

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*



Jamova cesta 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

**DRUGG** – Digitalni repozitorij UL FGG  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Birtič, T., 2014. Primerjava metod za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po postopku ASTM C1138. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Kryžanowski, A., somentor Schnabl, S.): 101 str.

Datum arhiviranja: 02-07-2014

University  
of Ljubljana

Faculty of  
*Civil and Geodetic  
Engineering*



Jamova cesta 2  
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia  
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

**DRUGG** – The Digital Repository  
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Birtič, T., 2014. Primerjava metod za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po postopku ASTM C1138. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Kryžanowski, A., co-supervisor Schnabl, S.): 101 pp.

Archiving Date: 02-07-2014

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI  
PROGRAM VODARSTVO IN  
KOMUNALNO INŽENIRSTVO

Kandidat:

**TADEJ BIRTIČ**

**PRIMERJAVA METOD ZA VREDNOTENJE  
REZULATOV PRESKUSA ABRAZIJSKE ODPORNOSTI  
BETONOV PO POSTOPKU ASTM C1138**

Diplomska naloga št.: 231/VKI

**COMPARISON OF METHODS FOR EVALUATING THE  
ABRASION RESISTANCE OF CONCRETE IN  
ACCORDANCE WITH THE ASTM C1138**

Graduation thesis No.: 231/VKI

**Mentor:**

doc. dr. Andrej Kryžanowski

**Predsednik komisije:**

izr. prof. dr. Dušan Žagar

**Somentor:**

doc. dr. Simon Schnabl

**Član komisije:**

prof. dr. Franc Steinman

Ljubljana, 30. 06. 2014

## **STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

---

**IZJAVE**

Podpisani Tadej Birtič izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:

»Primerjava metod za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po postopku ASTM C 1138.«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 4. 6. 2014

Tadej Birtič

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

<b>UDK:</b>	<b>620.1/.2:691.3 (043.2)</b>
<b>Avtor:</b>	<b>Tadej Birtič</b>
<b>Mentor:</b>	<b>doc. dr. Andrej Kryžanowski</b>
<b>Somentor:</b>	<b>doc. dr. Simon Schnabl</b>
<b>Naslov:</b>	<b>Primerjava metod za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po postopku ASTM C 1138</b>
<b>Tip dokumenta:</b>	<b>Diplomska naloga – univerzitetni študij</b>
<b>Obseg in oprema:</b>	<b>101 str., 18 pregl., 61 sl., 6 en.</b>
<b>Ključne besede:</b>	<b>abrazija, abrazijska erozija, abrazijska odpornost, abrazijsko odporen beton, laboratorijske metode, primerjava metod, analiza abrazijske odpornosti</b>

### **Izveček**

V diplomski nalogi smo primerjali različne metode za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po postopku ASTM C 1138. Postopek ASTM simulira proces vodne abrazije z obrusom in se v veliki meri uporablja za določanje abrazijske odpornosti betonov namenjenih za izdelavo izpostavljenih površin vodnih zgradb.

Izdelane betonske sestave so namenjene za izdelavo izpostavljenih površin na vodnih zgradbah, zato so v teoretičnem delu opisani abrazijska erozija na vodnih zgradbah, postopki za preizkušanje abrazijske odpornosti betona, raziskave abrazijsko odpornih betonov v naravi ter materiali in tehnike, ki se uporabljajo za zaščito pred abrazijsko erozijo na vodnih zgradbah. Zaradi pogoste uporabe abrazijsko odpornega betona na izpostavljenih delih vodnih zgradb je le ta podrobneje opisan.

Za potrebe izvedbe eksperimentalnega dela smo izdelali šest različnih betonskih mešanic in na njih opravili preiskave svežega betona. Iz betonskih mešanic smo izdelali preskušance, katerim smo določili tlačno trdnost, modul elastičnosti ter opravili preskus abrazijske odpornosti po postopku ASTM C 1138. Rezultate preskusa abrazijske odpornosti smo beležili s tremi metodami. Z obstoječo, predpisano v standardu ASTM C 1138, z uporabo rotacijskega laserskega profilomera, ter z metodo pri kateri smo merili spremembo nivoja vodne gladine v posodi. V okviru diplomske naloge smo opravili primerjavo teh metod ter podali predloge za izboljšave posameznih metod. Poleg tega smo opravili tudi analizo abrazijske odpornosti posameznih sestav betona, ki smo jih uporabili za izdelavo preskušancev, ugotavljali pa smo tudi soodvisnosti med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo ter med modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo.

**BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 620.1/.2:691.3 (043.2)  
**Author:** Tadej Birtič  
**Supervisor:** Asist. Prof. Andrej Kryžanowski, Ph.D.  
**Co-supervisor:** Asist. Prof. Simon Schnabl, Ph.D.  
**Title:** Comparison of methods for evaluating the abrasion resistance of concrete in accordance with the ASTM C 1138  
**Document type:** Graduation Thesis – University studies  
**Notes:** 101 p., 18 tab., 61 fig., 6 eq.  
**Keywords:** abrasion, abrasion erosion, abrasion resistance, abrasion concrete, laboratory methods, comparison of methods, analysis of abrasion resistance

**Abstract**

In this thesis we compared different evaluation methods and their with the results of standard test method ASTM C 1138. This method simulates the abrasive action of waterborne particles and is most commonly used for determining abrasion resistance of concrete, designed for use in hydraulic structures.

In theoretical section of the thesis we described abrasion erosion in hydraulic structures, different test methods used for determining abrasion resistance of concrete along with different materials and techniques for protection of hydraulic structures from abrasion erosion. Furthermore we discussed abrasion resistant concrete in more detail because of its frequent use in hydraulic structures.

For the purpose of the experimental work, we designed six different concrete mixtures from which we cast several specimens. We made specimens for a compressive strength test, an elastic modulus test and for testing abrasion resistance of concrete. The results of the abrasion resistance test were evaluated using three different methods. The first one was the current method specified in standard ASTM C 1138. The second method involved using a rotational laser profilometer and the third one was method where we measured the change in level of the water level in container. A comparison of these three methods were made and suggestions for their improvement followed. In addition, we analysed the abrasion resistance of manufactured concrete mixtures.

## ZAHVALA

Zahvaljujem se:

mentorju doc. dr. Andreju Kryžanowskemu in somentorju doc. dr. Simonu Schnablu za vso pomoč, nasvete ter njun korekten odnos,

celotnemu kolektivu IRMA d.o.o., še posebej dr. Jakobu Šušteršiču, da so mi omogočili izvedbo preskusa ter za vse nasvete in strokovno pomoč,

doc. dr. Matiji Jezeršku s Fakultete za strojništvo, Univerza v Ljubljani, za odobritev uporabe rotacijskega laserskega profilomera,

Urbanu Pavlovčiču univ. dipl. inž. str. s Fakultete za strojništvo, Univerza v Ljubljani, za takojšno pomoč ter za vso opravljeno delo,

sošolcem in prijateljem,

ter puncji, sestri in staršem za podporo.

**KAZALO VSEBINE**

<b>BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK .....</b>	<b>III</b>
<b>BIBLIOGRAPHIC - DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
<b>KAZALO VSEBINE .....</b>	<b>VI</b>
<b>KAZALO PREGLEDNIC.....</b>	<b>X</b>
<b>KAZALO SLIK.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 Opredelevitev raziskovalnega problema.....	1
1.2 Namen diplomske naloge .....	2
<b>2 ABRAZIJSKA EROZIJA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Splošno o abrazijski eroziji .....	4
2.2 Vodna erozija .....	5
2.3 Tribološki proces .....	5
<b>3 ABRAZIJSKA EROZIJA NA VODNIH ZGRADBAH.....</b>	<b>9</b>
3.1 Splošno .....	9
3.2 Parametri, ki vplivajo na pojav abrazijske erozije.....	10
3.2.1 Vpliv vpadnega kota na obrabo .....	10
3.2.2 Vpliv prisotnosti vode na obrabo.....	11
3.2.3 Vpliv lastnosti abrazijskih zrn na obrabo .....	11
3.2.4 Vpliv hitrosti vodnega toka na obrabo.....	12
3.2.5 Karakteristike vodotoka .....	13
3.3 Vodne zgradbe, ki so podvržene abrazijski eroziji .....	13
3.3.1 Razlogi za nastanek škode na podslapju ter ukrepi in priporočila za zmanjšanje škode.....	14
3.4 Razvoj abrazijske erozije na betonskih vodnih zgradbah.....	16
3.5 Vzdrževanje .....	17
3.6 Slikovni primeri abrazijske erozije na vodnih zgradbah.....	17
<b>4 PRESKUSI ZA DOLOČITEV ABRAZIJSKE ODPORNOSTI BETONA .....</b>	<b>20</b>
4.1 Modeliranje procesa abrazije v laboratoriju.....	20
4.2 Postopki za preizkušanje abrazijske odpornosti v laboratoriju .....	20
4.2.1 Metoda po ASTM C 1138 .....	20
4.2.2 Preskus odpornosti betona proti obrusu (Böhmejeva metoda) .....	21
4.2.3 Metoda po Banii .....	22



4.3	Preizkusi v naravi .....	22
4.4	Primeri preizkusov v naravi .....	23
4.4.1	Raziskave v obtočnem prodnem izpustu akumulacije Runcahez.....	23
4.4.2	Raziskave v podslapju hidroelektrarne Vrhovo .....	28
<b>5</b>	<b>MATERIALI IN TEHNIKE, S KATERIMI IZBOLJŠAMO ABRAZIJSKO ODPORNOST.....</b>	<b>34</b>
5.1	Zaščita izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo s tlakovanjem površine.....	34
5.1.1	Bazaltni tlakovci .....	36
5.1.2	Tlakovci iz naravnega kamna .....	36
5.1.3	Les .....	37
5.2	Zaščita izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo s premazi in tankimi oblogami.....	37
5.3	Zaščita izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo z jekleno pločevino.....	37
5.4	Zaščita izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo z rešetkami iz železniških tirov .....	38
5.5	Zaščita izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo z betonsko oblogo.....	39
<b>6</b>	<b>ABRAZIJSKO ODPORNI BETON.....</b>	<b>40</b>
6.1	Parametri, ki vplivajo na abrazijsko odpornost betona .....	40
6.1.1	Kvaliteta agregata .....	41
6.1.2	Tlačna trdnost .....	42
6.1.3	Vodocementno razmerje .....	43
6.1.4	Cement in cementni kamen.....	44
6.1.5	Dodatki.....	45
6.1.6	Vrste betonov .....	45
6.1.7	Beton z dodatkom mikrosilike .....	45
6.1.8	Beton s polimeri .....	46
6.1.9	Vlaknasto armirani beton.....	47
6.1.10	Beton z dodatkom gumenega granulata .....	47
6.1.11	Površinska obdelava betona .....	48
6.1.12	Nega betona .....	49
<b>7</b>	<b>IZVEDBA EKSPERIMENTALNEGA DELA.....</b>	<b>50</b>
7.1	Projektna izhodišča .....	50
7.2	Uporabljeni materiali .....	50
7.2.1	Cement .....	50
7.2.2	Agregat .....	51

7.2.3	Voda.....	51
7.2.4	Mineralni dodatek.....	51
7.2.5	Kemijski dodatki .....	51
7.2.6	Vlakna .....	51
7.2.7	Gumeni granulat.....	52
7.3	Sestave betonskih mešanic.....	53
7.4	Priprava betonskih mešanic .....	54
7.5	Določitev lastnosti svežega betona .....	55
7.6	Preiskave na strjenem betonu .....	57
7.6.1	Preskus tlačne trdnosti betona po standardu SIST EN 12390-2 .....	57
7.6.2	Preskus statičnega elastičnega modula betona po standardu DIN 1048, Teil 5 .....	59
7.7	Preskušanje abrazijske odpornosti .....	60
7.7.1	Preskus abrazijske odpornosti po standardu ASTM C 1138 .....	60
7.8	Opis metod s katerimi določamo obrabo .....	63
7.8.1	Postopek določanja obrabe preskušancev z metodo s tehtanjem.....	64
7.8.1.1	Opis postopka tehtanja.....	64
7.8.1.2	Izračun prostornine preskušanca:.....	65
7.8.1.3	Izračun prostornine obrabe zaradi abrazijsko erozijskega procesa v času trajanja preskusa t .....	65
7.8.1.4	Izračun globine obrabe v času trajanja preskusa t.....	65
7.8.2	Postopek določanja obrabe preskušancev po metodi z rotacijskim laserskim profilometerom.....	66
7.8.2.1	Izvedba tridimenzionalnega (3D) merjenja .....	66
7.8.2.2	Opis rotacijskega laserskega profilomera .....	66
7.8.2.3	Postopek merjenja.....	67
7.8.2.4	Obdelava zajetih podatkov .....	68
7.8.3	Postopek določanja obrabe preskušancev po metodi z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi .....	69
7.8.3.1	Zahteve in pripomočki .....	69
7.8.3.2	Opis postopka določanja obrabe z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi.....	70
7.8.3.3	Določanje prostornine obrabe preskušanca.....	71
7.9	Analiza rezultatov .....	72
7.9.1	Meritve po standardnem postopku .....	72
7.9.1.1	Analiza rezultatov, dobljenih z metodo s tehtanjem .....	72
7.9.1.2	Predlagane izboljšave metode s tehtanjem .....	74
7.9.2	Meritve z rotacijskim laserskim profilometrom .....	74
7.9.2.1	Analiza rezultatov, dobljenih po metodi z rotacijskim laserskim profilometerom.....	74

