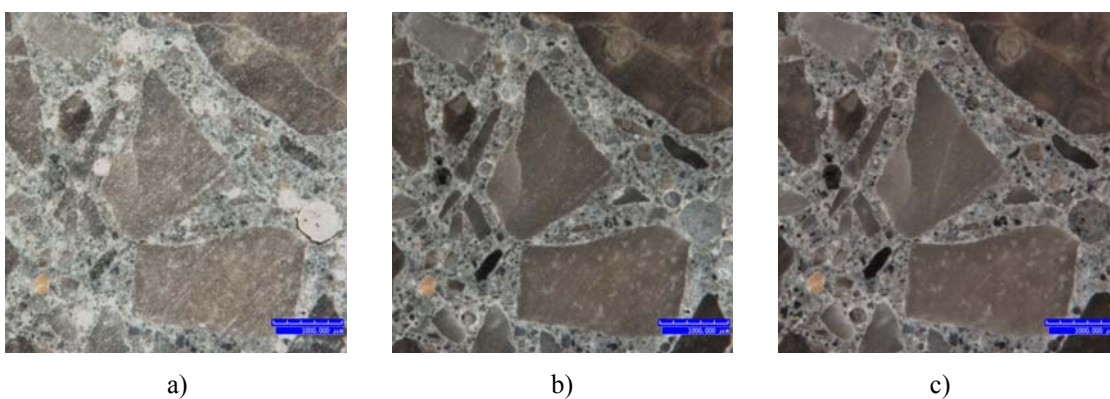


Slika 6.21: Korekcija (desno) barvi agregata ustreznih RGB kanalov zajete slike (levo)
 Fig. 6.21: Correction (right) of the adequate RGB channels in the captured image (left)



Slika 6.22: Posledica kromatične aberacije optičnih čitalcev (levo, slika je zajeta pri resoluciji 1200 dpi) in mikroskopska slika realnega stanja pri povečavi 100x (desno)

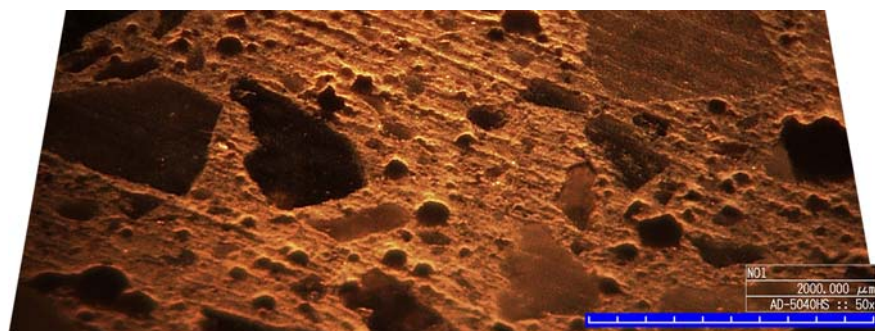
Fig. 6.22: Chromatic aberration of a flatbed scanner (left, the image is captured at the resolution of 1200 dpi) and a photomicrograph of the real state at the magnification of 100x (right)



Slika 6.23: Površina betonskega vzorca: a) 1 mesec po brušenju, brez zaključnega čiščenja; b) naknadno čiščena v ultrazvočni čistilni napravi; c) ponovno čiščena v ultrazvočni čistilni napravi. Slike so zajete z optičnim mikroskopom pri povečavi 50x. Dolžina skale je 1000 µm

Fig. 6.23: Surface of a concrete sample: a) 1 month after grinding, without final cleaning; b) cleaned using ultrasonic bath; c) cleaned again using ultrasonic bath. Photomicrographs are taken at the magnification of 50x. Scale length is 1000 µm

V fazi brušenja lahko nastopi še ena težava, in sicer pri betonih s šibko matrico cementnega kamna. Problem predstavlja iztrganje zrn drobnozrnatega agregata iz matrice cementnega kamna med brušenjem, kar povzroči razenje površine in spodrezanje cementnega kamna v okolici trših agregatnih zrn (Slika 6.24a). Do podobnega problema lahko pride tudi pri betonih s šibkim in drobljivim agregatom. Evropski standard EN 480-11 tega problema ne navaja. Ameriška različica ASTM C 457 (1998) problem detajlno opiše in priporoča tudi rešitev s postopkom voskanja šibke matrice cementnega kamna.



a)

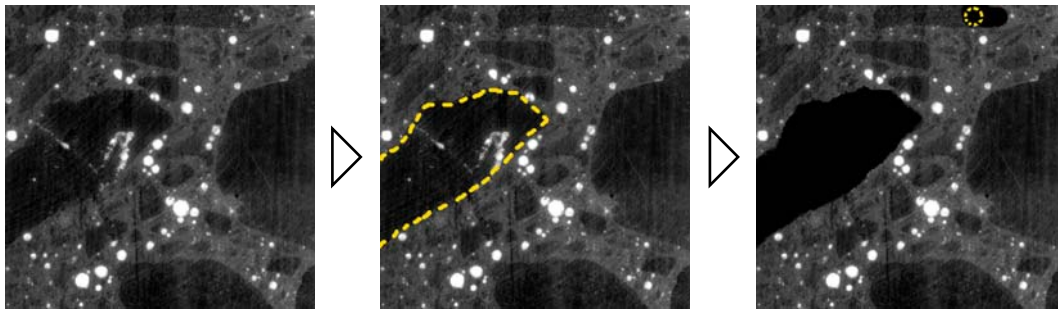


b)

Slika 6.24: Površina betonskih vzorcev po enakem postopku brušenja: a) aeriran vibriran beton z bodisi šibko matrico cementnega kamna ali šibkim agregatom; b) aeriran samozgoščevalni beton. Sliki sta zajeti s tridimenzionalno tehniko optičnega mikroskopa Hirox (2002) pri povečavi 50x

Fig. 6.24: Surface of concrete samples after equal procedure of grinding: a) aerated vibrated concrete with either weak cement-paste matrix or friable aggregate; b) aerated self-compacting concrete. Photomicrographs of 3-D optical microscopy, patented by Hirox (2002), are taken at the magnification of 50x

Kljub vsem zgoraj opisanim ukrepom za kvalitetnejšo predpripravo preiskovane površine betonskih vzorcev še vedno ostaja problem morebitnih por v agregatu, ki se v fazi kontrastiranja prav tako zapolnijo s kontrastnim sredstvom. Ker teh por ne smemo upoštevati kot zračne pore v matrici cementnega kamna, jih po kontrastiranju lahko prebarvamo s črnim flomastrom. Takšno delo sicer ponovno zahteva mikroskop in visoko natančnost izvajalca, je dolgotrajno in obenem še ireverzibilno. V primeru računalniške avtomatizacije, kjer celotno preiskovano površino zajamemo z optičnim čitalcem, lahko to delo opravimo v kateremkoli grafičnem računalniškem programu, kot kaže primer na sliki (Slika 6.25). Postopek je v tem primeru precej lažji, hitrejši in tudi reverzibilen.

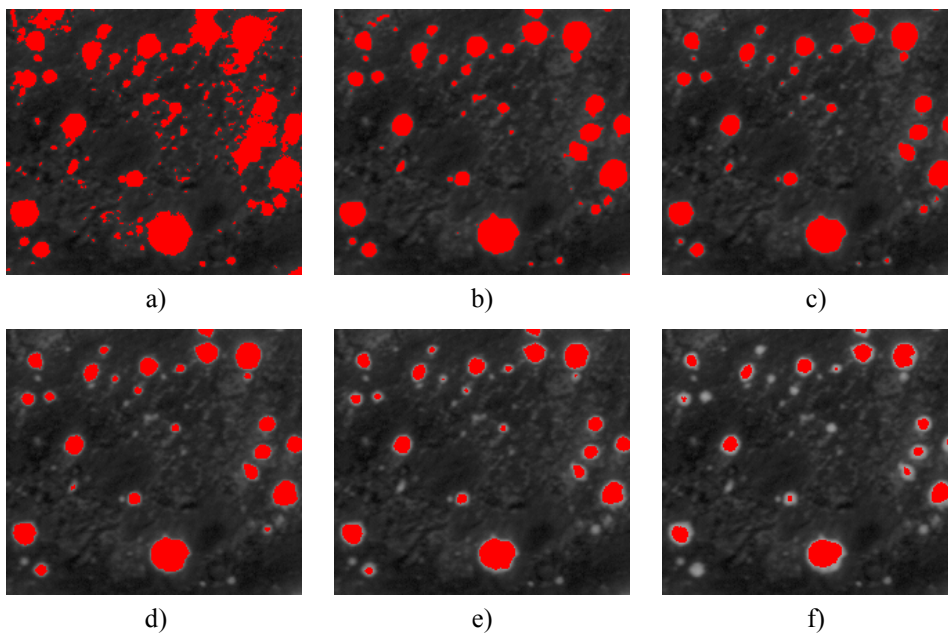


Slika 6.25: Rešitev problema morebitnih por v agregatu v primeru računalniške avtomatizacije

Fig. 6.25: Aggregate voids problem solution in case of computerized automation

6.3.3 Ideje za rešitev problema izbire prave threshold vrednosti

Problem izbire prave threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por na kontrastirani površini betonskega vzorca je grafično predstavljen na sliki (Slika 6.26). Izbrati je potrebno tisto vrednost na skali sivin (ponavadi od 0 do 255), ki še oz. ki že predstavlja kontrastirane zračne pore.

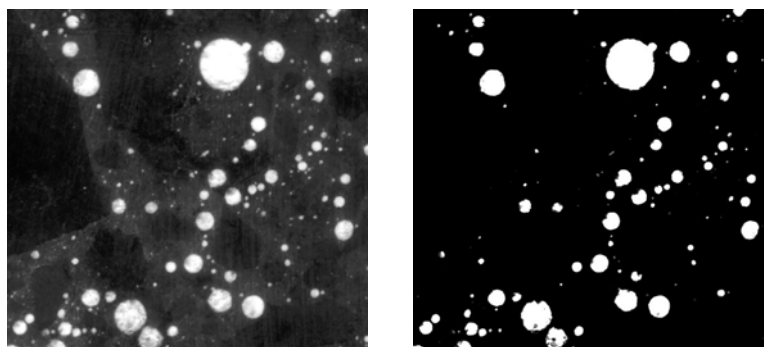


Slika 6.26: Identificirani predeli (rdeča barva) na zajeti sliki kontrastirane površine betonskega vzorca pri threshold vrednosti: a) 80; b) 100; c) 120; d) 140; e) 160; f) 180

Fig. 6.26: Identified areas (red colour) on the scanned image of the contrast enhanced surface of a concrete specimen at threshold value of: a) 80; b) 100; c) 120; d) 140; e) 160; f) 180

Nekateri tuji raziskovalci na področju avtomatizacije postopka LMA (Jakobsen, *et al.*, 2006) navajajo, da meritve niso močno občutljive na nekolikšne spremembe v izbiri threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por na kontrastirani površini. Drugi (Carlson, *et al.*, 2006) poudarjajo močno odvisnost meritev in rezultatov LMA od izbire te threshold vrednosti. Do tako različnih zaključkov

lahko pride zaradi možnosti optičnega zajemanja slike pri zelo različnih nastavitvah svetlosti in kontrasta. Z izbiro večjega kontrasta zajemanja slike sicer res zmanjšamo občutljivost meritev na izbiro threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por, a lahko ob tem izgubimo pomembne podatke. To so predvsem majhne zračne pore, ki praviloma izkazujejo manjši kontrast. Z večanjem kontrasta in/ali z manjšanjem svetlosti zajemanja slike dejansko posredno že izbiramo threshold vrednost za identifikacijo zračnih por, kot kaže slika (Slika 6.27, desno), in to na zelo nekontroliran način.



Slika 6.27: Kontrastirana površina betonskega vzorca zajeta z optičnim čitalcem pri srednjih, ničelnih, nastavitvah kontrasta (levo) in pri visokem kontrastu (desno)

Fig. 6.27: Contrast enhanced concrete specimen surface obtained with a flatbed scanner at zero contrast settings (left) and at high contrast settings (right)

Velika večina tujih raziskovalcev poudarja pomembnost ustrezne priprave preiskovane površine za namene avtomatiziranih postopkov LMA, le redki pa pišejo tudi o izjemni pomembnosti izbire prave threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por. Le s pravilno izbiro te vrednosti bo nek avtomatiziran sistem uspel prebrati pravo število in pravo velikost zračnih por na kontrastirani površini betonskega vzorca.

Osnovna ideja našega pristopa k izbiri prave threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por na kontrastirani površini betonskega vzorca je določitev vseh parametrov LMA pri različnih threshold vrednostih. Threshold vrednosti blizu nič (črna barva) nismo izbirali, ker je v tem primeru označena skoraj celotna površina vzorca. Prav tako za threshold vrednost nismo izbirali vrednosti blizu 255 (bela barva), ker je v tem primeru identificiranih premalo predelov na zajeti sliki površine vzorca, ki bi naj predstavljali zračne pore. V večini poskusov smo izbrali 23 različnih threshold vrednosti, in sicer od 20 do 240 s korakom 10. Tovrstno parametrizacijo rezultatov metode LMA smo si lahko privoščili šele z uporabo računalniškega tipa avtomatizacije LMA z optičnim čitalcem, kjer sliko površine vzorca zajamemo samo enkrat. V primeru mehanske avtomatizacije, kjer mehanska roka premika glavo mikroskopa nad izbranimi testnimi linijami na preiskovani površini vzorca vsakič znova, ko izberemo novo threshold vrednost, bi bila takšna ideja najbrž nesmiselna, saj bi postopek trajal več časa kot traja klasična ročna izvedba LMA. Poleg tega bi bilo pri ponovnih izvajanjih LMA najverjetneje problematično tudi zagotavljanje identične pogoje preiskave, tj. izbira testnega sistema, stopnja kontrastiranosti in osvetljenosti testne površine, ipd.

Na prvi pogled morda kljub vsemu preširoka izbira območja threshold vrednosti, tj. od 20 do 240, nas pripelje do zelo zanimivih rezultatov, ki jih v primeru izbire ožjega območja threshold vrednosti skoraj ni bilo moč napovedati. Izkaže se, da imajo krivulje parametrov LMA v odvisnosti od izbrane

threshold vrednosti x na desni strani, tj. v območju svetlih sivin, približno linearno obliko, kot je razvidno iz diagramov na sliki (Slika 6.30). Če pogledamo diagrame še podrobneje, lahko opazimo, da se ta območja linearnosti končajo pri približno enakem x , za obravnavan vzorec pri $x \approx 110$. Temu sledi strm padec ali vzpon krivulj. Pojav ima fizikalno razlago. Zaradi načina kontrastiranja, ki je opisan v poglavju 6.3.1, in napake zaradi kromatične aberacije optičnih čitalcev (Slika 6.22) bodo večje zračne pore izkazovale večji kontrast kot manjše in robovi krožnih sledi zračnih por bodo temnejših sivin kot sivine v njihovih središčih. To je lepo razvidno tudi iz slike (Slika 6.26), kjer z manjšanjem threshold vrednosti x zajemamo vedno več in obenem tudi vedno večjo površino krožnih sledi zračnih por iz središča proti njihovemu dejanskemu robu. Ena izmed posledic tega je približno linearno naraščanje skupnega števila prebranih pikslov $N_{pix}(x)$ na zajeti sliki z manjšanjem threshold vrednosti x . Skupno število prebranih pikslov $N_{pix}(x)$ predstavlja skupno ploščino identificiranih ploskev na zajeti sliki. Če to ploščino $N_{pix}(x)$ podelimo s celotno testno površino vzorca, tj. z vsemi piksli na zajeti sliki $N_{pix}(x=0)$, dobimo površinsko gostoto $S_s(x)$ faze določene s threshold intervalom $[x, 255]$. Po Delessejevi stereološki zvezi (43) bi naj ta površinska gostota $S_s(x)$ predstavljala dobro oceno za prostorninsko gostoto identificirane faze $V_v(x)$. Prostorninska gostota pa je ravno definicija parametra A . To pomeni, da sta parameter A in skupno število prebranih pikslov $N_{pix}(x)$ na zajeti sliki stereološko povezana, in sicer:

$$\frac{N_{pix}(x)}{N_{pix}(x=0)} = S_s(x) = V_v(x) = A(x) . \quad (44)$$

Približno linearno naraščanje krivulje A -Threshold (Slika 6.30, desno spodaj) na njeni desni strani je torej posledica približno linearnega večanja števila prebranih pikslov z manjšanjem threshold vrednosti x , ali bolje rečeno, z večanjem threshold intervala $[x, 255]$. Nadalje, če zelo pozorno spremljamo zaključek te linearnosti krivulje A -Threshold na sorodnih slikah pripadajočih identificiranih predelov (Slika 6.26), lahko opazimo, da v tem prevojnem območju s pripadajočimi threshold vrednostmi x_p pričenjamo določati tiste sivine, ki že predstavljajo cementni kamen in agregatna zrna (Slika 6.26a in b). Ker je te faze v betonski mešanici velika večina, začne število identificiranih pikslov $N_{pix}(x < x_p)$ z nadaljnjim manjšanjem x vedno hitreje naraščati, in posledično tudi $A(x < x_p)$. To pomeni, da lahko pričakujemo pravo threshold vrednost za identifikacijo zračnih por x_a na kontrastirani površini betonskega vzorca točno v tem območju zaključka linearnosti krivulje $A(x)$, kar lahko zapišemo z:

$$x_a = x_p + \Delta , \quad (45)$$

kjer je Δ neko majhno število, ki ga je potrebno določiti s postopkom validacije, predstavljenim v poglavju 6.3.4.4. Obsežne preiskave kvalitete priprave površine betonskih vzorcev so pokazale, da je ta zaključek desne linearnosti krivulje $A(x)$ tem bolj očitni, čim bolj izvedemo predpripravo preiskovane površine in postopek kontrastiranja.

Ker tudi v primeru zelo kvalitetne priprave preiskovane površine zaključek desne linearnosti krivulje $A(x)$ še vedno ni enolično določljiv, si lahko pomagamo še s krivuljama preostalih dveh parametrov LMA v odvisnosti od threshold vrednosti x . To sta specifična površina zračnih por α in faktor oddaljenosti \bar{L} . Če najprej analiziramo diagram α -Threshold (Slika 6.30, desno zgoraj), lahko ponovno opazimo območje približne linearnosti na desni strani. Tokrat je fizikalna razlaga malenkost bolj zapletena. Specifična površina nekega telesa je razmerje med njegovo površino P_i in volumnom V_i . Pri krogli je to:

$$\alpha_{kr} = \frac{P_{kr}}{V_{kr}} = \frac{4\pi r_{kr}^2}{\frac{4}{3}\pi r_{kr}^3} = \frac{3}{r_{kr}} . \quad (46)$$

Iz izraza (46) je razvidno, da se z manjšanjem velikosti krogle njena specifična površina povečuje. To pomeni, da bo imel sistem pretežno majhnih zračnih por večjo specifično površino kot sistem enakega števila večjih zračnih por. Števila zračnih por N pri tem ne smemo zanemariti, kot tudi predpisuje SIST EN 480-11 (2005):

$$\alpha = \frac{4N}{T_a} , \quad (47)$$

kjer je T_a vsota dolžin vseh presečnih tetiv, ki so statistično značilno odvisne od velikosti zračnih por. Iz izraza (47) je razvidno, da se bo specifična površina sistema zračnih por večala, če bomo k sistemu dodajali zgolj majhne zračne pore, in da bi ostajala približno enaka, če bi se obenem ustrezno večale že obstoječe zračne pore v sistemu. Kot že navedeno, in prikazano na sliki (Slika 6.26), se točno to dogaja, ko manjšamo threshold vrednost x . K sistemu se dodajajo manjše zračne pore z nižjim kontrastom, obenem pa se večajo vse že obstoječe zračne pore v sistemu zaradi svojih temnejših robov. Tako specifična površina sistema zračnih por $\alpha(x > x_p)$ z manjšanjem x ostaja približno enaka ali se rahlo viša, približno linearno, kot je razvidno iz diagrama α -Threshold (Slika 6.30, desno zgoraj). To se dogaja dokler z izbrano threshold vrednostjo ne dosežemo pravih robov krožnih sledi zračnih por. Po tem se z nižanjem threshold vrednosti k sistemu samo še dodajajo nove regije, že obstoječe v sistemu pa se skoraj ne večajo več. Tako začne $\alpha(x < x_p)$ močno naraščati. Iz diagrama α -threshold (Slika 6.30, desno zgoraj) je prav tako razvidno, da $\alpha(x < x_p)$ ne narašča v nedogled. Z nadaljnjim nižanjem x se namreč identificirane regije pričenjajo združevati, kot kaže slika (Slika 6.26a), s tem upade število identificiranih regij N in posledično tudi α . Ob predpostavki, da so sivine robov večjih zračnih por najtemnejše sivine, ki še predstavljajo zračne pore, lahko ponovno pričakujemo, da prava threshold vrednost za identifikacijo zračnih por x_a na kontrastirani površini betonskega vzorca leži tudi v območju zaključka linearnosti krivulje $\alpha(x)$.

Tretjo oceno vrednosti x_a lahko v večini primerov dobimo tudi iz diagrama \bar{L} -Threshold (Slika 6.30, levo zgoraj). Fizikalna razlaga je tokrat analogna zgornji, saj je parameter \bar{L} obratno sorazmeren od α (glej zveze (34)-(35) na str. 78). Ponovno se je izkazalo, da sta zaključka linearnosti krivulj $\alpha(x)$ in $\bar{L}(x)$ tem bolj očitna, čim bolje izvedemo predpripravo preiskovane površine in postopek kontrastiranja.

V večini primerov imamo na razpolago torej vsaj tri ocene prave threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por na kontrastirani površini betonskega vzorca, ki so odvisne od fizikalne narave sistema zračnih por v strjenem betonu in ne od izkušenosti izvajalca. To pomeni, da lahko z ustreznim algoritmom dosežemo avtomatsko določitev vrednosti x_a in končno resnično dosežemo popolno avtomatizacijo postopka LMA.

6.3.4 Razvoj računalniške aplikacije LMAir

Algoritem za analizo slike smo zapisali v programskem okolju ImageJ (2004). ImageJ je analizator slike z odprto Java programsko kodo. Ob številnih že vgrajenih grafičnih funkcijah ponuja dodajanje lastnih algoritmov in je prosto dostopen na internetu.

Program za branje in obdelavo podatkov smo napisali v programskem okolju Matlab. Poimenovali smo ga LMAir. Aplikacija vsebuje dva različna pristopa k določevanju zgoraj opisanih krivulj. Prvi pristop je vezan neposredno na histogram zajete slike kontrastirane površine betonskega vzorca in smo ga zato poimenovali histogram metoda (v nadaljevanju HST metoda). Drugi pristop je parametrizacija rezultatov LMA, kjer je parameter threshold vrednost x , zato smo ga poimenovali threshold metoda (v nadaljevanju THR metoda).

6.3.4.1 HST metoda

HST metoda temelji na planarni stereološki zvezi (44), predstavljeni na prejšnjih straneh. Postopek je sledeč. Če kontrastirano površino betonskega vzorca zajamemo z optičnim čitalcem, lahko določimo njen histogram. Ta je dejansko sestavljen iz treh histogramov, če površino zajemamo z barvnim modelom RGB. Glede na to, da je površina vzorca kontrastirana s črno-belo tehniko, lahko pri zajemanju slike uporabimo kar barvni model sivin (*grayscale*). V tem primeru je histogram en sam in predstavlja frekvenčno porazdelitev 256 sivin na zajeti sliki (Slika 6.28, levo). Enota pri tem je 1 piksel, ki pri optičnem čitalcu z resolucijo 1200 dpi predstavlja približno 20 μm . Če ta histogram sivin zapišemo v kumulativni obliki, in sicer v smeri temnejših sivin, kot kaže algoritem spodaj, dobimo iskano krivuljo deleža vseh pikselov na zajeti sliki $S_s(x)$ v odvisnosti od threshold vrednosti x :

```
ThrCum(256) = ThrFrq(256)
for x=1:255
    ThrCum(256-x) = ThrCum(256-x+1) + ThrFrq(256-x)
end
```

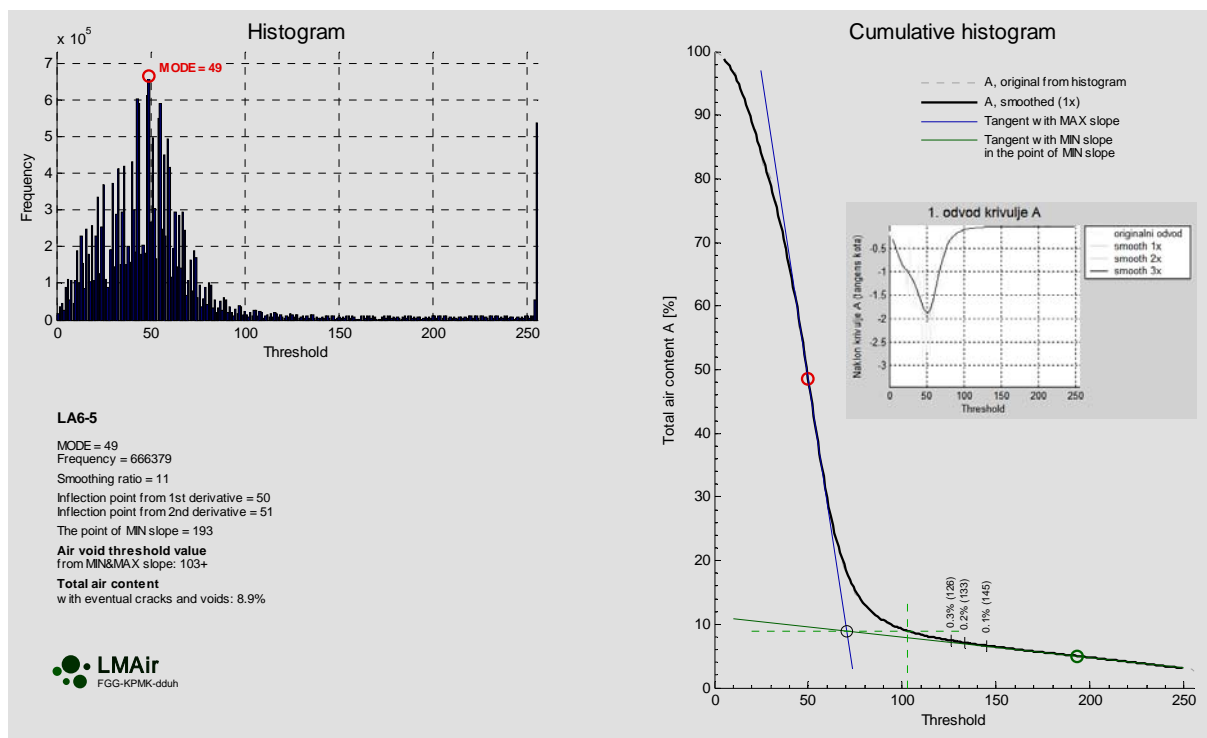
kjer je $ThrCum(x) \equiv S_s(x)$ in $ThrFrq$ vektor frekvenc histograma. Po stereološki zvezi (44) krivulja $ThrCum(x)$ predstavlja dobro oceno za $A(x)$. Z upoštevanjem osnovnih stereoloških pravil lahko torej iskano krivuljo A -Threshold določimo neposredno iz histograma zajete slike kontrastirane površine preiskovanega vzorca, kar je zelo ekonomičen način. Računski čas postopka HST metode je tako le nekaj sekund.

Ker je na zajeti sliki še vedno relativno malo različnih sivin, tj. 256, je tako dobljena krivulja $A(x)$ rahlo žagaste oblike. Za lažje določanje zaključka njene linearnosti, tj. threshold vrednosti x_a , jo je najprej smiselno aproksimirati z gladko krivuljo. V ta namen smo uporabili O'Haverjev (2006) algoritem mehčanja. Iz izračunanih odvodov krivulje nato določimo njene ekstremne naklone, kot kaže slika (Slika 6.28, desno), zaključek območja linearnosti pa iz opazovanja odklona krivulje $A(x) = ThrCum(x)$ od svoje tangente z najmanjšim naklonom $y_{MIN}(x)$, kot kaže algoritem:

```
x = 1
while (ThrCum(x) - yMIN(x)) > tol
    x = x + 1
end
xa = x
```

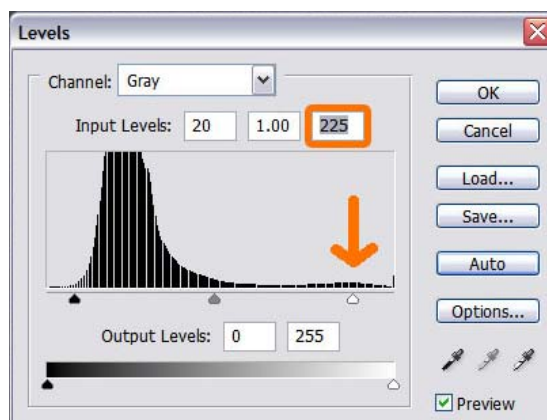
kjer je tol tisto majhno število, ki ga je potrebno določiti preko postopka validacije avtomatiziranega sistema. Validacija prototipne aplikacije LMAir je predstavljena v poglavju 6.3.4.4. Aplikacija v tej fazi HST metode poleg avtomatske ocene threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por x_a na kontrastirani površini obravnavanega betonskega vzorca izpiše tudi največji pričakovani delež zraka, tj. delež zraka vključno z vsemi možnimi lunkerji in razpokami. Pri tem je še potrebno navesti, da je za uspešno avtomatsko določitev zaključka linearnosti krivulje $A(x)$ s programom LMAir histogram zajete slike testne površine vzorca potrebno normirati. In sicer v kateremkoli grafičnem programu kot kaže slika (Slika 6.29). V naslednji verziji programa LMAir je z ustreznimi grafičnimi algoritmi moč

avtomatizirati tudi to. Za lažjo uporabo programa smo vgradili tudi grafični vmesnik, ki uporabnika vodi skozi postopek HST metode.



Slika 6.28: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – predlagana HST metoda

Fig. 6.28: Sample screenshot from the prototype application LMAir – the proposed HST method



Slika 6.29: Normiranje histograma zajete slike testne površine vzorca: avtomatsko normiranje za levi rob histograma in ročna postavitve desnega robu histograma na vrh desnega »hribočka«

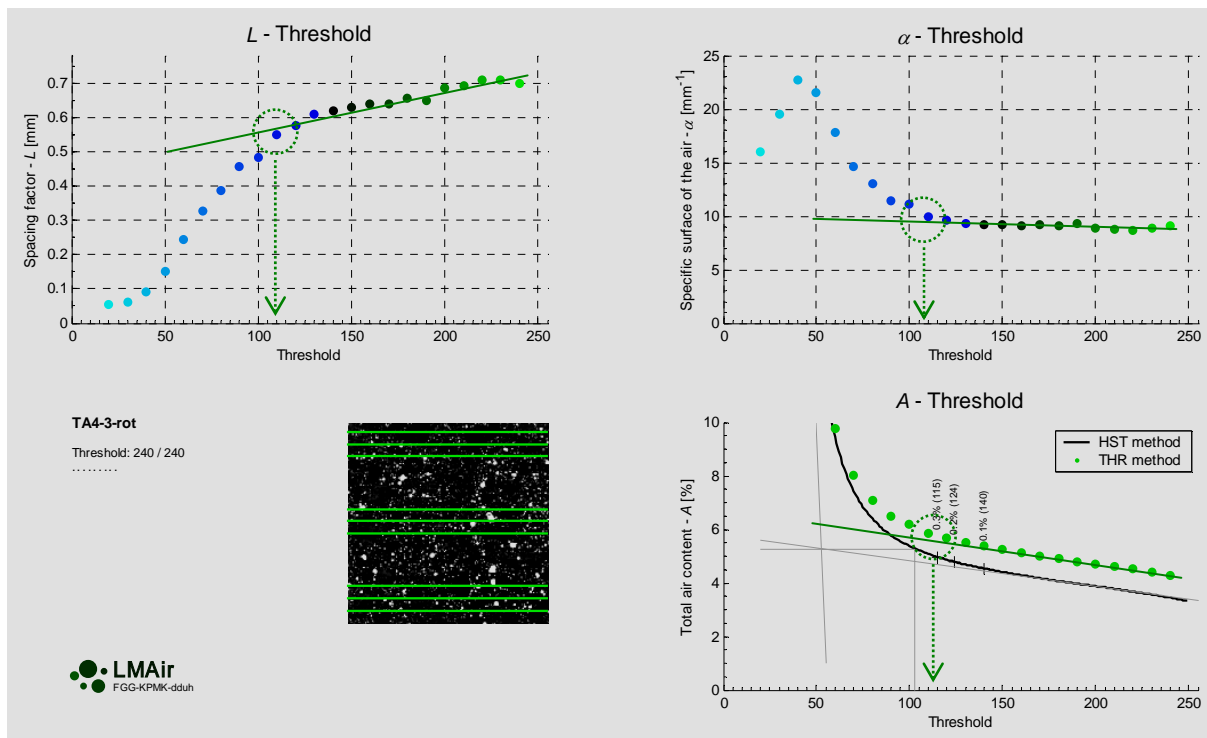
Fig. 6.29: Normalization of the scanned image: automatic normalization for the left edge of the image histogram and manual normalization of the right edge to the top of the right »hill« of the image histogram

6.3.4.2 THR metoda

Ideja metode THR je določiti diagrame vseh parametrov LMA v odvisnosti od threshold vrednosti x preko linijske stereološke metode, uporabljene v SIST EN 480-11 (2005). To storimo tako, da poženemo analizator slike pri izbranem testnem sistemu linij za vsako izbrano threshold vrednost x_i znova in postopoma določamo vrednosti diskretnih krivulj $A(x_i)$, $\alpha(x_i)$ in $\bar{L}(x_i)$. V ta namen smo zapisali skript za analizator slike ImageJ, ki samodejno poganja podane analize. Izpisan je v prilogi (Priloga A). Iz kode skripta je razvidno, da testne linije simuliramo na ta način, da podajamo območja za analizo velikosti delcev, določenih s threshold vrednostjo x_i , kot pravokotnike širine enake širini testne površine vzorca in višine $h_{ij} = 1$ piksel. Tako rezultati dejanske planarne analize velikosti delcev, tj. identificirane ploščine S_{ij} na j -ti liniji testnega sistema, dejansko predstavljajo dolžine identificiranih presečnih tetiv $T_{a,ij}$ krožnih sledi zračnih por, v piksljih:

$$S_{ij} [\text{pix}] = l_{ij} \times h_{ij} = l_{ij} \times 1 = l_{ij} = T_{a,ij} [\text{pix}] , \quad (48)$$

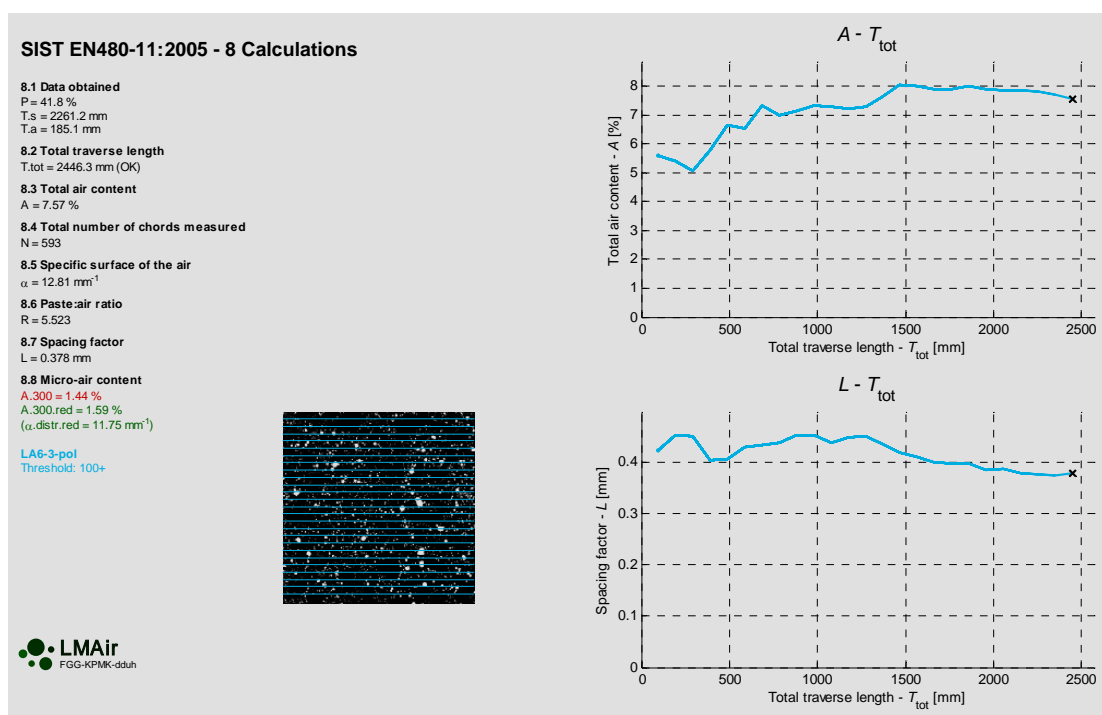
Potrebna je le še pretvorba dobljenih rezultatov iz enote [pix] v enoto [μm]. Pri resoluciji zajemanja slike 1200 dpi je 1 piksel dolg in visok $1/1200$ palca = $2,54/1200$ cm = $0,00212$ cm = $21,2$ μm . Skript prav tako shrani rezultate analize v ustrezni tabelarni obliki, ki jo prebere in obdela aplikacija LMAir. Primer končnih rezultatov predlagane THR metode je prikazan na sliki (Slika 6.30). Za lažjo uporabo programa je vgrajen tudi grafični vmesnik v obliki računalniškega vodnika.