7.9.2.2	Predlagane izboljšave metode z rotacijskim laserskim profilomerom.....	83
7.9.3	Meritve z volumetrično metodo.....	83
7.9.3.1	Analiza rezultatov dobljenih po metodi z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi .....	83
7.9.3.2	Predlagane izboljšave metode z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi.....	85
7.9.4	Primerjava rezultatov med standardno metodo in metodo z rotacijskim laserskim profilomerom.....	85
7.9.5	Vpliv premera na globino obrabe.....	88
7.10	Primerjave soodvisnosti .....	90
7.10.1	Soodvisnost med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo.....	90
7.10.2	Soodvisnost med modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo.....	91
7.11	Zaključki analize rezultatov .....	91
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČEK .....</b>	<b>94</b>
	<b>VIRI .....</b>	<b>97</b>

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1:	Prikaz vplivnih parametrov za opredelitev analize obrabe na vodnih zgradbah	7
Preglednica 2:	Prikaz načina obrabe za primere pojava triboloških sistemov na vodnih zgradbah	8
Preglednica 3:	Pregled receptur betonskih mešanic za pripravo 1m <sup>3</sup> betona	30
Preglednica 4:	V laboratoriju določeni parametri betonskih sestav	31
Preglednica 5:	Recepture posameznih betonskih mešanic	54
Preglednica 6:	Rezultati preizkušanja svežega betona za posamezne sestave betona	56
Preglednica 7:	Stopnje poseda po SIST EN 206-1:2003	57
Preglednica 8:	Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti preskušancev po dveh in 28-ih dneh	58
Preglednica 9:	Povprečne vrednosti statičnih elastičnih modulov pri 28 dneh	59
Preglednica 10:	Prikaz rezultatov preskusa abrazijske odpornosti po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo s tehtanjem za različne sestave betona	72
Preglednica 11:	Prikaz rezultatov preskusa abrazijske odpornosti (povprečna prostornina in globina obrabe) po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom za različne sestave betona	75
Preglednica 12:	Prikaz rezultatov preskusa abrazijske odpornosti (največja in najmanjša globina obrabe ter standardni odklon) po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom za različne sestave betona	76
Preglednica 13:	Prikaz delnih rezultatov preskusa abrazijske odpornosti po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo z merjenjem spremembe prostornine preskušancev	84
Preglednica 14:	Prikaz primerjav prostornine obrabe preskušancev po končanem postopku ASTM C 1138 po metodi s tehtanjem in po metodi z rotacijskim laserskim profilomerom	86
Preglednica 15:	Prikaz primerjave globin obrabe preskušancev po končanem postopku ASTM C 1138 po metodi s tehtanjem in po metodi z rotacijskim laserskim profilomerom	87
Preglednica 16:	Prikaz izmerjenih vrednosti premera pri metodi s tehtanjem in metodi z RLP	88

Preglednica 17: Rezultati globine obrabe po korekciji premera pri metodi s tehtanjem	89
Preglednica 18: Rezultati razlike v obrabi brez korekcije in po opravljeni korekciji	90

**KAZALO SLIK**

Slika 1:	Prikaz gibanja rinjenih plavin po površini	5
Slika 2:	Primer nastalih poškodb zaradi delovanja abrazije	9
Slika 3:	Vpliv vpadnega kota na obrabo pri različnih materialih po Kunterdingu (1991)	11
Slika 4:	Transportna sposobnost vodotoka	12
Slika 5:	Prikaz podslapja	15
Slika 6:	Proces abrazijske erozije na betonski površini	16
Slika 7:	Zaradi delovanja abrazije močno poškodovan deflektor v podslapju	17
Slika 8:	Poškodba prelivne sekcije betonske hudourniške pregrade zaradi delovanja abrazije	17
Slika 9:	Pojav abrazijske erozije na prelivnem polju HE Krško	18
Slika 10:	Poškodbe v podslapju pregrade Kinuza Dam	18
Slika 11:	Poškodovan razbijač	18
Slika 12:	Pojav abrazijske erozije na betonski podlagi	19
Slika 13:	Naprava za izvedbo preskusa po Böhmeju	21
Slika 14:	Naprava za izvedbo preskusa po Banii	22
Slika 15:	Prikaz situacije obtočnega prodnega izpusta in akumulacije Runcahez	23
Slika 16:	Poškodbe dna obtočnega prodnega izpusta	24
Slika 17:	Čas obratovanja obtočnega izpusta v enem letu v obdobju med 1960 in 2000	24
Slika 18:	Prikaz razporeditve preizkusnih polj	25
Slika 19:	Izvajanje geodetskih meritev	26
Slika 20:	Povprečna obraba	26
Slika 21:	Prikaz meritev na preizkusnih poljih in rezultatov, dobljenih s postopkom po Banii	28
Slika 22:	Hidroelektrarna Vrhovo	29
Slika 23:	Situacijski prikaz poskusnih polj v podslapju prelivnega polja HE Vrhovo in kontrolnih profilov za meritev obrabe osnovnega betona	31
Slika 24:	Situacijski prikaz razporeditve merskih točk na posameznem preizkusnem polju	32
Slika 25:	Primerjava obrabe med sestavami betonov po ASTM C 1138 in meritvami na prelivnem polju HE Vrhovo	33
Slika 26:	Prikaz pravilne razporeditve fug glede na smer toka	35

Slika 27:	Prikaz vgradnje tlakovcev na podlago	35
Slika 28:	Poškodbe tlakovane površine, nastale zaradi abrazijske erozije	36
Slika 29:	Zaščita podlage z oblogo	37
Slika 30:	Zaščita podlage z jekleno pločevino	38
Slika 31:	Zaščita podlage z rešetkami iz železniških tirov	38
Slika 32:	Zaščita podlage z betonom visoke zmogljivosti	39
Slika 33:	Splošna priporočila za tlačno in upogibno trdnost betona pri starosti 28 dni za nekatere vodne objekte in njihove elemente	42
Slika 34:	Jeklena vlakna a) in polipropilenska vlakna b)	52
Slika 35:	Gumeni granulati podolgovate in kubične oblike	53
Slika 36:	Vgrajevanje svežega betona v kalupe	55
Slika 37:	Merjenje poseda a) in določanje vsebnosti zraka b)	56
Slika 38:	Prikaz tlačne preše	57
Slika 39:	Povprečne vrednosti tlačne trdnosti preskušancev po dveh in 28-ih dneh	58
Slika 40:	Prikaz namestitve merilne opreme na preskušane	59
Slika 41:	Preskusna naprava za izvedbo postopka ASTM C 1138	61
Slika 42:	Prikaz stanja obrabe preskušanca po posameznih delih	62
Slika 43:	Prikaz stopnje razvitosti abrazijske erozije na preskušancu po opravljenem preskusu ASTM C 1138	63
Slika 44:	Preskušanec med tehtanjem v vodi	65
Slika 45:	Shema rotacijskega laserskega profilomera	67
Slika 46:	Prikaz tridimenzionalnega (3D) merjenja površine preskušancev z rotacijskim laserskim profilomerom	68
Slika 47:	Prikaz pripomočkov za izvedbo postopka določanja obrabe preskušancev po metodi z merjenjem spremembe vodne gladine v posodi	69
Slika 48:	Prikaz merjenja višine gladine vode v posodi s preskušancem	70
Slika 49:	Prikaz dinamike obrabe preskušancev	73
Slika 50:	Prikaz podobe površine preskušanca C1 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserskim profilomerom	76
Slika 51:	Prikaz podobe površine preskušanca C2 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserskim profilomerom	77
Slika 52:	Prikaz podobe površine preskušanca PMC2-1 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserskim profilomerom	78
Slika 53:	Prikaz podobe površine preskušanca PMC2-SR-1 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserskim profilomerom	79

---

Slika 54:	Prikaz podobe površine preskušanca PMC2-SR-2 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserski profilomerom	80
Slika 55:	Prikaz podobe površine preskušanca PMM-G po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserski profilomerom	81
Slika 56:	Prikaz gumenega granula, ki se po obrabi cementnega kamna in agregata, katera ga obdajata, vrne v prvotno obliko	82
Slika 57:	Prikaz prostornine obrabe preskušancev, ki smo jih dobili z metodo s tehtanjem in z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom	85
Slika 58:	Prikaz globine obrabe preskušancev, ki smo jih dobili z metodo s tehtanjem in z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom	87
Slika 59:	Primerjava globin obrabe po korekciji premera pri metodi s tehtanjem	89
Slika 60:	Soodvisnost med globino obrabe po ASTM C 1138 in povprečno tlačno trdnostjo pri starosti 28 dni	90
Slika 61:	Soodvisnost med globino obrabe po ASTM C 1138 in statičnim modulom elastičnosti pri starosti 28 dni	91



Ta stran je namenoma prazna.

Ta stran je namenoma prazna.

## 1 UVOD

### 1.1 Opredelitev raziskovalnega problema

Kryžanowski (2009) je raziskoval abrazijsko odpornost betonskih oblog na hidroelektrarnah na spodnji Savi. V okviru doktorske disertacije so bile med drugim opravljene laboratorijske preiskave abrazijske odpornosti betonskih mešanic, ki so bile kasneje vgrajene v preizkusna polja na prelivnem polju hidroelektrarne Vrhovo. Preučevane betonske mešanice so bile načrtovane na osnovi preteklih izkušenj pridobljenih pri gradnji hidroelektrarn na Savi, betonska mešanica pri kateri so del mineralnega agregata nadomestili z gumenim granulatom pa na osnovi podatkov iz literature. Laboratorijski preskus abrazijske odpornosti betonskih sestav je bil opravljen po dveh postopkih, po postopku po Böhmeju ter po postopku ASTM C 1138.

Postopek ASTM C 1138 simulira proces vodne abrazije zaradi katere pride do abrazijske erozije z brusom in se uporablja predvsem za preskušanje abrazijske odpornosti betonov namenjenih za zaščito pred pojavom abrazijske erozije, ki je posledica obremenitev, ki jih povzročajo z vodnim tokom transportirane plavine. Rezultat postopka ASTM C 1138 je volumen obrabljenega materiala oziroma povprečna globina obrabe preskušanca.

Postopek ASTM C 1138 je bil razvit v osemdesetih letih 20. stoletja. V tem času je precej napredovalo znanje o abrazijsko odpornih betonih. Posledica novega znanja pa je izboljšana odpornost betonov ter posledično manjša obraba zaradi procesa abrazije. Tudi rezultati laboratorijskega testiranja v okviru zgoraj omenjene disertacije, dobljeni po postopku ASTM C 1138, so pokazali, da so vse preizkušene sestave dosegle zelo dobro abrazijsko odpornost, kar se je izražalo v zelo majhnem volumnu obrabljenega materiala oziroma v majhni povprečni globini obrabe preskušanca. Vrednotenje rezultatov obrabe preskušancev je potekalo po metodi predpisani v standardu ASTM C 1138. Prav zaradi visoke abrazijske odpornosti teh betonov ter posledično majhne povprečne globine obrabe preskušancev se je pojavilo vprašanje ustreznosti meritev obrabe po standardiziranem postopku ASTM C 1138 pri bolj zmogljivih betonih, zaradi česar smo se v diplomski nalogi odločili poleg standardizirane metode, preizkusiti še dve, do sedaj še ne preizkušeni metodi za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti po postopku ASTM C 1138.