Slika 6.30: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – predlagana THR metoda
 Fig. 6.30: Sample screenshot from the prototype application LMAir – the proposed THR method

6.3.4.3 Končna faza aplikacije LMAir

Po določitvi threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por \bar{x}_a , ki je povprečje vseh štirih ocen $x_{a,i}$ dobljenih z metodama HST in THR, aplikacija LMAir v končni fazi izračuna vse parametre LMA, kot predpisuje SIST EN 480-11 (2005). Dodatno se k tem rezultatom izrišeta tudi diagrama deleža zraka A in faktorja oddaljenosti \bar{L} v odvisnosti od skupne dolžine testnih linij T_{tot} (Slika 6.31). Iz teh diagramov lahko preberemo občutljivost metode LMA na velikost testnega sistema, obenem pa lahko tudi ocenimo kako se parametra A in \bar{L} spreminjata po prerezu obravnavanega vzorca. Slednje nam lahko nakazuje značilnosti sistema zračnih por v obravnavanem vzorcu glede na smer vgrajevanja, ipd., odvisno od izbire položaja linij testnega sistema. Npr. za obravnavan primer na sliki (Slika 6.31) smo testne linije postavili enakomerno po prečnem prerezu betonskega vzorca v smeri vgrajevanja, tj. prvo testno linijo ob vrhnjem sloju in zadnjo v območju dna v kalupu. Iz diagramov na sliki (Slika 6.31) je razvidno, da se delež zraka z večanjem T_{tot} viša, faktor oddaljenosti pa niža. S testnimi linijami proti dnu vzorca torej identificiramo vedno več zračnih por. To pomeni, da je dno vzorca najverjetneje bolj porozno kakor vrhnji sloj pri vgrajevanju betona. Pri takšni oceni se sicer moramo zavedati, da sta majhna naklona krivulj $A - T_{tot}$ in $\bar{L} - T_{tot}$ lahko zgolj posledica visoke občutljivosti LMA na velikost testnega sistema manjšega od najmanjše predpisane skupne dolžine testnih linij 2400 mm. Občutljivost metode LMA je natančno opisana v poglavju 6.2. Če želimo višjo stopnjo zaupanja pri tej oceni, moramo izbrati večji testni sistem. Pri tovrstni avtomatizaciji LMA je tudi v primeru izbire 10-krat večjega testnega sistema kot je minimalen predpisan računski čas kvečjemu 5-10 minut.

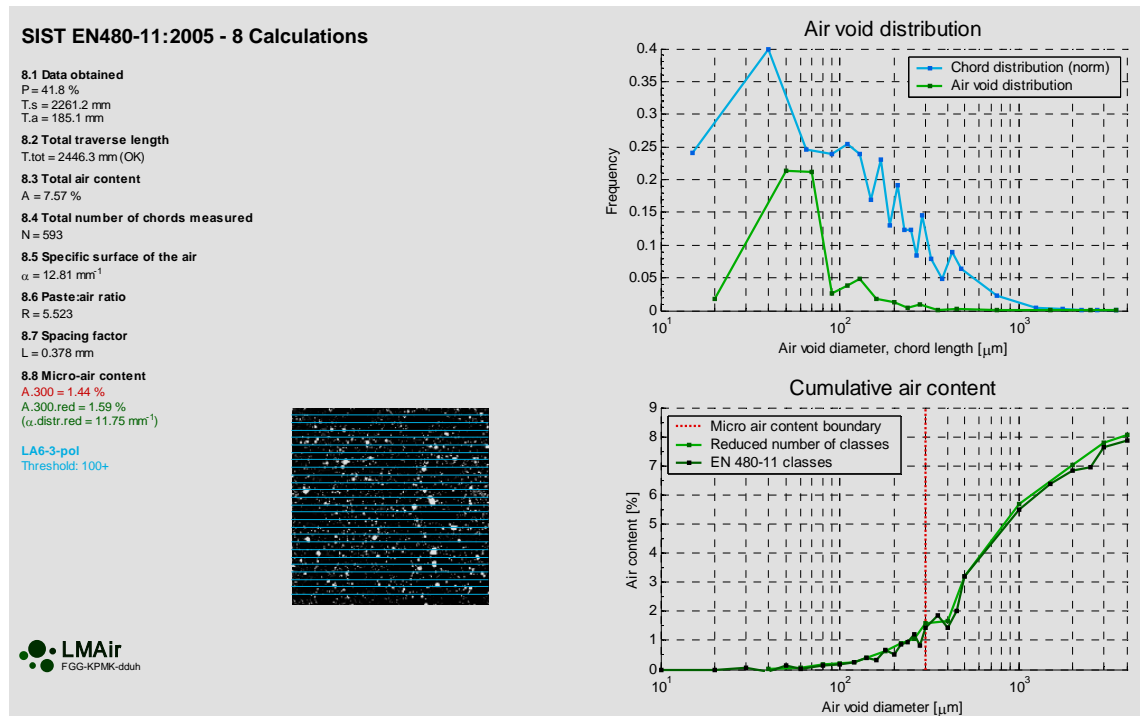


Slika 6.31: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – končni rezultati #1/2

Fig. 6.31: Sample screenshot from the prototype application LMAir – final results #1/2

Drugi del končnih rezultatov aplikacije LMAir, tj. porazdelitev zračnih por, je prikazan na sliki (Slika 6.32). Iz tuje literature na tem področju je razbrati, da je velikost zračnih por v aeriranem betonu

porazdeljena približno logaritemsko normalno. Torej pričakujemo precej več majhnih por kot velikih. Temu ustrezno so tudi izbrani predlagani velikostni razredi v SIST EN 480-11 (2005) za določitev porazdelitve zračnih por. Glede na rezultate opravljene validacije metode LMA, v poglavju 6.2, pričakujemo pri minimalni predpisani velikosti testnega sistema pomanjkanje podatkov za takšen račun porazdelitve zračnih por. Ker je za večjo natančnost rezultatov potrebno testni sistem močno povečati je morda bolje spremeniti tudi same robne pogoje metode, kar SIST EN 480-11 (2005) tudi dopušča. In sicer, če imamo premajhno število podatkov, lahko zmanjšamo število velikostnih razredov predlaganih v SIST EN 480-11 (2005). Tako se rešimo problema praznih razredov in posledičnih negativnih vrednosti porazdelitve zračnih por, na katere SIST EN 480-11 (2005) v opombi tudi opozarja. Če namreč želimo predstavljati porazdelitev in/ali gostoto verjetnosti neke spremenljivke, je matematično neustrezno zapisovati negativne vrednosti. Negativna verjetnost ne obstaja. V predlagani preglednici za določanje porazdelitve zračnih por v SIST EN 480-11 (2005) smo pogrešali tudi določitev gostote verjetnosti, iz katere je šele razvidno, ali gre za logaritemsko normalno ali katerokoli drugo porazdelitev. Predlagani velikostni razredi so namreč zaradi pričakovane logaritemsko normalne porazdelitve zračnih por različnih širin, kar je pri določanju gostote verjetnosti neke spremenljivke potrebno ustrezno upoštevati. Za bolj jasen prikaz porazdelitve zračnih por smo tako v aplikacijo LMAir vgradili račun porazdelitve zračnih por z reduciranim številom razredov, kot kaže preglednica v prilogi (Priloga B). Vsi faktorji v preglednici so ponovno določeni v skladu s teoretičnim ozadjem SIST EN 480-11 (2005), dodani pa so tudi stolpci za izračun gostote verjetnosti v skladu s teorijo statistike in verjetnostnega računa (Turk, 2005). Na tem mestu bi še dodal, da so me zelo negativno presenetili številni tiskarski škrti v preglednicah standarda SIST EN 480-11 (2005). Te napake bi bilo potrebno popraviti, saj niso trivialno očitne.



Slika 6.32: Primer izpisa prototipnega programa LMAir – končni rezultati #2/2

Fig. 6.32: Sample screenshot from the prototype application LMAir – final results #2/2

Program LMAir končno tako izriše ocenjeno (linijski stereološki pristop) gostoto verjetnosti velikosti zračnih por v obravnavanem betonskem vzorcu glede na reducirano število velikostnih razredov in gostoto verjetnosti velikosti presečnih tetiv dvodimenzionalnih sledi zračnih por na testni površini obravnavanega vzorca glede na originalno število velikostnih razredov (Slika 6.32, desno zgoraj). Slednja gostota verjetnosti je zaradi prikaza na istem diagramu normirana na maksimalno vrednost 0,4. Ta faktor normiranja uporabnik programa LMAir lahko spreminja po želji. Izrišeta se tudi porazdelitveni funkciji velikosti zračnih por glede na originalno in reducirano število velikostnih razredov (Slika 6.32, desno spodaj). S slednjo smo tudi uspeli znižati visoko občutljivost parametra A_{300} od velikosti testnega sistema, natančneje opisano v poglavju 6.2. Pričakovana boljša ocena deleža mikro-por, določena iz ocenjene porazdelitvene funkcije velikosti zračnih por z reduciranim številom velikostnih razredov, se tako izpiše z zeleno barvo pod oznako $A_{300,red}$ (Slika 6.32, levo).

Za kontrolo ustreznosti takšnega pristopa k oceni porazdelitve zračnih por se v rezultatih (Slika 6.32, levo) izpiše tudi specifična površina sistema zračnih por $\alpha_{distr.red}$ določena neposredno iz ocenjene porazdelitve zračnih por z reduciranim številom velikostnih razredov po enačbi:

$$\alpha_{distr.red} = \frac{P_{sist}}{V_{sist}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{C.red}} 4\pi r_{C.red,i}^2 n_{C.red,i}}{\sum_{i=1}^{n_{C.red}} \frac{4}{3}\pi r_{C.red,i}^3 n_{C.red,i}} \quad (49)$$

kjer je P_{sist} skupna površina in V_{sist} skupna prostornina ocenjenega sistema zračnih por, $n_{C.red}$ reducirano število velikostnih razredov, $n_{C.red,i}$ ocenjeno število zračnih por v i -tem velikostnem razredu in $r_{C.red,i}$ polmer zračne pore na zgornji meji i -tega velikostnega razreda.

6.3.4.4 Validacija LMAir

Kot vsak avtomatiziran sistem je potrebno validirati tudi LMAir. To pomeni, da je potrebno opraviti primerjavo rezultatov LMAir z rezultati klasične ročne LMA z mikroskopom, in to na čim večjem številu vzorcev ter na čim bolj različnih betonskih mešanicah po sestavi. Validacijo smo tako opravili na vzorcih naslednjih betonskih mešanic:

- aeriran samozgoščevalni beton: TA4, CA4, LA4, LA6, LA8, LA10, LA12;
- neaeriran samozgoščevalni beton: EF;
- aeriran vibriran beton: LVA8.

Sestave mešanic so podane v preglednicah (Preglednica 4.1) in (Preglednica 4.2). Iz vsake mešanice so bili analizirani po trije vzorci, in sicer na dveh prerezih v smeri vgrajevanja: v sredini in ob stranski površini vzorca, kjer so potekale preiskave OSMO odpornosti. To pomeni, da je bilo za validacijo avtomatiziranega sistema LMAir uporabljenih 54 različnih testnih površin velikosti približno 100x100 mm.

Vzorci so bili pripravljani v skladu s SIST EN 480-11 (2005) kot je navedeno v poglavju 6.3.2. Klasična LMA je bila opravljena z optičnim mikroskopom HIROX (2002). Opravljali smo jo trije različni operaterji. Določene preiskave smo ponovili, da smo ocenili ponovljivost metode LMA, ki je podrobno predstavljena v poglavju 6.2. Pri validaciji avtomatiziranega sistema LMAir so namreč rezultati klasične ročne LMA z mikroskopom privzeti kot pričakovani pravi rezultati, zato je ustrezno validacijo potrebno poznati napako same metode LMA in vpliv operaterja na končne rezultate.

Kontrastiranje preiskovanih površin betonskih vzorcev je bilo izvedeno v skladu s SIST EN 480-11 (2005) z upoštevanjem vseh detajlov, ki smo jih predstavili v poglavju 6.3.1. Kontrastirane površine so bile zajete z optičnim čitalcem z visoko resolucijo (1200 dpi), in sicer takoj po kontrastiranju, da smo se izognili neugodnemu učinku krčenja kontrastnega sredstva (cinkove paste) v nastalih mikrokraterjih zračnih por. Slike smo shranili v rastrskem formatu TIFF, da smo se izognili morebitni izgubi in/ali spremembi podatkov zaradi računalniške kompresije. Analiza slike je bila opravljena v analizatorju slike ImageJ (2004) v kombinaciji z razvojnim programom LMAir. Primerjave rezultatov avtomatiziranega sistema LMAir in klasične LMA so prikazane v preglednicah (Preglednica 6.4)-(Preglednica 6.15) in na diagramih na sliki (Slika 6.33).

Preglednica 6.4: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA10 (srednji prerezi)

Table 6.4: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA10 samples (middle sections)

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.	LMAir	Rel.
	LMA	slabo kontrast.	nap.	1 pix izločitev	nap.
A (%)	10,40	10,61	2%	10,50	1%
α (mm^{-1})	15,15	17,02	12%	14,01	-8%
\bar{L} (mm)	0,258	0,225	-13%	0,278	8%
A_{300} (%)	2,33	2,97	27%	2,39	2%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,394	0,451	15%	0,366	-7%

Preglednica 6.5: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA10 (prerezi ob površini)

Table 6.5: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA10 samples (near surface sections)

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.
	LMA	kvalit. kontrast.	nap.
A (%)	7,75	8,74	13%
α (mm^{-1})	13,27	13,28	0%
\bar{L} (mm)	0,357	0,338	-5%
A_{300} (%)	1,57	1,97	26%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,257	0,290	13%

Preglednica 6.6: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce EF (srednji prerezi)

Table 6.6: Comparison of LMAir and classic LTM results for EF samples (middle sections)

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.	LMAir	Rel.
	LMA	slabo kontrast.	nap.	1 pix izločitev	nap.
A (%)	3,66	3,73	2%	3,84	5%
α (mm^{-1})	14,36	16,66	16%	13,99	-3%
\bar{L} (mm)	0,479	0,410	-14%	0,482	1%
A_{300} (%)	0,91	1,03	14%	1,03	13%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,131	0,155	18%	0,134	2%

Preglednica 6.7: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce EF (prerezi ob površini)

Table 6.7: Comparison of LMAir and classic LTM results for EF samples (near surface sections)

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.
	LMA	kvalit. kontrast.	nap.
A (%)	4,31	4,50	4%
α (mm^{-1})	15,65	15,06	-4%
\bar{L} (mm)	0,408	0,416	2%
A_{300} (%)	1,03	1,12	9%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,169	0,169	0%

Preglednica 6.8: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce CA4 (srednji prerezi)

Table 6.8: Comparison of LMAir and classic LTM results for CA4 samples (middle sections)

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.	LMAir	Rel.
	LMA	slabo kontrast.	nap.	1 pix izločitev	nap.
A (%)	4,60	5,46	19%	5,05	10%
α (mm^{-1})	10,44	16,11	54%	13,73	32%
\bar{L} (mm)	0,587	0,352	-40%	0,433	-26%
A_{300} (%)	0,66	1,38	109%	1,27	92%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,120	0,220	83%	0,173	44%

Preglednica 6.9: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce CA4 (prerezi ob površini)

Table 6.9: Comparison of LMAir and classic LTM results for CA4 samples (near surface sections)

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.
	LMA	kvalit. kontrast.	nap.
A (%)	5,22	4,82	-8%
α (mm^{-1})	11,93	12,29	3%
\bar{L} (mm)	0,485	0,488	1%
A_{300} (%)	0,94	0,85	-10%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,156	0,148	-5%

Preglednica 6.10: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce TA4

Table 6.10: Comparison of LMAir and classic LTM results for TA4 samples

Parameter	Srednji prerezi			Prerezi ob površini		
	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.
A (%)	5,24	5,55	6%	5,04	4,85	-4%
α (mm^{-1})	11,05	11,09	0%	10,76	12,11	13%
\bar{L} (mm)	0,524	0,508	-3%	0,547	0,495	-10%
A_{300} (%)	0,59	0,89	51%	0,63	0,82	30%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,145	0,154	6%	0,136	0,147	8%

Preglednica 6.11: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA4

Table 6.11: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA4 samples

Parameter	Srednji prerezi			Prerezi ob površini		
	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.
A (%)	5,38	5,50	2%	5,10	5,31	4%
α (mm^{-1})	11,81	11,56	-2%	11,69	11,67	0%
\bar{L} (mm)	0,484	0,493	2%	0,501	0,493	-2%
A_{300} (%)	0,98	1,09	11%	0,96	1,04	8%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,159	0,158	-1%	0,149	0,155	4%

Preglednica 6.12: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA6

Table 6.12: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA6 samples

Parameter	Srednji prerezi			Prerezi ob površini		
	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.
A (%)	7,74	7,77	0%	7,35	7,97	8%
α (mm^{-1})	12,51	12,20	-2%	11,91	11,50	-3%
\bar{L} (mm)	0,383	0,397	4%	0,413	0,412	0%
A_{300} (%)	1,55	1,46	-6%	0,97	1,28	32%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,242	0,235	-3%	0,219	0,229	5%

Preglednica 6.13: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA8

Table 6.13: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA8 samples

Parameter	Srednji prerezi			Prerezi ob površini		
	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.
A (%)	9,87	10,10	2%	7,80	7,86	1%
α (mm^{-1})	12,71	12,76	0%	11,94	12,24	3%
\bar{L} (mm)	0,327	0,319	-3%	0,397	0,386	-3%
A_{300} (%)	1,77	1,90	7%	1,41	1,35	-4%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,314	0,322	3%	0,233	0,240	3%

Preglednica 6.14: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LA12

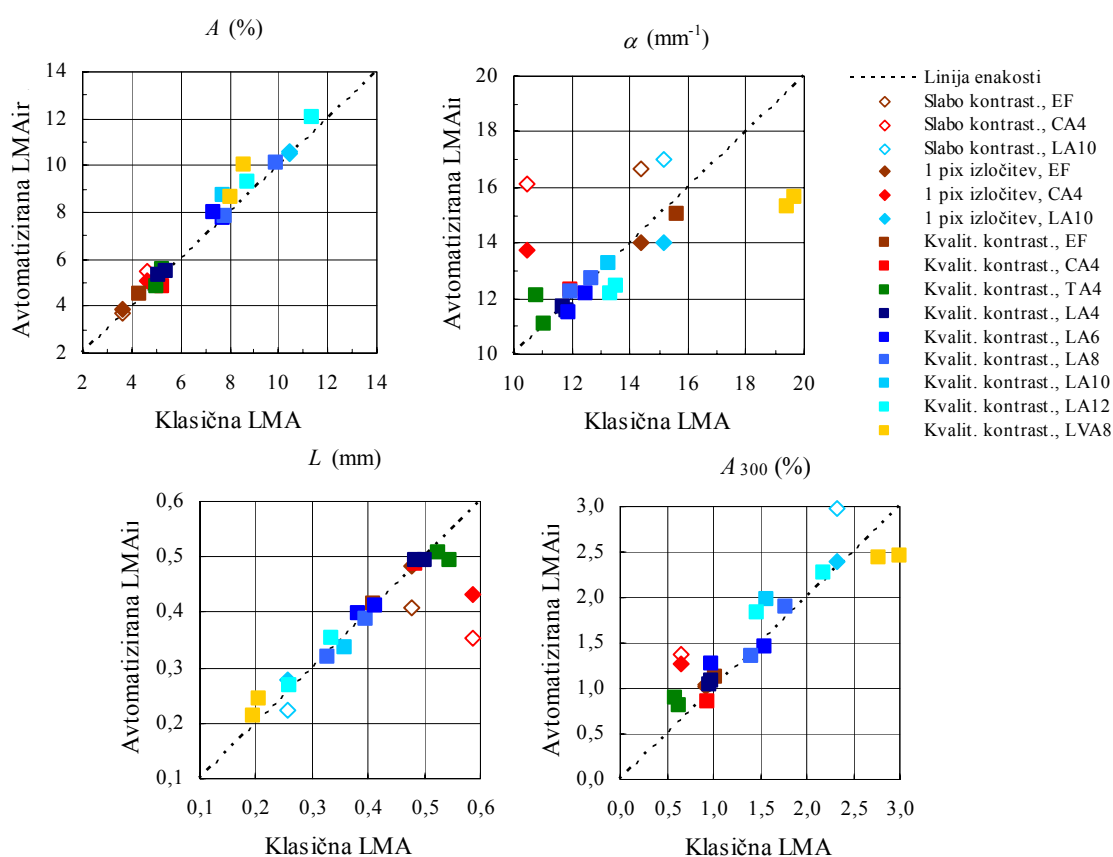
Table 6.14: Comparison of LMAir and classic LTM results for LA12 samples

Parameter	Srednji prerezi			Prerezi ob površini		
	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.
A (%)	11,33	12,05	6%	8,70	9,27	7%
α (mm^{-1})	13,56	12,45	-8%	13,31	12,17	-9%
\bar{L} (mm)	0,261	0,268	3%	0,335	0,355	6%
A_{300} (%)	2,19	2,28	4%	1,47	1,83	25%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,384	0,375	-2%	0,290	0,282	-3%

Preglednica 6.15: Primerjava rezultatov LMAir in klasične LMA za vzorce LVA8

Table 6.15: Comparison of LMAir and classic LTM results for LVA8 samples

Parameter	Srednji prerezi			Prerezi ob površini		
	Klasična LMA	LMAir združene pore	Rel. nap.	Klasična LMA	LMAir združene pore	Rel. nap.
A (%)	8,02	8,62	8%	8,60	10,01	16%
α (mm^{-1})	19,66	15,63	-21%	19,40	15,31	-21%
\bar{L} (mm)	0,207	0,243	17%	0,196	0,213	9%
A_{300} (%)	2,77	2,43	-12%	2,99	2,46	-18%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,394	0,337	-15%	0,417	0,383	-8%

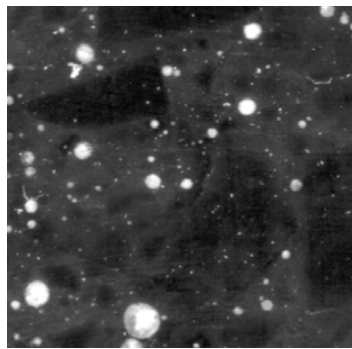


Slika 6.33: Primerjava rezultatov avtomatiziranega sistema LMAir in klasične LMA

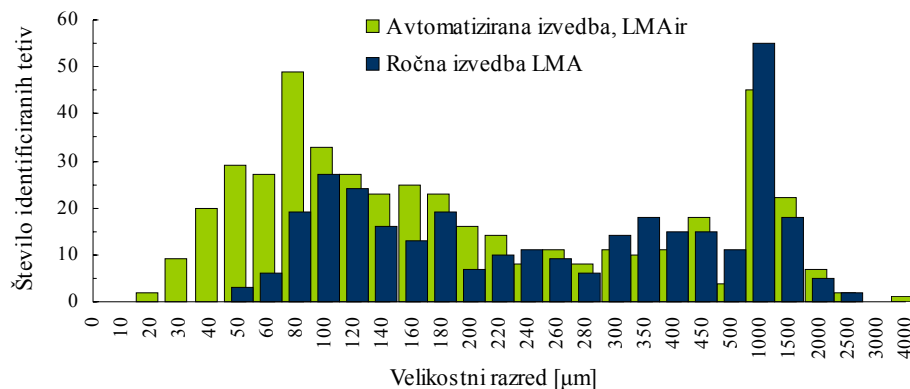
Fig. 6.33: Comparison of the results of the automated system LMAir and classic LTM

Iz diagramov na sliki (Slika 6.33) je razvidno, da prototipna aplikacija LMAir daje zelo dobre ocene vseh parametrov LMA, a le v primeru, če je preiskovana površina ustrezno pripravljena, tj. kvalitetno brušena in kvalitetno kontrastirana. V nasprotnem primeru so rezultati LMAir, razen za parameter A , skoraj neuporabni. Še več, so na nevarni strani – ustreznost sistema zračnih por je precenjena, saj nekvalitetna priprava površine vzorcev pomeni večje število majhnih artefaktov, ki se računalniku »izdajajo« za majhne zračne pore.

Primer nekvalitetne priprave površine vzorcev so srednji prerezi vzorcev mešanic EF, CA4 in LA10, ki so na diagramih na sliki (Slika 6.33) označeni s praznim karo. Pri teh smo v končni fazi kontrastiranja namesto žiletke uporabljali še običajno strgalo s precej manj ostrim robom. Na kontrastirani površini je tako ostalo veliko delcev mavca in kontrastnega sredstva, kar je lepo razvidno iz slike (Slika 6.34). Z naknadno računalniško delno izločitvijo tovrstnih artefaktov na zajeti sliki, tj. z izločitvijo večine identificiranih predelov velikosti 1 piksel, lahko rezultate LMAir sicer močno približamo pravim (Slika 6.33, polni karo), a je relativna napaka pri tem še vedno velika, v povprečju 13%, samo v primeru vzorcev mešanice CA4 pa kar 41%. Kot je razvidno iz slike (Slika 6.34) tako kontrastirana površina namreč poleg artefaktov velikosti 1 piksel vsebuje še veliko artefaktov velikosti 2 piksela in več. To najenostavneje preverimo s primerjavo števila identificiranih tetiv klasične in avtomatizirane izvedbe LMA. Iz diagrama na sliki (Slika 6.35) je lepo razvidno, da se rezultati pričnejo močno razhajati šele pri tetivah manjših od 80 μm . To je glede na resolucijo zajete slike (1200 dpi) pri tetivah manjših od 4 piksle. Za primer mešanice CA4, ki ima očitno zelo malo zračnih por manjših od 80 μm , bi torej problem artefaktov lahko rešili z naknadnim izločanjem vseh identificiranih tetiv manjših od 4 piksle. Seveda pa tovrstni pristop ni rešitev za splošni primer, kjer pričakujemo tudi zračne pore manjše od 80 μm . Obsežne preiskave so pokazale, da je k problemu artefaktov bolje pristopiti »preventivno« in ne »kurativno«. Postopek kvalitetne predpriprave in kvalitetne izvedbe kontrastiranja površine betonskih vzorcev je predstavljen v poglavjih 6.3.1 in 6.3.2.



Slika 6.34: Primer nekvalitetno kontrastirane površine enega srednjih prerezov vzorcev CA4
Fig. 6.34: Low quality of contrast enhancement (surface of CA4 specimen, middle section)

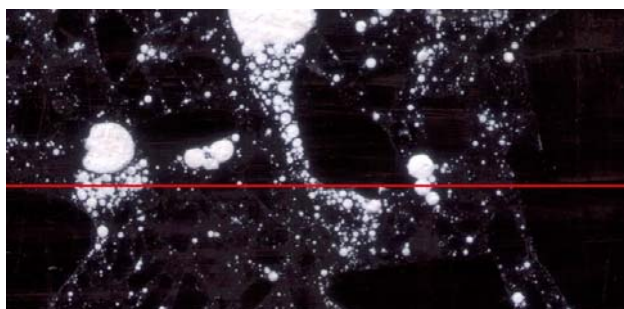


Slika 6.35: Primerjava števila identificiranih tetiv ročne in avtomatizirane izvedbe LMA za vzorce CA4
Fig. 6.35: Comparison of the recorded number of chords with manual and automated LTM for CA4 samples

Od kvalitetno kontrastiranih vzorcev, ki so na diagramih na sliki (Slika 6.33) označeni s polnim kvadratom, nekoliko izstopajo vzorci vibrirane betonske mešanice LVA8. Edino pri tej betonski mešanici je prišlo do močnega kopičenja zračnih por, kot je razvidno iz slike (Slika 6.36). Posledica tega je napačna avtomatska identifikacija velikosti in števila presečnih tetiv testne linije preko takšnega predela, kjer se dvodimenzionalne sledi zračnih por stikajo. V primeru testne linije, ponazorjene na sliki (Slika 6.36, rdeča linija), bo avtomatiziran sistem namesto približno 16 kratkih tetiv prebral 12 ustrezno daljših tetiv, saj se krogi na skoncentriranih mestih stikajo. Ta napaka bo najbolj vplivala na oceno specifične površine zračnih por:

$$\alpha_{LMA} = \frac{4N}{T_a} \approx \frac{4 \cdot 16}{3,2 \text{ mm}} = 20 \text{ mm}^{-1}; \quad \alpha_{LMAir} = \frac{4N}{T_a} \approx \frac{4 \cdot 12}{3,2 \text{ mm}} = 15 \text{ mm}^{-1}, \quad (50)$$

kar je lepo razvidno iz preglednice (Preglednica 6.15). Glede na stereološke zveze (34)-(35) bo temu ustrezno višja tudi ocena parametra \bar{L} , kar primerjava rezultatov klasične LMA in avtomatizirane LMAir prav tako potrjuje. Za rešitev tega problema je potrebno računalniku nekako dopovedati, da gre za več por, ki se deloma stikajo. Šele tako bo program za analizo slike identificiral pravo število tetiv in posledično tudi njihove prave dolžine. To lahko storimo z uporabo računalniško-grafične metode *Watershed*, ki bo natančneje opisana v naslednjem poglavju pri planarnem stereološkem pristopu k analizi podatkov, kjer ta problem pride še bolj do izraza.



Slika 6.36: Kontrastirana površina vzorca mešanice LVA8. Slika je zajeta z optičnim čitalcem (1200 dpi)
Fig. 6.36: Contrast-enhanced surface of LVA8 sample. Image is captured with a flatbed scanner at 1200 dpi

Iz validacijskih diagramov na sliki (Slika 6.33) je še razvidno, da LMAir nekoliko precenjuje parameter A in podcenjuje parameter α . Tudi to ne preseneča. Če še enkrat podrobneje pogledamo primer zajete slike kontrastirane površine betonskega vzorca (Slika 6.22), lahko opazimo, da so zajete slike krožnih sledi zračnih por zaradi kromatične aberacije optičnega čitalca za spoznanje večje od njihovih originalnih dimenzij. To je napaka, ki se počasi, a neprestano seštevava in glede na zvezo (32) vpliva na povečanje parametra A , glede na zvezo (47) pa na zmanjšanje parametra α . Da to ni posledica majhnih artefaktov pri avtomatizirani LMAir, se lahko prepričamo iz primerjave števila identificiranih por na 1 mm testne linije N/T_{tot} , ki je dodan k rezultatom LMA v preglednicah (Preglednica 6.4)-(Preglednica 6.15). Iz rezultatov je namreč razvidno, da LMAir za spoznanje precenjuje delež zraka A in podcenjuje α pri primerljivih frekvencah N/T_{tot} . Kot rešitev za ta problem bi lahko uvedli faktor k_v za korekcijo prebrane velikosti presečnih tetiv:

$$T_i^{kor} = \frac{T_i^{orig}}{k_v} . \quad (51)$$

Za uporabljen optični čitalec bi k_v znašal približno 1,04, kar smo določili neposredno iz povprečnih relativnih napak ocen parametrov A in α z aplikacijo LMAir. Relativne napake ocen vseh LMA parametrov, pri čemer so rezultati klasične izvedbe LMA privzeti za pričakovane, so navedene v preglednici (Preglednica 6.16).

Preglednica 6.16: Relativne napake ocen LMA parametrov z aplikacijo LMAir
Table 6.16: Relative error of the automated LMAir estimations of LTM parameters

Parameter	Slabo		Kvalitetno
	kontrastiranje	1 pix izločitev	kontrastiranje
A (%)	8%	5%	4 %
α (mm ⁻¹)	28%	7%	-3 %
\bar{L} (mm)	-22%	-6%	1 %
A_{300} (%)	50%	36%	10 %
N/T_{tot} (mm ⁻¹)	39%	13%	0 %

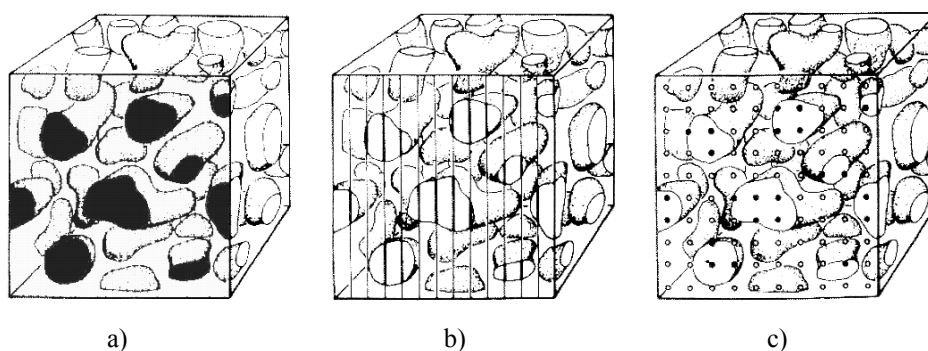
Iz preglednice (Preglednica 6.16) je še enkrat lepo razvidno, kako močno je avtomatiziran sistem za izvedbo LMA odvisen od kvalitete priprave površine preiskovanih vzorcev. Kar se tiče navedenih parametrov v preglednici (Preglednica 6.16) se z izločitvijo vseh identificiranih tetiv velikosti 1 piksel močno približamo pričakovanemu rezultatu LMA, a s tem v večini primerov odsekamo relativno veliko območje podatkov, ki med vsemi artefakti predstavljajo tudi najmanjše zračne pore. Ker je na slabo kontrastirani površini tudi dovolj artefaktov velikosti večje od 1 piksel, bo pri parametrih A , α in \bar{L} relativna napaka ocen že dovolj majhna. Veliko napako pa še zmeraj pričakujemo pri oceni velikostne porazdelitve zračnih por, kar tudi potrjuje relativna napaka ocene parametra A_{300} , ki je pri tem še vedno 36%. Natančne ocene vseh LMA parametrov in obenem ocene s sprejemljivo stopnjo zaupanja lahko dobimo kvečjemu s kvalitetnim kontrastiranjem testne površine betonskih vzorcev. Ker v tem primeru relativne napake dobljenih ocen z LMAir ležijo v območju napake same metode LMA pri minimalni velikosti testnega sistema, navedene v preglednici (Preglednica 6.3), lahko trdimo, da je v primeru kvalitetnega kontrastiranja prototipni sistem LMAir ustrezen.

Potrjena ustreznost sestavljenega računalniško-avtomatiziranega sistema LMAir pomeni, da lahko končno izbiramo večje testne sisteme, z namenom, da bi zmanjšali pričakovano napako ocen LMA parametrov predvsem zaradi heterogenosti materiala. To si lahko privoščimo zaradi hitrosti računalniških procesorjev in sofisticirane programske opreme, ki nam je danes na voljo in katero LMAir tudi s pridom uporablja. Pri močno heterogenih betonskih vzorcih seveda želimo izbrati čim večji testni sistem, takšen, da bi zajel čim večji del testne površine. Izkaže se, da računski čas računalniške simulacije linijske stereološke analize pri velikih testnih sistemih kljub vsemu znaša do več ur. Nadaljnji računski čas povečuje tudi posledično ogromna količina prebranih linijskih podatkov. Vse to nas je vodilo v nova razmišljanja. In sicer, glede na to, da za razliko od dosedanjih mehanskih avtomatiziranih sistemov pri tovrstni avtomatizaciji LMA z optičnim čitalcem končno enostavno zajamemo celotno testno površino preiskovanega vzorca in ne le območja ob testnih linijah, lahko razmislimo o uporabi drugih stereoloških metod za ocenjevanje karakteristik zračnih por v strjenem betonu, s katerimi bi lahko bolj optimalno izkoristili vse zajete podatke, ki so nam s takšnim načinom

avtomatizacije LMA na voljo. Odgovor najdemo v teoriji planarne stereologije, na podlagi katere smo izdelali novo računalniško aplikacijo, ki smo jo poimenovali PMAir. Njen razvoj in validacija sta predstavljena v naslednjem poglavju.