## 1.2 Namen diplomske naloge

Meritev obrabe po standardnem postopku ASTM C 1138 poteka gravimetrično, z meritvijo izgube mase preskušanca tekom trajanja preskusa abrazijske odpornosti. Zaradi nastalega vprašanja o ustreznosti obstoječe metode za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti pri visoko zmogljivih betonih smo si za glavni cilj v diplomski nalogi zadali poiskati ustrežno metodo za meritev obrabljenosti preskušancev. primerjavo ustreznosti treh metod za vrednotenje rezultatov ter preveriti njihovo ustreznost za uporabo. Za določitev obrabe po opravljenem postopku ASTM C 1138 smo poleg obstoječe, gravimetrične metode uporabili še volumetrični metodi, ki temeljita na primerjavi prostornine obrabe in smo jih razvili za potrebe diplomske naloge, t.j. metodo z uporabo rotacijskega laserskega profilomera in metodo določanja obrabe z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi. Rotacijski laserski profilomer, je bil razvit v laboratoriju Katedre za optodinamiko in lasersko tehniko, na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani, kjer so potekale tudi meritve.

Za izdelavo preskušancev smo uporabili modificirane sestave betonskih mešanic, načrtovanih na osnovi tistih, ki so bile uporabljene v okviru raziskave Kryžanowskega (2009), s poudarkom na betonskih mešanicah, ki namesto dela mineralnega agregata vsebujejo gumeni granulati. Izmed šestih izdelanih betonskih sestav so štiri vsebovale gumeni granulati. V raziskavi smo uporabili dve vrsti gumenega agregata, kot končni produkt predelave avtomobilskih pnevmatik, prvi tip je bil agregat, pridobljen z mehanskim drobljenjem (reciklaža), drugi tip, pa je bil pridobljen z brušenjem (protektiranje) odsluženih avtomobilskih pnevmatik.

Izdelane betonske sestave so načrtovane za izdelavo abrazijsko odpornih betonskih oblog na hidroelektrarnah na spodnji Savi. Progresivna razgradnja izpostavljenih betonskih površin, imenovana abrazijska erozija, do katere pride zaradi obremenitev, ki jih povzročajo z vodnim tokom transportirane plavine, povzroča motnje pri obratovanju vodnih zgradb (Kryžanowski, 2009). Zato smo v splošnem delu diplomske naloge želeli podrobneje predstaviti pojav abrazijske erozije ter samo problematiko abrazijske erozije na vodnih zgradbah.

V literaturi se kot parametra, ki vplivata na abrazijsko odpornost betona, večkrat omenjata tlačna trdnost betona in modul elastičnosti betona. Zaradi tega smo v okviru diplomske naloge opravili tudi meritve tlačne trdnosti in modula elastičnosti betonskih preskušancev pri starosti 28 dni, preverili pa smo tudi soodvisnost med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo ter soodvisnost med modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo.

Izdelava betonskih mešanic, meritev tlačne trdnosti, meritev modula elastičnosti ter izvajanje postopka za določanje abrazijske odpornosti so potekali v laboratoriju Inštituta za raziskave materialov in aplikacij (IRMA).

## 2 ABRAZIJSKA EROZIJA

### 2.1 Splošno o abrazijski eroziji

Pojav progresivne razgradnje trdne podlage zaradi obremenitev, ki jih povzročajo z vodnim tokom transportirane plavine, imenujemo **abrazijska erozija**. (Kryžanowski, 1991, Jacobs et al., 2001). Rušilni proces, ki je posledica trenja in trkanja trdnih delcev na podlago, imenujemo **abrazija** (Kryžanowski, 1991). Kadar do trenja in trkanja pride zaradi drsanja, kotaljenja in udarjanja z vodo nošenih plavin ob trdno podlago, se v nekaterih strokovnih literaturah za opis rušilnega procesa uporablja izraz **vodna abrazija** (Kryžanowski, 1991; Uetz, 1986; Jacobs et al., 2001).

Omeniti velja, da v literaturi obstajajo tudi definicije, ki pojem abrazija razlagajo drugače in so med drugim odvisne tudi od strokovnega področja (hidrotehnika, geografija, strojništvo), s katerim se določena literatura ukvarja. Mikoš (1993) navaja, da se pojem abrazija ponavadi uporablja kot splošni pojem, ki ponazarja obrus ali obrabo. V primeru strojniške stroke Pehan in Flašker (2008) abrazijsko obrabo opisujeta kot proces izgube materiala zaradi prehoda trdnega delca preko površine, medtem ko se za obrabo, povzročeno z udarjanjem delcev po površini, uporablja pojem erozijska obraba. Srednješolski učbenik Obča geografija pa z izrazom abrazija označuje razdiralno moč morskih valov, ki oblikuje obale (Senegačnik, 2002). V diplomski nalogi se pri opisu pojava ravnam po definiciji iz prvega odstavka, ki abrazijsko erozijo opisuje kot pojav progresivne razgradnje trdne podlage zaradi obremenitev, ki jih povzročajo z vodnim tokom transportirane plavine. Omenjeni rušilni proces pa imenujem abrazija.

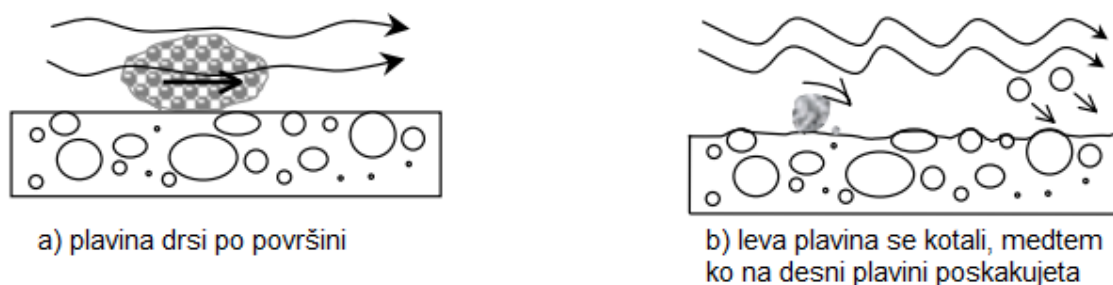
Stopnja obrabe izpostavljene površine je v veliki meri odvisna od premestitvene zmogljivosti vodotoka in od načina premeščanja transportiranih plavin, na obrabo pa vplivajo tudi velikost plavin, oblika plavin ter količina le-teh, trdota plavin, hitrosti vodnega toka in tudi lastnosti materialov, ki so udeleženi v procesu (Mikoš, 1993, ACI 210, 2013, Jacobs et al., 2001). Na podlagi teh spoznanj Uetz (1986) pravi, da obraba ni odvisna zgolj od lastnosti materiala, temveč predvsem od lastnosti sestavnih elementov procesa, v povezavi z dejavnimi tribološkimi obremenitvami.

Plavine, ki se premeščajo z vodnim tokom, so med drugim mulj, prod, skale in led (Kryžanowski, 1991, ACI 210, 2013). Plavine, katere se premikajo v bližini dna vodotoka, imenujemo rinjene plavine. Način premeščanja le-teh je lahko drsenje, kotaljenje ali poskakovanje. Plavine, ki zaradi turbulence lebdiijo v vodnem toku in pridejo zelo redko v stik

z dnom, imenujemo lebdeče plavine (Mikoš, 2007). Obremenitve na izpostavljeno površino povzročajo rinjene plavine. Odvisno od načina obremenitve poznamo dve vrsti abrazijske erozije (Jacobs et al., 2001):

- abrazijska erozija z brusom.
- udarna abrazijska erozija.

Abrazijska erozija z brusom nastopi, kadar se rinjene plavine drsajo ali kotalijo po površini (razgraditveni proces nastane zaradi sile trenja), kadar pa plavine poskakujejo po površini (razgraditveni proces se sproži zaradi sil trka), pa govorimo o udarni abrazijski eroziji (Kryžanovski, 2009).



Slika 1: Prikaz gibanja rinjenih plavin po površini (Jacobs et al., 2001, str. 12)

## 2.2 Vodna erozija

Zaradi podobnosti med pojavoma je poleg pojava abrazijske erozije potrebno pojasniti še pojav, pri katerem vodni tok prav tako obteka površino in povzroča obremenitve ter s tem obrabo površine. Vendar pa v tem primeru obremenitve povzročajo le obtekanje vodnega toka in spremljajoči hidrodinamični fenomeni, ne pa tudi transportirane plavine. Pojav progresivne obrabe površine zaradi obremenitev, ki jih povzročajo obtekajoč vodni tok, imenujemo **vodna erozija**. Slednja se deli na vodno erozijo s spiranjem, kjer obrabo povzročajo obtekajoč vodni tok, in udarno vodno erozijo, ki opisuje obrabo z obtekajočim vodnim tokom z izrazito razvitimi hidrodinamičnimi procesi. Poseben primer vodne erozije pa je **kavitacijska erozija**, ki je posledica implozije parnih mehurčkov ob trdno podlago – **kavitacije** (Kryžanowski, 2009).

## 2.3 Tribološki proces

Glavni problem abrazijske erozije je obraba izpostavljene površine, saj se obraba kaže z izgubo majhnih delcev s površine trdnega telesa, s čimer se spremenita njegovala oblika in struktura površine (Kryžanowski, 2009).

»**Tribologija** je znanstvena veda o poteku fizikalno-kemijskih trenjskih procesov in posledicah delovanja teh procesov – obrabe, nastale zaradi medsebojnega delovanja na stiku površin teles, ki so med seboj v relativnem gibanju« (Kryžanowski, 2009,). V primeru abrazijske erozije pride do trenja in obrabe, zato sta spodaj pojasnjena oba pojma.

»**Trenje** se pojavi na stiku površine dveh teles, ki sta med seboj v relativnem gibanju, kot sila trenja, ki nasprotuje premiku. Z oddanim delom, premagujoč silo trenja na kontaktu s podlago, se kinetična energija teles v gibanju pretvarja v druge oblike energije. Obraba površine trdnega telesa je tako ena od posledic premagovanja sile trenja in pretvorbe kinetične energije v delo za razgraditev površine« (Kryžanowski, 2009).

**Obraba** pomeni napredujočo odstranitev materiala s površine trdnega telesa, povzročeno z mehanskim delovanjem na stični površini z drugim telesom, ki je lahko v trdni, tekoči ali plinasti obliki. Telesi sta med seboj v relativnem gibanju (Kryžanowski, 2009).

Obraba ni odvisna zgolj od lastnosti materiala, temveč predvsem od lastnosti sestavnih elementov procesa v povezavi z dejavnimi tribološkimi obremenitvami. Zaradi tega je potrebno pri obravnavi vsakega posameznega primera obrabe upoštevati večplastnost poteka tribološkega procesa. To pomeni, da je potrebno opraviti obsežne analize neposredno in posredno vključenih parametrov ter znanstveno razlago ozadja (Kryžanowski, 2009, Uetz, 1986).

Kryžanowski (2009) je na podlagi DIN 50321 (1979) podal sistemsko analizo tribološkega postopka, prirejeno za primer obrabe betonskih površin na vodnih zgradbah. Analiza obsega štiri korake:

1. **Splošni tehnični opis tribološkega sistema** na vodnih zgradbah, ki zajema betonsko površino kot osnovno telo in zrna plavin kot prosto gibajoče trdne delce v obdajajočem vodnem mediju.

2. **Opredelitev triboloških obremenitev** glede na (1) karakteristični način gibanja trdnih delcev in obtekanje vodnega medija ter (2) obtežbene parametre (delujoče sile, hitrost, trajanje, temperatura). Tribološke obremenitve se kažejo skozi pretvorbo mehanske energije v delo za razgraditev ali deformacije betonske površine, deloma pa tudi v toplotno energijo.



3. **Opredelitev tribološke strukture**, ki obsega opise: (1) stanja ter mehanskih in fizikalnih lastnosti betona kot osnovnega telesa, (2) mehanskih in fizikalnih lastnosti zrn plavin kot delujočih trdnih delcev, (3) fizikalne lastnosti vodnega toka kot obdajajočega medija, v katerem se gibljejo trdni delci.

4. **Opredelitev velikosti obrabe**, ki zajema: (1) prepoznavo delujočega razgraditvenega procesa in (2) izvedbo meritev obrabe.


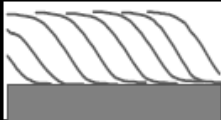
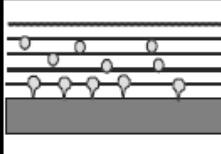

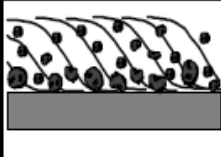
Vplivni parametri za opredelitev obrabe na vodnih zgradbah so prikazani v preglednici 1.

Preglednica 1: Prikaz vplivnih parametrov za opredelitev analize obrabe na vodnih zgradbah (Kryžanowski, 2009)

TRIBOLOŠKA STRUKTURA						TRIBOLOŠKE OBREMITVE S ČASOVNIM POTEKOM	
OSNOVNO TELO			DELUJOČE TELO			OBTEŽBA	KARAKTERISTIKE GIBANJA
BETONSKA POVRŠINA			VODNI TOK	ZRNA PLAVIN			
STANJE	MEHANSKE LASTNOSTI	FIZIKALNE LASTNOSTI			MEHANSKE LASTNOSTI	FIZIKALNE LASTNOSTI	
HRAPAVOST NERAVNINE KVALITETA POVRŠINE	TRDNOST	STRUKTURA	NAČIN DELOVANJA	TRDNOST	NAČIN DELOVANJA	STALNA	DRSANJE
	ŽILAVOST	GOSTOTA	VISKOZNOST	ŽILAVOST	ŠTEVILO	OBČASNA	KOTALJENJE
	ELASTIČNOST	VPOJNOST	KEMIZEM	TRDOTA	VELIKOST	TRENTNA	OBTEKANJE
	OBSTOJNOST	VODOODBOJNOST			OBLIKA	VELIKOST	DOLŽINA IN
	TRDOTA	HETEROGENOST			TEKSTURA	SMER	TRAJANJE DELOVANJA

V preglednici 2 so prikazani možni načini obrabe betonskih površin na vodnih zgradbah. V večini primerov je prevladujoč material, uporabljen za izdelavo izpostavljenih površin na vodnih zgradbah, beton, zato je v primeru abrazijske erozije v velikem številu primerov izpostavljena površina betonska.

Preglednica 2: Prikaz načina obrabe za primere pojava triboloških sistemov na vodnih zgradbah (Kryžanowski, 2009)

TRIBOLOŠKI SISTEM	TRIBOLOŠKE OBREMENTIVE		NAČIN OBRABE	PREVLADUJOČI (OSTALI DELUJOČI) RAZGRADITVENI PROCES	PRIMER
<ul style="list-style-type: none"> <li>• betonska površina</li> <li>• vodni tok</li> </ul>	obtekanje + pulzacije tlakov		vodna erozija	spiranje	preliv, derivacije
	obtekanje + pulzacije tlakov + udarjanje z vodnim curkom		vodna erozija	vodni udar (spiranje)	podslapje, disipacijski objekti
	obtekanje pri velikih hitrostih + pulzacije tlakov + udarjanje z implozijami		kavitacijska erozija	kavitacija (spiranje)	temeljni izpust, drča preliva, podslapje
<ul style="list-style-type: none"> <li>• betonska površina</li> <li>• vodni tok</li> <li>• zrna plavin</li> </ul>	obtekanje + pulzacije tlakov + obruš s trdnimi delci		abrazijska erozija	abrazija z obrušom (spiranje)	prelivni prag, temeljni izpust, podslapje
	obtekanje + pulzacije tlakov + udarjanje z vodnim curkom s trdnimi delci		abrazijska erozija	udarna abrazija (spiranje + vodni udar)	temeljni izpust, podslapje, disipacijski objekti

### 3 ABRAZIJSKA EROZIJA NA VODNIH ZGRADBAH

#### 3.1 Splošno

Osnovni in prevladujoč material na vodnih zgradbah je beton, zato predstavlja pojav abrazijske erozije na vodnih zgradbah enega izmed večjih problemov, s katerimi se srečujemo pri obratovanju le-teh. Do razgradnje pride zaradi obremenitev, ki jih povzročajo z vodnim tokom transportirane plavine. Problematika je še toliko bolj resna v primeru velikih hitrosti vodnega toka. Zaradi nastalih poškodb so potrebna pogostejša intervencijska dela na konstrukciji, kar povečuje obratovalne stroške in hkrati povzroča motnje pri gospodarski rabi objektov. Če napredovanja razgradnje ne ustavimo pravočasno, lahko v skrajnem primeru pride do nastanka nenadzorovanih hidrodinamičnih fenomenov, katerih vpliv lahko sega zunaj neposrednega območja vodne zgradbe, s čimer se zmanjšuje obratovalna varnost, povečujejo pa se obratovalni stroški za odpravo posledic (Kryžanowski, 2009). Abrazijske erozije na betonskih površinah ni povsem enostavno prepoznati, saj je obrabljena površina lahko gladka ali hrapava, enakomerno ali neenakomerno obrabljena. To je odvisno od lastnosti osnovnega in abrazivnega materiala ter od tega, ali nastopa abrazija z brusom ali udarna abrazija.

Na sliki 2 so na desni strani prikazane abrazijske poškodbe, kjer je površina dokaj gladka in dokaj enakomerno obrabljena. Na levi strani so prikazane abrazijske poškodbe na kaskadnem prelivu, kjer je površina hrapava in neenakomerno obrabljena.



a)

b)

Slika 2: Primer nastalih poškodb zaradi delovanja abrazije (Jacobs et. al. 2001)

Trenutno še ne poznamo materiala, ki bi v primeru neugodnih pogojev (močan tok, plavine) nudil popolno zaščito pred abrazijsko erozijo. Z ustrežno izbiro materialov lahko le zmanjšamo obseg škode. V primeru, da tega ne moremo storiti, moramo škodo omejiti z izbiro ustreznih materialov (ACI 210, 2013).

Kryžanowski et al.(2009) je ugotovil, da pri načrtovanju vodnih zgradb ne obstaja splošni kriterij za zagotovitev odpornosti betona na abrazijsko erozijo. Na odpornost betona na pojav abrazijske erozije med drugim vplivajo njegova tlačna trdnost, natezna trdnost, trdnost agregata, uporaba posebnih cementov, elastični modul betona, vodo-cementno razmerje, površinska obdelava betona, nega betona ter dodatki (mineralni dodatki, polimeri, vlakna).

Abrazijsko erozijo lahko omejimo s pravilnim načrtovanjem vodne zgradbe. To storimo na način, da konstrukcijske elemente prilagodimo tako, da zmanjšamo verjetnost nastanka škode. Pogosta ovira pri tem so visoki stroški izvedbe takšnih konstrukcij in pa tehnološke omejitve. Abrazijsko erozijo lahko zmanjšamo tudi z izbiro kvalitetnih materialov, torej takšnih materialov, ki nudijo dobro abrazijsko odpornost in so primerni za uporabo na vodnih zgradbah (Hu, et al., 2006).

### **3.2 Parametri, ki vplivajo na pojav abrazijske erozije**

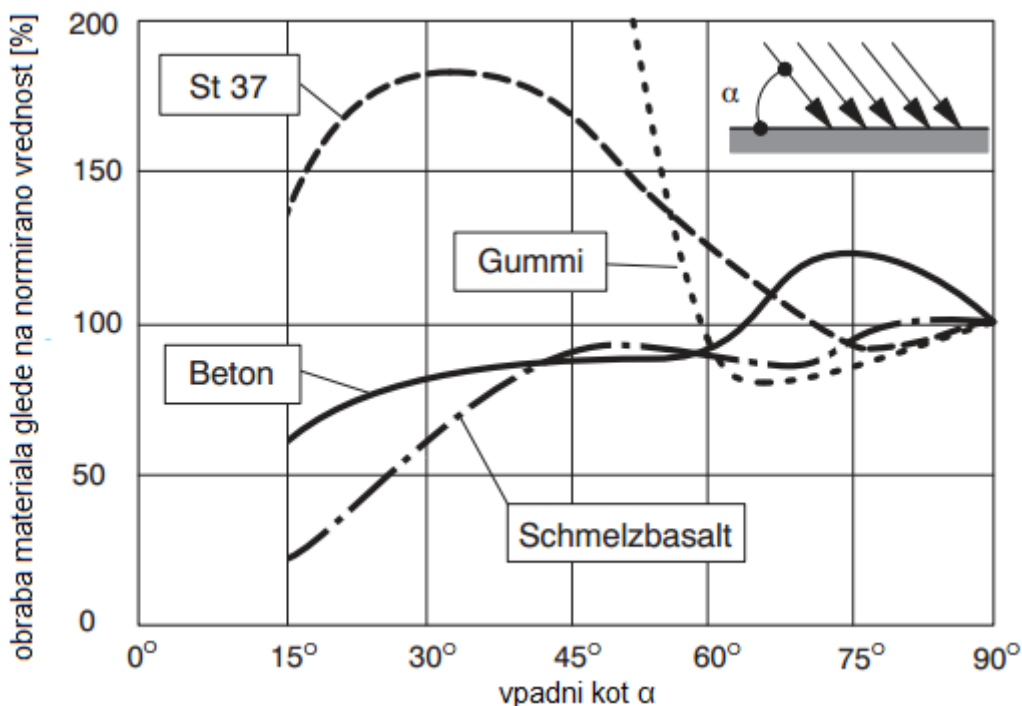
S trenutnim poznavanjem pojava abrazijske erozije na vodnih zgradbah še ne moremo podati dejanske vrednosti obremenitev, ki nastajajo zaradi delovanja z vodnim tokom transportiranih plavin (Jacobs et. al., 2001). Zato lahko s pomočjo vplivnih parametrov podamo kvalitativne ocene in stopnjo razvoja. S pomočjo teh parametrov pa lahko opredelimo pričakovane obremenitve. V nadaljevanju so navedeni tisti parametri, ki so v literaturi podani kot parametri, ki vplivajo na nastanek abrazijske erozije, stopnjo razvitosti in obseg poškodb na opazovanih objektih (Kryžanowski, 2009, Kryžanowski, 1991, Jacobs et.al., 2001).

#### **3.2.1 Vpliv vpadnega kota na obrabo**

Jacobs et al. (2001) je ob pregledu literature izpostavil, da sta tako Bania (1989) kot tudi Kunterdning (1991) ugotovila dokaj majhen vpliv spremembe vpadnega kota zrn na obrabo pri betonu. Bania (1989) je izmeril največjo obrabo betona pri vpadnem kotu zrn  $50^\circ$ , medtem ko je Kunterding (1991) največjo obrabo betona zabeležil pri vpadnem kotu  $75^\circ$ .

Na sliki 3 vidimo grafično prikazane rezultate, ki jih je zabeležil Kunterding. Obrabo vseh preskušanih materialov je normiral pri vpadnem kotu  $90^\circ$ . Beton in bazaltne obloge imajo

podobne odpornostne karakteristike pri manjših vpadnih kotih. Pri bazaltu se odpornost z naraščanjem vpadnega kota rahlo poslabšuje, pri betonu pa je to povečanje bolj zaznavno. Evidentno je izkazana izrazita povečana odpornost gume pri velikih vpadnih kotih, manj je ta trend izrazit pri jeklenih oblogah. Gumena obloga pri nizkih vpadnih kotih ne izkazuje primerne odpornosti.



Slika 3: Vpliv vpadnega kota na obrabo pri različnih materialih po Kunterdingu (1991)  
(Jacobs et al. 2001, str. 14)

### 3.2.2 Vpliv prisotnosti vode na obrabo

Prisotnost vode vpliva na obrabo. Jacobs et al.(2001) je zapisal, da so Roš (1936, 1937), Pedersen (1988) in Gjør et al. (1990) ugotovili, da kadar suho betonsko površino obremenjujemo s suhimi zrn, je obraba manjša kot v primeru obremenjevanja vlažne betonske površine z vlažnimi abrazivskimi zrn.