6.3.5 Razvoj računalniške aplikacije PMAir

Če se za trenutek vrnemo k osnovam stereologije in si pogledamo zgodovinski razvoj volumetričnih metod, prikazan na sliki (Slika 6.37), lahko opazimo nenehno ekonomizacijo obstoječih postopkov. In sicer, planimetrija (Slika 6.37a), osnovana na Delessejevi zvezi (43), je morfologom vrsto let služila kot metoda za določanje prostorninske gostote. Ta pristop bi naj bil ekonomizacija predhodnega zamudnejšega in dražjega načina z izrezovanjem in tehtanjem papirja, na katerem so z risanjem ali fotografsko začrtali obrise sestavin (Kališnik, 2002). Nadaljnjo ekonomizacijo metod je predstavljalo spoznanje avstroogrškega geologa Rosiwala (1898, *cit. po* Kališnik, 2002), ki je pri določevanju prostorninske gostote nadomestil površinsko gostoto z interceptno gostoto, tj. relativno dolžino testnih linij, ki leže znotraj profilov proučevanih sestavin, glede na dolžino vseh testnih črt (Slika 6.37b). Gre za linijsko stereološko metodo, ki je uporabljena tudi v SIST EN 480-11 (2005). Končno sta ameriški geolog Thomson (1930, *cit. po* Kališnik, 2002) in sovjetski mineralog Glagolev (1934, *cit. po* Kališnik, 2002) volumetrijo še poenostavila. Za oceno prostorninske gostote sta vzela kar točkovno gostoto, tj. delež testnih točk, ki padejo na profile proučevane sestavine, glede na vse testne točke (Slika 6.37c). Merjenje prostornine sta tako reducirala na preprosto štetje točk. To metodo v nekoliko modificirani obliki predpisuje ameriški standard ASTM C 457 (1998) kot enega izmed možnih postopkov za določanje parametrov LMA.



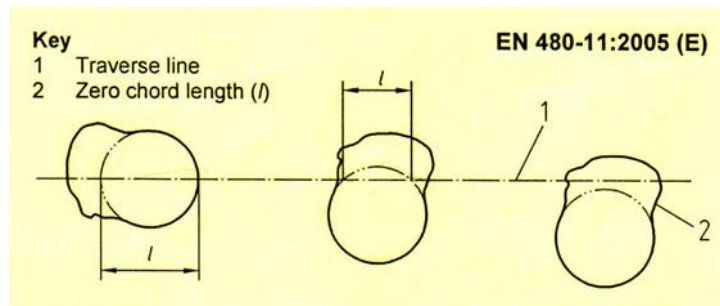
Slika 6.37: Razvoj volumetričnih stereoloških metod: a) planimetrično; b) z linearno integracijo; c) z diferencialnim štetjem točk (Kališnik, 2002)

Fig. 6.37: Development of volumetric stereological methods: a) plane geometry; b) linear traverse method; c) point-count method (Kališnik, 2002)

Vsaka takšna ekonomizacija je sicer zmanjševala natančnost ocene prostorninske gostote, a je bila zaradi dolgotrajnosti obstoječih postopkov nujno potrebna. Bodisi izrezane kose papirja, ploskve ali tetive je štel in meril človek, ali kasneje relativno počasna in izjemno draga mehanska roka. Danes, ko imamo na razpolago visoko razvito računalniško opremo, lahko ne le pospešimo avtomatizacijo teh ekonomiziranih metod, kot je predstavljeno v prejšnjih poglavjih, temveč razmislimo tudi o tem, ali je ta ekonomizacija sploh še potrebna.

Nedavni razvoj optičnih čitalcev z visoko resolucijo je izhodiščni planarni metodi za določanje prostorninske gostote, ki je med vsemi zgoraj navedenimi tudi najnatančnejša, vrnil konkurenčnost. Še več, izvedba planarne metode na zajeti sliki testne površine preskusnega vzorca je v programu za analizo slike celo najhitrejša. To dejansko niti ne preseneča, če pomislimo na vse dodatne algoritme za računalniško simulacijo linijske ali točkovne metode. Zgoraj navedeni pristopi, ki so za človeka predstavljali ekonomizacijo, za računalnik dejansko predstavljajo dodatno delo.

Uporaba planarne analize za določanje karakteristik sistema zračnih por v strjenem betonu odpira tudi nekaj novih možnosti in rešitev za razne probleme pri linijskem pristopu, kot npr. za zračne pore z odkrušenimi robovi (Slika 6.38). Do tega pojava ponavadi pride pri zračnih porah prerezanih visoko nad svojim ekvatorjem, zaradi česar nastane zelo oster in krhek rob, ki se pri postopku brušenja velikokrat odkruši. Z avtomatizirano linijsko analizo je tovrstne primere praktično nemogoče identificirati in korigirati kot zahteva standard (Slika 6.38). Nujno potrebna je planarna detekcija takšnih ploskev, pri kateri lahko šele izločimo del ki ne pripada krogu.

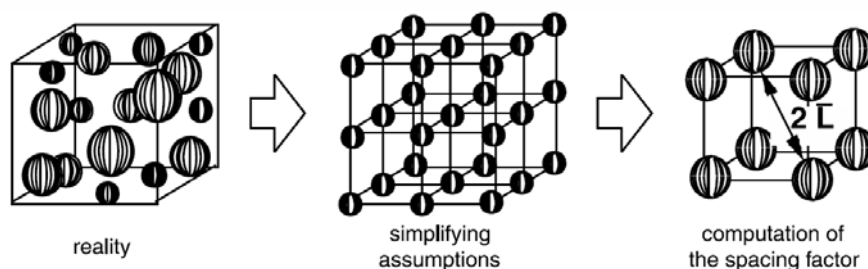


Slika 6.38: Ocena dolžine presečne tetive pri LMA v primeru odkrušenih robov zračnih por (EN, 2005)

Fig. 6.38: Estimation of chord length for broken void edges during microscopic examination (EN, 2005)

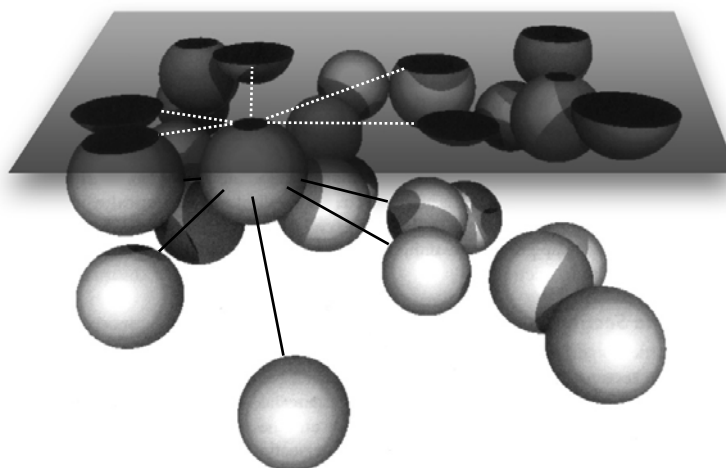
Ena novih možnosti, ki jih odpira planarni pristop, je tudi identifikacija morebitnih predelov zgostitve zračnih por na testni površini, kot je bilo lepo razvidno pri vzorcih mešanice LVA8 v prejšnjem poglavju (Slika 6.36). Posledično se s tem odpira tudi razvoj novih parametrov, ki bi lahko bolj realno opisali medsebojno razdaljo zračnih por kot jo opiše Powersov model za izračun faktorja oddaljenosti \bar{L} (Powers, 1954, *cit. po* Dequiedt, *et al.*, 2001), ki je trenutno uporabljen v standardih EN 480-11 (2005) in ASTM C 457 (1998). Powersov model bi naj namreč temeljil na dveh predpostavkah, tj. da so vse zračne pore enakih velikosti in da so enakomerno porazdeljene po kubični prostorski shemi, kot so grafično prikazali Pleau, Pigeon in Laurencot (2001) s skico (Slika 6.39). Pleau, Pigeon in Laurencot (2001) navajajo tudi, da je moč pokazati, da je tako določen faktor oddaljenosti zgolj groba ocena, ki vedno preceni realno medsebojno razdaljo zračnih por. V želji po določitvi bolj realne medsebojne razdalje zračnih por so nekateri avtorji (Dequiedt, *et al.*, 2001; Zalocha, Kasperkiewicz, 2005) predstavili nove modele, ki temeljijo na različnih geodetskih izračunih medsebojnih razdalj planarno identificiranih objektov na testni površini. S takšnim pristopom sicer lahko identificiramo morebitne predele zgostitve zračnih por na testni površini, po drugi strani pa tako določena medsebojna razdalja zračnih por na dvodimenzionalnem prerezu ne ustreza realni tridimenzionalni obliki sistema zračnih por (Slika 6.40) in je lahko zato še slabša ocena prave medsebojne razdalje zračnih por kakor Powersov faktor oddaljenosti. Snyder, Natesaiyer in Hover (2001) v zelo obsežnem prispevku navajajo in komentirajo tudi druge modele faktorja oddaljenosti, ki bi naj upoštevali pričakovano prostorsko porazdelitev zračnih por. Izrazi so posledično zelo zapleteni in še niso

vključeni v standarde. Snyder, Natesaiyer in Hover (2001) prav tako opozarjajo na nekatere »ill-defined« parametre pri takšnih pristopih in na dejstvo, da je pri vseh predlaganih izračunih faktorja oddaljenosti vpliv agregatnih zrn še vedno zanemarljiv. Matematični model za realen opis tako heterogenega materiala, kot je aeriran beton, je zelo zapleten. V lastnih preiskavah smo se zato zaenkrat omejili na določitev faktorja oddaljenosti po Powersovem modelu, identifikacijo morebitnih območij zgostitve zračnih por pa smo zajeli preko izrisa frekvence dvodimenzionalnih sledi zračnih por na celotni testni površini, kot bo predstavljeno v nadaljevanju.



Slika 6.39: Shematična predstavitev poenostavitvenih predpostavk za račun Powersovega faktorja oddaljenosti \bar{L} (Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001)

Fig. 6.39: Schematic description of the simplifying assumptions used in the computation of the Powers spacing factor \bar{L} (Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001)



Slika 6.40: Tridimenzionalni pogled na poljubno ravnino, ki seka sistem sfer, in medsebojne razdalje njihovih dvodimenzionalnih sledi (bela črtkana črta) ter realne medsebojne razdalje sfer (črna črta)

Fig. 6.40: 3-D view of a random plane intersecting a system of spheres and spacing lengths of spheres 2-D profiles (white dashed line) and true spacing lengths of spheres (black line)

6.3.5.1 Izpeljava planarnih stereoloških zvez za oceno parametrov LMA

Za razliko od razvoja aplikacije LMAir, ki temelji na linijskih stereoloških zvezah predpisanih v SIST EN 480-11 (2005), moramo tokrat planarne stereološke zveze za oceno parametrov LMA najprej izpeljati. Začnimo s parametrom A , tj. delež zraka v strjenem betonu. Stereološko gledano je ta

fizikalna količina prostorninska gostota V_V , ki jo je s planarno analizo najenostavneje oceniti, in sicer iz površinske gostote S_S po Delessejevi zvezi (43). Torej lahko zapišemo:

$$A_{plan} = V_V = S_S . \quad (52)$$

Pri izpeljavi planarne stereološke zveze za oceno parametra α lahko pričakujemo več dela. Gre za verjetnostni problem ocenjevanja specifične površine sistema delcev iz njihovih dvodimenzionalnih sledi na poljubnem prerezu skozi. Pomagamo si s prispevkom avtorjev Snyder, Natesaiyer in Hover (2001). Kot smo že pokazali z izrazom (49) je specifično površino sistema delcev moč določiti neposredno iz njihove velikostne porazdelitve. Specifična površina sistema delcev je namreč kvocient med skupno površino delcev P_{sist} in njihovo skupno prostornino V_{sist} . Ker želimo ti dve količini oceniti iz rezultatov planarne analize, tj. velikosti dvodimenzionalnih sledi delcev, potrebujemo geometrijsko verjetnostno zvezo med velikostjo delcev in njihovimi dvodimenzionalnimi sledmi na poljubnem prerezu skozi. Wicksell (1926, *cit. po* Snyder, Natesaiyer, Hover, 2001) ter Kendall in Moran (1963, *cit. po* Snyder, Natesaiyer, Hover, 2001) so izpeljali izraz za to zvezo v zelo uporabni obliki:

$$\bar{d}^n = \begin{cases} \frac{\overline{D^{n+1}}}{\bar{D}} \frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots n}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots (n+1)} \frac{\pi}{2} ; & \text{za lihe } n ; \\ \frac{\overline{D^{n+1}}}{\bar{D}} \frac{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots n}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (n+1)} ; & \text{za sode } n ; \end{cases} \quad (53)$$

kjer je \bar{D} povprečni premer zračnih por, tj. sfer, in \bar{d} povprečni premer njihovih dvodimenzionalnih sledi na poljubnem prerezu skozi, tj. krogov. Iz zgornjega izraza lahko izpeljemo naslednjo zvezo:

$$\bar{d}^{-1} = \frac{\pi}{\bar{D} \cdot 2} \Rightarrow \bar{D} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\bar{d}^{-1}} . \quad (54)$$

Z upoštevanjem le-te lahko iz izraza (53) izpeljemo še:

$$\bar{d} = \frac{\overline{D^2} \cdot \pi}{\bar{D} \cdot 4} = \frac{\overline{D^2} \cdot \bar{d}^{-1}}{2} \Rightarrow \bar{D}^2 = 2 \frac{\bar{d}}{\bar{d}^{-1}} ; \quad (55)$$

$$\bar{d}^2 = \frac{\overline{D^3} \cdot 2}{\bar{D} \cdot 3} = \frac{4 \cdot \overline{D^3} \cdot \bar{d}^{-1}}{3 \cdot \pi} \Rightarrow \bar{D}^3 = \frac{3\pi}{4} \frac{\bar{d}^2}{\bar{d}^{-1}} . \quad (56)$$

Če dobljeni zvezi (55) in (56) vstavimo v izraz za specifično površino sistema sfer:

$$\alpha = \frac{P_{sist}}{V_{sist}} = \frac{\pi \overline{D^2}}{\pi \overline{D^3} / 6} = \frac{6 \overline{D^2}}{\overline{D^3}} , \quad (57)$$

dobimo iskano zvezo za določitev α iz rezultatov planarne analize:

$$\alpha_{plan} = \frac{16}{\pi} \frac{\bar{d}}{\bar{d}^2} . \quad (58)$$

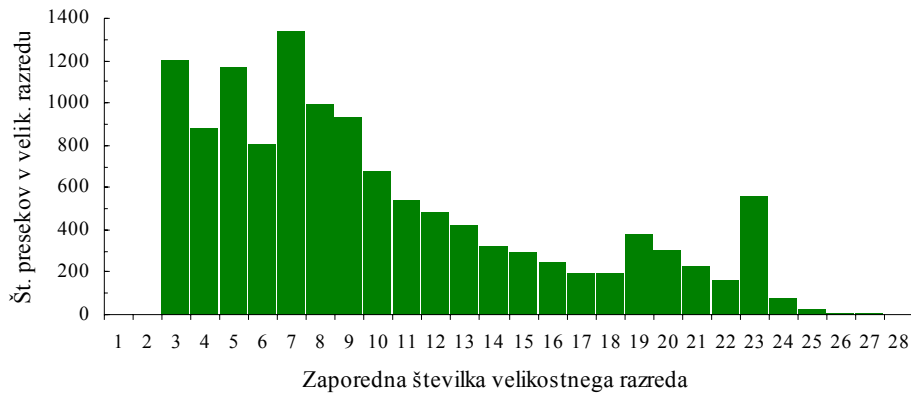
Analogen izraz navajajo tudi Pleau, Pigeon in Laurecot (2001), vendar se pri definiciji spremenljivk izražajo površno. Zaradi mladosti stereologije kot vede nomenklatura stereoloških količin še ni standardizirana in tako obstaja velika nevarnost, da z nejasnimi opisi pride do napačne interpretacije. Za določitev parametra \bar{L} ni potrebnih novih izpeljav, saj je ta parameter odvisen od že izpeljanih parametrov. Tako nam ostane samo še izpeljava planarnega stereološkega izraza za oceno parametra A_{300} . Kot že rečeno se vrednost za ta parameter vzame neposredno iz ocenjene porazdelitve zračnih por. To pomeni, da je dejansko potrebno izpeljati izraz za oceno porazdelitve zračnih por iz rezultatov planarne analize.

Eden izmed postopkov določanja porazdelitve krogel iz njihovih dvodimenzionalnih sledi, tj. krogov, je idejno opisan v (Kališnik, 2002). In sicer, če pripada populacija krogel v preiskovanem materialu več velikostnim razredom, ki imajo različne premere, je frekvenčna distribucija vsake delne populacije skrita v skupni frekvenčni distribuciji njihovih dvodimenzionalnih sledi. Zaradi lažje predstave bomo predlagan postopek preskusili na naključno izbranem kvalitetno kontrastiranem betonskem vzorcu. Izbrali smo srednji prerez enega izmed vzorcev mešanice LA6 (Preglednica 6.12). Threshold vrednost za identifikacijo zračnih por smo določili z uporabo programa LMAir in tokrat v programskem okolju ImageJ izvedli planarno analizo. Dobljene rezultate lahko prikažemo v obliki frekvenčne porazdelitve premerov identificiranih ploskev, tj. krožnih presekov (Slika 6.41). Pri tem smo zaradi želje po neposredni primerjavi rezultatov s standardizirano linijsko analizo izbrali enake velikostne razrede porazdelitve kot jih predpisuje SIST EN 480-11 (2005). Ker smo pri zajemanju slike kontrastirane površine obravnavanega betonskega vzorca uporabili optični čitalec z resolucijo 1200 dpi, sta na diagramu na sliki (Slika 6.41) prva dva velikostna razreda (0-10 μm in 10-20 μm) prazna. Kot že navedeno, je pri resoluciji 1200 dpi 1 piksel namreč širok in visok 21 μm . Pri računu premerov identificiranih ploskev d_i smo vse identificirane ploskve A_i aproksimirali z modelom kroga, ki ustreza fizikalni obliki dvodimenzionalne sledi vnešene zračne pore (St John, Poole, Sims, 1998):

$$d_i = \sqrt{4A_i/\pi} . \quad (59)$$

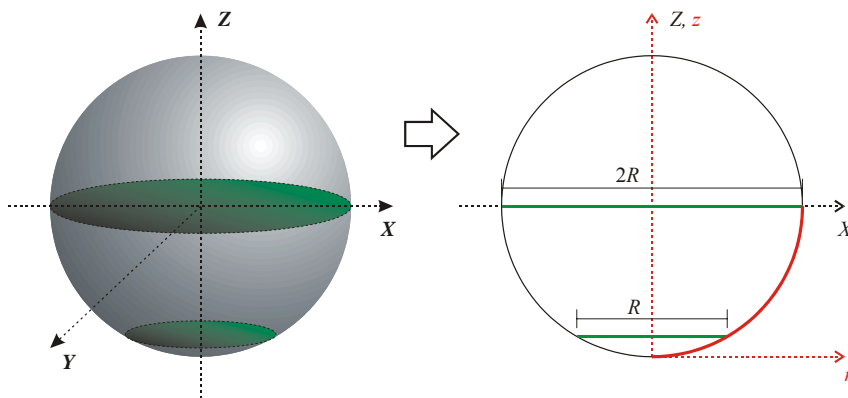
Glede na to, da je testna površina obravnavanega vzorca pripravljena zelo kvalitetno, izločanje morebitnih raz in por v agregatu lahko izvedemo kar z grafično obdelavo zajete slike, kot je prikazano na sliki (Slika 6.25). Sicer je tovrstne artefakte moč odpraviti tudi z avtomatskim filtriranjem rezultatov, kot npr. z uporabo računalniškega grafičnega algoritma *Circularity*, ki loči krožne identificirane predele od močno elipsastih. Morebitni lunckerji zaradi slabe zgoščenosti betonske mešanice pa iz računa izpadejo sami po sebi, saj so v povprečnem premeru praviloma večji od zgornje meje največjega velikostnega razreda, ki znaša 4000 μm .

Nadaljevanje postopka določanja porazdelitve zračnih por iz rezultatov planarne analize je sledeč. Iz sestavljenega diagrama skupne frekvenčne porazdelitve (Slika 6.41) postopoma »odštevamo« relativne frekvence, najprej tiste, ki pripadajo največjemu razredu krogel, nato relativne frekvence, ki pripadajo drugemu razredu po velikosti, in tako naprej, dokler ne »porabimo« celotne populacije (Kališnik, 2002). Pripraviti moramo torej relativne frekvence vseh možnih krožnih presekov za vsak velikostni razred zračnih por pri poljubnem ravninskem prerezu. Iz slike (Slika 6.42) je razvidno, da pri naključnem preseku krogle s premerom $2R$ pričakujemo veliko več krogov s premeri med R in $2R$ kot tistih s premeri manjšimi od R .



Slika 6.41: Frekvenčna porazdelitev premerov presekov na celotni testni površini obravnavanega vzorca

Fig. 6.41: Distribution of planar intercept diameters on the test surface



Slika 6.42: Primer dveh različnih presekov krogle, tj. krog s premerom $2R$ in krog s premerom R

Fig. 6.42: Example of planar intercepts of a sphere, i.e. two circles with diameter of $2R$ and R

Eden izmed načinov določitve točnih vrednosti teh relativnih frekvenc je izpeljava porazdelitve premera krožnega preseka d pri naključnem prerezu krogle s premerom $2R$. Problem lahko poenostavimo s prevedbo na izpeljavo porazdelitve polmera krožnega preseka r iz enakomerno porazdeljene slučajne spremenljivke z , ki predstavlja koordinato naključnega ravninskega prereza krogle, kot kaže skica (Slika 6.42, desno). Gre za matematični problem transformacije slučajne spremenljivke, ki je detajlno obravnavan v učbeniku (Turk, 2005). In sicer, najprej je potrebno zapisati zvezo med slučajnjima spremenljivkama r in z v koordinatnem sistemu (r, z) . Enačba krožnice (Bronštejn, *et al.*, 1997) je v tem primeru:

$$r^2 + (z - R)^2 = R^2 \quad (60)$$

Iz izraza (60) lahko izpostavimo r in ga zapišemo kot funkcijo spremenljivke z :

$$r = \sqrt{R^2 - (z - R)^2} \equiv g(z) \quad (61)$$

Kot že rečeno je zvezna slučajna spremenljivka z porazdeljena enakomerno. Torej je njena gostota verjetnosti $f_z(z)$ enaka:

$$f_z(z) = \frac{1}{R}; \quad 0 \leq z \leq R. \quad (62)$$

Zaloga vrednosti slučajne spremenljivke r je tako:

$$\begin{aligned} \text{- sp. meja:} \quad 0 \leq z \quad \rightarrow \quad & g(0) \leq g(z) = r \\ & \sqrt{R^2 - (0 - R)^2} \leq r \\ & \underline{\underline{0 \leq r}} \end{aligned} \quad (63)$$

$$\begin{aligned} \text{- zg. meja:} \quad z \leq R \quad \rightarrow \quad & g(z) \leq g(R) \\ & r \leq \sqrt{R^2 - (R - R)^2} \\ & \underline{\underline{r \leq R}} \end{aligned} \quad (64)$$

Ker je funkcija $g(z)$ za $z \in [0, R]$ monotona, lahko na tem intervalu zapišemo njen inverz:

$$\begin{aligned} g(z) \equiv r &= \sqrt{R^2 - (z - R)^2} \\ r^2 &= R^2 - (z - R)^2 \\ z &= R \pm \sqrt{R^2 - r^2} \equiv g^{-1}(r) \end{aligned} \quad (65)$$

Zaradi izbranega dela krožnice (Slika 6.42, rdeča barva) vzamemo za $g^{-1}(r) = R - \sqrt{R^2 - r^2}$ in določimo še njen odvod:

$$\frac{dg^{-1}(r)}{dr} = \frac{d \left[R - (R^2 - r^2)^{\frac{1}{2}} \right]}{dr} = -\frac{1}{2} (R^2 - r^2)^{-\frac{1}{2}} (-2r) = \frac{r}{\sqrt{R^2 - r^2}}. \quad (66)$$

Končno zapišemo gostoto verjetnosti slučajne spremenljivke r :

$$f_r(r) = f_z(g^{-1}(r)) \left| \frac{dg^{-1}(r)}{dr} \right| = \frac{r}{R\sqrt{R^2 - r^2}} \quad (67)$$

Dobljen rezultat se sklada z rešitvami tega matematičnega problema v tuji literaturi (Russ, Dehoff, 2000; Larbi, Nijland, de Rooij, 2006). Sedaj lahko določimo relativne frekvence pričakovanih velikosti krožnih presekov pri naključnih prerezih krogel iz posameznega velikostnega razreda. Začnemo z največjim razredom ($d_{\max} = 4000 \mu\text{m}$). Izračun in izris $f_r(r; R = d_{\max}/2)$ izvedemo v programu Mathematica po naslednjem algoritmu:

```
fz = 1 / R;
g[r_] := R - Sqrt[R^2 - r^2];
fr = fz * g'[r]

      r
-----
R Sqrt[-r^2 + R^2]
```

```

razred = 4000;
R = razred / 2;
Plot[fr, {r, 0, R}]

```

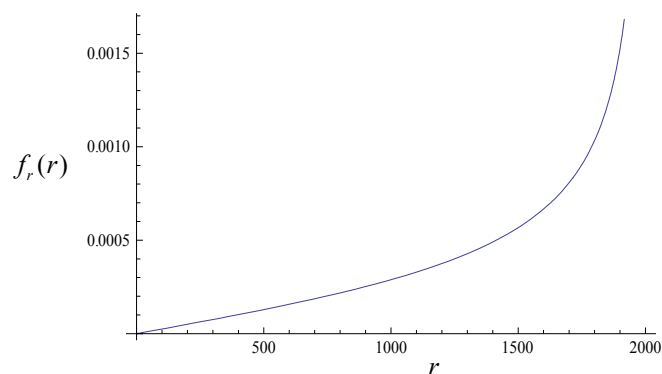
Graf $f_r(r; R = d_{\max}/2)$ je prikazan na sliki (Slika 6.43). Ker smo izbrali velikostne razrede, kot jih določa EN 480-11 (EN 2005) za klasično LMA, je potrebno dobljen diagram gostote verjetnosti $f_r(r)$ prevesti na diagram verjetnostne funkcije diskretne slučajne spremenljivke \tilde{r} . To lahko storimo tako, da gostoto verjetnosti zvezne slučajne spremenljivke r postopoma integriramo v mejah posameznega velikostnega razreda, kot kaže algoritem:

```

P1 = Integrate[fr, {r, 0, 10 / 2}] // N
P2 = Integrate[fr, {r, 10 / 2, 20 / 2}] // N
P3 = Integrate[fr, {r, 20 / 2, 30 / 2}] // N
P4 = Integrate[fr, {r, 30 / 2, 40 / 2}] // N
⋮
P18 = Integrate[fr, {r, 280 / 2, 300 / 2}] // N
P19 = Integrate[fr, {r, 300 / 2, 350 / 2}] // N
P20 = Integrate[fr, {r, 350 / 2, 400 / 2}] // N
P21 = Integrate[fr, {r, 400 / 2, 450 / 2}] // N
P22 = Integrate[fr, {r, 450 / 2, 500 / 2}] // N
P23 = Integrate[fr, {r, 500 / 2, 1000 / 2}] // N
P24 = Integrate[fr, {r, 1000 / 2, 1500 / 2}] // N
P25 = Integrate[fr, {r, 1500 / 2, 2000 / 2}] // N
P26 = Integrate[fr, {r, 2000 / 2, 2500 / 2}] // N
P27 = Integrate[fr, {r, 2500 / 2, 3000 / 2}] // N
P28 = Integrate[fr, {r, 3000 / 2, 4000 / 2}] // N

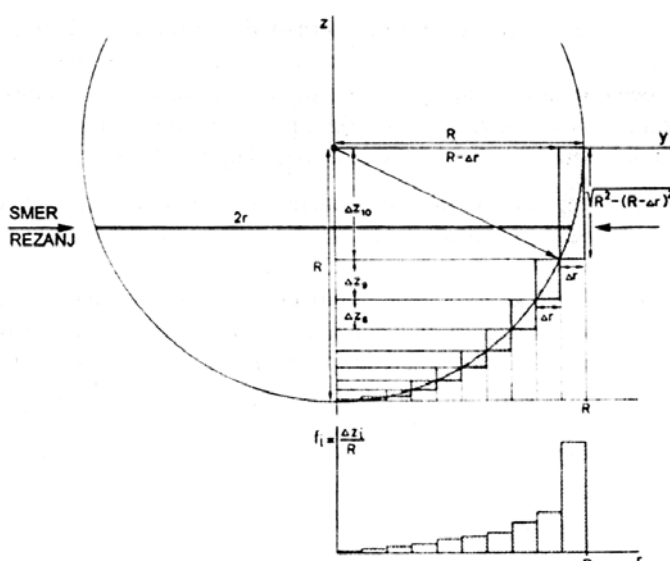
```

Ta postopek je potrebno ponoviti za vseh 28 velikostnih razredov. Dobljene rezultate lahko tudi kontroliramo z grafično varianto rešitve tega verjetnostnega problema, predstavljeno v (Kališnik, 2002) kot kaže skica (Slika 6.44). Ko pripravimo relativne frekvence za vse velikostne razrede, jih lahko torej začnemo postopoma odšteti od skupne frekvenčne porazdelitve vseh identificiranih dvodimenzionalnih sledi zračnih por, kot je prikazano v preglednici (Preglednica 6.17) in na sliki (Slika 6.45) za obravnavan vzorec.



Slika 6.43: Relativne frekvence polmerov pričakovanih presekov r pri naključnih prerezih krogel iz največjega velikostnega razreda $D_{28} \in (3000, 4000] \mu\text{m}$

Fig. 6.43: Radius frequencies of planar intercepts of the spheres from the class $D_{28} \in (3000, 4000] \mu\text{m}$



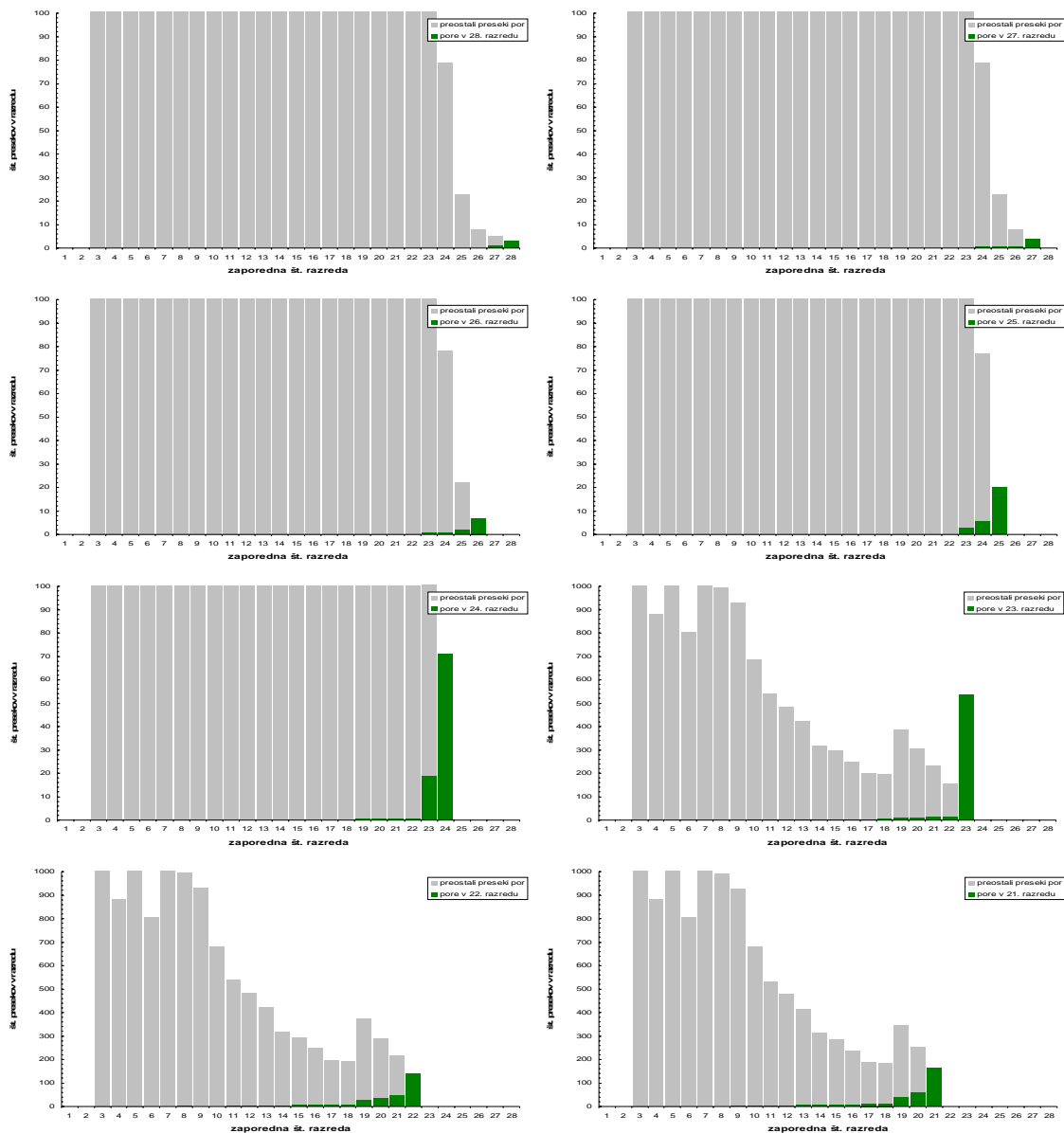
Slika 6.44: Grafična rešitev obravnavanega verjetnostnega problema po literaturi (Kališnik, 2002)

Fig. 6.44: Graphic solution of the discussed problem as presented in (Kališnik, 2002)

Preglednica 6.17: Odštevanje relativnih frekvenc največjega velikostnega razreda od skupne frekvenčne porazdelitve vseh identificiranih dvodimenzionalnih sledi zračnih por

Table 6.17: Example of the first phase of sphere distribution unfolding method from plane intersections

Razred	$2r$	Δr	Δz	Frekvenca	Št. por	Preostalo št. presekov
4	40	1985	0.0	0.000022	0	882
5	50	1980	0.1	0.000028	0	1174
6	60	1975	0.1	0.000034	0	806
7	80	1970	0.2	0.000088	0	1337
8	100	1960	0.2	0.000113	0	996
9	120	1950	0.3	0.000138	0	932
10	140	1940	0.3	0.000163	0	683
11	160	1930	0.4	0.000188	0	540
12	180	1920	0.4	0.000213	0	485
13	200	1910	0.5	0.000238	0	423
14	220	1900	0.5	0.000263	0	319
15	240	1890	0.6	0.000288	0	297
16	260	1880	0.6	0.000313	0	249
17	280	1870	0.7	0.000338	0	199
18	300	1860	0.7	0.000363	0	196
19	350	1850	2.0	0.001019	0	385
20	400	1825	2.4	0.001177	0	304
21	450	1800	2.7	0.001336	0	233
22	500	1775	3.0	0.001495	0	158
23	1000	1750	47.8	0.023911	0	562
24	1500	1500	82.4	0.041221	0	79
25	2000	1250	122.0	0.060999	0	23
26	2500	1000	170.8	0.085401	0	8
27	3000	750	238.4	0.119187	1	4
28	4000	500	1322,9	0,661438	3	0
kontrola:				1,000000		



Slika 6.45: Grafični prikaz odštevanja relativnih frekvenc prvih 8 velikostnih razredov od skupne frekvenčne porazdelitve vseh identificiranih dvodimenzionalnih sledi zračnih por

Fig. 6.45: Graphical presentation of the sphere distribution unfolding method from plane intersections

Pri vsakem takšnem odštevanju dobimo oceno skupnega števila zračnih por za vsak velikostni razred. Če pogledamo preglednico (Preglednica 6.17), je ocena skupnega števila zračnih por za največji velikostni razred zračnih por enaka $3 + 1 = 4$, itn. Končni rezultati so prikazani v preglednici (Preglednica 6.18). Glede na to, da so izbrani razredi zaradi pričakovane logaritemsko normalne porazdelitve zračnih por različnih širin, je dobljene ocene skupnega števila zračnih por v posameznem velikostnem razredu potrebno še podeliti s širino velikostnega razreda, da dobimo verjetnostno funkcijo, katera šele predstavlja porazdelitev zračnih por v obravnavanem vzorcu betona. Iz le-te bi bilo potrebno samo še izračunati pripadajoče prostornine zračnih por v posameznih razredih in iz teh njihove deleže zraka v vzorcu. Kumulativna vsota posameznih deležev zraka od 1. do 18. velikostnega

razreda, tj. od 0 do 300 μm , bi predstavljala ocenjeno vrednost za še zadnji iskan LMA parameter A_{300} . Na tem mestu nastopi problem. Z obravnavanim postopkom odštevanja relativnih frekvenc namreč nismo dobili celotne populacije zračnih por v našem betonskem vzorcu, temveč samo del populacije, ki je imela preseke na obravnavanem prerezu vzorca. Problem je v tem, da pri tem ni znan referenčni prostor dobljenega dela populacije. To pomeni, da iz tako dobljene porazdelitve zračnih por ne moremo določiti absolutnih vrednosti deleža zraka v celotnem vzorcu. Ob tem se porodi vprašanje, če je tako dobljena porazdelitev zračnih por potemtakem sploh smiselna oz. reprezentativna, glede na to, da ne poznamo njenega referenčnega prostora.

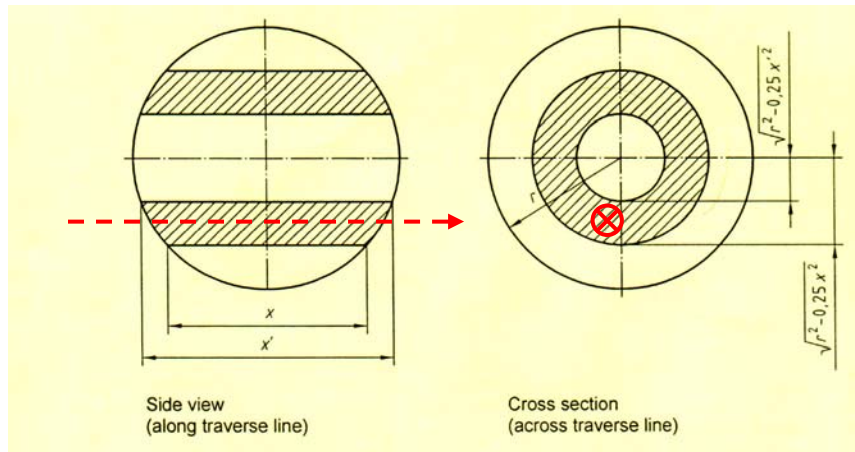
Preglednica 6.18: Ocenjena porazdelitev zračnih por z metodo odštevanja relativnih frekvenc
Table 6.18: Estimated air void distribution according to sphere distribution unfolding method

Razred	Širina razreda μm	Zgornja meja razreda μm	Število presekov v razredu	Št. presekov v razr./ šir. razreda	Ocena števila por v razredu	Št. por v razr./ šir. razreda
1	0-10	10	0	0,000	0	0,000
2	15-20	20	0	0,000	0	0,000
3	25-30	30	1208	40,267	763	25,433
4	35-40	40	882	88,200	449	44,900
5	45-50	50	1174	117,400	1161	116,100
6	55-60	60	806	80,600	818	81,800
7	65-80	80	1337	66,850	1238	61,900
8	85-100	100	996	49,800	876	43,800
9	105-120	120	932	46,600	1013	50,650
10	125-140	140	683	34,150	721	36,050
11	145-160	160	540	27,000	541	27,050
12	165-180	180	485	24,250	536	26,800
13	185-200	200	423	21,150	524	26,200
14	205-220	220	319	15,950	341	17,050
15	225-240	240	297	14,850	365	18,250
16	245-260	260	249	12,450	316	15,800
17	265-280	280	199	9,950	224	11,200
18	285-300	300	196	9,800	308	15,400
19	305-350	350	385	7,700	450	9,000
20	355-400	400	304	6,080	397	7,940
21	405-450	450	233	4,660	357	7,140
22	455-500	500	158	3,160	321	6,420
23	505-1000	1000	562	1,124	622	1,244
24	1005-1500	1500	79	0,158	94	0,188
25	1505-2000	2000	23	0,046	29	0,058
26	2005-2500	2500	8	0,016	11	0,022
27	2505-3000	3000	5	0,010	7	0,014
28	3005-4000	4000	3	0,003	4	0,004

Tudi Russ in Dehoff (2000) ta način določanja porazdelitve krogel iz njihovih dvodimenzionalnih sledi označujeta kot ne preveč smotrni pristop in zaključujeta, da bi bilo k problemu boljše pristopiti stohastično. Stohastičen pristop je uporabljen tudi v standardu SIST EN 480-11 (2005) pri linijski analizi. In sicer, če obravnavamo eno zračno poro, predpostavimo kroglo, dovolj veliko, da lahko vsebuje presečne tetive dolžine x do x' , lahko geometrijsko to zapišemo kot kaže skica (Slika 6.46). Če je to edina zračna pora v 1 mm^3 betona, simetrično orientiranega okoli izbrane testne linije, lahko

določimo verjetnost, da bo naključno izbrana testna linija v tem območju to poro sekala. Še več, določimo lahko verjetnost, da bo pri tem nastala tetiva dolžine x do x' . In sicer, vseh možnih izidov pri takšni naključni izbiri testnih linij v 1 mm^3 je torej 1 mm^2 oz. $1.000.000 \mu\text{m}^2$, ugodni izidi pa so samo šrafran del preseka krogle na skici (Slika 6.46, desno), tj. $\pi r_{zum}^2 - \pi r_{not}^2$ oziroma:

$$\pi(r^2 - 0,25x^2) - \pi(r^2 - 0,25x'^2) . \quad (68)$$



Slika 6.46: Skica geometrijske verjetnosti presečnih tetiv krogle (EN, 2005) z dodanim primerom testne linije (rdeča črtkana puščica) za lažjo predstavo

Fig. 6.46: Void geometry (EN, 2005) with test line example (red dashed arrow)

Če izraz (68) razvijemo, se člena z r^2 odštejeta in ostane samo:

$$0,25\pi(x'^2 - x^2) , \quad (69)$$

kar dejansko pomeni, da je verjetnost, da ob sekanju testne linije s kroglo nastanejo tetive točno določene velikosti, neodvisna od velikosti krogle. Tako lahko pripravimo vektor teh verjetnosti za izbrane velikostne razrede presečnih tetiv in po opravljeni linijski analizi iz prešteti tetiv določimo verjetno število vseh takšnih tetiv v celotnem volumnu vzorca. S tem sicer še nismo pri koncu. Iz te porazdelitve tetiv je še potrebno določiti porazdelitev zračnih por. Rešitev je sledeča. Če obravnavamo i -ti velikostni razred, smo iz opazovanega števila tetiv t_i preko zgoraj določene verjetnosti za obstoj teh tetiv najprej ocenili verjetno število vseh takšnih tetiv c_i v 1 mm^3 betona ali v celotnem vzorcu. Ker vemo, da so te tetive lahko nastale samo pri sekanju zračnih por, ki so večje ali enake zgornji meji obravnavanega velikostnega razreda x_i' , lahko zapišemo:

$$c_i = v_i + v_{i+1} + v_{i+2} + \dots + v_{28} , \quad (70)$$

kjer je v_i pričakovano število zračnih por v i -tem razredu, oz. natančneje pričakovano število zračnih por s premerom x_i' . Če takšno zvezo zapišemo še za $(i+1)$ -ti razred:

$$c_{i+1} = v_{i+1} + v_{i+2} + \dots + v_{28} , \quad (71)$$

lahko iz izrazov (70) in (71) zapišemo i -to rešitev problema:

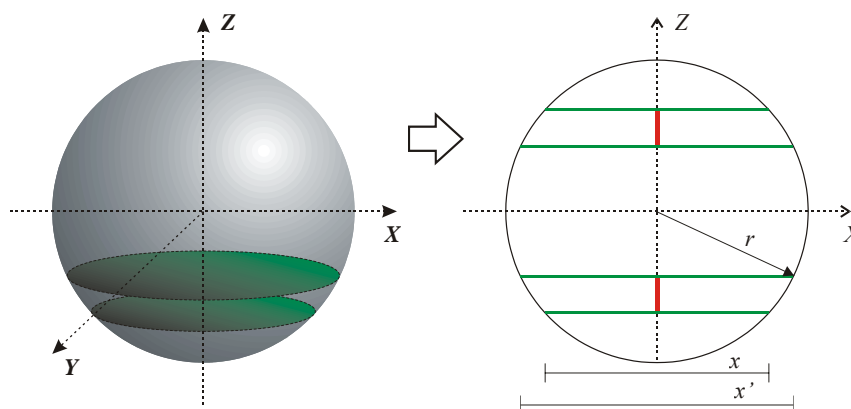
$$v_i = c_i - c_{i+1} . \quad (72)$$

Analogno postorimo še za preostale razrede in dobimo pričakovana števila zračnih por v_i za vsak velikostni razred v 1 mm^3 betona ali v celotnem vzorcu. Ta števila le še pomnožimo s pripadajočimi prostorninami krogel s premeri x_i' :

$$V_i = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{x_i'}{2} \right)^3 \quad (73)$$

in dobimo volumske deleže zračnih por iz vsakega velikostnega razreda ter končno tudi kumulativno krivuljo deleža zraka v betonu, ki predstavlja porazdelitveno funkcijo velikosti zračnih por.

Za ocenjevanje porazdelitve zračnih por iz rezultatov planarne analize torej poskusimo postopati analogno kot zgoraj. Če obravnavamo eno zračno poro, predpostavimo kroglo, dovolj veliko, da lahko vsebuje krožne preseke premerov x do x' , lahko geometrijsko to zapišemo kot kaže skica (Slika 6.47). Če je to edina zračna pora v 1 mm^3 betona, simetrično orientiranega okoli izbrane testne ravnine, lahko določimo verjetnost, da bo naključno izbrana testna ravnina v tem območju to poro sekala. Še več, določimo lahko verjetnost, da bo pri tem sekanju nastal krog premera x do x' . In sicer, vseh možnih izidov pri takšni naključni izbiri testnih ravnin v 1 mm^3 je torej 1 mm oz. $1000 \mu\text{m}$, ugodni izidi pa so samo z rdečo barvo označeni deli na skici (Slika 6.47, desno).



Slika 6.47: Skica geometrije krožnih presekov skozi kroglo oz. zračno poro
Fig. 6.47: Void geometry with two examples of plane intercepts

Ugodne izide lahko zapišemo podobno kot poprej:

$$\left(\sqrt{r^2 - 0,25x^2} - \sqrt{r^2 - 0,25x'^2} \right) \cdot 2 , \quad (74)$$

pri čemer pa žal opazimo, da se člena $z r^2$ ne odštejeta več, kot je bilo to pri prejšnjem linijskem problemu tetiv. To pomeni, da verjetnost, da ob ravninskem sekanju krogle nastanejo krogi točno določene velikosti, ni neodvisna od velikosti krogle. Torej bi za določitev teh verjetnosti morali vedeti koliko in kakšne krogle imamo v vzorcu – to pa je ravno porazdelitev zračnih por, katero iščemo. Kot kaže, je ta problem nerešljiv. Tudi tuji avtorji (Maerz, 1996; Weese, *et al.*, 1997; Ohser, Sandau, 2000;

Pawlas, Nyengaard, Vedel-Jensen, 2007) ta matematični problem označujejo kot »ill-posed« problem. Gre za oznako matematičnega problema brez enolične rešitve. Navedeni avtorji sicer predlagajo različne numerične pristope k reševanju problema, ob določenih predpostavkah, a končno še vedno navajajo problem zgolj kot »good-natured ill-posed« problem. Rešitev problema je verjetno bolj smotno, če ne že edino pravilno, iskati v zgoraj opisani linijski različici, kjer enolična rešitev očitno obstaja. V ta namen smo v Matlabu razvili funkcijo *plan2lin* (Priloga C), ki prevede rezultate planarne analize, tj. krožne preseke A_j , na linijske podatke, tj. tetive $T_{a,k}$. Gre za geometrijsko rešitev. Če zajeto sliko testne površine povečamo do takšne mere, da je 1 piksel jasno viden kot majhen kvadrat, bo neka identificirana dvodimenzionalna sled j -te zračne pore, tj. krožni presek A_j , izgledala tako kot kaže skica (Slika 6.48, zeleni raster). Če si nadalje predstavljamo, da bi v primeru linijske analize na zajeti sliki testne površine izbrali kar največ testnih linij, bi vsaka vrstica pikselov na zajeti računalniški sliki predstavljala natanko eno testno linijo višine 1 piksel. To pomeni, da lahko iz vsakega identificiranega krožnega preseka A_j ocenimo najprej število verjetnih tetiv N_j , ki bi sekale to krožno sled v primeru izbire maksimalnega linijskega testnega sistema na zajeti sliki:

$$N_j = 2\sqrt{\frac{A_j [\text{pix}]}{\pi}}, \quad (75)$$

in nato še njihove verjetne dolžine $T_{a,k}$:

$$T_{a,k} \equiv T_{a,ij} = 2\sqrt{\left(d_j/2\right)^2 - \left(z_{ij} - d_j/2\right)^2}, \quad (76)$$

kjer je d_j premer j -te krožne sledi in z_{ij} koordinata i -te presečne tetive, kot kaže skica (Slika 6.48). Pri tem smo vsako identificirano sled aproksimirali z idealnim krogom (Slika 6.48, rdeča barva), da bi čim bolj zmanjšali napako zaradi omejene resolucije uporabljenega optičnega čitalca. Izraz (75) smo izpeljali iz enačbe za ploščino kroga:

$$A_j [\text{pix}] = \pi \left(\frac{d_j [\text{pix}]}{2} \right)^2 \quad (77)$$

in geometrijske zveze:

$$d_j [\text{pix}] = N_j, \quad (78)$$

ki je lepo razvidna iz skice (Slika 6.48). Izraz (76) je izpeljan iz enačbe krožnice:

$$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2, \quad (79)$$

oziroma glede na izbran koordinatni sistem:

$$x_{ij}^2 + \left(z_{ij} - d_j/2\right)^2 = \left(d_j/2\right)^2, \quad (80)$$

in zveze:

$$T_{a,ij} = 2x_{ij}, \quad (81)$$

ki je prav tako lepo razvidna iz skice (Slika 6.48). Iz dobljenih linijskih podatkov $T_{a,k}$ lahko končno ocenimo porazdelitev zračnih por po postopku predpisanem v SIST EN 480-11 (2005) in iz le-te

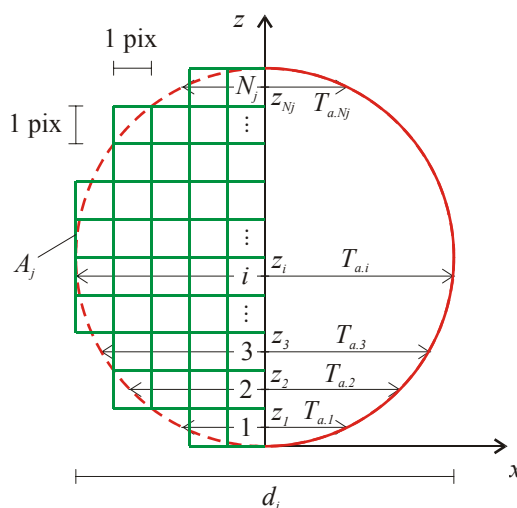
vrednost za A_{300} . Za kontrolo ustreznosti zgoraj izpeljanih zvez lahko iz tako dobljenih linijskih podatkov določimo še A_{lin} :

$$A_{lin} = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}} = \frac{\sum T_{a,k} [\text{pix}] \cdot 100}{S_{img} [\text{pix}]}, \quad (82)$$

kjer je S_{img} ploščina celotne testne površine oz. število vseh pikselov na zajeti sliki, ter α_{lin} :

$$\alpha_{lin} = \frac{4N}{T_a} = \frac{4\sum N_j}{\sum T_{a,k}} \quad (83)$$

in ju primerjamo z A_{plan} in α_{plan} določenima iz enačb (52) oz. (58).

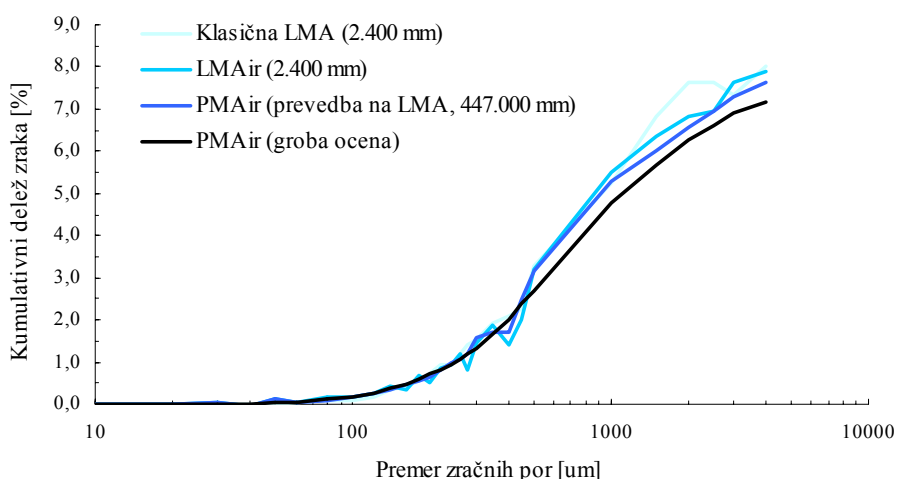


Slika 6.48: Skica identificiranega krožnega preseka j -te zračne pore na zajeti sliki

Fig. 6.48: Example of an air void plane intercept in the scanned image

Porazdelitev zračnih por bi lahko iz rezultatov planarne analize sicer na grobo ocenili tako, da bi kar neposredno po Delesejevi zvezi (43) postopoma določali deleže zraka posameznih velikostnih razredov. Postopek je prikazan v prilogi (Priloga D). Pri tem se sicer zavedamo, da delamo neko napako, saj neko manjše število krogov iz i -tega velikostnega razreda $[d_{i-1}, d_i]$ predstavlja krožne preseke krogel s premeri večjimi od d_i . Ker vemo, da je ta verjetnost relativno majhna, lahko pričakujemo tudi relativno majhno napako rezultatov tega postopka. Kot že rečeno, te verjetnosti ne moremo določiti, ker bi za to morali porazdelitev zračnih por že poznati. Glede na zgornji opis pričakovane napake lahko pri takšni oceni pričakujemo rahlo previsoke vrednosti v območju nižjih velikostnih razredov porazdelitve in rahlo prenizke vrednosti v območju višjih razredov. To potrjuje tudi primerjalni diagram na sliki (Slika 6.49). Iz diagrama je prav tako razvidno, da porazdelitveni krivulji določeni iz rezultatov planarne analize (PMAir) ležita rahlo pod porazdelitvenima krivuljama določenima iz rezultatov linearne analize. Vzrok za to razhajanje lažje identificiramo, če primerjamo še preostale LMA parametre za obravnavan vzorec določene z različnimi stereološkimi pristopi. Rezultati so prikazani v preglednici (Preglednica 6.19). Iz preglednice je razvidno, da PMAir vrne nižji vrednosti za parametra α in A_{300} ter višji \bar{L} kot LMAir pri zelo velikem testnem sistemu (1000 testnih linij), in to pri skoraj enakem A . To pomeni, da smo s planarno analizo PMAir očitno

identificirali manjše število manjših zračnih por in temu ustrezno večje število večjih, da je pri tem skupen delež zraka A ostal skoraj enak. To potrjuje tudi primerjava frekvence identificiranih tetiv N/T_{tot} z različnimi pristopi. Gre za napako, ki je posledica stikajočih se profilov zračnih por (Slika 6.50a). V takšnih primerih bo analizator slike stikajoče se profile identificiral kot en sam profil velikosti enake vsoti vseh profilov, ki se stikajo (Slika 6.50b). Kot že navedeno, rešitev za problem lahko najdemo v funkciji *Watershed* (Slika 6.50c in d), ki je že vgrajena v novo verzijo programa ImageJ. Rezultati po ponovno izvedeni planarni analizi z aplikacijo PMAir, z uporabo *Watershed* metode, so prikazani v preglednici (Preglednica 6.20).



Slika 6.49: Primerjava kumulativnega deleža zraka za obravnavan vzorec določenega z različnimi pristopi
Fig. 6.49: Comparison of the test sample cumulative air content obtained with different methods

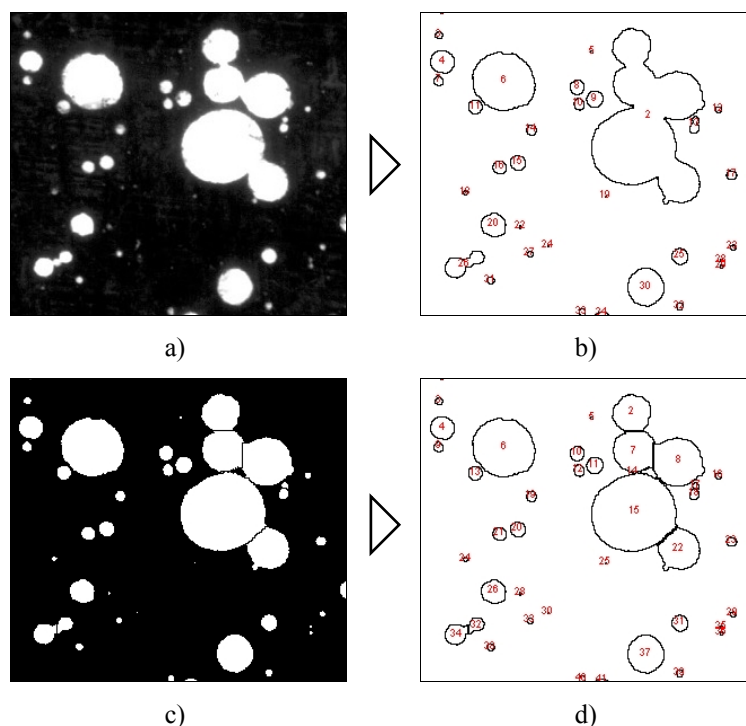
Preglednica 6.19: Primerjava preostalih parametrov LMA za obravnavan vzorec določenih z različnimi stereološkimi pristopi

Table 6.19: Comparison of the remaining LTM parameters for the test sample obtained from different stereological methods

Parameter	Klasična LMA	LMAir 97.800 mm	PMAir (LMA 447.000 mm)	PMAir 9.500 mm ²	Relativna napaka
A [%]	7,74	7,32	7,36	7,32	0,0%
α [mm ⁻¹]	12,51	13,18	11,84	12,00	9,0%
\bar{L} [mm]	0,383	0,374	0,416	0,414	10,7%
A_{300} [%]	1,55	1,56	1,19	1,34	14,1%
N/T_{tot} [mm ⁻¹]	0,242	0,241	0,216	-	-

Iz preglednice (Preglednica 6.20) je razvidno, da se z uporabo *Watershed* metode rezultati PMAir precej približajo pričakovanim vrednostim LMA parametrov za obravnavan vzorec, za katere smo privzeli rezultate LMAir pri testnem sistemu 1000 linij. Da bi ustreznost v tem poglavju izpeljanih enačb, ki smo jih vgradili v prototipno aplikacijo PMAir, potrdili še za splošen primer, moramo opraviti tovrstne primerjave rezultatov PMAir in klasične LMA za širšo paleto raznolikih betonskih mešanic. Ta validacija je predstavljena v poglavju 6.3.5.3. Iz preglednic (Preglednica 6.19) in

(Preglednica 6.20) je prav tako razvidno, da so rezultati planarne analize in rezultati prevedene planarne analize na LMA skoraj identični. To pomeni, da je predlagan pristop prevedbe rezultatov planarne analize na linijske podatke, zapisan z enačbami (75)-(81), ustrezen. Še več, na ta način lahko tudi z uporabo planarne analize enolično ocenimo porazdelitev zračnih por v strjenem betonu. Prednost pred klasično LMA je v tem, da so pri tej oceni upoštevani podatki celotne testne površine.



Slika 6.50: Rešitev problema deloma stikajočih se zračnih por: a) originalno stanje; b) napačna identifikacija števila por; c) popravljeno stanje z uporabo metode *Watershed*; d) pravilnejša identifikacija števila por
 Fig. 6.50: Solution for the joint air voids problem: a) original state; b) false identification of air voids; c) corrected state using *Watershed* method; d) corrected identification of air voids

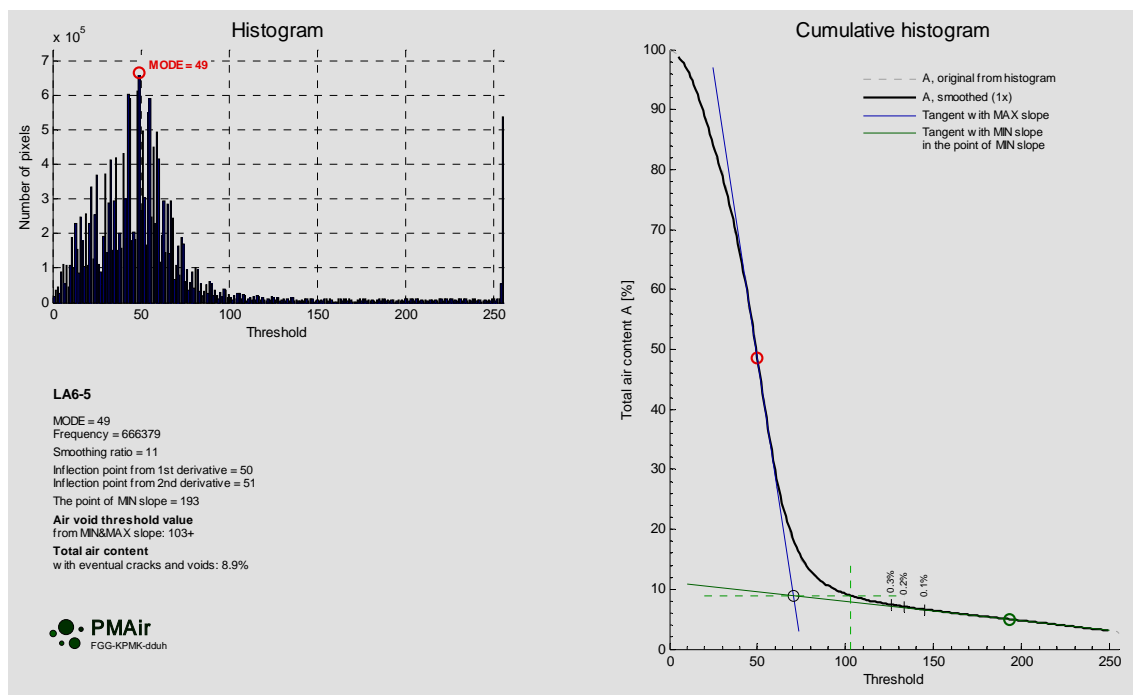
Preglednica 6.20: Primerjava preostalih parametrov LMA za obravnavan vzorec določenih z različnimi stereološkimi pristopi

Table 6.20: Comparison of the remaining LTM parameters for the test sample obtained from different stereological methods

Parameter	Klasična LMA	LMAir 97.800 mm	PMAir (LMA) + <i>Watershed</i>	PMAir + <i>Watershed</i>	Relativna napaka
A [%]	7,74	7,32	7,33	7,29	0,4%
α [mm^{-1}]	12,51	13,18	12,39	12,41	5,5%
\bar{L} [mm]	0,383	0,374	0,397	0,397	5,9%
A_{300} [%]	1,55	1,56	1,32	1,48	5,1%
N/T_{tot} [mm^{-1}]	0,242	0,241	0,227	-	-

6.3.5.2 Aplikacija PMAir

Aplikacija PMAir je skonstruirana analogno aplikaciji LMAir. Prvo fazo tako predstavlja izris diagramov vseh parametrov LMA v odvisnosti od threshold vrednosti, in sicer po HST metodi (Slika 6.51) detajlno predstavljeni v poglavju 6.3.4.1, in po THR metodi (Slika 6.52), ki je opisana v poglavju 6.3.4.2. Na podlagi teh diagramov se določi threshold vrednost za identifikacijo zračnih por na kontrastirani površini betonskega vzorca in končne vrednosti LMA parametrov pri le-tej (Slika 6.53), kjer so rezultati planarne analize prevedene na linijsko izpisani z zeleno barvo in označeni z indeksom *lin*. Dodatno se izrišeta tudi histograma položajev dvodimenzionalnih sledi zračnih por na celotni testni površini za kontrolo morebitnih območij zgostitve zračnih por (Slika 6.54).



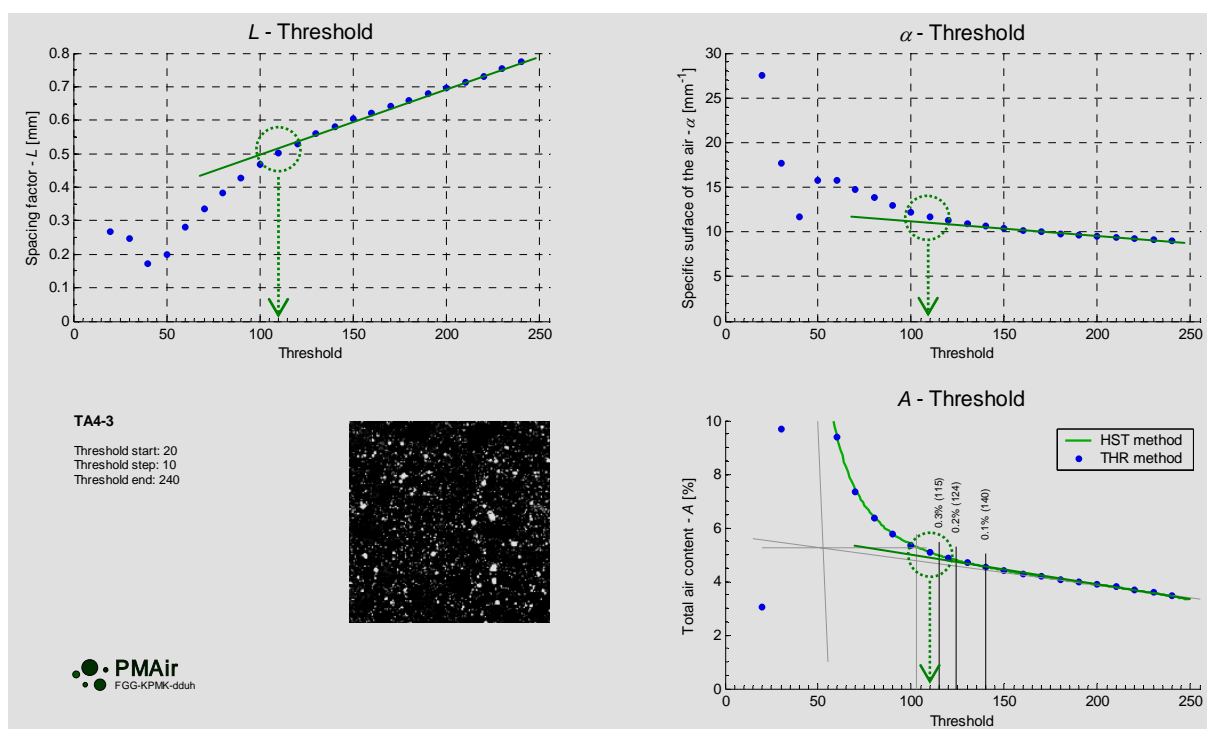
Slika 6.51: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – HST metoda

Fig. 6.51: Sample screenshot from the prototype application PMAir – HST method

Za primere izpisov prototipnega programa PMAir na slikah (Slika 6.51)-(Slika 6.53) smo zaradi zelene primerjave izbrali iste vzorce kot pri predstavitvi izpisov programa LMAir na slikah (Slika 6.28)-(Slika 6.32). Če najprej primerjamo izpisa HST metode pri obeh programih, tj. sliki (Slika 6.28) in (Slika 6.51), lahko opazimo, da so rezultati identični. To je v skladu s pričakovanji, saj v fazi metode HST tudi LMAir že uporablja planarni stereološki pristop za oceno parametra A .

Pri THR metodi pričakujemo določeno razliko v rezultatih, saj prvič LMAir (Slika 6.30) uporablja linearne stereološke zveze za oceno LMA parametrov, medtem ko PMAir (Slika 6.52) planarne, in drugič, pri LMAir testni sistem predstavljajo le izbrane testne linije na preiskovani površini vzorca, pri PMAir pa celotna površina vzorca. Če primerjamo rezultate iz diagramov na slikah (Slika 6.30) in (Slika 6.52), lahko opazimo manjše razlike predvsem v robnih območjih, kar je razumljivo, saj je podatkov za izračune pri LMAir v teh območjih precej manj kot pri PMAir. Tudi gladkost krivulj pri

LMAir zato ni tako visoka kot pri PMAir. Območja zaključkov linearnosti na desni strani vseh krivulj x_a (obkroženo z zeleno) so primerljiva, prav tako vrednosti LMA parametrov pri le-teh, je pa za opaziti precej manjše odklone krivulj pri PMAir v območju threshold vrednosti $x < x_a$. Gre za posledico večjega vpliva združevanja identificiranih predelov na testni površini na rezultate planarne analize kot na rezultate LMA. Če še enkrat pogledamo tovrsten primer združevanja identificiranih predelov na sliki (Slika 6.50b), si lahko predstavljamo, da bo PMAir v fazi THR metode privzel tak združen presek za en sam temu ustrezno velik krog, LMAir pa bo s poljubno testno linijo preko takšnega preseka v večini primerov še vedno dovolj dobro ocenil realne velikosti stikajočih se krožnih sledi zračnih por. To pomeni, da bi bilo za lažjo oceno zaključka linearnosti vseh THR krivulj pri PMAir tudi v fazi THR metode potrebno uporabljati računalniško metodo *Watershed*. S tem bi sicer močno povečali računski čas analize, saj bi bilo potrebno metodo *Watershed* zagnati za vsako izbrano threshold vrednost. Glede na trenutne sposobnosti računalnikov je zato zaenkrat boljše izvajati predlagano THR metodo za določitev threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por x_a z linijsko analizo LMAir. Glede na intenzivnost razvoja računalnikov kmalu ta ekonomizacija najverjetneje ne bo več potrebna.

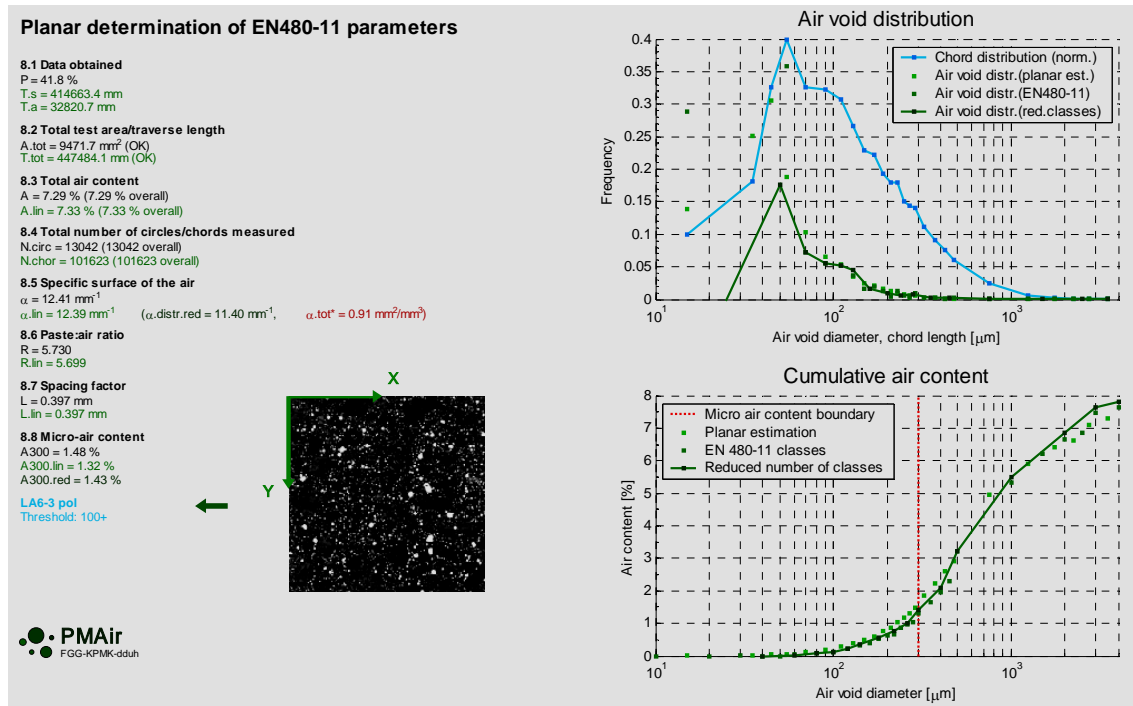


Slika 6.52: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – THR metoda

Fig. 6.52: Sample screenshot from the prototype application PMAir – THR method

Če primerjamo še končne rezultate LMAir (Slika 6.32) in PMAir (Slika 6.53), lahko opazimo bistveno razliko v gladkosti krivulj porazdelitve zračnih por in porazdelitve identificiranih tetiv krožnih sledi zračnih por. Pri PMAir je namreč analizirana celotna površina vzorca, kar prevedeno na linijske podatke predstavlja testno linijo skupne dolžine 447.484 mm in 101.623 identificiranih tetiv, v primerjavi z LMAir, kjer je bilo pri predpisani minimalni testni liniji skupne dolžine 2.446 mm identificiranih le 593 tetiv. Kljub tako ogromni razliki v količini podatkov je iz diagramov na slikah

(Slika 6.32) in (Slika 6.53) razvidno, da linijska analiza pri predpisanem minimalnem testnem sistemu kar dobro oceni globalno obliko porazdelitve zračnih por. Seveda pa lokalne ocene izkazujejo relativno velike napake, kar se najbolj pozna pri določitvi parametra A_{300} . Do neke mere preseneča tudi dosežena natančnost ocen preostalih LMA parametrov z LMAir v primerjavi z PMAir, kjer je bilo podatkov za statistično-stereološke izračune približno 170-krat več. Naj pri tem še enkrat navedemo dejstvo, da sta omenjeni LMAir in PMAir analizi opravljeni na identični testni površini izbranega betonskega vzorca pri enaki threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por $x_a = 100$.