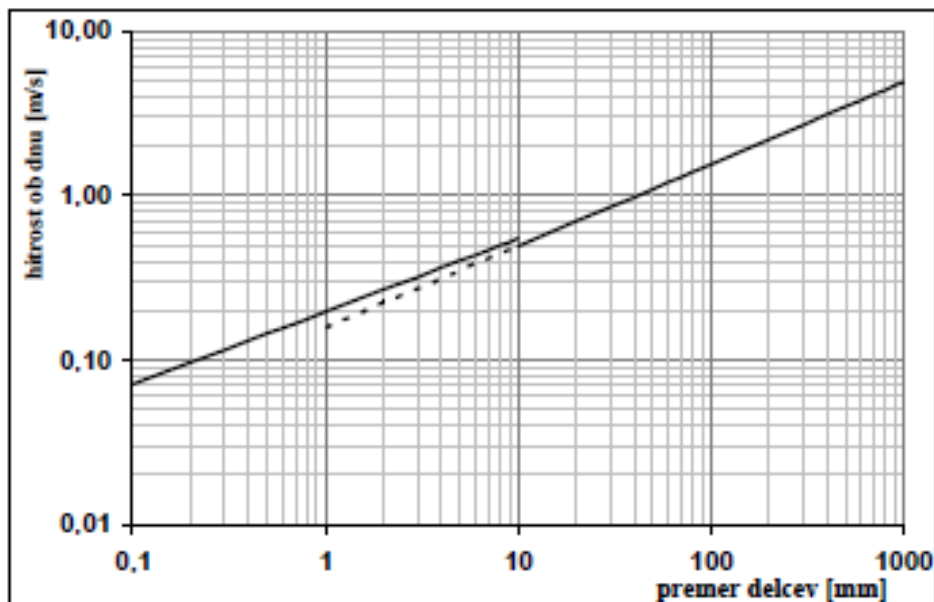
### 3.2.3 Vpliv lastnosti abrazivskih zrn na obrabo

Večje kot je število abrazivskih zrn v vodi, večja je obraba betonske površine, na katero delujejo. Prav tako se obraba povečuje z večanjem velikosti abrazivskih zrn. Večje število zrn in večja velikost le-teh pomeni povečanje obremenitev na izpostavljeno površino. Zrna z večjo maso povzročijo večjo obrabo (Jacobs et al. 2001). Jacobs je povzel Wellingerja & Uetza (1955) ter Kunterdinga (1991), ki trdijo, da na obrabo vpliva oblika zrn. Zrna robate oblike povzročijo večjo obrabo v primerjavi z zrn bolj zaobljene oblike. Zgoraj omenjeni

avtorji so po preiskavah ugotovili, da drobir v primerjavi s prodrom povzroči dvakrat večjo obrabo. V primeru večje trdote (žilavosti) abrazijskega materiala se poveča tudi obraba izpostavljene površine (Jacobs et al., 2001).

### 3.2.4 Vpliv hitrosti vodnega toka na obrabo

Kljub dolgoletnemu prelivanju vode pri velikih hitrostih preko visokokvalitetnih betonov ne pride do omembe vrednih poškodb. Kadar pa so v vodi, ob istih hidravličnih pogojih, prisotne plavine, na izpostavljenih betonskih površinah pride do obrabe (Kryžanowski, 2009). Globina obrabe lahko dosega vrednosti v razponu nekaj centimetrov do nekaj metrov, odvisno od hidravličnih razmer (ACI 210, 2013). »Sposobnost premeščanja zrn plavin je odvisna od hitrosti vodnega toka na stiku s prodnato podlago. Premeščanje se začne, ko so pri dnu presežene strižne napetosti med zrn plavin.« (Kryžanowski, 2009) Z naraščajočo hitrostjo vodnega toka se poveča obraba, z višanjem hitrosti pa se spreminja tudi mehanizem obrabe. Pri hitrosti do 1 m/s se plavine pomikajo predvsem z drsenjem in kotaljenjem, torej gre za proces abrazijske erozije z brusom. Pri hitrosti med 1 m/s in 2,5 m/s pride do kombinacije abrazijske erozije z brusom kot tudi udarne abrazijske erozije, saj se plavine premikajo z drsenjem, kotaljenjem in poskakovanjem. Pri hitrosti vodnega toka nad 2,5 m/s pa nastopa le proces udarne abrazijske erozije, saj se plavine premikajo predvsem s poskakovanjem (Jacobs et al., 2001 po Röhmnisch & Vollmer, 1970).



Slika 4: Transportna sposobnost vodotoka (Kryžanowski, 2009)

### 3.2.5 Karakteristike vodotoka

Občutljivost vodnih objektov na pojav, stopnjo razvitosti in obseg škode zaradi abrazijske erozije je med drugim odvisna tudi od karakteristik vodotoka. Pred postavitvijo vodnega objekta moramo te karakteristike analizirati ter jih upoštevati pri načrtovanju in izvedbi objekta. Te karakteristike so:

- hidrološke karakteristike vodotoka,
- hidravlične karakteristike vodotoka,
- karakteristike nošenega materiala.

Poznavanje hidroloških karakteristik vodotoka pomeni poznavanje režima vodotoka (pretoki, vodostaj), režima prodonosnosti in režima pretoka ledu. Hidravlične karakteristike zajemajo hidravliko vodotoka (režim toka, laminarni oz. turbulentni tok, hidravlične izgube), hidravliko prodonosnosti, hidravlični preračun deformacij korita in vpliv vodne zgradbe na hidravliko vodotoka. Karakteristike nošenega materiala zajemajo poznavanje zrnastostne krivulje plavin, lastnosti plavin (oblika zrn, žilavost, trdnost, gostota), mineraloško sestavo nošenega materiala in koncentracijo nošenega materiala (Kryžanowski, 1991).

### 3.3 Vodne zgradbe, ki so podvržene abrazijski eroziji

Vodne zgradbe, ki so podvržene abrazijskemu delovanju in s tem tudi pojavu škode na njih, so (Kryžanowski, 1991):

- Evakuacijski objekti – to so pretočno-derivacijski objekti pregrad, ki služijo za odvod visokih voda in naplavin iz akumulacije (prelivi, umirjevalni bazeni, izpustni kanali, obtočni kanali, podslapja, drenažni izpusti, prepusti itd.).
- Regulacijski objekti – to so pomožni objekti za čas gradnje (derivacijski kanali) in ostali regulacijski objekti (obrežni nasipi, utrdbe dna, prodne pregrade, hudourniške pregrade itd.).
- Ostali objekti – to so objekti, ki jih temeljimo v pogojih deročega toka (oporniki mostov, krilni zidovi itd.).

Na podlagi pregleda vodnih objektov v Švici je Jacobs et.al (2001) ugotovil, da so zaradi delovanja podvodne abrazije največkrat poškodovane hudourniške pregrade, obseg škode pa je največji na obtočnih prodnih izpustih. V obeh primerih je večino škode povzročil prod večje velikosti, ki je s kombinacijo brušenja in udarjanja povzročil razgradnjo površine. Kryžanowski et al. (2009) je zapisal, da se s problematiko nastanka abrazijske erozije največkrat srečujemo pri prelivnih objektih in izpustih pri pregradah, kjer je tok izrazito deroč.

Jacobs et.al. (2001) je navedel kriterije, s pomočjo katerih lahko ocenimo, v kolikšni meri je vodna zgradba ogrožena zaradi abrazijskega delovanja. Vodna zgradba je ogrožena, če je izpolnjen eden izmed naslednjih kriterijev:

1. Vodni objekt leži na vodotoku, kjer že obstajajo objekti, na katerih so zabeležili škodo, ki je nastala kot posledica abrazijske erozije, ali pa so karakteristike vodotoka podobne tistim vodotokom, na katerih je prišlo do pojava abrazijske erozije na vodnih zgradbah.
2. Vodotok ima veliko specifično prodonosnost. Običajno do povzročitve škode pride, če prodonosnost vodotoka znaša nad 1000 ton materiala na meter širine v enem letu.
3. Premer transportiranega proda je dokaj velik. Do večje škode pride, kadar je  $d_{90}$  večji kot 0,2 m.
4. Prod je trd in bolj robate oblike.

Prav tako je Jacobs et.al. (2001) podal naslednja priporočila, s katerimi lahko zmanjšamo abrazijsko erozijo na izpostavljenih površinah vodnih zgradb.

Priporočila so sledeča:

1. Hitrost vodnega toka naj bo nizka, kolikor se da, vendar pa moramo biti pozorni na to, da je transport proda čez vodno zgradbo ravno tolikšen, da ne povzročimo zaplavljanja.
2. Padci vodotoka preko vodnih zgradb naj bodo čim manjši.
3. Prečni prerez naj ne bo preozek.
4. Z vodno zgradbo ohranjamo smer vodotoka (razen če ni naš namen preusmeritev vodnega toka).
5. Površina, po kateri preko vodne zgradbe teče vodotok, naj bo čim bolj ravna. Izogibamo se konkavnim oblikam dna.

Navkljub upoštevanju priporočil in spoznanj pa naše trenutno poznavanje abrazijske erozije ne zadostuje, da bi z veliko stopnjo natančnosti lahko napovedali obseg abrazijske erozije na vodnih zgradbah. Z upoštevanjem spoznanj in priporočil o abrazijski eroziji lahko določimo tiste vplivne parametre na abrazijsko erozijo, s pomočjo katerih lahko izberemo ukrepe, s katerimi abrazijsko erozijo delno omejimo (Jacobs et. al. 2001).

### **3.3.1 Razlogi za nastanek škode na podslapju ter ukrepi in priporočila za zmanjšanje škode**

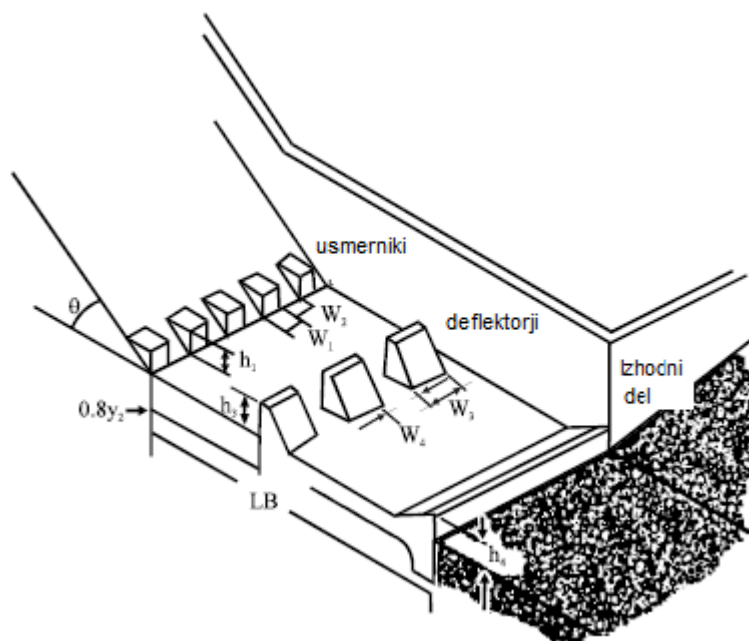
V priročniku ACI 210 (2013) so za primer podslapja podani naslednji najpogostejši razlogi za pojav abrazijske erozije: a) zoženje pretočnega profila zaradi gradbenih del, b) vrtinčni tokovi



zaradi obratovanja blizu ležeče strojnice c) gradbene aktivnosti v vplivnem območju podslapij, d) nesimetrični pretok, e) vrtnični tokovi v podslapju in s tem povezan vnos drobirja iz spodnje struge v podslapje ter f) neredno čiščenje plavin. V primeru derivacijskih kanalov pa so ogroženi tisti, pri katerih voda prenaša s seboj veliko plavin.

Pri dobro načrtovanih podslapjih moramo izpolniti naslednje ukrepe (ACI 210, 2013):

- Postaviti moramo naprave za lovljenje plavin (npr. prodni zadrževalnik) ter nizke pragove, s katerimi se zmanjša kroženje plavin zaradi vrtincev.
- Izogibamo se postavitvi deflektorjev (razbijačev) povsem zraven navpičnih sten podslapja, in sicer zaradi možnosti nastanka vrtničnega toka. Če je možno, se izogibamo postavitvi usmernikov in deflektorjev na istem območju, saj sta obe vrsti objektov dovzetni za nastanek škode zaradi delovanja abrazijske erozije.
- Izhodni del podslapja in spodnja struga naj bosta načrtovana s pomočjo fizičnih modelov, da dosežemo kar se da dobro izpiranje podslapja kot tudi zmanjšamo možnosti, da bi v podslapje vdirale plavine iz spodnje struge.