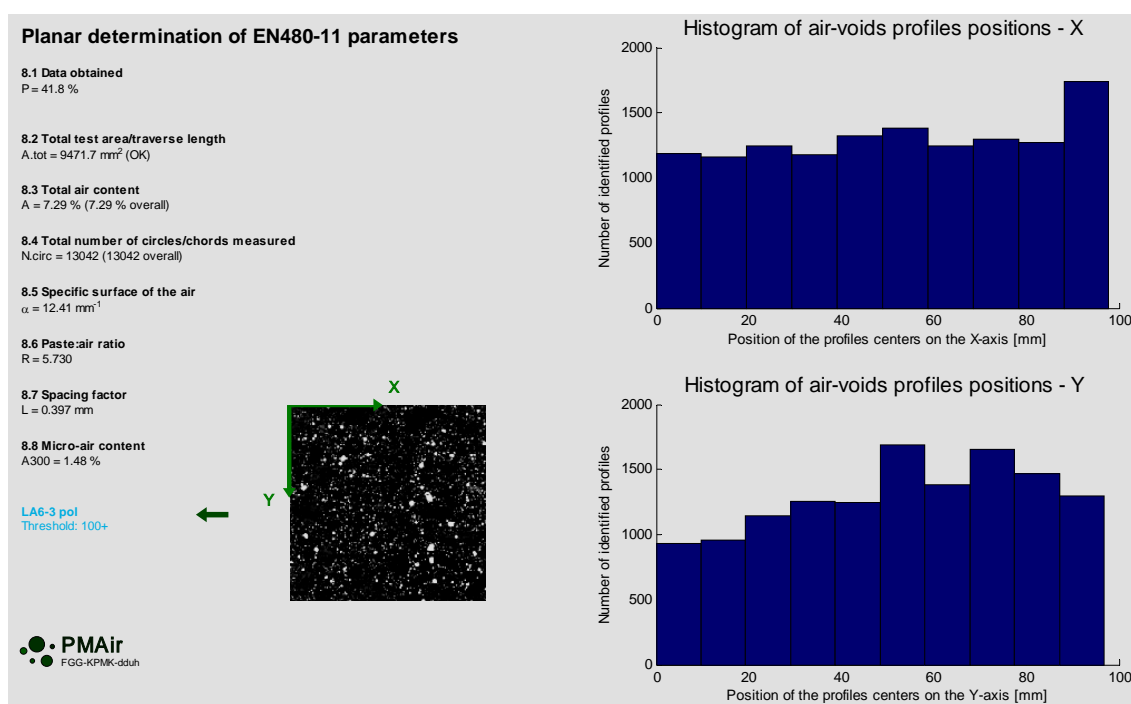


Slika 6.53: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – končni rezultati #2/2

Fig. 6.53: Sample screenshot from the prototype application PMAir – final results #2/2

PMAir v zadnji fazi izriše tudi grobo planarno oceno porazdelitve zračnih por, predstavljeno v prejšnjem poglavju, ter porazdelitev zračnih por glede na reducirano število velikostnih razredov po postopku, prikazanem v prilogi (Priloga B). Iz slednje se določi od vseh najbolj verjetna ocena za delež mikro-por v obravnavanem betonskem vzorcu in se izpiše pod oznako $A_{300.red}$. Iz te porazdelitve se za kontrolo ustreznosti izračuna določi tudi specifična površina sistema zračnih por, po enačbi (49), in se izpiše pod oznako $\alpha_{\text{distr.red}}$. Z rdečo barvo je ob tej izpisana tudi vrednost predlaganega novega parametra α^* , o katerem je več govora v poglavju 5.2.2.7. Končno lahko primerjamo še diagrame na slikah (Slika 6.31) in (Slika 6.54). Gre za oceno morebitnih območij zgostitve zračnih por. Z uporabo planarne stereološke metode je ta prikaz neposreden in enostaven za branje. Kot kažeta histograma na sliki (Slika 6.54) gre za izris frekvence krožnih sledi zračnih por glede na njihov položaj na testni površini preiskovanega vzorca. Iz teh dveh histogramov lahko razberemo, da je prišlo do rahle zgostitve zračnih por na desni strani obravnavanega vzorca (Slika 6.54, zgornji histogram), ter, da je proti dnu vzorca nekoliko več zračnih por (Slika 6.54, spodnji histogram). Obravnavan vzorec je bil namreč prerezan in zajet z optičnim čitalcem tako, da koordinata Y kaže v smeri vgrajevanja betona v kalup dimenzij 10x10x10 cm. Slednje se sklada s posrednimi ugotovitvami iz diagramov programa

LMAir na sliki (Slika 6.31). In sicer, glede na to, da so testne linije potekale zaporedno po testni površini vzorca od vrha proti dnu, lahko iz izkazanega sočasnega globalnega naraščanja parametra A in rahlega upadanja parametra \bar{L} z večanjem T_{tot} sklepamo, da je na dnu vzorca najverjetneje več zračnih por kot ob vrhu. Pri tako majhnem T_{tot} je sicer vpliv statistične napake zaradi premajhne količine podatkov (na obravnavanem vzorcu od 60 do 600 tetiv) zelo velik. Zato je tovrstne lastnosti sistema zračnih por bolj smotrno ocenjevati iz planarnega pristopa, predstavljenega na sliki (Slika 6.54), kjer je podatek za obravnavan primer kar 13.042 krožnih sledi zračnih por. Še vedno pa je tudi ta ocena zgolj lokalni pogled na sistem zračnih por po celotnem volumnu materiala. Bolj realno oceno lahko dobimo z analizo večjega števila prerezov skozi material.



Slika 6.54: Primer izpisa prototipne aplikacije PMAir – končni rezultati #1/2

Fig. 6.54: Sample screenshot from the prototype application PMAir – final results #1/2

6.3.5.3 Validacija PMAir

Za validacijo razvojnega programa PMAir smo uporabili iste vzorce kot pri validaciji aplikacije LMAir, predstavljene v poglavju 6.3.4.4. Pri tem smo za threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por $x_{a,i}$ izbrali iste vrednosti kot pri LMAir, saj smo analizo opravili na istih z optičnim čitalcem zajetih slikah kontrastiranih površin posameznih vzorcev. Primerjave rezultatov obeh avtomatiziranih sistemov PMAir in LMAir ter klasične ročno izvedene LMA so prikazane v preglednicah (Preglednica 6.21)-(Preglednica 6.28) in na diagramih na sliki (Slika 6.55).

Preglednica 6.21: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce CA4

Table 6.21: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for CA4 samples

Parameter	Klasična LMA	LMAir slabo kontrast.	Rel. nap.	PMAir slabo kontrast.	Rel. nap.
A (%)	4,60	5,46	19%	5,23	14%
α (mm^{-1})	10,44	16,11	54%	15,31	47%
\bar{L} (mm)	0,587	0,352	-40%	0,378	-36%
A_{300} (%)	0,66	1,38	109%	1,11	68%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,120	0,220	83%	0,203	69%

Preglednica 6.22: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LVA8

Table 6.22: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LVA8 samples

Parameter	Klasična LMA	LMAir združene pore	Rel. nap.	PMAir združene pore	Rel. nap.
A (%)	8,60	10,01	16%	9,95	16%
α (mm^{-1})	19,40	15,31	-21%	14,85	-24%
\bar{L} (mm)	0,196	0,213	9%	0,221	13%
A_{300} (%)	2,99	2,46	-18%	2,68	-10%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,417	0,383	-8%	0,372	-11%

Preglednica 6.23: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce EF

Table 6.23: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for EF samples

Parameter	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.	PMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.
A (%)	4,31	4,50	4%	4,54	5%
α (mm^{-1})	15,65	15,06	-4%	15,32	-2%
\bar{L} (mm)	0,408	0,416	2%	0,407	-0%
A_{300} (%)	1,03	1,12	9%	1,26	22%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,169	0,169	0%	0,175	4%

Preglednica 6.24: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce TA4

Table 6.24: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for TA4 samples

Parameter	Klasična LMA	LMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.	PMAir kvalit. kontrast.	Rel. nap.
A (%)	5,04	4,85	-4%	5,28	5%
α (mm^{-1})	10,76	12,11	13%	10,12	-6%
\bar{L} (mm)	0,547	0,495	-10%	0,570	4%
A_{300} (%)	0,63	0,82	30%	0,67	6%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,136	0,147	8%	0,134	-1%

Preglednica 6.25: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA4

Table 6.25: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA4 samples

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.	PMAir	Rel.
	LMA	kvalit. kontrast.	nap.	kvalit. kontrast.	nap.
A (%)	5,10	5,31	4%	5,52	8%
α (mm^{-1})	11,69	11,67	0%	10,36	-11%
\bar{L} (mm)	0,501	0,493	-2%	0,545	9%
A_{300} (%)	0,96	1,04	8%	0,79	-18%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,149	0,155	4%	0,143	-4%

Preglednica 6.26: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA8

Table 6.26: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA8 samples

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.	PMAir	Rel.
	LMA	kvalit. kontrast.	nap.	kvalit. kontrast.	nap.
A (%)	7,80	7,86	1%	7,65	-2%
α (mm^{-1})	11,94	12,24	3%	11,78	-1%
\bar{L} (mm)	0,397	0,386	-3%	0,406	2%
A_{300} (%)	1,41	1,35	-4%	1,33	-6%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,233	0,240	3%	0,226	-3%

Preglednica 6.27: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA10

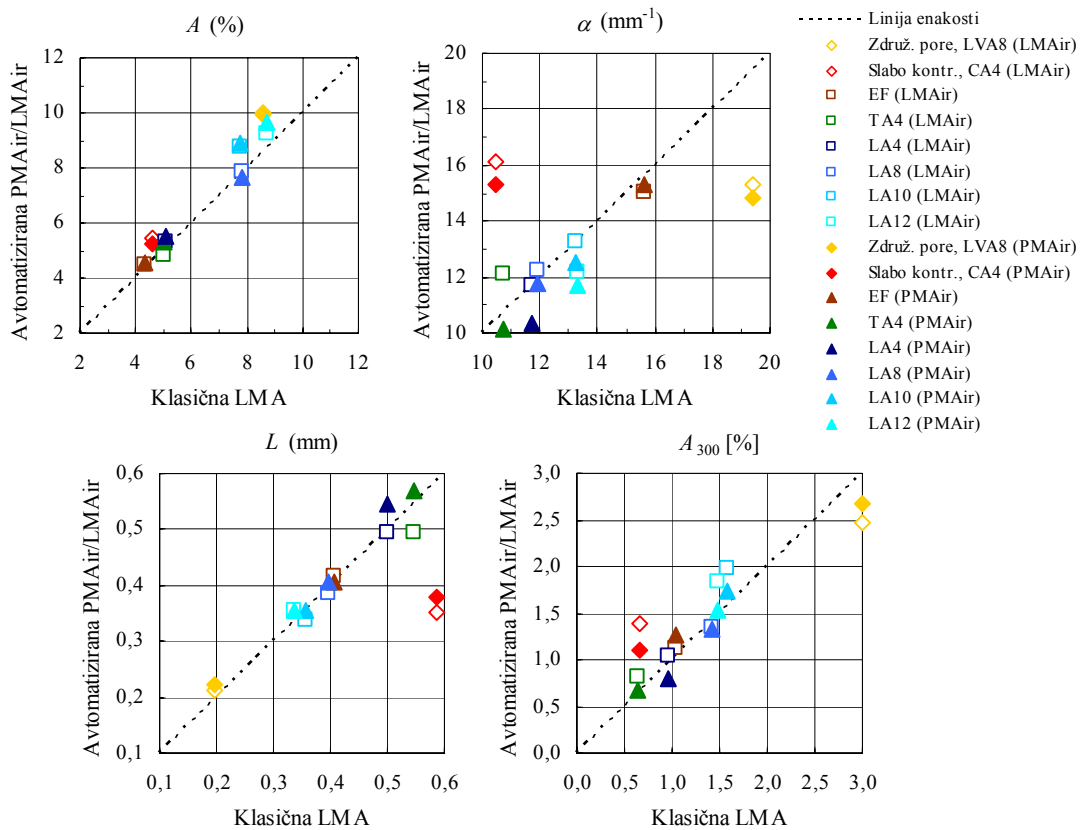
Table 6.27: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA10 samples

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.	PMAir	Rel.
	LMA	kvalit. kontrast.	nap.	kvalit. kontrast.	nap.
A (%)	7,75	8,74	13%	8,91	15%
α (mm^{-1})	13,27	13,28	0%	12,54	-6%
\bar{L} (mm)	0,357	0,338	-5%	0,354	-1%
A_{300} (%)	1,57	1,97	26%	1,74	11%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,257	0,290	13%	0,280	9%

Preglednica 6.28: Primerjava rezultatov PMAir, LMAir in klasične LMA za vzorce LA12

Table 6.28: Comparison of PMAir, LMAir and classic LTM results for LA12 samples

Parameter	Klasična	LMAir	Rel.	PMAir	Rel.
	LMA	kvalit. kontrast.	nap.	kvalit. kontrast.	nap.
A (%)	8,70	9,27	7%	9,64	11%
α (mm^{-1})	13,31	12,17	-9%	11,71	-12%
\bar{L} (mm)	0,335	0,355	6%	0,355	6%
A_{300} (%)	1,47	1,83	25%	1,53	4%
N/T_{tot} (mm^{-1})	0,290	0,282	-3%	0,283	-2%



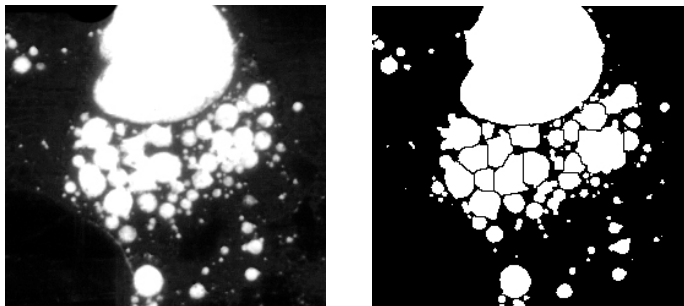
Slika 6.55: Primerjava rezultatov avtomatiziranih sistemov PMAir in LMAir ter klasične LMA

Fig. 6.55: Comparison of the results of automated systems PMAir, LMAir and classic LTM

Iz preglednic (Preglednica 6.21)-(Preglednica 6.28) in diagramov na sliki (Slika 6.55) je razvidno, da je avtomatiziran sistem PMAir ustrezen tudi za splošne primere, seveda pod pogojem kvalitetne priprave površine vzorcev. V primeru slabo kontrastiranih vzorcev (mešanica CA4) so relativne napake ocen LMA parametrov z metodo PMAir podobno visoke kot pri LMAir.

Glede na to, da smo za izvedbo PMAir in LMAir uporabili iste threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por na posameznih vzorcih, lahko iz opravljene validacije medsebojno primerjamo tudi linijsko in planarno stereološko metodo. Iz diagramov na sliki (Slika 6.55) je razvidno, da so rezultati obeh metod medsebojno dokaj enakomerno razpršeni, razen za parameter α . Tak rezultat je pričakovan, saj bi naj bili rezultati planarne stereološke metode tisti, h katerim rezultati linijske stereološke metode z večanjem testnega sistema konvergirajo. Dejstvo, da pa so PMAir ocene za parameter α skoraj v vseh primerih nižje od LMAir ocen, pa opozarja na opazko iz prejšnjega poglavja, kjer se kljub uporabi metode *Watershed* za rešitev problema združenih por nismo popolnoma približali pričakovani vrednosti za parameter α . Če še enkrat pogledamo rezultate v preglednici (Preglednica 6.20), lahko tudi opazimo, da PMAir še vedno ni identificirala enako velikega števila sledi zračnih por kot LMAir pri izjemno velikem testnem sistemu. Problem je v zgolj delni uspešnosti uporabljene metode *Watershed*. V primeru, da se medsebojno stika več zračnih por, metoda ne uspe ustrezno ločiti vseh krožnih sledi zračnih por, kot kaže slika (Slika 6.56). Več kot je zračnih por, slabša je njena učinkovitost. Zato tudi še vedno tako slabe PMAir ocene LMA parametrov za vzorce iz

mešanice LVA8, kjer je takšnih grozdov zračnih por ogromno. Dokler ne izboljšamo učinkovitosti *Watershed* metode, od potencialne planarne metode ne moremo pričakovati, da bo dajala boljše ocene LMA parametrov kot linijska metoda, na katero ima problem stikajočih se zračnih por manj negativni učinek. Problem rahlega precenjevanja velikosti identificiranih sledi zračnih por zaradi kromatične aberacije uporabljenega optičnega čitalca in naknadno opaženega svetilnega oz. tako imenovanega »halo« učinka kontrastnega sredstva (Slika 6.56) lahko rešimo z uvedbo korekcijskega faktorja k_v , analogno kot pri linijski metodi z izrazom (51).



Slika 6.56: Delna uspešnost funkcije *Watershed* (desno) v primeru močne zgostitve zračnih por (levo)
Fig. 6.56: Partial efficiency of the *Watershed* method (right) in case of high stacking of air voids (left)

7 ZAKLJUČKI

Zaključki, prispevki disertacije in ideje za nadaljnje delo so zaradi večje preglednosti podani ločeno po obravnavanih poglavjih in podpoglavjih.

7.1 Samozgoščevalni beton

7.1.1 Projektiranje SCC in primerljivih vibriranih mešanic

Iz opravljenih preiskav na svežih betonskih mešanicah in poskusov mešanja tako aeriranih kot tudi neaeriranih SCC in vibriranih mešanic iz različnih materialov, v laboratoriju in v betonarnah, lahko zaključimo naslednje:

- Neposreden prenos receptur SCC mešanic iz drugih držav sveta praviloma ni možen. Lastnosti SCC so namreč močno odvisne od karakteristik osnovnih materialov (agregat, cement, dodaten praškasti material in kemijski dodatki) potrebnih za njegovo izdelavo.
- Po splošni metodi za projektiranje SCC mešanic, ki so jo predlagali Okamura in Ozawa s sodelavci (1995, *cit. po* Skarendahl, Petersson, 2000), je moč najti dovolj dobro izhodišče za projektiranje SCC mešanic iz domačih materialov, tako z drobljenim agregatom kot s prodom.
- Apnenčeva moka, bodisi namensko pridobljena z mletjem apnenca ali pridobljena z odpraševanjem drobljenega apnenčevega agregata, kremenčeva mivka in elektrofiltrski pepel, ki so na voljo v Sloveniji, so se izkazali kot ustrezni praškasti materiali za projektiranje SCC mešanic. Od teh je najbolj ekonomična apnenčeva moka pridobljena z odpraševanjem. Iz ekološkega vidika bi bili najboljši izbiri ta vrsta apnenčeve moke ali elektrofiltrski pepel.
- Za izbiro ustrezne vrste in količine dodatnega praškastega materiala ter kemijskih dodatkov pri izbranem v/c razmerju je nujno potrebno najprej opraviti potrebne preiskave na cementnih pastah in SCC maltah.
- Pri prenosu receptur za SCC malte na recepture za SCC betonske mešanice lahko načeloma dosežemo zahtevane samozgoščevalne lastnosti samo z nekolikšnim spreminjanjem deležev kemijskih dodatkov in/ali količine zamesne vode.
- Pri projektiranju aeriranih SCC mešanic lahko izhajamo neposredno iz sprojektiranih receptur neaeriranih SCC mešanic z istimi materiali. Pri tem lahko za doseganje primerljivih reoloških lastnosti delež praškastih delcev v mešanici in v/c razmerje tudi zmanjšamo. Vnešeni zračni mehurčki v cementni pasti aerirane betonske mešanice imajo namreč do neke mere podoben mazivni učinek kot superplastifikator.
- Pri projektiranju aeriranih SCC mešanic se je izkazalo, da uporabljena vrsta aeranta ni bila kompatibilna z apnenčevo moko, ki je bila precej »hidrofobna«. Zaradi takšne površinske lastnosti delcev moke so se tvorjeni zračni mehurčki v cementni pasti od njih najverjetneje odbili, podobno kot vodne kapljice. Mešanica se je takoj po zamešanju namreč močno odzračila in dosegli smo kvečjemu 4-5% delež zraka.

Glede posamičnega in medsebojnega delovanja kemijskih dodatkov v sveži betonski mešanici lahko zaključimo naslednje:

- Superplastifikatorji praviloma znižujejo potrebo po zamesni vodi za doseganje enake obdelavnosti sveže betonske mešanice. Pri enakem v/c razmerju dodatek SP poveča obdelavnost mešanice. Superplastifikatorji nove generacije so tako učinkoviti, da lahko sveža mešanica betona z ustrezno povečano količino paste na račun grobozrnatega agregata doseže takšno obdelavnost, da se zgosti samo zaradi delovanja lastne teže.
- Večanje količine SP do neke mere praviloma veča sposobnost razlezanja sveže betonske mešanice, tako vibrirane kot SCC. Na hitrost razlezanja ima večanje količine SP zelo majhen vpliv, in če že, potem v smeri povečanja hitrosti razlezanja. Zaradi izboljšanja obdelavnosti se poroznost betonske mešanice s tem manjša. Kaže, da povečanje količine SP poveča tudi učinek delovanja aeranta, tako pri SCC kot tudi pri vibriranih mešanicah.
- Predozacija SP učinek delovanja aeranta praviloma zmanjša. SCC mešanica se v tem primeru namreč prekomerno odzrača, vibrirana mešanica pa je pri tem preveč »lepljiva« in viskozna za tvorjenje zračnih mehurčkov. Prevelika količina SP pri nekem v/c razmerju praviloma povzroči tudi segregacijo agregata v sveži betonski mešanici.
- Večja količina aeranta pri enakih pogojih praviloma pomeni večji delež zraka v betonski mešanici. Aerant prav tako do neke mere poveča sposobnost razlezanja sveže betonske mešanice, tako vibrirane kot SCC, hitrost razlezanja pa nekoliko upočasni. Pri iztekanju SCC mešanice skozi ozke odprtine zračni mehurčki v cementni pasti betona delujejo ugodno.
- Predozacija aeranta ima lahko negativen učinek na vnašanje zraka v beton. Zveza med količino dodanega aeranta in deležem vnešenega zraka v betonu je namreč približno linearna le do neke meje, ki jo v veliki meri določa količina paste betonske mešanice. Kaže tudi, da SCC mešanice s preveliko količino zračnih por zmanjšajo učinek superplastifikatorja. Takšne »penaste« SCC mešanice imajo praviloma omejen maksimalni razlez s posedom, ki je sicer pokazatelj sposobnosti tečenja SCC mešanice in zapolnjevanja kalupov ali opažev.
- Delovanje aeranta je pogojeno s številnimi dejavniki, s katerimi se srečujemo pri zasnovi in mešanju aeriranih betonskih mešanic. Prvi dejavnik je temperatura okolice v času mešanja in temperatura sestavin mešanice. Pri temperaturah betonske mešanice nižjih od 20°C lahko pri enaki dozaciji aeranta pričakujemo precej večji delež vnešenega zraka kot v primeru, da je temperatura betonske mešanice večja od 20°C. Večja obdelavnost mešanice prav tako poveča učinek delovanja aeranta, in obratno, medtem ko večanje finosti sestavnih materialov mešanice, predvsem praškastih delcev, učinek uporabljene vrste aeranta zmanjšuje.
- Do zgornjih pojavov pride zaradi visoke občutljivosti sistema vnešenih zračnih mehurčkov v sveži betonski mešanici. Le-ta je odvisen tudi od načina mešanja, časa mešanja in naknadnega agitiranja sveže aerirane mešanice ter od načina vgrajevanja. Pri aeriranih SCC mešanicah smo opazili precej večjo izgubo deleža zraka v primeru naknadnega mešanja mešanice kot pri aeriranem vibriranem betonu. Pri slednjem pa lahko do znatne izgube deleža zraka pride pri vgrajevanju mešanice zaradi potrebe po vibriranju. Pri tem je neugodna tudi nastala mikrostruktura sistema vnešenih zračnih por (kopičenje por).
- Naknadno dodajanje aeranta in SP zamešani betonski mešanici ima praviloma manjši učinek kot v primeru dodajanja teh kemijskih dodatkov v času prvotnega zamešanja.

- S sredstvom za kontrolo viskoznosti lahko uspešno povečamo odpornost sveže SCC mešanice na segregacijo, a pri tem zmanjšamo sposobnost za tečenje in znižamo hitrost njenega razlezanja. Sredstvo za kontrolo viskoznosti praviloma zavira delovanje aeranta in SP.
- Potrebo po uporabi sredstva za kontrolo viskoznosti lahko izločimo s povečanjem količine praškastih delcev v mešanici ali z znižanjem v/c razmerja. Pri tem moramo ustrezno povečati količino dodanega SP.
- Z večanjem v/c razmerja povečujemo predvsem hitrost razlezanja in iztekanja sveže SCC mešanice skozi ozke odprtine. Precej manjši vpliv ima spreminjanje v/c razmerja na velikost razleza s posedom. Z večanjem v/c razmerja se do neke mere povečuje tudi učinek aeranta in SP.
- Pri prenizkem v/c razmerju samo s povečevanjem količine dodanega SP ne moremo doseči zahtevanih samozgoščevalnih lastnosti. Takšna mešanica bo prepočasna in »lepljiva«.

Večina zgornjih učinkov je še bolj pregledno podana v preglednici (Preglednica 3.3). Glede časovnega spreminjanja obdelavnosti svežih SCC mešanic lahko zaključimo, da samozgoščevalne lastnosti s časom upadajo eksponentno, še posebej v primeru dodanega sredstva za kontrolo viskoznosti. Večina sprojektiranih SCC mešanic sicer po 30 minutah mirovanja še vedno izpolnjuje zahteve glede obdelavnosti. Z nenehnim agitiranjem mešanice bi bil upad SCC lastnosti najverjetneje počasnejši. Izkazalo se je tudi, da lahko z naknadnim dodajanjem SP samozgoščevalne lastnosti ohranjamo tudi 45 ali več minut po zamešanju.

Iz izkušenj z vgrajevanjem SCC v večje AB elemente v laboratoriju in v betonarnah lahko zaključimo naslednje:

- Pri kontinuirnem mešanju enakih SCC mešanic iz istih šarž materiala lahko pričakujemo 1-5% odstopanje od povprečnega razleza s posedom in 7-26% odstopanje od povprečnega časa razlezanja SCC mešanic. Velikost slednjega odstopanja je tudi posledica odvisnosti same preiskave od človeškega vpliva.
- V primeru zamešanja SCC mešanice iz novih šarž materiala je za doseganje primerljivih SCC lastnosti ponavadi potrebno nekoliko spremeniti količine kemijskih dodatkov.
- Pri večfaznem vgrajevanju s časovnim razmikom več kot 10 minut se zaradi tiksotropičnosti sveže SCC mešanice posamezni sloji betona ne mešajo več popolnoma. Preiskave z ultrazvokom so sicer pokazale, da je ta stik enako kompakten kot preostali predeli betona.
- Pri prenosu receptur za 50 litrov SCC, sprojektiranih v laboratoriju, na npr. 1 m³ za mešanje v betonarnah, se je izkazalo, da je nujno potrebno upoštevati dejansko vlažnost agregata v silosih in količino zamesne vode temu ustrezno prilagoditi. Za doseganje primerljivih samozgoščevalnih lastnosti je ponavadi potrebno tudi nekoliko spremeniti deleže kemijskih dodatkov.
- V primeru doseganja razleza s posedom vsaj 700 mm je bilo samozgoščevanje SCC mešanice, zapolnjevanje kalupa in oblivanje armaturnega koša izjemno dobro. Posledica so bili zelo ostri robovi izdelanih AB elementov in kvalitetna površina, ki je popolnoma prevzela strukturo materiala opaža.

Pri projektiranju aeriranih in neaeriranih vibriranih betonskih mešanic z veliko količino dodane apnenčeve moke (250 kg/m³) bi poleg že navedenega še dodali, da je za doseganje kohezivnosti takšnih mešanic potrebna relativno velika količina superplastifikatorja, tj. od 30-45%pr. Pri tem so

mešanice zelo »lepljive« in ročno izjemno težko obdelavne, četudi dosežejo lastnosti mehkoplastične konsistence. Z uporabo vibracijske mizice se sicer izjemno lepo vgradijo.

7.1.2 Numerični model sveže SCC mešanice

Glede na rezultate reoloških preiskav različnih vrst svežih SCC mešanic in glede na pregledano tujo literaturo lahko zaključimo naslednje:

- Svežo SCC mešanico takoj po zamešanju lahko dovolj dobro opišemo z modelom Binghamove tekočine. Za bolj natančen opis je potrebno uporabiti nelinearen Hershel-Bulkleyev model ali modificiran Binghamov model, ki prav tako upošteva vpliv t.i. »strižnega zgoščevanja« (*ang.* shear thickening) SCC mešanice.
- Numerična simulacija večfaznega vgrajevanja SCC v opaž poljubne oblike in napovedovanje bočnega pritiska na opaž je že možna, a je pri tem nujno potrebno upoštevati časovno spreminjanje reoloških lastnosti sveže SCC mešanice. In sicer, tiksotropičnost SCC mešanice s časom povečuje napetost na meji tečenja τ_0 , izguba obdelavnosti sveže SCC mešanice s časom pa povečuje tudi njeno viskoznost μ .
- Da bi bile numerične simulacije uporabne v praksi, potrebujemo čim bolj enostavno, hitro in zanesljivo metodo določanja reoloških karakteristik sveže SCC mešanice. V razvoju je več pristopov. Eden takšnih je določanje parametrov τ_0 in μ neposredno iz meritev vrtilnega momenta na mešalni ročici agitatorja na poti do gradbišča, tj. po principu reometrov, druga možnost pa je posredno ocenjevanje reoloških parametrov npr. iz meritev razleza s posedom.

7.1.3 SCC v praksi

Večina raziskovalcev in strokovnjakov iz prakse ugotavlja, da je kljub ogromnemu tehničnemu potencialu SCC trenutno še vedno ogromna vrzel med tem, kaj je moč narediti v laboratoriju in kaj v praksi – v betonarni ali na gradbišču. Prednosti SCC, ki jih stroka izpostavlja, so:

- enostavnost vgrajevanja SCC mešanice, kar omogoča gradnjo zelo zahtevnih AB konstrukcij in v arhitekturnem pogledu odpira nove možnosti;
- kvaliteta površine strjenega SCC, kar ima poleg ugodnega vpliva na obstojnost betona tudi estetski potencial;
- povečanje produktivnosti;
- kvaliteta matrice strjenega SCC.

Kot slabosti pa so izpostavljena naslednja dejstva:

- večja občutljivost SCC mešanice na vhodne parametre in posledično zahteva po večji kontroli kvalitete;
- potreba po visoki kvaliteti uporabljenih materialov, tudi za opaže v primeru visokih navpičnih konstrukcijskih elementov, in potreba po povečanju natančnosti opreme za proizvodnjo betona, kar lahko opazno poveča stroške;

- v primeru močne segregacije sveže SCC mešanice (slaba kontrola vlažnosti agregata ali dodajanja zamesne vode in kemijskih dodatkov) mešanico ne bo moč črpati ali izliti iz betonske hruške;
- v primeru slabo zatesnjene opaža bo sveža SCC mešanica iztekala skozi odprtine;
- v primeru premajhnega razleza s posedom (slabo projektirana SCC mešanica ali predolgo mirovanje SCC od trenutka zamešanja) bo površina strjenega SCC slaba;
- v primeru predolgega transportnega časa bo SCC praviloma izgubila svoje samozgoščevalne lastnosti.

Zadnje štiri alineje sicer niso slabosti SCC, temveč posledice slabih pogojev ali slabe kvalitete izvajanja del in bi lahko predstavljale motiv za izboljšanje kvalitete izvajanja betonerskih del. Ob tem stroka velikokrat pozablja tudi na prednost uporabe SCC v smislu izboljšanja delovnih pogojev in okolja zaradi izločitve potrebe po vibriranju ter v smislu zmanjšanja potrebe po količini cementa za doseganje zahtevanih mehanskih lastnosti strjenega betona. Pri proizvodnji cementa se namreč sprošča velika količina CO₂ (Larbi, Nijland, de Rooij, 2006). Vprašanje je samo, če je to v neki skupnosti res motiv.

7.1.4 Prispevek disertacije

V sklopu prve faze disertacije smo opravili obsežne preiskave na cementnih pastah, samozgoščevalnih maltah in samozgoščevalnih betonih v svežem stanju. Ugotovili smo, da neposreden prenos receptur SCC mešanic iz drugih držav sveta praviloma ni možen, a je po splošni metodi Okamure moč najti dovolj dobro izhodišče za projektiranje SCC mešanic iz domačih materialov tako z drobljenim agregatom kot s prodom.

Na podlagi parametrične študije učinkovitosti kemijskih dodatkov tipa superplastifikator, aerant in dodatek za povečanje viskoznosti ter interakcije med njimi v različnih SCC mešanicah smo sestavili preglednico posamičnih in medsebojnih vplivov kemijskih dodatkov in vodo-cementnega razmerja na samozgoščevalne lastnosti, ki bi lahko predstavljala zelo koristen pripomoček za projektiranje tako aeriranih kot tudi neaeriranih SCC v praksi. Pri prenosu receptur bodisi iz SCC malt na SCC betonske mešanice ali iz SCC mešanic v laboratoriju na SCC mešanice v betonarnah smo pokazali, da je moč doseči zahtevane samozgoščevalne lastnosti zgolj z manjšimi korekcijami količine zamesne vode in/ali kemijskih dodatkov.

Opravili smo tudi preiskave časovnega spreminjanja samozgoščevalnih lastnosti različnih SCC mešanic, iz katerih je razvidno, da v primeru uporabe sprojektiranih SCC kot transportnih betonov brez dodatnih ukrepov transport ne bi smel trajati več kot 30 minut. Na podlagi reoloških preiskav smo po pregledu tuje literature na področju numerične simulacije razlezanja sveže SCC mešanice podali kritično oceno predlaganih matematičnih modelov in predloge za boljši opis realnega stanja.

Pomemben prispevek disertacije je tudi ugotovitev, da vsaka vrsta apnenčeve moke ni primerna za izdelavo aeriranih SCC mešanic. Zaradi lastnosti površine delcev določene apnenčeve moke niso kompatibilne s tipičnimi aeranti. V disertaciji smo predlagali tudi zelo enostavno metodo za oceno primernosti neke apnenčeve moke ali morda tudi katerega drugega mineralnega dodatka za učinkovito aeriranje SCC mešanic. Rezultat sodelovanja naše raziskovalne skupine in strokovnjakov iz Skupine Primorje je, da so v praksi že nekajkrat uporabili samozgoščevalni beton za izdelavo konstrukcijskih elementov in za rešitve, ki z vibriranimi betoni ne bi bile mogoče.

7.1.5 Ideje za nadaljnje delo

Zaradi določenih lastnosti SCC v strjenem stanju bi bilo zanimivo tudi poskusiti sprojektirati SCC mešanico z manjšo količino cementa in s skupno količino praškastih delcev na spodnji priporočeni meji splošne metode po Okamuri, tj. 450 kg/m^3 . Zanimivo bi bilo tudi preveriti časovno izgubljanje samozgoščevalnih lastnosti SCC mešanic z normalno ali počasi vezočimi cementi in/ali s kemijskimi dodatki za zaviranje vezanja.

Kar se tiče projektiranja aeriranih mešanic betona z različnimi vrstami mineralnih dodatkov in stabilnosti tvorjenega sistema zračnih mehurčkov, bi bilo smiselno preiskati tudi kompatibilnost in učinek drugih vrst aerantov.

Pri projektiranju vibriranih betonskih mešanic z zamenjavo dela cementa z apnenčevo moko smo opravili parametrično študijo pri konstantnem v/c razmerju. Zanimivo bi bilo opraviti tudi študijo pri konstantnem razmerju med vodo in vsemi praškastimi delci pri tovrstni zamenjavi, tj. z enako količino zamesne vode, ne glede na delež zamenjave cementa z mineralnimi dodatki.

Glede numeričnega modeliranja sveže SCC mešanice se v zadnjih letih že pojavljajo nekateri modeli, ki upoštevajo vpliv tiksotropičnosti sveže SCC mešanice na povečanje napetosti na meji tečenja τ_0 v primeru mirovanja mešanice. Za še bolj natančen opis realnega stanja bi bilo potrebno upoštevati tudi časovno spreminjanje viskoznosti mešanice μ . Na tem področju je potreben tudi nadaljnji razvoj čim bolj enostavnih metod za določanje reoloških parametrov svežih SCC mešanic.

7.2 Mehanske lastnosti SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko

7.2.1 Tlačna trdnost

V sklopu preiskav tlačne trdnosti samozgoščevalnih in vibriranih betonov z apnenčevo moko smo preizkusili tudi eno SCC mešanico z elektrofiltrskim pepelom. Izkazane nekoliko višje tlačne trdnosti te mešanice v primerjavi s preostalimi betonskimi mešanicami, primerljivimi glede na vodo-vezivno razmerje, potrjujejo odvisnost tlačne trdnosti betona od količine veziva v betonski mešanici.

Rezultati preiskav nakazujejo tudi na odvisnost tlačne trdnosti betona od temperature v času mešanja in vgrajevanja betonske mešanice ter od temperature mokre nege betona. Vzorci betona negovani v vodi s temperaturo okoli 15°C so izkazali tudi do 10% nižjo tlačno trdnost kot vzorci enakega betona, ki so bili negovani v vodi s temperaturo (20±2)°C.

Glede tlačne trdnosti SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko lahko zaključimo še naslednje:

- Dodatek apnenčeve moke poviša tlačno trdnost betona. Še posebej opazne razlike so pri zgodnjih tlačnih trdnostih, 5-10% višje pa so tudi 28-dnevne tlačne trdnosti betona z apnenčevo moko v primerjavi z betonskimi mešanicami brez dodatka apnenčeve moke in z enakim v/c razmerjem ter količino cementa. Apnenčevo moko smo dodajali na račun grobozrnatega agregata.
- SCC mešanice z apnenčevo moko so dosegale še 5-10% višje tlačne trdnosti kot vibrirane mešanice z apnenčevo moko pri enaki sestavi (razen količine dodanega SP). Večja količina SP pri SCC (0,64%pr) v primerjavi s količino SP pri vibrirani mešanici (0,45%pr) zagotovo vpliva ugodno na hidratacijo cementa, saj molekule superplastifikatorjev nove generacije izboljšajo disperzijo cementnih delcev tudi v času hidratacije. Poleg tega smo po mikroskopski analizi vzorcev strjenega SCC in vibriranega betona ugotovili tudi bistveno razliko v kvaliteti stičnega območja med hidratizirano pasto in agregatnimi zrni, ki bi lahko prav tako doprinesla k izkazani višji tlačni trdnosti SCC. Rezultati topografske študije obruskov betonskih vzorcev namreč kažejo na to, da vibriranje sveže betonske mešanice povzroči lokalno povečanje v/c razmerja v okolici večjih zrn agregata in s tem oslabi mehanske lastnosti tega stičnega območja.
- Upad tlačne trdnosti aeriranih SCC z večanjem deleža zraka je približno 2,5 MPa na 1% zraka, medtem ko je ta upad pri aeriranih vibriranih betonih brez dodatka apnenčeve moke precej večji (3,8 MPa na 1% zraka). Razlog za to bi lahko bila večja gostota matrice cementnega kamna pri SCC zaradi dodatka apnenčeve moke in zaradi večje količine dodanega SP. Analiza mikrostrukture vzorcev teh betonov je pokazala še eno bistveno razliko med aeriranimi SCC in aeriranimi vibriranimi betoni, ki bi lahko prav tako neugodno vplivala na tlačno trdnost slednjih. Pri vibriranih aeriranih betonih je namreč ponekod prišlo do močnega kopičenja zračnih mehurčkov, medtem ko so pri aeriranih SCC zračni mehurčki bolj enakomerno porazdeljeni po matrici cementnega kamna. Najverjetneje gre za posledico vibriranja, saj so bili vsi ostali pogoji in sestavni materiali mešanic enaki.

Za napovedovanje časovnega razvoja tlačne trdnosti SCC z apnenčevo moko lahko uporabimo računski model iz Evrokoda 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005), pri čemer je potrebno za koeficient s vzeti vrednost 0,17. Podobne vrednosti za koeficient s pri tem računskem modelu imajo tudi vibrirani visokotrni betoni (Saje, 2001). Preizkusili smo tudi nekaj obstoječih računskih modelov ACI. Le-ti niso ustrezali časovnemu razvoju obravnavanega SCC z apnenčevo moko. Potrebno bi bilo poiskati nove koeficiente za ta računski model.

Z ultrazvočno metodo smo uspeli dobro oceniti kvaliteto vgrajenega betona. Iz primerjave izkazanih tlačnih trdnosti betonov in rezultatov neporušne ultrazvočne metode se je izkazalo, da je s slednjo metodo moč ocenjevati tlačno trdnost betonov, če poznamo sestavo betona.

7.2.2 Natezna trdnost

Preiskave cepilne natezne trdnosti betona so pokazale, da je obravnavan SCC z apnenčevo moko dosegel 20% nižjo natezno trdnost kot jo navaja Evrokod 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) za pripadajoč trdnostni razred. Do podobnih rezultatov za SCC z relativno veliko količino apnenčeve moke prihajajo tudi tuji raziskovalci (Parra, Valcuende, Benlloch, 2007). V primeru SCC z manjšo količino apnenčeve moke Georgiadis, Anagnostopoulos in Sideris (2007) sicer navajajo nekoliko višjo cepilno natezno trdnost SCC v primerjavi z vibriranim betonom pri enaki tlačni trdnosti. Do enakih rezultatov prihajajo tudi Dinakar, Babu in Santhanam (2007), in sicer v primeru SCC z elektrofiltrskim pepelom. Naknadno opravljeni upogibni preizkusi na betonskih prizmah so pokazali, da natezna trdnost obravnavanega SCC z apnenčevo moko ustreza vrednostim, ki so navedene v EC2.

Kar se tiče cepilne natezne preiskave, predpisane v SIST EN 12390-6 (2001), bi bilo smiselno preveriti tudi vplive človeškega faktorja, stanja preizkušanca (RH, T) in raznih imperfekcij uporabljene opreme na rezultate preiskave. V primeru, da ne pride do predvidenega napetostnega stanja v preizkušancu, napaka pri oceni natezne trdnosti betona s pomočjo cepilnega preskusa najverjetneje ni zanemarljiva.

Za napovedovanje časovnega razvoja natezne trdnosti SCC z apnenčevo moko lahko uporabimo računski model iz Evrokoda 2 (SIST EN 1992-1-1, 2005), pri čemer je vrednost za koeficient s najverjetneje ponovno okoli 0,17 ali malo manj. Za natančnejšo določitev koeficienta s bi bilo potrebno zgodnje (1, 3 in 7-dnevne) natezne trdnosti obravnavanega SCC izmeriti ponovno, in sicer z opremo, pri kateri je nevarnost »zaklinjanja« manjša.

7.2.3 Statični modul elastičnosti

Obravnavan SCC z apnenčevo moko je izkazal približno 10% večji modul elastičnosti kot ga navaja EC2 za običajen beton v istem trdnostnem razredu. Ker je modul elastičnosti betona močno odvisen od vrste uporabljenega agregata, je iz te primerjave sicer težko sklepati, da je dobljen modul elastičnosti SCC z apnenčevo moko večji zaradi dodatka apnenčeve moke. Nekateri tuji raziskovalci na tem področju (Georgiadis, Anagnostopoulos, Sideris, 2007; Dinakar, Babu, Santhanam, 2007) namreč navajajo tudi manjše module elastičnosti SCC z različnimi vrstami mineralnega dodatka v primerjavi z običajnimi vibriranimi betoni. Kot najverjetnejši razlog za to navajajo nekoliko večji delež paste pri SCC v primerjavi z vibriranim betonom.

Rezultati preiskav enoosnega tlaka pri različnih starostih obravnavanega SCC z apnenčevo moko so pokazali, da lahko za časovno spreminjanje modula elastičnosti SCC z apnenčevo moko uporabimo EC2 računski model z vrednostjo koeficienta $s = 0,25$.

7.2.4 Duktilnost

Številne preiskave tujih raziskovalcev so pokazale, da bi za določanje duktilnosti betona, ki je za projektiranje AB konstrukcij bistvenega pomena, potrebovali standardizirano preiskavo. Geometrija betonskih preizkušancev in tudi trenje med obremenilno ploščo in preizkušancem pri enoosnem tlaku

imata pomemben vpliv na izkazano tlačno trdnost betona f_{cm} , deformacijo pri le tej (ε_{c1}) in končno porušno deformacijo ε_{cu1} . RILEM v svojih zadnjih priporočilih navaja kot maksimalno razmerje med višino in širino betonskega preizkušanca za določanje duktilnosti betona z enoosnim tlakom $h_{pr}/b_{pr} = 2$, oz. še natančneje priporoča prizme dimenzij 10x10x20 cm ali valje s premerom 10 cm in višino 20 cm.

Uporabljene dimenzije betonskih preizkušancev za lastne preiskave (10x10x40 cm) so potrdile pričakovane težave pri določanju duktilnosti betona. Pri tako vitki geometriji preizkušancev je prišlo do predčasne porušitve betona najverjetneje zaradi uklona ali zaradi prepoznega ali prepočasnega nižanja tlačne sile s preizkuševalnim strojem. Iz dobljenih rezultatov, ki so zato na t.i. »varni strani«, lahko sklepamo naslednje:

- Obravnavan SCC z apnenčevo moko najverjetneje dosega podobne deformacije pri maksimalni tlačni napetosti ε_{c1} kot običajni betoni v istem trdnostnem razredu po EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005).
- S staranjem SCC z apnenčevo moko naraščata le tlačna trdnost f_{cm} in statični modul elastičnosti betona E_{cm} , medtem ko deformacija pri tlačni trdnosti betona ε_{c1} ostaja približno enaka. Pri uporabljeni geometriji preizkušancev (10x10x40 cm) znaša $\varepsilon_{c1}^{SCC_{am}}(t) \approx 2,2\%$.
- Tako vitke prizme obravnavanega SCC z apnenčevo moko so pri enoosnem tlaku v povprečju dosegale maksimalne tlačne napetosti $0,91 f_{cm}$.
- Obravnavan SCC z apnenčevo moko je pri starosti 1 dan dosegel porušno deformacijo $\varepsilon_{cu1} \approx 3,1\%$, kar bi z upoštevanjem vitkosti preizkušancev prav tako lahko ustrezalo predpisani vrednosti za ε_{cu1} v EC2 (SIST EN 1992-1-1, 2005) za pripadajoč trdnostni razred običajnega vibriranega betona, ki znaša $\varepsilon_{cu1} = 3,5\%$. Za potrditev te teze in tudi določitve porušnih deformacij SCC z apnenčevo moko pri višjih starostih betona bi bilo potrebno preiskave enoosnega tlaka ponoviti na preizkušancih dimenzij 10x10x20 cm.
- Poissonov koeficient SCC z apnenčevo moko, ocenjen iz meritev deformacij betona v prečni in v vzdolžni smeri pri enoosnem tlaku, pri napetosti $\sigma_c = 1/3 f_{cm}$ in starosti betona 28 dni, znaša $\nu = 0,23$, kar je nekoliko več kot navaja literatura za običajen beton ($\nu = 0,16-0,20$). Tako določen Poissonov koeficient s starostjo obravnavanega SCC še nekoliko narašča ($\nu_{2-letni} = 0,25$).

7.2.5 Krčenje

Rezultati preiskav celotnega krčenja betona so pokazali nekoliko (5-10%) večje krčenje SCC z apnenčevo moko v primerjavi z vibriranim betonom. Razlog za to bi lahko bil dodatek apnenčeve moke, ki pospeši hidratacijo cementa. Intenzivnejša hidratacija cementa pomeni hitrejšo porabo vode v betonu, kar ima za posledico večje avtogeno krčenje (Saje, 2001). Nekoliko večje krčenje pri SCC bi lahko bilo tudi posledica večje količine paste. Manj agregata namreč nudi manjši odpor krčenju cementne paste (Saje, 2001). Do podobnih rezultatov (celotno krčenje betona $\sim 0,35\%$ oz. $\sim 350 \mu\text{m/m}$) so prišli tudi tuji raziskovalci (Piérard, Dieryck, Desmyter, 2005), pri čemer bistvene razlike med SCC z apnenčevo moko in vibriranim betonom brez apnenčeve moke v celotnem krčenju ni bilo.

Večina raziskovalcev (Saje, 2001; Piérard, Dieryck, Desmyter, 2005) opaža bistveno razliko v deležu avtogenega krčenja pri betonih z nizkim v/c razmerjem. Ker imajo SCC mešanice praviloma nizko v/c razmerje, lahko tudi iz tega razloga pričakujemo rahlo povečano krčenje SCC, če ne celotno, pa

zagotovo avtogeno, kar pomeni, da je SCC v prvih dneh nujno potrebno negovati z vodo, da čimbolj zmanjšamo neugodne posledice krčenja betona.

7.2.6 Prispevek disertacije

V okviru druge faze disertacije smo opravili obsežne preiskave mehanskih lastnosti SCC in vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke. Zaradi nedavnega sprejetja slovenskega standarda SIST EN 197-1 (2002), ki šele dovoljuje uporabo apnenčeve moke v betonski mešanici, so rezultati teh preiskav v Sloveniji v celoti izvirni prispevek. V svetovnem merilu predstavljajo originalni prispevek k razvoju znanstvenega področja predvsem rezultati sistematičnih raziskav zgodnjih in dolgoročnih mehanskih karakteristik SCC iz relativno slabo granuliranega apnenčevega agregata in z velikim deležem apnenčeve moke.

V disertaciji smo predstavili nekatere pomembne detajle pri preiskavah duktilnosti betonov višjih trdnosti, kamor praviloma spadajo tudi SCC. Predstavili smo tudi pristop k preiskovanju strjenega betona na »mikro« ravni. Rezultati mikroskopskih analiz so se izkazali za izjemno pomembne za razumevanje obnašanja materiala, ki smo ga opazili pri »makro« testih. Mikroskopska analiza je pokazala bistveno razliko med SCC in vibriranimi betoni v gostoti cementnega kamna v stičnem območju z večjimi agregatnimi zrni. Na podlagi parametrične študije aeriranih betonov smo ocenili padce tlačne trdnosti zaradi vnešenih zračnih por tako pri SCC kot tudi pri vibriranih betonih. Opozorili smo na vpliv temperature v času mešanja in vgrajevanja betona ter temperature nadaljnje nege na tlačno trdnost betona. Prispevek disertacije so tudi izdelani analitični modeli časovnega razvoja mehanskih lastnosti SCC z relativno velikim deležem apnenčeve moke.

7.2.7 Ideje za nadaljnje delo

Vpliv temperature okolice in zamesne vode ter vpliv temperature nadaljnje mokre nege na mehanske lastnosti strjenega betona, tako SCC kot tudi vibriranega betona z različnimi mineralnimi dodatki, bi bilo smiselno še podrobneje raziskati, saj gre za realne pogoje, s katerimi se gradbena praksa sooča.

Zanimiva bi bila tudi parametrična študija vpliva različnih količin in tudi različnih kombinacij mineralnih dodatkov na mehanske lastnosti betona, predvsem kar se tiče časovnega razvoja teh lastnosti. Glede na to, da SCC izkazujejo višjo tlačno trdnost kot primerljivi vibrirani betoni, bi bilo smiselno preiskati tudi možnost za projektiranje SCC mešanic z manjšo količino cementa ali preizkusiti normalno in počasi vezoče cemente.

7.3 Obstočnost SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko

7.3.1 Notranja odpornost betona proti zmrzovanju in tajanju

Pri notranji odpornosti SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko v primerjavi z vibriranimi betoni brez apnenčeve moke po opravljenih 100 ciklih zmrzovanja/tajanja nismo opazili bistvenih razlik, niti kakršnihkoli znakov poškodb betona.

7.3.2 Odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju

Površina aeriranih SCC z apnenčevo moko je bila po opravljenih 50 ciklih zmrzovanja in tajanja brez prisotnosti soli skoraj nedotaknjena. Zato smo se pri nadaljnjem eksperimentalnem delu osredotočili na stopnjo izpostavljenosti betona XF4, kar pomeni preiskave odpornosti površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilnih soli (v nadaljevanju OSMO odpornost). Tekom prvotnih preiskav smo opazili nekaj dejavnikov, ki lahko pomembno vplivajo na rezultate OSMO preiskave in v standardu SIST 1026 (2004) niso navedeni. Le-ti so:

- način odstranjevanja odluščenega materiala s preiskovane površine betonskega vzorca (z vodnim curkom praviloma odstranimo manj materiala kot če si pri tem pomagamo še s čopičem, še posebej če ima čopič trše ščetine);
- vlažnost filtrskega papirja za zbiranje odluščenega materiala (filtrski papir mora biti v času nominalnega tehtanja in v času tehtanja do stalne mase posušenega odluščenega materiala v njem enako vlažen, sicer v rezultat štejemo tudi razliko v masi filtrskega papirja pri različnih vlažnostih, ki glede na tipično količino odluščenega materiala pri posameznem vzorcu po vsakem čiščenju ni zanemarljiva);
- soli iz zmrzovalnega medija (če teh soli po zbiranju odluščenega materiala iz filtrskega papirja ne odstranimo, lahko kristalizirajo na filtrskem papirju in v veliki meri doprinesejo h končni masi, ki bi naj predstavljala samo odluščen material. Soli je moč odstraniti z izpiranjem filtrskega papirja z 2-5 dcl vode);

Še enostavnejša rešitev za zadnji dve alineji je tehtanje samega odluščenega materiala, ki ga s filtrskega papirja po sušenju do stalne mase previdno zberemo na mizici tehtnice. Izpiranje soli po filtriranju je tudi v tem primeru še vedno priporočljivo, da jih izločimo tudi iz samega odluščenega materiala.

Tuji raziskovalci navajajo, da vključitev apnenčeve moke v betonsko mešanico povzroči tvorjenje mono-karboaluminata, ki velja za nestabilnega v okolju s prisotnostjo kloridov (Bonavetti, Rahhal, Irassar, 2001). Naše preiskave so pokazale, da je dodatek apnenčeve moke (z nekoliko povečanim deležem superplastifikatorja za primerljivo obdelavnost sveže betonske mešanice) povečal OSMO odpornost vibriranega betona. Sklepamo, da je ugoden vpliv povečane kompaktnosti cementnega kamna zaradi dodatka apnenčeve moke večji od morebitnega neugodnega vpliva tvorbe mono-karboaluminata. Preden to hipotezo potrdimo, bi bilo potrebno opraviti še preiskave z drugimi vrstami apnenčevih mok.

Vpliv aeriranja tako vibrirane kot tudi SCC mešanice ima ugoden učinek na OSMO odpornost betona, a je razviden šele po 50 ciklih zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli po metodi SIST 1026 (2004). Številne preiskave so pokazale, da se neaerirani betoni luščijo bolj na koncentriranih mestih in to v

precej večjih luskah kot aerirani, ki se luščijo precej bolj enakomerno po celotni testni površini. Rezultat tega je precej bolj linearno naraščanje količine odlučenega materiala z večanjem števila ciklov zmrzovanja/tajanja pri aeriranih betonih. Pri neaeriranih betonih je to naraščanje približno kvadratično. Iz tega razloga bi bilo za bolj realno oceno OSMO odpornosti nekega betona pri OSMO preiskavi potrebno opraviti več kot 50 ciklov zmrzovanja in tajanja.

Vibrirani betoni so v večini izkazali nižjo OSMO odpornost kot SCC. Mikroskopske analize so pokazale, da ima vibriranje neugoden učinek tako na homogenost cementnega kamna, predvsem v stičnem območju z agregatnimi zrni, kot tudi na enakomernost porazdelitve vnešenih zračnih por v primeru aeriranega betona. Pomembno vlogo pri tem igra verjetno tudi površinski sloj betona, ki je pri SCC zaradi izločitve potrebe po vibriranju praviloma bolj kvaliteten kot pri vibriranem betonu. Vibracije lahko povzročijo izcejanje vode na površino betonskega elementa in povzročijo lokalno višja v/c razmerja.

Vrsta mineralnega dodatka ima lahko na OSMO odpornost SCC relativno velik vpliv, čeprav morda le posreden. Preiskave so pokazale, da je SCC z apnenčevo moko z bolj fino zrnastostno sestavo izkazal manjšo OSMO odpornost kot SCC betoni z bolj grobimi apnenčevimi mokami. Preden zaključimo, da je OSMO odpornost SCC z apnenčevo moko odvisna od finosti apnenčeve moke, bi bilo potrebno preiskati še mineraloško sestavo uporabljenih apnenčevih mok. Poleg tega smo pri apnenčevih mokah opazili tudi različne površinske lastnosti, za katere pa verjetno ne moremo trditi, da so pogojene s finostjo. Apnenčeva moka, pri kateri je bila OSMO odpornost SCC opazno nižja, je bila precej bolj »hidrofobna« od ostalih apnenčevih mok, zaradi česar smo verjetno imeli probleme pri aeriranju te mešanice. Linijska mikroskopska analiza (SIST EN 480-11, 2005) je pokazala, da je bil sistem vnešenih zračnih por pri tej mešanici najmanj ugoden (velik faktor oddaljenosti in nizka specifična površina zračnih por).

Parametrična študija vpliva stopnje aeriranosti na OSMO odpornosti SCC z apnenčevo moko je pokazala, da razlika v deležu zraka ne vpliva tako močno na OSMO odpornost betona. Aerirana mešanica z minimalno količino aeranta, ki je imela 4% delež zraka, je izkazala približno enako OSMO odpornost kot sorodne mešanice s 6%, 8% in 12% deležem zraka. Približno enkrat večjo OSMO odpornost je izkazala le mešanica z 10% deležem zraka. Pri tem je potrebno opozoriti na dejstvo, da je bila mešanica z 8% deležem zraka vgrajena relativno pozno, ko so bile njene samozgoščevalne lastnosti že na kritični meji. Slabša kvaliteta zgoščenosti betonske mešanice vpliva neugodno na njene obstojnostne karakteristike v strjenem stanju. Pri mešanici z 12% deležem zraka pa bi lahko šlo za neugoden učinek predoziranja aeranta. Ponovno je linijska mikroskopska analiza (LMA) pokazala, da je bila pri teh mešanicah kljub večjemu deležu zraka A in ugodnejšemu faktorju oddaljenosti \bar{L} specifična površina sistema zračnih por α v istem velikostnem razredu ($12,5 \pm 1 \text{ mm}^{-1}$). Edino pri mešanici z 10% deležem zraka, ki je izkazala večjo OSMO odpornost, je bil $\alpha = 14,5 \text{ mm}^{-1}$.

Kaže, da je parameter α izmed vseh LMA parametrov najboljši pokazatelj OSMO odpornosti betona. Rezultati LMA prav tako kažejo, da bi bilo morda smiselno opraviti analizo na prerezih ob površini betonskih vzorcev in ne v notranjosti, če želimo oceniti odpornost površine betona proti zmrzali. Tudi ocenjene porazdelitve zračnih por so lahko zelo koristne, še posebej v primerih, ko imamo sestavne materiale betona, ki so prav tako sferičnih oblik (npr. elektrofiltirski pepel) in zgolj spominjajo na vnešene zračne pore. Za oceno porazdelitve zračnih por z metodo LMA sicer potrebujemo zelo velik testni sistem, kar pa za razvita avtomatizirana sistema LMAir in PMAir v sklopu doktorske disertacije ni več problem.

Vsi aerirani SCC z apnenčevo moko so izkazali visoko OSMO odpornost kljub relativno visokim faktorjem oddaljenosti \bar{L} (250-500 μm). Za običajne betone je namreč splošno priporočeno, da faktor oddaljenosti za ustrezno OSMO odpornost betona ne bi smel preseči mejo 200 ali 250 μm (Pleau, Pigeon, Laurencot, 2001). Razlog za takšno razhajanje bi lahko bil v močno izboljšani matrici cementnega kamna pri SCC v primerjavi z običajnimi betoni, zaradi katere SCC tudi pri višjih \bar{L} (tudi do 500 μm) lahko izkaže visoko OSMO odpornost. Enake smernice najdemo tudi v PCA poročilu (Pinto, Hover, 2001), kjer so za visokotrdne betone pri v/c razmerjih nižjih od 0,35 za ustrezno OSMO odpornost prav tako dovoljeni faktorji oddaljenosti do 550 μm . Pri tem je potrebno navesti še dejstvo, da v SIST EN 480-11 (2005) ni popolnoma jasno definirana spodnja meja velikosti odprtih v hidratizirani cementni pasti, ki bi še naj predstavljale vnešene zračne pore in ki jih je potrebno šteti v račun LMA parametrov. Še več, z upoštevanjem odprtanic manjših od 10 μm , ki bi naj že predstavljale kapilarne pore (St John, Poole, Sims, 1998), dobimo zelo majhne faktorje oddaljenosti \bar{L} (tudi manjše od 100 μm), kar je velikokrat razvidno tudi iz rezultatov tujih avtorjev. Problem je v tem, da s tem štejejo odprtine v matrici betona, ki v primeru izpostavljenosti vlagi najverjetneje vsebujejo vodo in ne predstavljajo več območij, kamor bi se voda v času zmrzovanja lahko širila. Tako določen majhen \bar{L} (in posledično visok α) zato še ne pomeni, da bo beton res OSMO odporen.

Da je k rezultatom metode LMA potrebno pristopiti previdno, dokazuje tudi dejstvo, da obstoječi parametri metode SIST EN 480-11 (2005) ne identificirajo morebitnih zgostitev vnešenih zračnih por, ki na OSMO odpornost betona verjetno delujejo neugodno. V primeru aeriranega vibriranega betona s približno 8% deležem zraka, kjer je do takšnih zgostitev vnešenih zračnih por prišlo v veliki meri, so bili rezultati LMA namreč še vedno ugodni: $A = 8,6\%$, $\alpha = 19,4 \text{ mm}^{-1}$ in $\bar{L} = 0,196 \text{ mm}$. Ta beton je bil sicer po kriterijih SIST 1026 (2004) OSMO neodporen. Na ta problem opozarjata tudi Zalocha in Kasperkiewicz (2005). Iz tega razloga bi bilo smiselno vpeljati nov parameter, ki bi ocenil tudi stopnjo enakomernosti porazdelitve vnešenih zračnih por po celotni matrici betona. Naš pristop k temu je predstavljen pri razvoju aplikacije PMAir.

Temperatura v času mešanja in vgrajevanja betona ter temperatura in trajanje nadaljnje mokre nege imajo na OSMO odpornost betona zelo velik vpliv. Betonski vzorci zamešani, vgrajeni in negovani v vodi pri približno 15°C so izkazali opazno nižjo OSMO odpornost kot vzorci, ki so bili manj časa v relativno hladni vodi ($T_N \approx 15^\circ\text{C}$). V primerjavi z vzorci iz enakega betona, ki so bili zamešani, vgrajeni in negovani pri kontrolirani temperaturi (20 ± 1) $^\circ\text{C}$ pa je bila razlika v OSMO odpornosti zelo velika, in sicer v prid slednjim. Še večja razlika je bila med vzorci, ki mokre nege sploh niso bili deležni. Aeriran SCC z apnenčevo moko in z 8% deležem zraka, ki je sicer izmed vseh preizkušenih betonov izkazal daleč najvišjo OSMO odpornost, je bil v primeru odsotnosti mokre nege po kriterijih SIST 1026 (2004) celo OSMO neodporen. Razlika v luščenju teh vzorcev je bila drastična. Ti rezultati bi morali biti izmed vseh navedenih kot najglasnejše opozorilo za gradbeniško prakso, kjer se vse prevečkrat pozablja na pomembnost temperature v času mešanja in betoniranja ter trajanja mokre nege. Beton, ki bo vgrajen pri nizkih temperaturah ali ki ne bo deležen mokre nege, ne bo obstojen v agresivnih okoljih, četudi bo najverjetneje zadostil zahtevam po minimalni tlačni trdnosti.

Če še enkrat zgolj naštejemo preiskane dejavnike, ki vplivajo na OSMO odpornost SCC in vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke, bi si od najbolj vplivnega do najmanj vplivnega sledili približno takole:

- mokra nega betona v zgodnji fazi,
- temperatura pri mešanju betona in betoniranju ter temperatura mokre nege,

- kvaliteta zgostitve betonske mešanice v času vgrajevanja,
- kompaktnost cementnega kamna,
- aeriranje sveže betonske mešanice,
- način zgoščevanja sveže betonske mešanice, z vibriranjem ali brez (SCC),
- vrsta mineralnega dodatka,
- stopnja aeriranosti.

Glede na zgoraj naštete dejavnike, ki v veliki meri vplivajo na OSMO odpornost betona, bi radi poudarili, da torej zgolj izpolnitev priporočil SIST EN 206-1 (2003) glede sestave betona pri stopnjah izpostavljenosti XF2 in XF4 še ne zagotavlja, da bo tak beton res OSMO odporen. Nadalje, ker preiskava OSMO odpornosti betona traja najmanj 2-3 mesece, bi bila kakršnakoli hitrejša ocena OSMO odpornosti vgrajenega betona za gradbeniško prakso zelo dobrodošla. Rezultati preiskav kažejo, da bi OSMO odpornost betona najverjetneje lahko ocenili, če bi ob opravljeni linijski mikroskopski analizi opravili še test vodovpojnosti betona, s čimer bi kontrolirali tudi kvaliteto cementnega kamna, ki je LMA ne identificira. Obe preiskavi sta precej hitrejši kot preizkus OSMO odpornosti betona in bi lahko predstavljali pomemben korak naprej pri gradnji AB konstrukcij izpostavljenih zmrzali in talilnim solem.

7.3.3 Odpornost betona proti sulfatni koroziji

Iz 16-mesečne preiskave na betonskih prizmah potopljenih v 4,4% raztopini Na_2SO_4 lahko zaključimo naslednje:

- Prizme vibriranega betona brez apnenčeve moke in prizme primerljivega samozgoščevalnega betona z apnenčevo moko so zaradi potopitve v sulfatno raztopino s časom nabrekale približno enako kot tiste, ki so odležavale v vodi pri enaki temperaturi. Nabrekanje obeh betonov je bilo prav tako približno enako.
- Prizme aeriranega SCC s približno 4% deležem zraka so se po približno 100 dneh nabrekanja zaradi potopitve v sulfatno raztopino pričele krčiti. Prizme tega betona potopljene v vodo so nabrekale ves čas, podobno kot prizme vibriranega betona in neaeriranega SCC, a približno 2-krat bolj intenzivno.
- Nabrekanje prizem vibriranega betona brez apnenčeve moke in SCC z apnenčevo moko samo zaradi delovanja sulfatov je tudi po 16 mesecih izpostavljenosti skoraj nično. Kvečjemu nekoliko narašča, in sicer linearno.
- Prizme aeriranega SCC z apnenčevo moko so se samo zaradi delovanja sulfatov tekom vseh 16 mesecev izpostavitve krčile, in to precej bolj intenzivno kot so nabrekale prizme vibriranega betona in neaeriranega SCC sicer z nekoliko višjim v/c razmerjem.

Iz preiskav mehanskih lastnosti obravnavanih betonskih vzorcev je težko trditi, da je 16-mesečna izpostavitve betona z ali brez apnenčeve moke sulfatom bistveno vplivala na njegovo tlačno trdnost. Je pa razvidno, da so betonske prizme, ki so bile potopljene v sulfatni raztopini, izkazale v povprečju 24% večjo upogibno natezno trdnost kot tiste, ki so odležavale v vodi. Očitno so se pri 16-mesečni izpostavljenosti 4,4% raztopini Na_2SO_4 v cementnem kamnu tvorili novi kristali (verjetno sekundarni etringit in gips) do takšne mere, da so na upogibno natezno trdnost betona vplivali ugodno.

Mikroskopska analiza je pri betonskih vzorcih, ki so bili izpostavljeni sulfatom, potrdila tvorbo novih kristalov (najverjetneje sekundarnega etringita). Do najintenzivnejše tvorbe tovrstnih kristalov je prišlo pri samozgoščevalnem betonu z apnenčevo moko, a zgolj v zračnih porah tik ob površini teh betonskih vzorcev, ki so bili potopljeni v sulfatno raztopino. Pri vzorcih vibriranega betona brez apnenčeve moke in aeriranega SCC z apnenčevo moko je bilo moč opaziti tvorbo kristalov tudi globlje proti notranjosti vzorcev, a v precej manjši meri kot pri vzorcih neaeriranega SCC z apnenčevo moko.

Kaže, da je lahko tvorba kristalov zaradi kemijske reakcije med sulfatnimi ioni iz okolice in hidratizirano cementno pasto v betonu intenzivnejša v primeru dodatka apnenčeve moke v betonsko mešanico, ampak je ravno v tem primeru zaradi posledično gostejše matrice cementnega kamna vdor sulfatnih ionov v notranjost betona očitno manj intenziven. Iz opravljenih preiskav lahko zaključimo, da po 16-mesečni izpostavljenosti sulfatom (približno 10-krat večjim koncentracijam sulfata kot jih najdemo v zemljinah) obravnavan SCC z relativno veliko količino apnenčeve moke (250 kg/m^3) ni bistveno poškodovan. Za oceno dolgotrajnega učinka sulfatov na beton bi bilo potrebno preiskavo izvajati več kot 16 mesecev.

V zadnjem zaključnem poročilu RILEM-a (2008) lahko prav tako preberemo, da je pri SCC z veliko količino apnenčeve moke v primeru izpostavljenosti sulfatom povečana nevarnost za tvorbo sekundarnega etringita in taumazita. Pri zaključkih nekaterih tujih raziskovalcev na tem področju je sicer potrebno biti zelo pozoren, saj nekateri z dodajanjem apnenčeve moke v mešanico betona posledično večajo tudi v/c razmerje. Iz takšnih preiskav je nemogoče zaključiti, v kolikšni meri je na izkazano slabšo sulfatno odpornost betona vplival dodatek apnenčeve moke in v kolikšni meri povečano v/c razmerje, ki pomeni večjo poroznost in posledično večjo prepustnost cementnega kamna za vdor agresivnih snovi.

7.3.4 Prispevek disertacije

V okviru tretje faze disertacije smo opravili obsežne preiskave obstojnosti SCC in vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke. Zaradi nedavnega sprejetja slovenskega standarda SIST EN 197-1 (2002), ki šele dovoljuje uporabo apnenčeve moke v betonski mešanici, so rezultati teh preiskav v Sloveniji v celoti izvirni prispevek. V svetovnem merilu predstavljajo originalni prispevek k razvoju znanstvenega področja predvsem rezultati sistematičnih preiskav odpornosti površine SCC in vibriranih betonov z apnenčevo moko proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli in odpornosti tovrstnih betonov proti sulfatni koroziji.

V disertaciji smo predstavili dejavnike, ki lahko pomembno vplivajo na rezultate preiskave OSMO odpornosti betona in v standardu SIST 1026 niso navedeni. Po opisani validaciji metode smo predstavili vpliv apnenčeve moke, načina zgoščevanja betona (vibriranje ali samozgoščevanje), vrste mineralnega dodatka, deleža zraka ter temperature in trajanja mokre nege na količino odluččenega materiala po 100 ali več ciklih zmrzovanja in tavanja v prisotnosti soli. Predstavili smo tudi korelacijo med OSMO odpornostjo betona in značilnostmi sistema zračnih por v strjenem betonu, določenih z linijsko mikroskopsko analizo po SIST EN 480-11. Ob tem smo predlagali kontrolo nekaterih drugih parametrov, ki prav tako pomembno vplivajo na OSMO odpornost betona in jih metoda SIST EN 480-11 z obstoječimi parametri ne zajame.

Prispevek disertacije predstavlja tudi izpeljava bolj verjetnega fizikalnega ozadja Powersovega faktorja oddaljenosti kot ga podaja SIST EN 480-11 in večina tuje literature ter predlog za razvoj »posodobljenega« Powersovega faktorja \bar{L}^* , ki bi zajel tudi dejansko kvaliteto cementnega kamna.

7.3.5 Ideje za nadaljnje delo

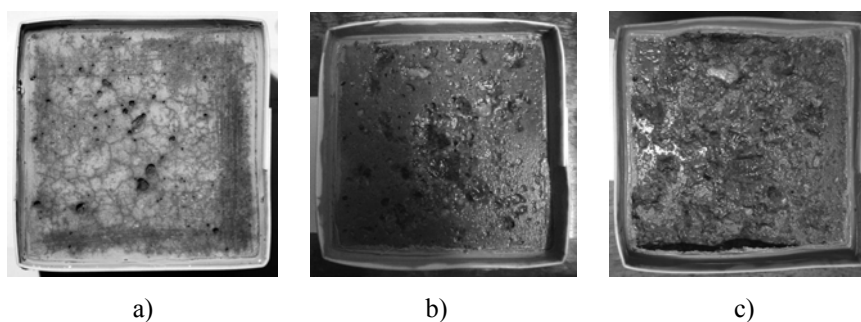
Za razjasnitev vpliva finosti mineralnih dodatkov k betonski mešanici na OSMO odpornost betona bi bilo potrebno opraviti širšo parametrično analizo z upoštevanjem mineraloške sestave in površinskih lastnosti delcev posameznega mineralnega dodatka.