Slika 5: Prikaz podslapja (Science alert)

Tekom obratovanja podslapja je priporočljivo, da voda vanj doteka enakomerno preko vseh prelivnih polj. Pretoki preko posameznih prelivnih polj naj bodo med seboj čim bolj podobni, saj s tem zmanjšamo verjetnost nastanka vrtničnih tokov. Prav tako je priporočljivo po določenem času obratovanja plavine v podslapju odstraniti. To storimo tako, da naenkrat izpustimo večji pretok vode v podslapje. Kako pogosto in kakšen pretok je za to potreben, se določi s pomočjo vplivnih parametrov, študij in modeliranja procesa. V primeru, da plavin ne moremo odstraniti z izplakovanjem, je potrebno določiti drug primeren način za njihovo

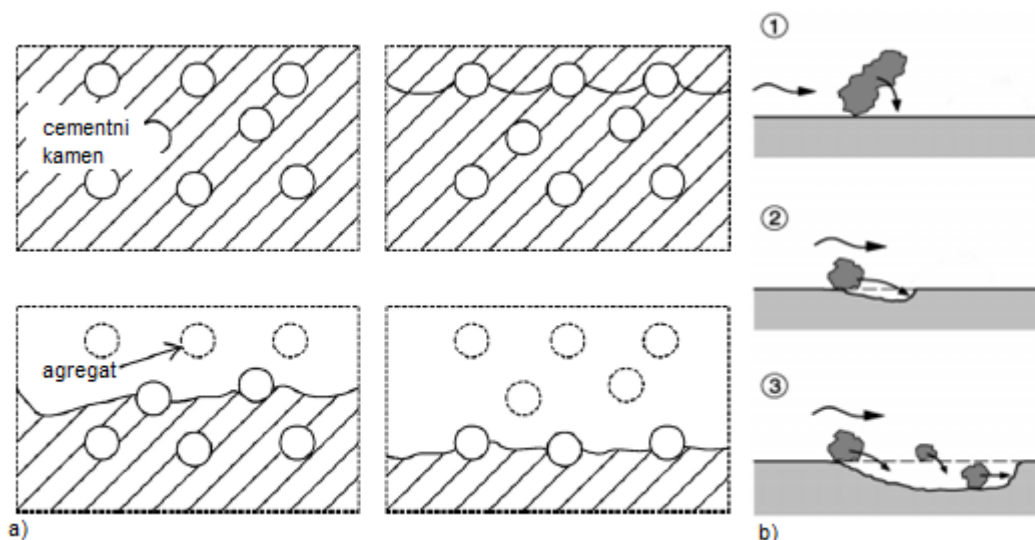
odstranitev. Med obratovanjem podslapja je potrebno po določenem obdobju opraviti kontrolni pregled. Med pregledom ugotovljamo količino plavin v podslapju in stopnjo škode, nastale zaradi obremenitev z vodnim tokom in plavinami (ACI 210, 2013).

### 3.4 Razvoj abrazijske erozije na betonskih vodnih zgradbah

Abrazijska erozija betonske površine se deli v tri faze (Liu et. al., 2005, Jacobs et. al., 2001):

1. V prvi fazi abrazijsko erozijo povzročijo plavine, ki drsijo in se kotalijo po površini, kar privede do abrazijske erozije z obrusom. S povečano premestitveno sposobnostjo se poveča tudi velikost transportiranih delcev ter število le-teh, kar privede do poskakovanja plavin, s tem pa do udarne abrazijske erozije. Zgornja plast cementne matrice se obrabi.
2. V drugi fazi transportirane plavine na izpostavljeno površino vpadajo pod večjimi koti, kar privede do večjih obremenitev na izpostavljenih mestih, agregat odstopa iz cementnega kamna, zaradi česar se začetna škoda, povzročena v prvi fazi, poveča, hitro razširi in privede do manjših razpok in vdolbin.
3. V tretji fazi se zaradi obremenitev v smeri vodnega toka začnejo na izpostavljeni betonski površini tvoriti žlebičaste strukture, ki se zaradi transportiranih plavin, ki udarjajo na spodnji del žlebov, s časoma le še povečujejo.

Na sliki 6 je prikazan pod točko a) razvoj abrazijske erozije betona, pod točko b) pa je prikazan razvoj abrazijske erozije v treh fazah.



Slika 6: Proces abrazijske erozije na betonski površini (Liu et. al., 2005, Jacobs et. al., 2001)

### 3.5 Vzdrževanje

Redni, v določenih časovnih intervalih izvedeni, kontrolni pregledi in vzdrževanje vodnih zgradb bistveno pripomorejo k uspešnemu varovanju konstrukcij pred nastopom erozije večjega obsega. Program vzdrževanja mora biti izdelan glede na vrsto in obremenjenost vodnega objekta. Dela na objektih morajo biti izvedena strokovno, uporabljeni material pa mora izkazovati dobro abrazijsko odpornost (ACI 210, 2013; Kryžanowski, 2009).

### 3.6 Slikovni primeri abrazijske erozije na vodnih zgradbah



Slika 7: Zaradi delovanja abrazije močno poškodovan deflektor v podslapju (International Water Power & Dam Construction)



Slika 8: Poškodba prelivne sekcije betonske hudourniške pregrade zaradi delovanja abrazije (Jacobs et al, 2001: str. 32)





Slika 9: Pojav abrazijske erozije na prelivnem polju HE Krško (osebni arhiv)



Slika 10: Poškodbe v podslapju pregrade Kinuza Dam (Kenal Chemical)



Slika 11: Poškodovan razbijač (International Water Power & Dam Construction)



Slika 12: Pojav abrazijske erozije na betonski podlagi (Foundation, Concrete and Earthquake Engineering)

## 4 PRESKUSI ZA DOLOČITEV ABRAZIJSKE ODPORNOSTI BETONA

### 4.1 Modeliranje procesa abrazije v laboratoriju

Škoda na vodnih zgradbah zaradi podvodne abrazije v večini primerov nastane pri večjih hitrostih vodnega toka, ki s seboj prenaša plavine grobih frakcij. Takšne razmere je praktično nemogoče poustvariti v laboratorijskih razmerah. Zato so v uporabi različne preizkusne metode za določanje abrazijske odpornosti betonov v laboratoriju, ki poskušajo čim bolj natančno posnemati obremenitve, ki nastopajo v naravnem okolju. Ker pa so obremenitve v veliki meri nepoznane, obstaja določena negotovost pri napovedi obnašanja materialov v naravi glede na rezultat laboratorijskih meritev (Jacobs et al., 2001).

Primerjava rezultatov, dobljenih z različnimi preizkusnimi metodami, je možna samo takrat, kadar metode izhajajo iz enakih triboloških mehanizmov. Mehanizme lahko opišemo s pomočjo naslednjih parametrov: (1) sestava (trdnost), (2) velikost abrazivnih delcev, (3) hitrost gibanja delcev, (4) udarni kot. Sprememba enega izmed naštetih parametrov povzroči spremembo celotnega mehanizma, zaradi česar rezultati meritev med sabo niso več primerljivi (Horszczaruk, 2004).

### 4.2 Postopki za preizkušanje abrazijske odpornosti v laboratoriju

Abrazijsko odpornost betonov, ki so namenjeni za izgradnjo vodni abraziji izpostavljenih površin, se večinoma določa z metodami, ki so podane v nadaljevanju.

#### 4.2.1 Metoda po ASTM C 1138

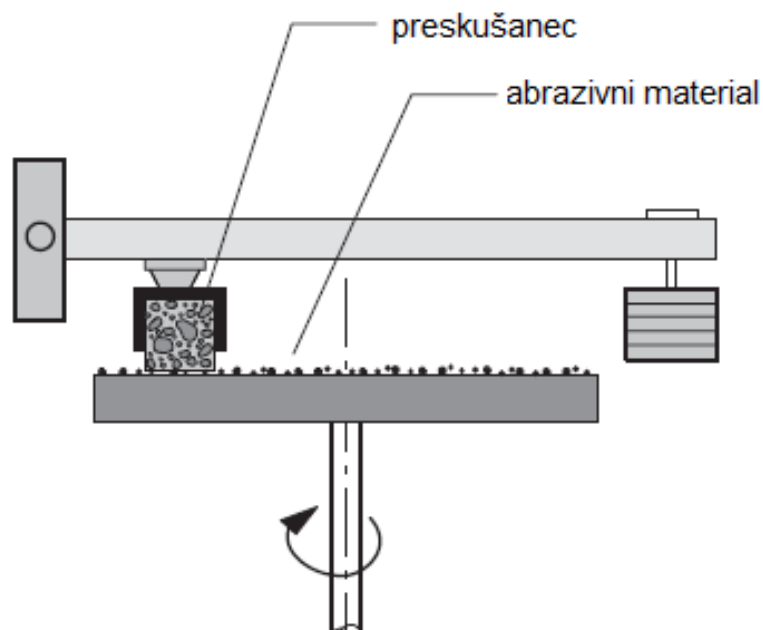
Gre za standardiziran postopek s katerim preizkušamo odpornost betona na abrazijsko erozijo. S postopkom simuliramo proces abrazije z obrušom.

Pri postopku ASTM C 1138 preskušanelec v obliki kolača s premerom 29,5 cm in višino 10 cm vstavimo v jekleno cilindrično posodo napolnjeno z vodo. Na površino preskušanca položimo 70 jeklenih krogel različnih dimenzij. Preskus poteka tako, da s posebej oblikovanim mešalom ustvarjamo krožni tok vode. Hitrost vode na gladini preskušanca znaša okoli 1,8 m/s. Na vsake 12 ur določimo izgubo mase preskušanca. Celoten postopek traja 72 ur (ASTM C 1138 – 9).

Postopek ASTM C 1138 je podrobneje razložen v nadaljevanju, v podpoglavju z naslovom *Preskus abrazijske odpornosti po standardu ASTM C 1138*.

#### 4.2.2 Preskus odpornosti betona proti obrusu (Böhmejeva metoda)

Preskušanelec v obliki ploščice ali kocke s stranico  $71 \pm 1,5$  mm se brusi z brusnim prahom - elektrokorundom na rotacijski brusni plošči. Napravo sestavljajo vrtljiva brusna plošča, preizkuševalna steza, naprava za držanje (vpenjanje) preskušanca in naprava za obteževanje. Preskušanelec vpenemo in fiksiramo v okvir, kateri preskušanca potiska na rotirajočo brusno ploščo. Preskušance, ki so pred preskusom stari najmanj 28 dni, pred in nato po vsakih 4 ciklih stehtamo na 0,1 g natančno. En cikel sestoji iz 22 vrtljajev brusne plošče. Brušenje lahko pospešimo z dodajanjem abrazivnega materiala v suhem ali vlažnem stanju. Proces razgradnje je torna abrazija, ki se pojavlja na cestiščih, pohodnih površinah in podobno. Rezultat preskusa je obrus betona po 16 ciklih in se določi z izgubo prostornine preskušanca v  $\text{cm}^3$  na površini  $50 \text{ cm}^2$ . Metoda je standardizirana in pri raziskavah abrazijske odpornosti pogosto uporabljena. Na podlagi njenih rezultatov in na podlagi primerjalnih analiz je možno napovedati, v kateri kakovostni razred lahko razvrstimo raziskane vzorce, lahko pa tudi določimo izhodišča za primerjavo z ostalimi preskusnimi metodami (Kryžanowski, 2009, SIST 1026:2008, Dodatek 6).

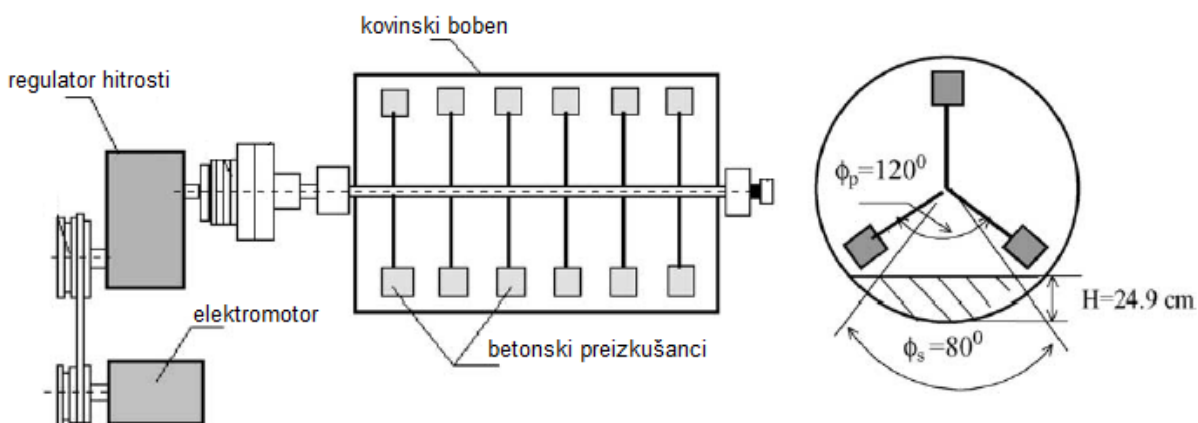


Slika 13: Naprava za izvedbo preskusa po Böhmeju (Jacobs et al., 2001 str. 113)

### 4.2.3 Metoda po Banii

Metodo so razvili na univerzi v Rostocku. Gre za metodo, ki simulira abrazijo z brusom in udarno abrazijo. Razvili so jo z namenom simuliranja naravnih pogojev nastanka abrazijske erozije betonov zaradi obremenitev z vodo nošenih plavin. Metoda ni standardizirana.

Naprava za izvajanje preskusa je sestavljena iz kovinskega bobna s premerom 155 cm in dolžino 228 cm. Preskušance namestimo na nosilce, ki so vpeti na rotirajočo os znotraj bobna, ki jo poganja elektromotor. Kovinski boben napolnimo z vodo do višine 24,9 cm. Voda vsebuje abrazivni material (naravni agregat granulacije 8-32 mm), volumsko razmerje med vodo in abrazivnim materialom pa je 3:1. Preskus poteka tako, da na nosilce pritrjeni preskušanci krožijo skozi vodo s hitrostjo od 1,6 do 3,2 m/s. Proces traja od 20 do 30 ur. Z regulacijo hitrosti in dolžino trajanja preskusa je možno spreminjati stopnjo obrabe. Rezultat je izguba mase v odvisnosti od trajanja preskusa (Horszczaruk 2004, Kryžanowski, 2009).



Slika 14: Naprava za izvedbo preskusa po Banii (Horszczaruk, 2004)

### 4.3 Preizkusi v naravi

V primeru, da preizkuse izvajamo v naravi, obrabo izpostavljenih površin povzročajo dejanske obremenitve. Dejanske obremenitve so pogosto težko določljive ter jih ne moremo namensko spreminjati. Izvedba preizkusov v naravi je pogosto otežena zaradi visoke cene izvedbe ter dolgega trajanja preizkusa. Težavo prav tako predstavlja določitev stopnje škode, saj rezultate različnih preizkusov v naravi težko primerjamo med seboj.

Najbolj reprezentativne rezultate dobimo s preizkusom v naravnem okolju, vendar ob pogoju, da so razmere, v katerih poteka raziskava, enake tistim, katerim bo izpostavljen načrtovani objekt (Kryžanowski, 2009). V primeru izvajanja preizkusov v naravi je potrebno določiti mesta, na katerih lahko merimo ali predpostavimo hidravlične in hidrološke parametre

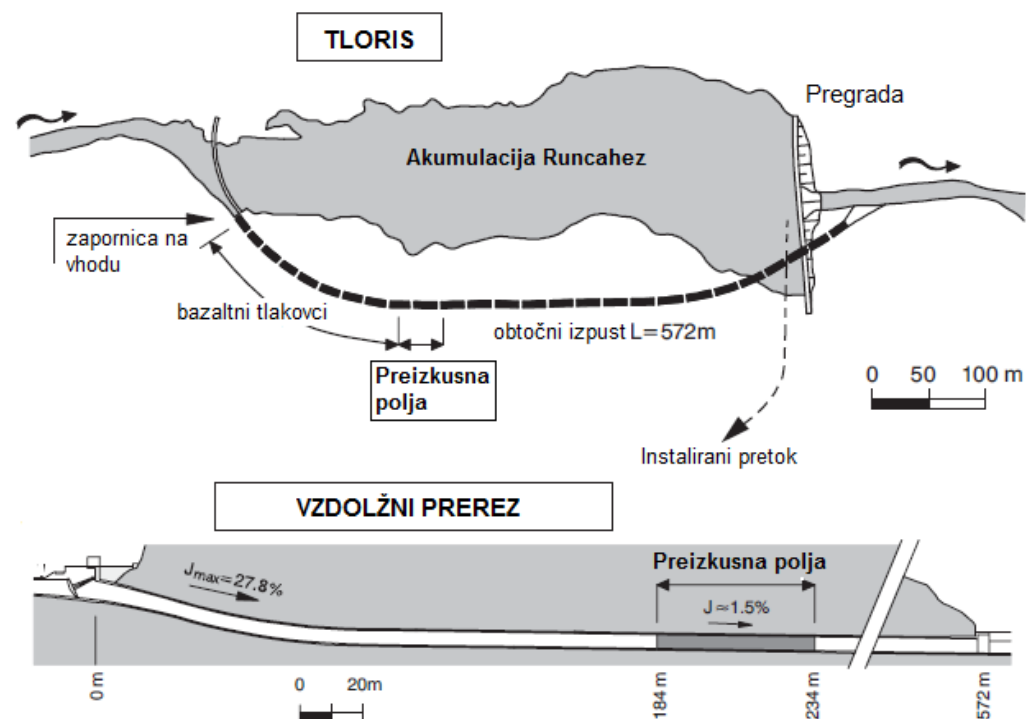


vodotoka, kot so pretok vodotoka, hitrost vodnega toka, prodonosnost, granulometrijska krivulja plavin ter vrsta in oblika plavin (Jacobs et al., 2001).

#### 4.4 Primera preizkusov v naravi

##### 4.4.1 Raziskave v obtočnem prodnem izpustu akumulacije Runcahez

Akumulacija Runcahez se nahaja v švicarskih Alpah in leži na enem izmed pritokov reke Ren, imenovanem Ren pri Somvigtu. V obdobju med leti 1995 in 1999 je Jacobs s sodelavci opravil raziskave abrazijske odpornosti več vrst betonov na preizkusnih poljih v naravi v obtočnem prodnem izpustu akumulacije Runcahez.



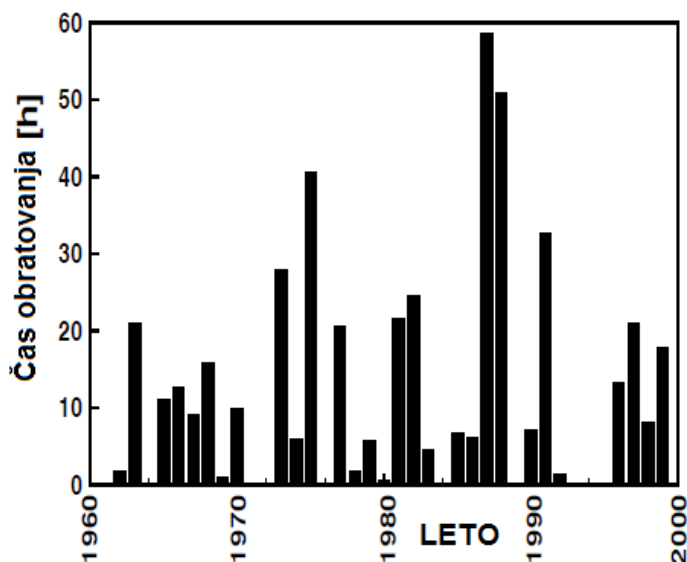
Slika 15: Prikaz situacije obtočnega prodnega izpusta in akumulacije Runcahez (Jacobs et al., 2001)

Namen obtočnega izpusta akumulacije Runcahez je, da se v primeru visokih voda, ko je presežena mejna vrednost pretoka  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , viški vode prevajajo preko obtočnega izpusta. Obtočni izpust je bil dokončan v začetku šestdesetih let prejšnjega stoletja. Pojav abrazijske erozije zaradi premeščanja plavin pri obratovanju obtočnega izpusta pa so zabeležili že kmalu po začetku obratovanja objekta.



Slika 16: Poškodbe dna obtočnega prodnega izpusta (Jacobs et al., 2001: str. 36)

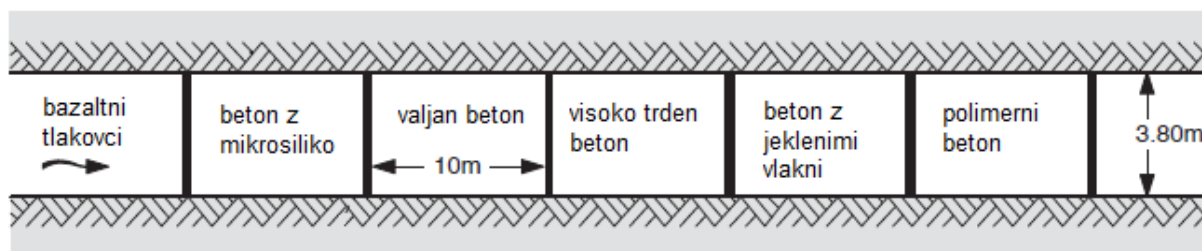
V času opravljanja raziskav, med leti 1995 in 1999, se je preko obtočnega izpusta prelilo okoli 13 hm<sup>3</sup> vode in transportiralo okoli 40.000 ton plavin. Povprečni premer rinjenih plavin je znašal 0,23 m, maksimalni premer pa je znašal kar 1,2 m. Obtočni izpust je v letih opravljanja raziskav obratoval nekaj več kot 60 ur.



Slika 17: Čas obratovanja obtočnega izpusta v enem letu v obdobju med 1960 in 2000  
(Jacobs et al., 2001: str. 47)

V raziskavi so med seboj primerjali abrazijsko odpornost petih različnih betonskih sestav, ki so jih vgradili v preizkusna polja na dnu obtočnega izpusta. Vsako preizkusno polje je bilo dolgo 10 metrov in je segalo čez celotno širino obtočnega izpusta. Na očiščeno in deloma

odstranjeno obstoječe dno so vgradili betonske obloge različnih sestav, in primerjalno tlak iz bazaltnih plošč. Debelina preizkusnih polj je bila 30 cm.



Slika 18: Prikaz razporeditve preizkusnih polj (Jacobs et al., 2001, str. 57)

Za potrebe raziskave so uporabili naslednje betonske sestave:

- 1) visoko trden beton z dodatkom mikrosilike,
- 2) visoko trden beton,
- 3) beton z dodatkom jeklenih vlaken,
- 4) valjan beton in
- 5) polimerni beton.

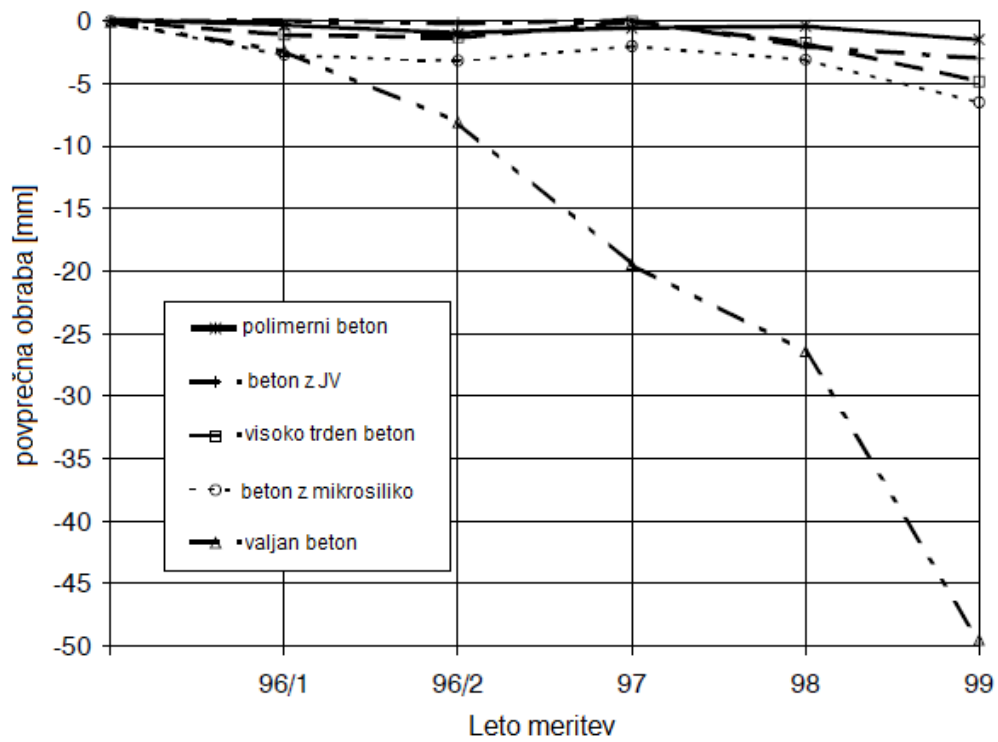
Sočasno z vgradnjo betona v preizkusna polja so v laboratoriju za vse betonske sestave določili tlačno trdnost, modul elastičnosti, upogibno trdnost, udarno žilavost in gostoto pri 28. in 90. dneh. Največjo tlačno trdnost je dosegel beton z dodatkom jeklenih vlaken (pri 90. dneh 114 MPa), najnižjo pa valjan beton (pri 90. dneh 67,6 MPa). Največji modul elastičnosti so zabeležili pri betonu z dodatkom jeklenih vlaken (pri 90. dneh 58 GPa), najnižji pa pri polimernemu betonu (pri 90. dneh 13 GPa). Največjo upogibno trdnost je dosegel beton z dodatkom jeklenih vlaken (pri 90. dneh 12,1 MPa), najmanjšo pa valjan beton (pri 90. dneh 8,6 MPa). Najbolj odporen beton na udar je bil beton z jeklenimi vlakni (pri 90. dneh 209 J/m<sup>2</sup>), najmanj odporen na udar pa je bil valjan beton (pri 90. dneh 209 J/m<sup>2</sup>). Največjo gostoto je imel beton z jeklenimi vlakni (pri 90. dneh 2737 kg/m<sup>3</sup>), najmanjšo pa valjan beton (pri 90 dneh 2568 kg/m<sup>3</sup>).