Zanimivo bi bilo tudi preizkusiti učinkovitost raznih impregnacijskih premazov za zaščito betona. Nehote smo namreč opazili izjemno velik učinek nanesenega prednamaza (TKK, KVZ 16) na stransko površino betona, ki je povzročil močno vodotesnost tudi vrhnjega sloja betona. Takšna površina betona se v nadaljnjih 100 ciklih zmrzovanja/tajanja v prisotnosti soli skoraj ni več luščila. Če ostali premazi nimajo tako močnega učinka, bi bilo zanimivo preiskati sestavo uporabljenega prednamaza, ki je očitno izjemno učinkovit.

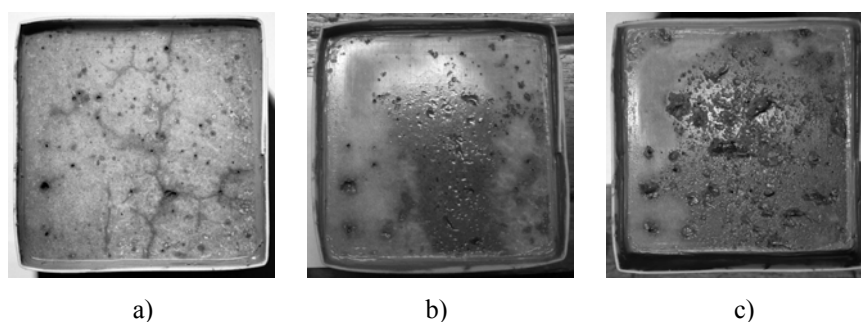
Glede čim hitrejše in enostavnejše ocene OSMO odpornosti betona bi lahko navedli tudi opazko, katero bi bilo sicer potrebno še nadalje raziskati. Gre za temne lise in vzorce razpok, ki nastanejo na površini betonskega preizkušanca, takoj ko nanjo natočimo raztopino NaCl, kot je razvidno na slikah (Slika 7.1a) in (Slika 7.2a). Izkazalo se je, da čim več je teh temnih lis in vzorcev razpok, tem bolj se površina vzorca lušči zaradi zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli. Te temne lise in vzorci razpok najverjetneje predstavljajo območja z oslabljeno oz. bolj porozno matrico cementnega kamna. Zanimivo je tudi dejstvo, da se ti vzorci razpok pri aeriranih betonih ponavadi sploh ne pojavijo, kot kaže primer na sliki (Slika 7.3).

Končno bi še navedli, da smo pri poskusu razvoja novega parametra linijske mikroskopske analize α^* , ki bi za razliko od originalnega LMA parametra α predstavljal specifično površino zračnih por glede na prostornino paste, kjer se dejansko nahaja potencialno nevarna voda pri zmrzovanju, ugotovili, da je ta parameter dejansko inverzna vrednost obstoječega LMA parametra \bar{L} . Novega parametra torej nismo našli, smo pa nehote izpeljali Powersov faktor oddaljenosti in njegovo fizikalno razlago, ki je tudi precej lažje razumljiva ali celo bolj verjetna kot tista, ki je zapisana v SIST EN 480-11 (2005) ali v tuji literaturi (Pleau, Pigeon, Laurecot, 2001). Powersov faktor torej pove, kolikšna skupna površina vseh območij možnih sprostitvev P_{sist} je na voljo z vodo zasičeni matrici betona V_p v primeru zmrzovanja in najverjetneje ne ocenjuje medsebojne razdalje zračnih por v betonu niti maksimalne razdalje od poljubne točke v pasti betona do obodov zračnih por, kot je v literaturi velikokrat zapisano. Do podobnih zaključkov prihajajo tudi Snyder, Natesaiyer in Hover (2001).

Pri zgornji razlagi Powersovega faktorja in tudi pri drugih predlaganih konceptih določanja medsebojne razdalje zračnih por v betonu lahko končno opazimo tudi bistveno poenostavitev, ki pa za vse vrste betonov ne vzdrži. Vsi koncepti namreč privzamejo, da je pasta betona vedno enaka. Na tem mestu pa se novodobni visokotrdni in/ali samozgoščevalni betoni od običajnih betonov močno razlikujejo. Zaradi posledično nižje poroznosti cementnega kamna le-ti niso tako izpostavljeni vdoru vode v matrico betona kot običajni vibrirani betoni z višjimi v/c razmerji, četudi imajo morda večjo količino paste. To bi lahko bil tudi eden glavnih razlogov za relativno slabo korelacijo Powersovega faktorja oddaljenosti in izkazane OSMO odpornosti betona, predstavljeno v disertaciji in v nekateri tuji literaturi. Končno bi bilo smiselno razmisliti o posodobitvi Powersovega faktorja oddaljenosti, ki bi zajel tudi kvaliteto hidratizirane cementne paste. To bi lahko dosegli z upoštevanjem dejanske poroznosti cementnega kamna, kot smo predlagali z izrazom (40). Seveda bi bilo meje za posodobljen \bar{L}^* potrebno glede na rezultate preiskave OSMO odpornosti določiti ponovno in lahko bi imeli nov LMA parameter, na podlagi katerega bi bilo morda moč bolje napovedati OSMO odpornost betona.



Slika 7.1: Vzorec OSMO neodpornega betona: a) po natočeni raztopini; b) po 25 ciklih; c) po 50 ciklih
Fig. 7.1: Sample of frost non-resistant concrete: a) at poured freezing medium; b) at 25 cycles; c) at 50 cycles



Slika 7.2: Vzorec OSMO odpornega betona: a) po natočeni raztopini; b) po 25 ciklih; c) po 50 ciklih
Fig. 7.2: Sample of salt frost resistant concrete: a) at poured freezing medium; b) at 25 cycles; c) at 50 cycles



Slika 7.3: Vzorec visoko OSMO odpornega aeriranega betona takoj po natočeni raztopini
Fig. 7.3: Sample of highly salt frost resistant aerated concrete after poured freezing medium

7.4 Avtomatizacija metode EN 480-11

7.4.1 Metoda EN 480-11

Glede metode EN 480-11 lahko zaključimo naslednje:

- Metoda EN 480-11 je v klasični izvedbi z mikroskopom zelo dolgotrajna in močno odvisna od izkušnosti ter natančnosti izvajalca.
- Zaradi nenehnega razvoja mikroskopov bi bilo v standard SIST EN 480-11 (2005) smiselno dodati, da je za nedvoumno identifikacijo zračnih por potrebno uporabljati leče s čim manjšo globinsko ostrino in/ali osvetlitev s strani.
- Rezultati metode so močno odvisni od identificiranega števila zračnih por, medtem ko manjše razlike v oceni dolžine posameznih tetiv na končne rezultate skoraj ne vplivajo.
- Glede na zgornjo občutljivost metode in na omejitve v kvaliteti brušenja/poliranja preiskovane površine vzorca bi bila v standardu nujno potrebna natančnejša definicija mikro-odprtine v matrici cementnega kamna, ki se naj šteje kot zračna pora. Predpisana spodnja meja za zračno poro 1 μm prav tako ne ustreza definiciji vnešenih zračnih por. Odprtine v matrici cementnega kamna manjše od 10 μm bi naj že predstavljale kapilarne pore (St John, Poole, Sims, 1998).
- Ena preiskava pri minimalni predpisani velikosti testnega sistema traja približno 10-20 ur, odvisno od stopnje aeriranosti preiskovanih betonskih vzorcev.
- Pri minimalni predpisani velikosti testnega sistema lahko pričakujemo tudi do 10% napako ocen parametrov A , α in \bar{L} ter do 25% napako ocene parametra A_{300} samo zaradi različne izbire položaja testnega sistema. Da bi to napako vsaj razpolovili, je potrebno opraviti analizo pri približno 4-krat večjem testnem sistemu. To bi pomenilo 40-80 ur natančnega mikroskopiranja za eno preiskavo.
- Postopki priprave, izvedbe in interpretacije rezultatov LMA so v sorodnem ameriškem standardu ASTM C 457 (1998) napisani precej bolj jasno in uporabno kot v SIST EN 480-11 (2005). Prednost evropskega standarda je sicer v tem, da vključuje metodo za določitev porazdelitve zračnih por in deleža mikro-por. Kljub temu pri opisu metode ponekod manjka matematične jasnosti in inženirske uporabnosti. Najnovejša različica SIST EN 480-11 (2005) v tem delu še vedno vsebuje tudi številne tiskarske skrate, ki bi jih bilo potrebno popraviti.

7.4.2 Mehanski tip avtomatizacije LMA

Glede mehanskega tipa avtomatizacije postopka LMA lahko zaključimo naslednje:

- Mehanska roka, ki namesto človeka premika bodisi glavo mikroskopa nad preiskovanim vzorcem ali mizico mikroskopa, znatno zmanjša merski čas preiskave in olajša naporno delo. Dodatno delo sicer predstavlja kontrastiranje testne površine preiskovanega vzorca za povečanje kontrasta med zračnimi porami in matrico cementnega kamna.
- Rezultati avtomatiziranega sistema so močno odvisni od kvalitete kontrastiranja preiskovane površine vzorca ter od izbire threshold vrednosti oz. svetlobnega praga za identifikacijo zračnih por. Preiskovana površina vzorca po kontrastiranju namreč ni idealno črno-bela.

- Kasnejša ponovitev preiskave je lahko problematična, saj se lahko kontrastno sredstvo v mikrokraterjih zračnih por sčasoma skrči in/ali črnilo na preostalih površinah vzorca zbledi.
- Problem lahko predstavlja tudi morebitna neenakomerna osvetlitev celotne testne površine vzorca in zahtevana vzporednost površine vzorca ter ravnine premikov mikroskopske glave. Popravljanje kontrastiranih predelov na preiskovani površini, ki ne predstavljajo zračnih por, je zelo težko izvedljivo (s flomastrom pod mikroskopsko povečavo) in ireverzibilno.
- Oprema za takšno mehanizacijo ali že sestavljeni prototipni sistemi za avtomatizirano izvedbo LMA so izjemno dragi.

7.4.3 Avtomatizacija LMA z optičnim čitalcem

Glede avtomatizacije postopka LMA z optičnim čitalcem lahko zaključimo naslednje:

- Možnost naenkratnega zajema celotne testne površine preiskovanega vzorca z optičnim čitalcem popolnoma izloči potrebo po relativno počasni naravi človeške ali mehanske roke. Tudi izjemno draga mehanizacija za avtomatizacijo in mikroskop nista več potrebna.
- Merski čas je še manjši kot pri mehanskem tipu avtomatizacije LMA. Razlika je še posebej očitna v primeru izbire večjih testnih sistemov.
- Rezultati takšne izvedbe LMA so sicer še vedno močno odvisni od kvalitete kontrastiranja preiskovane površine ter od izbire threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por, a je slednje s takšnim pristopom k avtomatizaciji že moč avtomatizirati.
- Preiskavo lahko ponovimo kadarkoli, in to na identični, optično zajeti in računalniško shranjeni, sliki celotne testne površine preiskovanega vzorca.
- Problema neenakomerne osvetlitve celotne testne površine pri optičnih čitalcih praviloma ni. Zahteva po vzporednosti je izpolnjena sama po sebi, saj je vzorec med zajemom slike položen na stekleno površino optičnega čitalca. Popravljanje kontrastiranih predelov na preiskovani površini, ki ne predstavljajo zračnih por, je precej enostavnejše, v kateremkoli grafičnem programu, in je tudi reverzibilno.
- Potrebna oprema za tovrstno avtomatizacijo (optični čitalec z visoko resolucijo, računalnik in računalniški program za analizo slike) je relativno poceni.
- Zelo enostaven in dovolj natančen zajem celotne testne površine vzorca pomeni tudi, da nekdanja ekonomizacija oz. linearizacija, po Rosiwalu (1898, *cit. po* Kališnik, 2002), natančnejše planarne stereološke metode za določanje večine LMA parametrov ni več potrebna.
- V primeru kvalitetne priprave preiskovane površine vzorca in pravilno izbrane threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por tovrstna avtomatizacija daje skoraj enake rezultate kot klasična ročna izvedba LMA z mikroskopom. Nekolikšna odstopanja v rezultatih so samo v primeru betonskih mešanic, kjer je prišlo do znatnega kopičenja zračnih por.
- Problem stikajočih se krožnih sledi zračnih por je moč omiliti z uporabo računalniško-grafične metode *Watershed*.
- Pri slabše kontrastiranih vzorcih lahko grobo oceno LMA parametrov dobimo z izločitvijo vseh identificiranih predelov velikosti 1 piksel in z izbiro threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por na prevojih krivulj $\bar{L}(x)$ in $\alpha(x)$, tj. pri $x < x_a$.

Glede na opravljene preiskave lahko zaključimo še naslednje:

- Za kvalitetno kontrastiranje je najpomembnejša predpriprava preiskovane površine betonskega vzorca, in sicer ustrezno brušenje. Poliranje ima v večini primerov negativen učinek.
- Z večanjem kontrasta pri optičnem zajemu slike z namenom, da bi zmanjšali občutljivost meritev na izbiro threshold vrednosti, posredno že izbiramo threshold vrednost, in to na zelo nekontroliran način. Slednje praviloma privede do izgube najpomembnejših informacij – najmanjše zračne pore.
- Le z nevtralnimi (ničelnimi) nastavitvami kontrasta optičnega zajema slike kontrastirane površine betonskega vzorca in s pravilno izbiro threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por bo nek avtomatiziran sistem uspel prebrati pravo število in pravo velikost zračnih por.
- S predlaganima metodama HST in THR za oceno prave threshold vrednosti za identifikacijo zračnih por na kontrastirani površini betonskega vzorca, na katerih temelji naš prototipni sistem LMAir, lahko dosežemo popolno avtomatizacijo postopka LMA. Predlagani metodi namreč temeljita na fizikalni naravi sistema zračnih por v strjenem betonu in sta praviloma neodvisni od človeškega faktorja.
- Z upoštevanjem Delessejeve planarne stereološke zveze lahko parameter A v odvisnosti od threshold vrednosti x določimo neposredno iz histograma zajete slike testne površine vzorca, kar traja le nekaj sekund.
- Problem negativnih vrednosti pri določanju porazdelitve zračnih por pri minimalni predpisani velikosti testnega sistema smo uspešno rešili z zmanjšanjem števila velikostnih razredov. S tem smo uspeli tudi znižati visoko občutljivost parametra A_{300} na velikost testnega sistema.

7.4.4 Planarna stereološka analiza

Glede planarnega pristopa k določanju parametrov LMA lahko zaključimo naslednje:

- Planarna metoda za določanje prostorninske gostote (parameter A) je od vseh stereoloških metod najnatančnejša. S popolnoma računalniškim tipom avtomatizacije LMA je od linijske ali točkovne stereološke metode tudi hitrejša.
- Pričakujemo lahko tudi najnatančnejši oceni parametrov α in \bar{L} , saj s planarnim pristopom analiziramo prav vse krožne sledi na testni površini in ne le tiste, ki jih »zadenemo« bodisi linijskim ali točkovnim testnim sistemom.
- Planarna analiza ponuja tudi rešitev problema odkrušenih robov zračnih por, kar z avtomatizirano linijsko analizo praktično ni moč identificirati in korigirati.
- Ena novih možnosti, ki jih odpira planarni pristop, je tudi identifikacija morebitnih predelov zgostitve zračnih por na testni površini in posledičen razvoj novih parametrov, ki bi lahko medsebojno razdaljo zračnih por opisali bolj realno kot Powersov model. Ta tema je trenutno zelo aktualna, a raziskovalci ne prihajajo do enotne rešitve, saj je matematični model za realen opis tako heterogenega materiala, kot je aeriran beton, zelo zapleten.
- V razvojno računalniško aplikacijo PMAir smo uspešno vgradili identifikacijo morebitnih območij zgostitve zračnih por preko izrisa frekvence krožnih sledi zračnih por na celotni testni površini.
- Določanje porazdelitve zračnih por s planarno analizo je »ill-posed« matematični problem brez enolične rešitve. Zato smo v sklopu aplikacije PMAir razvili poseben algoritem, ki prevede

rezultate planarne analize na linijske in nato določi porazdelitev zračnih por po linijski metodi, ki ima enolično rešitev.

- Rezultati razvitega avtomatiziranega sistema PMAir so v večini primerov primerljivi z rezultati LMAir in klasične ročne izvedbe LMA z mikroskopom.
- Dokler ne izboljšamo učinkovitosti metode *Watershed* ali razvijemo bolj učinkovito metodo za ločitev deloma stikajočih se krožnih sledi zračnih por, od potencialne planarne metode še ne moremo pričakovati, da daje bolj točne rezultate kot linijska. Zato bi bilo trenutno najbolje uporabljati razvit avtomatiziran sistem LMAir pri $T_{tot} \geq 10.000$ mm.

7.4.5 Prispevek disertacije

V sklopu zadnjega dela disertacije smo opravili validacijo postopka linijske mikroskopske analize, predpisanega v SIST EN 480-11. Pri minimalni velikosti testnega sistema, ki ga predlaga standard, smo določili statistike, na podlagi katerih smo ocenili ponovljivost in stopnjo zaupanja metode, ki ju standard ne podaja. Prispevek disertacije predstavlja tudi izvirna ideja o avtomatizirani določitvi prave threshold vrednosti, ki predstavlja svetlobni prag med kontrastiranimi zračnimi porami in okoliškim cementnim kamnom, kar zapolnjuje veliko vrzel v dosedanjih pristopih k avtomatizaciji tega dolgotrajnega postopka. Idejo smo uspešno vgradili v izdelano računalniško aplikacijo LMAir za avtomatizirano izvedbo LMA in končni validiran izdelek objavili v (Duh, Žarnić, Bokan-Bosiljkov, 2008). V disertaciji smo predstavili tudi pristope k čim bolj kvalitetni izvedbi kontrastiranja testne površine betonskih vzorcev in metode računalniške obdelave zajete slike testne površine za izločitev tistih predelov, ki predstavljajo napake ali pore v agregatu.

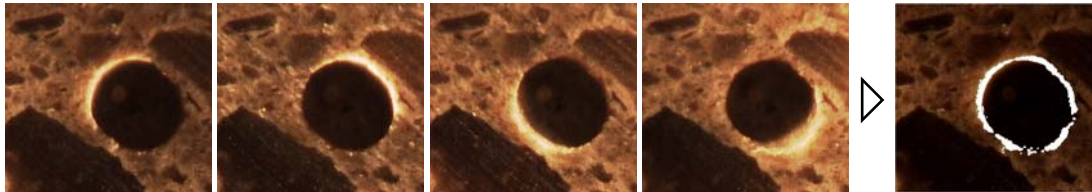
Končno smo izpeljali stereološke zveze za določanje LMA parametrov iz rezultatov planarne analize, ki je od linijske analize bolj natančna, saj v izračunih upošteva vse dvodimenzionalne sledi zračnih por na testni površini in ne le tiste, ki jih v primeru linijske analize sekajo linije izbranega testnega sistema. S pomočjo planarne analize smo izdelali tudi osnutek določanja enakomernosti porazdelitve zračnih por po matrici cementnega kamna. Določanje velikostne porazdelitve zračnih por s planarno analizo, ki velja za »ill-posed« matematični problem, smo rešili na ta način, da smo z izvirnim pristopom k prevedbi rezultatov planarne analize na linijske podatke posredno prevedli planarni matematični problem na linearnega, ki pa ima enolično rešitev. Na podlagi navedenih idej in stereoloških zvez smo izdelali računalniško aplikacijo PMAir za avtomatizirano planarno določitev značilnosti zračnih por v strjenem betonu. Tudi to računalniško aplikacijo smo validirali z velikim številom preizkušancev izdelanih iz betonskih mešanic z različnimi sestavami.

7.4.6 Ideje za nadaljnje delo

Pred uvajanjem natančnejših metod in/ali novih parametrov, ki bi lahko bolj realno opisali sistem zračnih por v strjenem betonu, bi bilo potrebno najprej bolj jasno in tudi bolj smiselno definirati najmanjšo odprtino v matrici cementnega kamna, ki še predstavlja zračno poro, kamor se voda v času zmrzovanja lahko širi.

Pri uporabi računalniško avtomatiziranih sistemov LMA bi bilo prav tako bolj smiselno rešiti problem svetilnega oz. tako imenovanega »halo« učinka kontrastnega sredstva na zajeti sliki kontrastirane površine vzorca preventivno. To bi morda lahko dosegli že z uporabo optičnih čitalcev z višjo resolucijo kot 1200 dpi. V tem primeru bi bilo samo potrebno izločiti vse identificirane predele velikosti manjše od 10 μm oz. od predpisane meje. Problem bi najverjetneje rešili tudi z uporabo

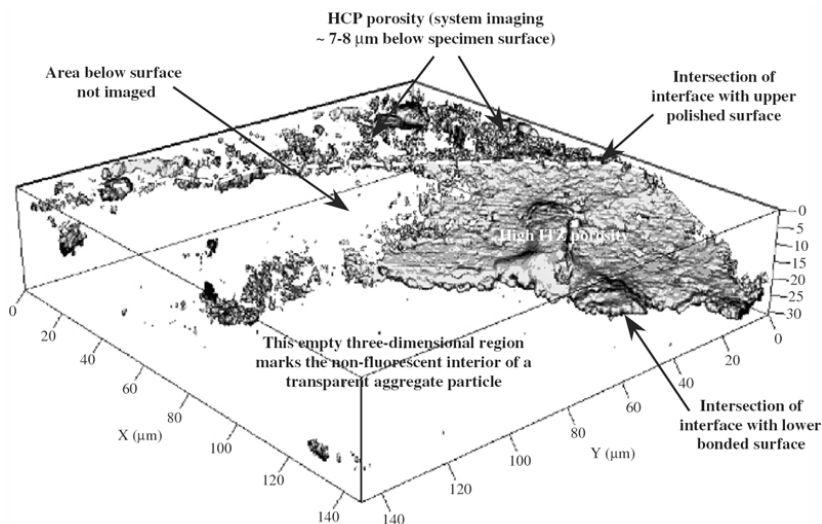
kakšnega kontrastnega sredstva mat barve ali s kakšnim drugačnim pristopom k računalniški identifikaciji mikro-kraterjev zračnih por na testni površini vzorca, ki ne zahteva kontrastiranja. In sicer, če bi testno površino osvetlili iz štirih strani pod čim večjim kotom glede na navpičnico, bi lahko po računalniški vsoti samo svetlih pikslov teh slik dobili sestavljen obris zračnih por, kot kaže slika (Slika 7.4). V tem primeru tudi poliranje testne površine praviloma ne bi imelo neugodnega učinka.



Slika 7.4: Osvetlitev testne površine s štirih strani in primer računalniške vsote svetlih predelov slik (desno)

Fig. 7.4: Side lighting from four directions and an example of images bright pixels sum (right)

Zanimiv bi bil tudi nadaljnji razvoj parametra, ki bi še bolj jasno prikazal morebitna območja zgoščenih por, in razvoj sestavljanja tridimenzionalne slike sistema zračnih por v betonu. S trenutno mikroskopsko in računalniško opremo je moč sestaviti tridimenzionalne slike zbruskov (Head, 2006), kar sicer pomeni maksimalno višino virtualne tridimenzionalne slike samo 30 μm (Slika 7.5). Sestavljanje tridimenzionalne slike večjih dimenzij bi bilo načeloma možno z računalniškim sestavljanjem slik več zaporedno izdelanih zbruskov nekega betonskega vzorca, a je praktično to še vedno težko izvedljivo.



Slika 7.5: Virtualni tridimenzionalni model poroznosti cementnega kamna (Head, 2006)

Fig. 7.5: Virtual 3D model of hardened cement paste porosity (Head, 2006)

8 POVZETEK

Doktorska disertacija je vsebinsko razdeljena na dva med seboj povezana dela. Prvi del je posvečen projektiranju, zamešanju in lastnostim samozgoščevalnih ter vibriranih betonov z apnenčevo moko v svežem in v strjenem stanju. Lastnosti smo določali s standardnimi in nestandardnimi metodami laboratorijskih preiskav na »makro« in »mikro« nivoju. Drugi del disertacije obravnava dva načina avtomatizirane določitve značilnosti zračnih por v strjenem betonu, ki sta bila razvita v okviru doktorske disertacije.

Obsežne preiskave na cementnih pastah, samozgoščevalnih maltah in samozgoščevalnih betonih (v nadaljevanju SCC) so pokazale, da neposreden prenos receptur SCC mešanic iz drugih držav sveta praviloma ni možen, a je po splošni metodi Okamure moč najti dovolj dobro izhodišče za projektiranje SCC mešanic iz domačih materialov tako z drobljenim agregatom kot s prodom. Na podlagi parametrične študije učinkovitosti kemijskih dodatkov tipa superplastifikator, aerant in dodatek za povečanje viskoznosti ter interakcije med njimi v različnih SCC mešanicah smo sestavili osnutek preglednice posamičnih in medsebojnih vplivov kemijskih dodatkov in vodo-cementnega razmerja na samozgoščevalne lastnosti, ki bi lahko predstavljala zelo koristen pripomoček za projektiranje tako aeriranih kot tudi neaeriranih SCC v praksi. Učinkovitost sprojektiranih receptur SCC mešanic smo preverili v dveh betonarnah z različnimi vrstami mešalcev.

V sklopu projektiranja aeriranih SCC mešanic smo preizkusili tudi različne mineralne dodatke (različne vrste apnenčevih mok, elektrofiltrski pepel in kremenčevo mivko). Izkazalo se je, da zaradi lastnosti površine delcev določene apnenčeve moke niso primerne za optimalno oblikovanje sistema zračnih por v betonu. Opravili smo tudi preiskave časovnega spreminjanja samozgoščevalnih lastnosti različnih SCC mešanic, iz katerih je razvidno, da v primeru uporabe sprojektiranih SCC mešanic kot transportnega betona brez dodatnih ukrepov transport ne bi smel trajati več kot 30 minut. Na podlagi reoloških preiskav smo podali tudi oceno predlaganih matematičnih modelov za numerično simulacijo razlezanja sveže SCC mešanice.

Preiskave mehanskih lastnosti SCC in vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke so pokazale, da vključitev apnenčeve moke poveča tlačno trdnost betona, še posebej pri zgodnjih starostih. Pri tem SCC dosega še do 10% višje tlačne trdnosti kot vibriran beton z identično sestavo in drugačno konsistenco. Določili smo tudi padec tlačne trdnosti betona zaradi vnešenih zračnih mehurčkov, ki je pri aeriranih SCC manjši (v povprečju 2,5 MPa na 1% zraka) kot pri primerljivih vibriranih betonih (v povprečju 3,8 MPa na 1% zraka). Naknadne mikroskopske analize so pokazale bistvene razlike v mikrostrukturi teh betonov, ki dobro razlagajo takšno obnašanje materiala. Rezultati cepilnega nateznega preizkusa so pokazali, da bi bila lahko natezna trdnost SCC do 20% manjša od natezne trdnosti, kot jo za beton enakega trdnostnega razreda navaja Evrokod 2, rezultati upogibnega nateznega preizkusa so pokazali obratno. Poissonov koeficient, statični modul elastičnosti in duktilnost betona smo poskušali določiti s preiskavo tlačno obremenjenih prizem dimenzij 10x10x40 cm. Izkazalo se je, da je takšna geometrija preizkušancev preveč vitka, da bi lahko ocenili prave deformacije ob tlačni trdnosti betona in nadaljnje mehčanje. Kljub temu je bilo za opaziti, da je deformacija SCC z apnenčevo moko pri tlačni trdnosti večja od 2% in da se s starostjo bistveno ne spreminja. Za časovne razvoje statičnega modula elastičnosti ter tlačne in natezne trdnosti SCC z apnenčevo moko smo uspeli izdelati matematične modele na podlagi modelov v Evrokodu 2.

V sklopu mehanskih lastnosti betona smo opozorili tudi na vpliv temperature v času mešanja in vgrajevanja betonske mešanice ter temperature nadaljnje mokre nege na tlačno trdnost betona in predstavili krčenje SCC z apnenčevo moko. Kaže, da je kljub pomembno manjši prostornini agregata v SCC mešanici krčenje SCC z apnenčevo moko le do 10% večje od krčenja primerljivega vibriranega betona brez apnenčeve moke, pri čemer večji del odpade praviloma na avtogeno krčenje, medtem ko je krčenje zaradi sušenja pri obravnavanem SCC manjše.

Pri preiskavah obstojnosti SCC in vibriranih betonov z ali brez apnenčeve moke smo se osredotočili na odpornost površine betona proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti talilnih soli (v nadaljevanju OSMO odpornost), ki je praviloma najbolj kritičen agresivni vpliv pri premostitvenih objektih v večjem delu Slovenije. Po prvotnih preiskavah smo opazili nekaj dejavnikov, ki lahko pomembno vplivajo na rezultate standardne preiskave OSMO odpornosti betona (SIST 1026) in v standardu niso navedeni. Po natančni validaciji metode smo opravili parametrično študijo različnih vplivov na OSMO odpornost betona, ki bi jih lahko po vrsti od najbolj vplivnega do najmanj vplivnega našteali v tem vrstnem redu: mokra nega betona v zgodnji fazi, temperatura v času mešanja in vgrajevanja betona ter temperatura nadaljnje mokre nege, kvaliteta zgostitve betonske mešanice in kompaktnost cementnega kamna, aeriranje betonske mešanice, način zgostitve betonske mešanice (samozgoščevanje pred vibriranjem), vrsta mineralnega dodatka in količina vnešenega zraka. Pri vseh OSMO preskusih smo praviloma opravili 100 ali več ciklov zmrzovanja in tajanja v prisotnosti soli, saj se razlike pri nekaterih vplivih pojavijo šele po v standardu predpisanih 50 ciklih zmrzovanja/tajanja. Na večini preizkušancev smo opravili tudi linijsko (v nadaljevanju LMA) in planarno mikroskopsko analizo, ki je pokazala največjo korelacijo med OSMO odpornostjo betona in specifično površino sistema zračnih por v betonu. Korelacija med OSMO odpornostjo betona in Powersovim faktorjem oddaljenosti je bila precej manjša. Nadaljnje preiskave so pokazale, da je OSMO odpornost betona močno odvisna tudi od kompaktnosti cementnega kamna, ki pa jo parametri LMA ne zajamejo. Iz tega razloga smo predlagali kombinacijo metode LMA s preiskavo vodovpojnosti betona, ki bi lahko v praksi predstavljala najhitrejšo oceno ustreznosti vgrajenega betona v primeru izpostavljenosti XF. Preiskali smo tudi pravo fizikalno ozadje Powersovega faktorja in na podlagi tega predlagali smernice za »posodobljen« Powersov faktor, ki bi zajel tudi kvaliteto cementnega kamna.

V okviru obstojnostnih karakteristik betona smo opravili tudi dolgotrajno preiskavo odpornosti betona proti sulfatni koroziji. V času 16-mesečne izpostavitve 4,4% raztopini Na_2SO_4 so prizme vibriranega betona brez apnenčeve moke in prizme SCC z apnenčevo moko zaradi sulfatnega napada nabrekale komaj opazno in približno enako. Prizme aeriranega SCC z apnenčevo moko so se zaradi sulfatnega napada krčile in to v precej večji meri. Preiskave mehanskih lastnosti preizkušancev so pokazale, da 16-mesečna izpostavitve sulfatni raztopini ni vplivala na tlačno trdnost betona, se pa je pri tem v povprečju za 24% povečala upogibna natezna trdnost betona. Mikroskopska analiza betonskih preizkušancev je pokazala, da je lahko tvorba kristalov (sekundarni etringit in morda tudi taumazit) zaradi sulfatne korozije intenzivnejša pri SCC z velikim deležem apnenčeve moke, a je ravno pri tem betonu tvorbo tovrstnih kristalov za opaziti le tik ob površini preizkušancev.

Zaradi dolgotrajnosti klasične ročne izvedbe LMA z mikroskopom (SIST EN 480-11) smo v okviru doktorske disertacije poskušali ta postopek avtomatizirati. Pri pregledu obstoječih poskusov avtomatizacije tega postopka v svetu smo opazili bistveni manjkajoči člen, ki v tuji literaturi praktično ni omenjen. Gre za zagotovitev nedvoumne identifikacije zračnih por v matrici strjenega betona, ki je za avtomatizacijo stereološke kvantitativne metode LMA ključnega pomena. Za določitev prave threshold vrednosti, ki predstavlja svetlobni prag med kontrastiranimi zračnimi porami in okoliškim cementnim kamnom, smo predlagali rešitev, na podlagi katere smo izdelali računalniško aplikacijo

LMAir za avtomatizirano izvedbo LMA s pomočjo optičnega čitalca, analizatorja slike in posebne priprave testne površine preizkušanca. Predstavili smo tudi rešitve problema izločitve delov zajete slike testne površine, ki predstavljajo napake ali pore v agregatu. V primeru kvalitetne priprave vzorcev se rezultati avtomatizirane LMAir in klasične LMA zelo dobro ujemajo.

Izdelali smo tudi računalniško aplikacijo PMAir za avtomatizirano analizo sistema zračnih por v strjenem betonu na podlagi planarnih stereoloških zvez, ki dajejo bolj natančne rezultate kot linearne stereološke zveze iz LMA. Gre namreč za analizo celotne testne površine betonskega vzorca, ki zajame vse dvodimenzionalne sledi zračnih por in ne le tiste, ki jih v primeru LMA sekajo linije testnega sistema. S pomočjo planarne analize smo izdelali tudi osnutek določanja enakomernosti porazdelitve zračnih por po matrici cementnega kamna. Določanje velikostne porazdelitve zračnih por s planarno analizo, ki velja za »ill-posed« matematični problem, smo rešili na ta način, da smo izdelali algoritem za prevedbo rezultatov planarne analize na linijske podatke. Tako smo planarni matematični problem prevedli na linearnega, ki pa ima enolično rešitev.

9 SUMMARY

The thesis is divided into two connected parts. The first part deals with design, mixing and characteristics of self-compacting and vibrated concretes with limestone powder. Characteristics of fresh and hardened concrete were obtained with standard and non-standard tests on »macro« and »micro« level. The second part of thesis deals with two approaches to computer assisted determination of air void characteristics in hardened concrete, which were developed in the framework of the doctoral work.

Extensive tests on cement pastes, self-compacting mortars and self-compacting concretes (SCC) showed that direct transfer of SCC mix compositions from foreign countries is not possible. However, the general Okamura method gave a good starting-point for the design of SCC mixtures with either crushed stone aggregate or gravel from domestic materials. According to the parametrical study of efficiency and interaction of chemical admixtures (superplasticizer, air-entraining agent and viscosity agent) in different SCC mixtures a table of individual and interacting influences of chemical admixtures and water-cement ratio on self-compacting characteristics was constructed. This table could represent a useful tool for the design of aerated and non-aerated SCC mixtures in practice. Effectiveness of the designed SCC mixtures was verified in two domestic concrete plants with different types of concrete mixers.

In the framework of SCC mix design different mineral additions (different types of limestone powder, fly ash and siliceous sand) were tested. During the design of aerated SCC mixtures it became clear that due to particle characteristics some types of limestone powder were not suitable for optimal formation of air bubbles in the fresh SCC mixture. Further on, time dependent loss of self-compacting properties of different SCC mixtures was studied. The results showed that in case of ready-mix concrete transport of the designed fresh SCC should not exceed the time period of 30 minutes, unless some additional interventions are carried out. According to rheological tests different models for numerical simulation of fresh SCC, proposed by some authors in recent years, were discussed.

The tests of mechanical properties of SCC and vibrated concretes with limestone powder showed that addition of limestone powder to concrete mixture increases compressive strength of concrete, especially at early age. Moreover, SCC with limestone powder shows up to 10% higher compressive strength than vibrated concrete with identical composition and different consistency. Further on, the decrease of compressive strength by air entrainment was studied. The results showed lower decrease for aerated SCC (approximately 2.5 MPa per 1% of air content) than for vibrated aerated concrete (approximately 3.8 MPa per 1% of air content). Additional microscopical analysis showed some essential differences in the microstructure of these concretes, which gave a good explanation for such behaviour. The results of splitting tensile tests showed that tensile strength of SCC with limestone powder could be up to 20% lower than the expected tensile strength of concrete in the corresponding compressive strength class, given by Eurocode 2. However, the results of bending tensile tests showed the opposite. Poisson's ratio, static modulus of elasticity and ductility of concrete were estimated from the uniaxial compressive test on concrete prisms with dimensions of 10x10x40 cm. The tests showed that such geometry of concrete specimens is too slender for the evaluation of true compressive strain and strain-softening behaviour of concrete. However, it was clear that the compressive strain of SCC with limestone powder is higher than 2‰ and that it does not change with age of concrete. For the static modulus of elasticity, compressive and tensile strength evolutions of SCC with limestone powder the analytical models were developed on the basis of Eurocode 2 models.

In the framework of mechanical properties of concrete the influence of temperature during mixing, placing and further curing of concrete on the compressive strength of concrete was discussed. Furthermore, initial tests of shrinkage of SCC with limestone powder were carried out. The results indicated only somewhat bigger total shrinkage of SCC with limestone powder in comparison to vibrated concrete without limestone powder, regardless of the notably lower content of aggregate in the SCC mixture. However, much higher portion of autogenous shrinkage is expected for SCC. Drying shrinkage of SCC is therefore lower than in the case of ordinary vibrated concretes.

In the framework of durability of SCC and vibrated concretes with limestone powder the main focus was on salt frost scaling of concrete, which is one of the main durability issues in bridging construction in Slovenia. Initial tests indicated some factors that can have significant influence on the results of the standard freeze-thaw test (SIST 1026) and are not mentioned in the standard. After careful validation of the standard method different influencing factors on salt frost scaling of concrete were studied in detail. The following order from the most influencing to the least influencing factor could be made: wet curing of concrete in the early age, the temperature of mixing, placing and further wet curing of concrete, quality of compaction and density of hydrated cement paste, air entrainment, type of compaction (self-compacting better than vibrating), type of mineral addition and amount of entrained air. For the discussed studies 100 or more freeze-thaw cycles were carried out, as significant difference between some factors was noticed only after 50 cycles, which is a maximum value defined in SIST 1026. After the freeze-thaw tests the concrete specimens were analysed with microscope according to the linear-traverse method (LTM), defined in EN 480-11, and planar stereological method that was developed in the framework of the doctoral work. The results of LTM indicated the highest correlation between salt frost scaling of concrete and the specific surface of air void system in hardened concrete. The correlation between salt frost scaling and Powers spacing factor was rather small. Further studies showed that salt frost scaling of concrete is highly dependent on the quality of hydrated cement phase, which is not considered in the LTM parameters. Therefore, a combination of LTM with simple water sorption test for more suitable and significantly quicker estimation of adequacy of placed concrete in case of exposure to freezing and de-icing salts was proposed. Moreover, a true physical background of Powers spacing factor was studied in detail. On that basis the guidelines for an »updated« Powers factor, which would include the quality of hydrated cement paste as well, was proposed.

The long-term tests of concrete resistance to sulfate attack showed that in 16 month time period of concrete prisms immersion in the 4.4% Na₂SO₄ solution SCC with limestone powder and comparable vibrated concrete without limestone powder expanded, although hardly noticeably and by almost the same rate. However, the prisms from aerated SCC with limestone powder immersed in the sodium sulfate solution shrunk a bit more noticeably. Further tests of mechanical properties showed no difference in compressive strength of the concrete prisms immersed in sodium sulfate solution or water for 16 months. Bending tensile strength of prisms immersed in sodium sulfate solution, however, was on average 24% higher. Microscopical observations of the tested concrete specimens indicated a possibility of more intensive formation of crystals (secondary ettringite and possibly thaumasite) in SCC with high content of limestone powder in the case of exposure to sulfate attack. However, due to the denser matrix of such SCC these crystalline formations are found only near the surface of the specimens.

Classical manual LTM with microscope is a very time-consuming and tedious task. Therefore, an automation of this procedure was attempted in the framework of doctoral dissertation. After the extensive study of different approaches to this automation by different authors, a significant missing

link was identified. For an adequate automation of this quantitative stereological method, firstly the unequivocal identification of air voids must be achieved. Therefore, an original solution for the determination of adequate threshold value for the identification of contrasted air voids in hardened concrete was proposed. On the basis of this solution a computer application LMAir for automatic determination of air void characteristics in hardened concrete was developed. LMAir uses a flatbed scanner and image analysis software ImageJ. Test surface of concrete specimen must be contrast enhanced as well. Therefore, some solutions for the elimination of artefacts on the scanned image that are not air voids were proposed. In case of quality contrast enhancement the results from automated LMAir and classical manual LTM show high correlation.

Computer application PMAir for automatic determination of air void characteristics in hardened concrete, based on planar stereological rules, was developed as well. Planar analysis gives more accurate estimations of LTM parameters than linear analysis, as the whole test surface is analyzed and not only the regions along the traverse lines. The planar approach also provided an opportunity to develop a method for the determination of the rate of uniformity of dispersed air voids in the cement paste. However, the determination of air void size distribution by planar analysis is often regarded as ill-posed mathematical problem. The problem was solved by developing a special algorithm, which creates linear data from the results of the planar analysis, hence transforming the planar mathematical problem to a linear one, which has a unique solution.

VIRI

Uporabljeni viri

- Amziane, S., Ferraris, C.F., Koehler, E.P. 2005. Rheology measurement of fresh concrete with a mixing truck. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 539-544.
- ASTM C 457. 1998. Standard test method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. ASTM International: 14 str.
- Audenaert, K., Boel, V., De Schutter, G. 2002. Durability of self-compacting concrete, V: Shah, S.P., Daczko, J.A., Lingscheit, J.N. (ur.). First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete. Rosemont, IL, November 12-13, 2002. Hanley-Wood Publication: str. 337-341.
- Audenaert, K., Boel, V., De Schutter, G. 2005. Chloride penetration in self compacting concrete by non steady state migration test. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 367-372.
- Belaribi, N., Pons, G., Perrin, B. 1997. Delayed behaviour of concrete : influence of additions and aggregate characteristics in relation to moisture variations. Cement and Concrete Research 27, 9: 1429-1438.
- Berdajs, A., Bertoncej, J., Gruden, T., Murn, Z., Musi, A., Paulik, B., Slokan, I., Štembalj-Capuder, M., Zorman, F., Žitnik, D., Žitnik, J. 1998. Gradbeniški priročnik, 2. predelana in razširjena izdaja. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije.
- Billberg, P. 1999a. Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience. CBI report 2:99. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute: 80 f.
- Billberg, P. 1999b. Energy modified cement in SCC. V: Skarendahl, Å., Petersson, Ö. (ur.). Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 1999. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 591-602.
- Bokan-Bosiljkov, V., Žarnić, R., Čepon, F., Petan, S., Duh, D. 2001. Betoni vgradljivi brez kompaktiranja (SCC) za cestne objekte. Razvojno-raziskovalna naloga, končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 46 f.
- Bokan-Bosiljkov, V., Žarnić, R., Duh, D., Čepon, F. 2004a. Uporaba samozgoščevalnih betonov za povečanje trajnosti betonskih varnostnih ograj. Razvojno-raziskovalna naloga, končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 78 f.
- Bokan-Bosiljkov, V., Žarnić, R., Duh, D., Čepon, F. 2004b. Mehanske lastnosti in trajnost betonov z večjo vsebnostjo apnenčastih finih delcev. Razvojno-raziskovalna naloga, končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 74 f.
- Bokan-Bosiljkov, V., Duh, D., Žarnić, R. 2005. Salt frost scaling of different SCC made from locally available materials. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 355-360.

- Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., Irassar, E. 2000. Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement. *Cement and Concrete Research* 30: 703-708.
- Bonavetti, V.L., Rahhal, V.F., Irassar, E.F. 2001. Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research* 31, 6: 853-859.
- Bonfiglioli, B., Pascale, G. 2000. Internal Strain Measurements in Concrete Specimens in Compression. V: *Proceedings of 15th World Conference on Nondestructive Testing*. Roma, Italy, 15-21 October, 2000.
- Bronštejn, I.N., Semendjajev, K.A., Musiol, G., Mühlig, H. 1997. *Matematični priročnik, 2. predelana in dopolnjena izdaja*. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 967 str.
- Bui, V.K., Montgomery, D. 1999. Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone. V: Skarendahl, Å., Petersson, Ö. (ur.). *Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Stockholm, September 1999. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 227-238.
- Carlson, J., Sutter, L., Van Dam, T., Peterson, K.R. 2006. Comparison of Flatbed Scanner and RapidAir 457 System for Determining Air Void System Parameters of Hardened Concrete. *Transportation Research Record* 1979: 54-59.
- Chatterji, S., Gudmundsson, H. 1977. Characterization of Entrained Air Void System in Concrete by Means of an Image Analysis Microscope. *Cement and Concrete Research* 7: 423-428.
- Cimperman, L. 2008. Vpliv konsistence in deleža zraka v svežem betonu na značilnosti zračnih por v strjenem betonu. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 103 f.
- Cussigh, F. 2007. SCC in practice : opportunities and bottlenecks. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007*. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 21-27.
- Dequiedt, A.S., Coster, M., Chermant, L., Chermant, J.L. 2001. Distances between air-voids in concrete by automatic methods. *Cement and Concrete Composites* 23: 247-254.
- DIN 1048 Teil 5. 1991. Prüfverfahren für Beton : Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. = Testing methods for concrete : hardened concrete, specially prepared specimens.
- Dinakar, P., Babu, K.G., Santhanam, M. 2007. Mechanical properties of high volume fly ash self compacting concretes. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). *Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007*. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 651-657.
- Du, L., Folliard, K.J. 2005. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research* 35: 1463-1471.
- Duh, D. 2003. Obdelavnost in mehanske karakteristike aeriranih samozgoščevalnih betonov iz domačih materialov. *Diplomska naloga*. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 100 f.
- Duh, D., Mehle, J., Bokan-Bosiljkov, V. 2004. Odpornost samozgoščevalnih betonov proti zmrzovanju-tajanju v prisotnosti soli. V: Saje, F., Lopatič, J. (ur.). *Zbornik 26. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije*. Bled, 28.-29. oktober 2004. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 167-174.
- Duh, D., Bokan-Bosiljkov, V. 2005. Vpliv apnenčeve moke v obliki mineralnega dodatka na odpornost betona proti zmrzovanju/tajanju. V: *Konferenca o obstojnosti betonov v konstrukcijah*. Lipica, 10.-11. marec 2005. *Zbornik referatov*. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije: str. 93-100.

- Duh, D., Bokan-Bosiljkov, V. 2006. Vpliv poroznosti in vrste kamene moke na zmrzlinsko odpornost samozgoščevalnega betona. V: Konferenca »Vzdrževanje, zaščita in popravila betonskih konstrukcij«. Lipica, 9.-10. marec 2006. Zbornik referatov. Ljubljana, ZBS, Združenje za beton Slovenije: str. 130-137.
- Duh, D., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V. 2006. Odpornost površine aeriranih samozgoščevalnih betonov proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli – študija vpliva deleža vnešenega zraka in vrste mineralnega dodatka. Gradbeni vestnik 55: 238-244.
- Duh, D., Leskovar, R.T., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V. 2006. Validacija in avtomatizacija linijske mikroskopske analize kot metode za oceno ustreznosti vnešenih por v betonu. V: Saje, F. in Lopatič, J. (ur.). Zbornik 28. zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije. Bled, 19.-20. oktober 2006. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 197-206.
- Duh, D., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V. 2007. Avtomatizacija metode za ugotavljanje značilnosti zračnih por v strjenem betonu s pomočjo optičnega čitalca in analizatorja slike. V: Konferenca »Novo na področju betona 2007«. Lipica, 8.-9. marec 2007. Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije: str. 26-35.
- Duh, D., Žarnić, R., Bokan-Bosiljkov, V. 2008. Strategies for finding the adequate air void threshold value in computer assisted determination of air void characteristics in hardened concrete. Computers and Concrete 5, 2: 101-116.
- EN 197-1:2000. Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. CEN.
- EN 206-1:2000. Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. CEN.
- Esping, O. 2007. Slump flow values vs. Bingham parameters for high flowable mortars and concretes. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 315-322.
- Estellé, P., Perrot, A., Mélinge, Y., Lanos, C., Amziane, S. 2007. Rheological characterisation of self-compacting concrete from vane shear flow measurement. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 291-296.
- Feys, D., Heirman, G., De Schutter, G., Verhoeven, R., Vandewalle, L., Van Gemert, D. 2007. Comparison of two concrete rheometers for shear thickening behaviour of SCC. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 365-370.
- Feys, D., Verhoeven, R., De Schutter, G. 2007. Non-reversible time-dependent rheological properties of fresh SCC. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 359-364.
- Friebert, M. 2004. Durability of self compacting concrete – influence of the mineral admixtures. Brno, Brno University of Technology: 6 str.
- Georgiadis, A.S., Anagnostopoulos, N.S., Sideris, K.K. 2007. Mechanical characteristics of self-compacting concretes produced with different filler materials. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 611-618.
- Ghezal, A., Khayat, K.H. 2002. Optimizing self-consolidating concrete with limestone filler by using statistical factorial design methods. ACI Materials Journal 99, 3: 264-272.

- Gram, A., Farhang, A., Silfwerbrand, J. 2007. Computer-aided modeling and simulation of self-compacting concrete flow. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 455-460.
- Gram, H.-E., Piiparinen, P. 1999. Properties of SCC – especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. V: Skarendahl, Å., Petersson, Ö. (ur.). Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 1999. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 211-225.
- Graubner, C.-A., Proske, T. 2005. Formwork pressure : A new concept for the calculation. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 605-613.
- Head, M.K., Buenfeld, N.R. 2006. Confocal imaging of porosity in hardened concrete. *Cement and Concrete Research* 36: 896-911.
- Heikal, M., El-Didamony, H., Morsy, M.S. 2000. Limestone-filled pozzolanic cement. *Cement and Concrete Research* 30, 11: 1827-1834.
- Hewlett, P.C. 1998. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Fourth Edition. Elsevier, Butterworth-Heinemann: 1057 str.
- Hirox : 3-D Video-Microscope Solutions. 2002. Hirox-USA.
<http://www.hirox-usa.com> (24.12.2007).
- ImageJ : Image Processing and Analysis in Java. 2004. National Institutes of Health.
<http://rsb.info.nih.gov/ij/> (11.1.2008).
- Irassar, E.F., Bonavetti, V.L., Gonzalez, M. 2003. Microstructural study of sulfate attack on ordinary and limestone Portland cements at ambient temperature. *Cement and Concrete Research* 33, 1: 31-41.
- Jakobsen, U.H., Pade, C., Thaulow, N., Brown, D., Sahu, S., Magnusson, O., De Buck, S., De Schutter, G. 2006. Automated air void analysis of hardened concrete – a Round Robin study. *Cement and Concrete Research* 36: 1444-1452.
- JUS U.M1.025:1982. Beton – Određivanje statičkog modula elastičnosti pritiskom. = Concrete – Determination of static modulus of elasticity in compression. V: Bulat, R. (ur.). Zbirka jugoslovenskih standarda za primenu pravilnika BAB 87 o tehničkim normativima za beton in armirani beton. Simpozijum SDGKJ. Dubrovnik, 25.-27. april 1989. Beograd, JUDIMK, SDGKJ: str. 266-268.
- Kališnik, M. 2002. Temelji stereologije. Tretja, predelana izdaja. Ljubljana, Društvo za stereologijo in kvantitativno analizo slike: 133 str.
- Korošak, B., Šušteršič, J. 2007. Aproksimativna funkcija tlačne trdnosti betona. *Gradbeni vestnik* 56: 263-369.
- Khayat, K.H., Assaad, J. 2005. Use of rheological properties of SCC to predict formwork pressure. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 671-677.
- Khedr, S.A., Abou-Zeid, M.N., Abadir, J.M. 2006. Response of Air-Entrained Concrete to Severe Chemical Aggression. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*: 11-17.
- Larbi, J.A., Nijland, T.G., de Rooij, M.R. 2006. Concrete Microscopy Course 2006. Lecture notes. Technical University Delft: 29 str.

- Maerz, N.H. 1996. Reconstructing 3-D block size distributions from 2-D measurements on sections. V: Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurements of Blast Fragmentation. Canada, Quebec, Montreal, 23.-24. august 1996. FRAGBLAST: str. 39-43.
- Mechtcherine, V., Shyshko, S. 2007. Simulating the behaviour of fresh concrete using distinct element method. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 467-472.
- Mehle, J. 2004. Trajnost betonov z mineralnim dodatkom v obliki apnenčeve moke. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 115 f.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. 2006. Concrete : Microstructure, Properties, and Materials. Third Edition. New York, McGraw-Hill: 659 str.
- Mielich, O., Öttl, C. 2004. Practical investigation of the sulfate resistance of concrete from constructions units. Otto Graf Journal 15: 135-152.
- Modigell, M., Vasilic, K., Brameshuber, W., Uebachs, S. 2007. Modelling and simulation of the flow behaviour of self-compacting concrete. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 387-392.
- Muravljov, M. 1983. Građevinski materiali : Posebni deo (2) : 5. malteri, 6. betoni. Beograd, Građevinski fakultet, Naučna knjiga: str. 68.
- Muravljov, M. 2000. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, Građevinska knjiga Beograd: str. 35-36.
- Nehdi, M., Mindess, S., Aïtcin, P.C. 1998. Rheology of high-performance concrete : effect of ultrafine particles. Cement and Concrete Research 28: 687-697.
- Nehdi, M. 2000. Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials. Cement and Concrete Research 30: 1663-1669.
- O'Haver, T. 2006. Differentiation : The Importance of Smoothing Derivatives. University of Maryland, College Park, Department of Chemistry and Biochemistry.
<http://www.wam.umd.edu/~toh/spectrum/Differentiation.html> (11.1.2008).
- Ohser, J., Sandau, K. 2000. Considerations about the Estimation of the Size Distribution in Wicksell's Corpuscle Problem. Statistical Physics and Spatial Statistics 554: 18 str.
- Ouchi, M., Hibino, M., Ozawa, K., Okamura, H. 1998. A rational mix-design method for mortar in self-compacting concrete. V: Proceedings of Sixth South-East Asia Pacific Conference of Structural Engineering and Construction. Taipei, Taiwan: str. 1307-1312.
- Parra, C., Valcuende, M., Benlloch, J. 2007. Mechanical properties of self-compacting concretes. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 645-650.
- Pawlas, Z., Nyengaard, J.R., Vedel-Jensen, E.B. 2007. Particle sizes from sectional data. Research Report No. 01. Thiele Centre for Applied Mathematics in Natural Science: 16 f.
- PCA. 2003. Concrete Technical Support. Skokie, IL, Portland Cement Association: CD.
- Péra, J., Husson, S., Guilhot, B. 1999. Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites 21: 99-105.

- Persson, B. 2001. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and Concrete Research* 31, 2: 193-198.
- Persson, B. 2003a. Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 33, 3: 373-379.
- Persson, B. 2003b. Sulphate resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 33: 1933-1938.
- Petan, S. 2002. Uporaba kamene moke kot dodatnega praškastega materiala za izdelavo samo-zgoščevalnih betonov iz drobljenega kamenega agregata. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 108 f.
- Peterson, K., Sutter, L., Van Dam, T. 2002. Air Void Analysis of Hardened Concrete with a High-Resolution Flatbed Scanner. V: *Proceedings of the 24th International Conference on Cement Microscopy*. Kalifornija, San Diego, 7.-11. april 2007. International Cement Microscopy Association: str. 304-316.
- Petersson, O. 2001. Limestone powder as filler in self-compacting concrete – frost resistance and compressive strength. V: Ozawa, K., Ouchi, M. (ur.). *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*. Tokyo, October 2001. Coms Engineering Corporation: str. 277-284.
- Pezdiric, B. 2005. Vpliv poroznosti in vrste kamene moke na odpornost površine samozgoščevalnega betona proti zmrzovanju/tajanju. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 87 f.
- Piérard, J., Dieryck, V., Desmyter, J. 2005. Autogenous shrinkage of self-compacting concrete. V: *The Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Poster.
- Pinto, R.C.A, Hover, K.C. 2001. Frost and Scaling Resistance of High-Strength Concrete. Report RD122. Skokie, Illinois, Portland Cement Association: 75 f.
- Pleau, R., Pigeon, M., Laurencot, J.L. 2001. Some findings on the usefulness of image analysis for determining the characteristics of the air-void system on hardened concrete. *Cement and Concrete Composites* 23: 237-246.
- Poitevin, P. 1999. Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. *Cement and Concrete Composites* 21: 89-97.
- Powers, T.C. 1958. *The Physical Structure and Engineering Properties of Concrete*. Bulletin 90, Portland Cement Association, Skokie, IL.
- Ranc, R., Regourd, M., Cochet, G., Chaudourard, G. 1991. Durability of cements with fillers. V: Malhotra, V.M. (ur.). *Durability of Concrete*. ACI Special Publication 126, 2: str. 1239-1257.
- RapidAir 457 : Air void analyzer : linear traverse and modified point count. 2006. Denmark, Concrete Experts International. http://www.concrete-experts.com/pages/air_void.htm (21.12.2007).
- RILEM TC 148-SSC : Strain softening of concrete – test methods for compressive softening : Test method for measurement of the strain-softening behaviour of concrete under uniaxial compression : Recommendations. 2000. *Materials and Structures* 33: 347-351.
- RILEM TC 205-DSC : Durability of self-compacting concrete. Final Report. 2008. *Materials and Structures* 41, 2: 225-233.

- Roussel, N. 2007. A thixotropy model for fresh fluid concretes : theory and applications. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 267-274.
- Russ, J.C., Dehoff, R.T. 2000. Practical stereology. Second Edition. New York, Kluwer Academic / Plenum Publishers: 381 str.
- Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 157 f.
- Shackelford, J.F. 1990. Introduction to Materials Science for Engineers. Second edition. New York, Macmillan Publishing Company: 732 str.
- Shah, S.P., Ferron, R.P., Ferrara, L., Tregger, N., Kwon S.H. 2007. Research on SCC : Some emerging themes. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 3-14.
- SIST 1026:2004. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206-1. = Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity – Rules for the implementation of SIST EN 206-1. CEN.
- SIST EN 12350-2:2001. Preskušanje svežega betona – 2. del: Posed stožca. = Testing fresh concrete – Part 2: Slump test. CEN.
- SIST EN 12350-5:2001. Preskušanje svežega betona – 5. del: Razlez. = Testing fresh concrete – Part 5: Flow table test. CEN.
- SIST EN 12350-7:2001. Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka – Porozimetske metode. = Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods. CEN.
- SIST EN 12390-3:2002. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev. = Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens. CEN.
- SIST EN 12390-6:2001. Preskušanje strjenega betona – 6. del: Natezna trdnost preskušancev. = Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens. CEN.
- SIST-TS CEN/TS 12390-9:2006. Preskušanje strjenega betona – 9. del: Odpornost proti zmrzovanju- tajanju – Luščenje. = Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling. CEN.
- SIST EN 197-1:2002. Cement – 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente. = Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements. CEN.
- SIST EN 1992-1-1:2005. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe. = Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN.
- SIST EN 206-1:2003. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost. = Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity. CEN.
- SIST EN 480-11:2005. Kemijski dodatki za beton, malto in injekcijsko maso – Preskusne metode – 11. del: Ugotavljanje značilnosti zračnih por v strjenem betonu. = Admixtures for concrete, mortar and grout – Test methods – Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete. CEN.
- SIST EN 772-11:2000. Metode preskušanja zidakov – 11. del: Ugotavljanje kapilarnega vpijanja vode betonskih zidakov ter zidakov iz umetnega in naravnega kamna in začetna stopnja vpijanja vode opečnih zidakov. = Methods of test for masonry units – Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete,

manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units. CEN.

Skarendahl, Å. (ur.), Petersson, Ö. (ur.) 2000. Self-Compacting Concrete. State-of-the-Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Report 23. RILEM Publications S.A.R.L.: 154 str.

Sonerbi, M., Bartos, P.J.M., Zhu, W., Gibbs, J., Tamimi, A. 2000. Task 4 – Properties of hardened concrete. Final report. Brite EuRam Project No. BE96-3801/Contact BRPR-CT96-0366: 73 f.

Snyder, K., Natesaiyer, K., Hover, K. 2001. The Stereological and Statistical Properties of Entrained Air Voids in Concrete : A Mathematical Basis for Air Void System Characterisation. V: Mindess, S., Skalny, J. (ur.). Materials Science of Concrete VI. Ohio, The American Ceramic Society: str. 129-214.

Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. 2002. EFNARC: 32 f.

St John, D.A., Poole, A.B., Sims, I. 1998. Concrete Petrography : A handbook of investigative techniques. Great Britain, Arnold: 474 str.

The European Guidelines for Self-Compacting Concrete : Specification, Production and Use. 2005. EFNARC: 63 f.

Thrane, L.N., Szabo, P., Geiker, M., Stang, H., Pade, C. 2005. Simulation and verification of flow in test methods. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 551-556.

Thrane, L.N., Pade, C., Svensson, T. 2007. Estimation of Bingham rheological parameters of SCC from slump flow measurement. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 353-358.

Torres, S.M., Sharp, J.H., Swamy, R.N., Lynsdale, C.J., Huntley, S.A. 2003. Long term durability of Portland-limestone cement mortars exposed to magnesium sulfate attack. Cement & Concrete Composites 25: 947-954.

Trägårdh, J. 1999. Microstructural features and related properties of self-compacting concrete. V: Skarendahl, Å., Petersson, Ö. (ur.). Proceedings of the First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 1999. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 175-186.

Trtnik, J. 2004. Uporaba elektrofiltrskega pepela kot mineralnega dodatka vibriranim in samo-zgoščevalnim betonom. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 65 f.

Turk, F. 2005. Zasnova in lastnosti samozgoščevalnih betonov izdelanih z drobljenim agregatom iz kamnoloma Sveta Ana in z naravnim savskim prodom iz peskokopa in separacije Stari Grad. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 82 f.

Turk, G. 2005. Verjetnostni račun in statistika. Delovna različica učbenika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 234 str.

Tviksta, L.G. 2000. Task 9 : Guidelines, Self-Compacting Concrete. Brite EuRam Contract No. BRPR-CT96-0366. CORDIS Publications: 48 str.

Uebachs, S., Brameshuber, W. 2005. Numerical simulation of the flow behaviour of self-compacting concretes using fluid mechanical methods. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM

Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 597-604.

Ulm, F.J. 2005. Genoming GeoMaterials : from Nanoindentation to the Prediction of Structural Performance. V: Glasgow Open Workshop on Current Challenges in the Integration of Computational Modeling and Micro/Nano Characterisation of Cementitious Materials. Glasgow, 10-11 January 2005. Centre for Microstructural Modelling and Characterisation of Cementitious Materials: 236 str.

Van Waarde, F., Koenders, E.A.B., Nijeholt, J.A.L., Walraven, J.C. 2007. Theoretical and practical investigations on SCC formwork. V: De Schutter, G. and Boel, V. (ur.). Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete – SCC 2007. Belgija, Ghent, 3-5 September 2007. RILEM Publications S.A.R.L.: str. 417-422.

Vetrih, U. 2004. Trdnostne karakteristike različno obdelavnih betonov iz Soškega kamenega agregata. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 64 f.

Watanabe, K., Shinya, K., Ono, H., Tanigawa, Y. 2005. Effects of agitation and shear stress on rheological properties of fresh concrete. V: Shah, S.P. (ur.). Proceedings of the Second North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete and the Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Chicago, IL, October 30-November 2, 2005. Hanley Wood Publication: str. 545-550.

Weese, J., Korat, E., Maier, D., Honerkamp, J. 1997. Unfolding Sphere Size Distributions with a Density Estimator Based on Tikhonov Regularization. Journal of Computational Physics 138: 331-353.

Wikipedia : The Free Encyclopedia. 2008.
<http://en.wikipedia.org> (10.1.2008).

Zalocha, D., Kasperkiewicz, J. 2005. Estimation of the structure of air entrained concrete using a flatbed scanner. Cement and Concrete Research 35: 2041-2046.

Zhang, Z., Ansari, F., Vitillo, N. 2005. Automated Determination of Entrained Air-Void Parameters in Hardened Concrete. ACI Materials Journal 102, 1: 42-48.

Zhu, W., Bartos, P.J.M. 2003. Permeation properties of self-compacting concrete. Cement and Concrete Research 33, 6: 921-926.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.

Ostali viri

Advanced Research of an Image Analysis System for Hardened Concrete. 2003. Research Development and Technology, Missouri Department of Transportation. Research Investigation 98-006, Brief.

Baumgart, C.W., Cave, S.P., Linder, K.E. 2002. Performance Enhancement of the Automated Concrete Evaluation System. Final Report, Project Accomplishments Summary. United States Department of Energy, Honeywell: 12 f.

Bokan-Bosiljkov, V. 1996. Modificirani betoni pri visokih temperaturah. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo: 186 f.

Bokan-Bosiljkov, V. 2002. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. Cement and Concrete Research 33: 1279-1286.

-
- Elsen, J. 2001. Automated air void analysis on hardened concrete : Results of a European inter-comparison testing program. *Cement and Concrete Research* 31: 1027-1031.
- Menéndez, G., Bonavetti, V., Irassar, E.F. 2003. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnance slag. *Cement and Concrete Composites* 25: 61-67.
- Peterson, K., Van Dam, T., Sutter, L. 2001. Determination of the Paste to Void Proximity Distribution in Two Dimensions from a Cross-Section through a Concrete Specimen. V: Proceedings of the 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials. Grčija, Atene, hotel Divani Apollon Palace, 4.-7. september 2001: str. 611-617.
- Preparation of concrete samples for Air Void Analysis. 2003. The Concrete Experts International Website Newsletter 05: 3 f.

Priloga A: SKRIPT ZA ImageJ – PREDLAGANA LINIJSKA THR METODA

```
// VHODNI PODATKI
// *****
ThrZac = 20; //začetna vrednost za Threshold
ThrKor = 10; //korak za Threshold
n = 1; //število Threshold-ov
m = 23; //število linij
vz = 1; //številk vzorca

h = getHeight();
if (m == 9) {
    Y = newArray(280, 560, 840, h/2-280, h/2, h/2+280, h-840, h-560, h-280);
} else {
    LinKor = (h) / (m + 1); //korak med linijami v [pix]
    Y = newArray(m);
    Y[0] = LinKor;
    for (i=1; i<m; i++) {
        Y[i] = Y[i-1] + LinKor; //Y-koordinate izbranih linij v [pix]
    }
}

if (Y.length != m) exit("NAPAKA! Stevilo Y-koordinat ne ustreza številu linij!");

// PRIPRAVA PODATKOV
// *****
Thr = ThrZac;
w = getWidth();
l = newArray(m); //vektor kumulativne dolžine linij
run("Set Measurements...", "area redirect=None decimal=3");
start = getTime();

// THRESHOLDING
// *****
for (i=0; i<n; i++) { // i ... za vsak izbran Threshold
    setThreshold(Thr, 255);
    for (j=0; j<m; j++) { // j ... za vsako izbrano linijo
        run("Specify...", "width="+w+" height=1 x=0 y="+Y[j]+" ");
        if (j == 0) {
            run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing
            display clear record"); //pri 1. liniji naj se varnostno izbrišejo
            //kaksnikoli predhodni rezultati, če obstajajo
            l[j] = w;
        } else {
            run("Analyze Particles...", "size=0-Infinity circularity=0.00-1.00 show=Nothing
            display record"); //rezultati naslednjih linij se dopisujejo k
            //predhodnim
            l[j] = l[j-1] + w;
        }
        showProgress((i*m+j+1), n*m);
    }
    if (n == 1) {
        saveAs("Measurements", "C:\\LMAir\\"+vz+".txt");
    } else {
        saveAs("Measurements", "C:\\LMAir\\"+Thr+".txt");
    }
    Thr=Thr+ThrKor;
}

for (i=0; i<l.length; i++)
    print(l[i]);
if (n == 1) {
    saveAs("Text", "C:\\LMAir\\linije"+vz+".txt");
} else {
    saveAs("Text", "C:\\LMAir\\linije.txt");
}
showStatus("Cas izvedbe: "+(getTime()-start)/1000/60+" min");
```

Priloga B: PREGLEDNICA ZA DOLOČITEV PORAZDELITVE ZRAČNIH POR Z REDUCIRANIM ŠTEVILOM VELIKOSTNIH RAZREDOV

Stolpec	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Količina	Razred	Širina razreda	Izmerjeno št. tetiv v razredu	Frekvenca tetiv	Verjetnost nastanka tetive v 1 mm ³	Verjetno št. tetiv v 1 mm ³	Verjetno št. por v 1 mm ³	Prostor- nina pore	Delež zrača	Kumulativni delež zrača	Gostota verjetnosti tetiv	Gostota verjetnosti velikosti zračnih por
Vir			Analizator slike ali mikroskop	Stolpec 3 deljen s T_{tot}	Stolpec 3 deljen s stolp. 5	Stolp. 4 deljen s stolp. 5	Soležne razlike v stolp. 6	Stolp. 7 pomn. s stolp. 8 krat 100	Stolp. 9 kumulativno	Stolpec 3 deljen s širino razreda	Stolpec 7 deljen s širino razreda	
Enota		μm		mm ⁻¹	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ⁻³	mm ³	%	%	%	%
	1	(0, 40]			0,001414			3,351E-05				
	2	(40, 60]			0,001649			1,131E-04				
	3	(60, 80]			0,002278			2,681E-04				
	4	(80, 100]			0,002906			5,236E-04				
	5	(100, 120]			0,003534			9,048E-04				
	6	(120, 140]			0,004163			1,437E-03				
	7	(140, 180]			0,010210			3,054E-03				
	8	(180, 220]			0,012723			5,575E-03				
	9	(220, 260]			0,015237			9,203E-03				
	10	(260, 300]			0,017750			1,414E-02				
	11	(300, 400]			0,055371			3,351E-02				
	12	(400, 500]			0,071079			6,545E-02				
	13	(500, 1000]			0,591012			5,236E-01				
	14	(1000, 2000]			2,360121			4,189E+00				
	15	(2000, 3000]			3,930918			1,414E+01				
	16	(3000, 4000]			5,501714			3,351E+01				

OPOMBA: V primeru negativnih vrednosti se lahko št. razredov še zmanjša, sicer jih je potrebno zadržati.

Priloga C: FUNKCIJA ZA Matlab – PREVEDBA PLANARNIH PODATKOV NA LINIJSKE

```
function [Ta]=plan2lin(DATA,PRE);

%-----
% Funkcija določi linijske podatke iz planarnih, tj. število in dolžine
% tetiv iz vseh identificiranih ploščin 2-D sledi zračnih por.
%
% Avtor: DAVID DUH
% Zadnja sprememba: 5.12.2007
%-----

dPIX = (DATA ./ pi) .^ 0.5 .* 2;           %stolpec premerov krogov, določenih iz ploščin
                                         %2-D sledi zračnih por, v [pix]
N = round(dPIX);                         %stolpec števila presečnih tetiv za 2-D sled j-te
                                         %zračne pore
d = dPIX ./ PRE .* 1000;                 %stolpec premerov krogov, določenih iz ploščin
                                         %2-D sledi zračnih por, v [um]
Ta = [];                                  %stolpec dolžin vseh tetiv v [um]
k = 1;                                    %globalni števec vseh tetiv
okno = waitbar(0,'Creating linear data from planar data...');

for j=1:length(DATA)                     %for zanka po vseh identificiranih 2-D sledih
                                         %zračnih por
    for i=1:N(j)                          %for zanka po vseh pričakovanih tetivah 2-D sledi
                                         %j-te zračne pore
        if i == 1                          %prva tetiva
            kota = d(j) / N(j) / 2;        %kota prve tetive
            Ta(k) = 2 * ( (d(j)/2)^2 - (kota - d(j)/2)^2 )^0.5;
            k = k + 1;
        else                                %ostale tetive
            kota = kota + d(j) / N(j);      %kote ostalih tetiv
            Ta(k) = 2 * ( (d(j)/2)^2 - (kota - d(j)/2)^2 )^0.5;
            k = k + 1;
        end
    end
    waitbar(j/length(DATA));
end

close(okno);
Ta = Ta';
```

**Priloga D: PREGLEDNICA ZA GROBO OCENO PORAZDELITVE ZRAČNIH POR IZ
REZULTATOV PLANARNE ANALIZE**

<i>Stolpec</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>Količina</i>	Razred	Širina razreda	Delež zraka	Kumulativni delež zraka	Prostorina pore	Ocena št. por v 1 mm ³	Gostota verjetnosti velikosti zračnih por
<i>Vir</i>		<i>Analizator slike, po Delesseju</i>	<i>Stolp. 3 kumulativno</i>			<i>Stolpec 3 deljen s stolpcem 5 deljeno s 100</i>	<i>Stolpec 6 deljen s širino razreda</i>
<i>Enota</i>		μm	%	%	mm ³	mm ⁻³	
	1	(0, 10]			5,24E-07		
	2	(10, 20]			4,19E-06		
	3	(20, 30]			1,41E-05		
	4	(30, 40]			3,35E-05		
	5	(40, 50]			6,54E-05		
	6	(50, 60]			1,13E-04		
	7	(60, 80]			2,68E-04		
	8	(80, 100]			5,24E-04		
	9	(100, 120]			9,05E-04		
	10	(120, 140]			1,44E-03		
	11	(140, 160]			2,14E-03		
	12	(160, 180]			3,05E-03		
	13	(180, 200]			4,19E-03		
	14	(200, 220]			5,58E-03		
	15	(220, 240]			7,24E-03		
	16	(240, 260]			9,20E-03		
	17	(260, 280]			1,15E-02		
	18	(280, 300]			1,41E-02		
	19	(300, 350]			2,24E-02		
	20	(350, 400]			3,35E-02		
	21	(400, 450]			4,77E-02		
	22	(450, 500]			6,54E-02		
	23	(500, 1000]			5,24E-01		
	24	(1000, 1500]			1,77E+00		
	25	(1500, 2000]			4,19E+00		
	26	(2000, 2500]			8,18E+00		
	27	(2500, 3000]			1,41E+01		
	28	(3000, 4000]			3,35E+01		

OPOMBA: V primeru negativnih vrednosti se lahko št. razredov zmanjša, sicer jih je potrebno zadržati.