Na preizkusnih poljih so obrabo zaradi delovanja abrazijske erozije določili na naslednja načina:

- obrabo so izmerili z geodetsko izmero, natančnost merjenja je bila okoli  $\pm 2$  mm;
- obrabo so določili z vizualnim pregledom polj.



Slika 19: Izvajanje geodetskih meritev (Jacobs et al. 2001: str. 68)



Slika 20: Povprečna obraba (Jacobs et al. 2001, str. 66)

S pomočjo vizualnega pregleda in z merjenjem obrabe so raziskovalci prišli do naslednjih ugotovitev:

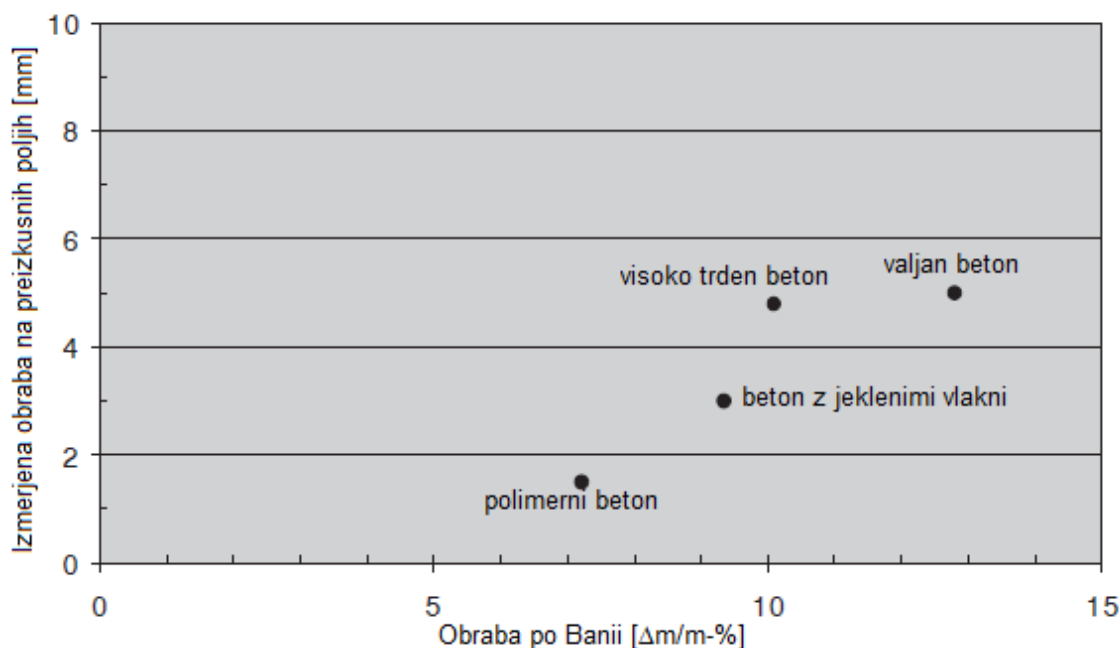
- Povprečna obraba posameznega preizkusnega polja znaša 0,5 mm/leto, le pri valjanem betonu je povprečje večje zaradi neenakomerne obrabe, saj je na robnih delih preizkusnega polja prišlo do velike lokalne obrabe.
- Maksimalna izmerjena globina obrabe na preizkusnih poljih je znašala 3–5 mm/leto, na preizkusnem polju z vgrajenim valjanim betonom pa je na robovih preizkusnega polja globina obrabe znašala tudi 100 mm/leto.
- Že po 2,5 urah obratovanja obtočnega izpusta, v tem času se je preko njega transportiralo 100 ton plavin, se je cementni kamen na površju povsem obrabil.
- Zaradi obremenitev površine s plavinami so se na določenih delih pojavili žlebiči pravokotno na smer toka, žlebiči v smeri toka, ponekod so se iztrgali večji kosi površine, na določenih mestih pa je površina postala valovita.

Štiri leta po vgradnji betona v preizkusna polja so v okviru raziskovalnega projekta iz preizkusnih polj izvrtali več valjev s premerom 100 mm, katere so uporabili v postopkih za določanje abrazijske odpornosti (postopek po Böhmeju ter postopek po Banii (1989)).

S preskusi so preverili:

- katere lastnosti betona vplivajo na abrazijsko odpornost betona;
- ali obstaja korelacija med rezultati, dobljenimi s postopkom za določanje abrazijske odpornosti betona po Banii, in meritvami na preizkusnih poljih;
- ali obstaja povezava med rezultati, dobljenimi z metodo po Banii, in metodo po Böhmeju.

Ugotovili so, da soodvisnosti med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo ni mogoče potrditi, enako velja za soodvisnost med modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo betona. Ugotovili so tudi, da se je z večanjem upogibne tlačne trdnosti in odpornosti na udar povečala tudi abrazijska odpornost betona. Primerjave med rezultati, dobljenimi s postopkom za določanje abrazijske odpornosti betona po Banii, in meritvami na preizkusnih poljih so pokazale, da med njima obstaja soodvisnost, medtem ko soodvisnosti med rezultati, dobljenimi z metodo po Banii in metodo po Böhmeju, ni bilo mogoče ugotoviti.



Slika 21: Prikaz meritev na preizkusnih poljih in rezultatov, dobljenih s postopkom po Banii (Jacobs et al. 2001, str. 73)

Na podlagi laboratorijskih preskusov in meritev na preizkusnih poljih so raziskovalci zapisali, katerim zahtevam mora ustrezati beton ter katere lastnosti mora imeti beton, podvržen podobnim obremenitvam kot nastopajo v obtočnem izpustu Runcahez, da zagotovimo dobro abrazijsko odpornost.

Te zahteve in lastnosti so:

- kvalitetna stična površina med cementnim kamnom in agregatom,
- velika upogibna trdnost ter dobra odpornost na udar,
- nizek modul elastičnosti,
- manjša obraba preskušanca po postopku Böhme.

Podatki v podpoglavju so povzeti po Jacobs et al. (2001).

#### 4.4.2 Raziskave v podslapju hidroelektrarne Vrhovo

HE Vrhovo leži na spodnji Savi in je poimenovana po kraju, ob katerem leži. Elektrarna je bila zgrajena leta 1993 in obratuje v dnevnem akumulacijskem pretočnem režimu. Je prva v nizu šestih hidroelektrarn spodnje savske verige in predstavlja čelno stopnjo. Vloga čelne elektrarne je izravnavanje dnevnih nihanj pretokov. Akumulacija Vrhovo je postala umetni zadrževalnik za plavine. V primeru visokih voda so na jezovni zgradbi zapornice popolnoma



odprte, tako da so takrat površine evakuacijskih objektov (prelivi in umirjevalni bazeni) v celoti izpostavljene abrazivnemu delovanju vodnega toka.

Z namenom opredelitve relevantnih kriterijev za dimenzioniranje abrazijsko odpornih betonov na jezovnih zgradbah, ki bi jih koristili pri gradnji ostalih HE, saj so se v tistem obdobju odvijale pospešene priprave za nadaljevanje gradnje verige hidroelektrarn na spodnji Savi, so leta 2001 raziskovalci na dno podslapja na HE Vrhovo v devet preizkusnih polj vgradili različne sestave betona.



Slika 22: Hidroelektrarna Vrhovo (Savske elektrarne Ljubljana)

Za reko Savo so značilni izjemni ekstremi med mokrim in sušnim hidrološkim letom, kar vpliva tudi na prodnosnost vodotoka. Pretok reke Save niha med 40 in 3.000 m<sup>3</sup>/s. Nihanje pretoka vpliva tudi na prodnosnost, povprečni letni pretok plavin znaša 66.000 m<sup>3</sup>/leto, v primeru mokrega leta pa lahko znaša tudi 260.000 m<sup>3</sup>/leto oziroma maksimalno 12.000 m<sup>3</sup>/dan. Mejni pretok Save, pri katerem se na območju akumulacije začne proces izpiranja sedimentov, znaša 630 m<sup>3</sup>/s. Povprečno je prodnosnih dni v letu 140. Povprečni premer plavin znaša 30,9 mm. Za napovedi abrazijskih procesov je pomembno obdobje, ko je intenziteta premeščanja sedimentov v vodotoku največja.

V okviru raziskovalnega projekta je Kryžanowski s sodelavci kot lokacijo preizkusov abrazijsko odpornih betonov izbral prvo prelivno polje na HE Vrhovo, neposredno ob strojnici, kjer je, glede na režim obratovanja, stopnja erozijskih procesov največja, saj je zaradi potreb čiščenja plavin na vtoku v turbinski del to polje največkrat v uporabi.

Raziskovalci so si pri tem razvojno-raziskovalnem projektu zadali naslednje cilje:

- določiti primerne abrazijsko odporne sestave betonov,

- primerjati rezultate laboratorijskih sestav in na preizkusnih poljih v naravi opravljenih meritev,
- možnost napovedovanja časovnega razvoja obrabe betonov na vodnih zgradbah na osnovi meritev obrabe betonov po postopku ASTM C 1138 in ob upoštevanju podobnih hidroloških pogojev ter obratovalnih razmer, ki so veljali v času izvajanja raziskav.

Preglednica 3: Pregled receptur betonskih mešanic za pripravo 1m<sup>3</sup> betona (Kryžanowski, 2009)

SESTAVA BETONSKIH MEŠANIC			C1	C2	PMC1	PMC2	PMC3	PMC4
<b>cement</b>	kg		440	450	450	450	450	450
<b>v/c</b>			0,391	0,414	0,416	0,416	0,416	0,412
<b>superplastifikator</b>	m/m% na maso cementsa		0,9	0,9				
<b>mineralni dodatek (SiO<sub>2</sub> &gt; 90%)</b>	m/m% na maso cementsa		5	5				
<b>polimer - suhi delež</b>	m/m% na maso cementsa				10	10	10	5
<b>jeklena vlakna</b>	v/v%		0,5	0,5	0,5			
<b>polipropilenska vlakna - L=10mm</b>	v/v%		0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	0,05
<b>polipropilenska vlakna - L=30mm</b>	v/v%						0,60	
<b>frakcije prodnatega agregata</b>		0-4	48	69	70	56,9	70	69,4
		4-8	15	31	30	33,6	30	30,6
	[mm]	8-16	37					
<b>granulirana guma</b>		0-4				9,5		
	[mm]							

Pred pričetkom preizkusov na prelivnem polju so raziskovalci izvedli standardne preskuse betonskih mešanic v laboratoriju. Za preskuse so pripravili šest betonskih mešanic. Kot izhodiščno sestavo betonske mešanice so prevzeli betonsko sestavo, ki je bila uporabljena pri vgradnji abrazijsko odpornih betonskih oblog na prelivnih poljih HE Vrhovo. Ostale betonske mešanice so z namenom izdelave betonske sestave s čim boljšimi mehanskimi lastnostmi in ustrezno vgradljivostjo modificirali tako, da so osnovni mešanici dodali različne dodatke (jeklena vlakna, polipropilenska vlakna, mineralni dodatek, polimerno vezivo, gumeni granulati).

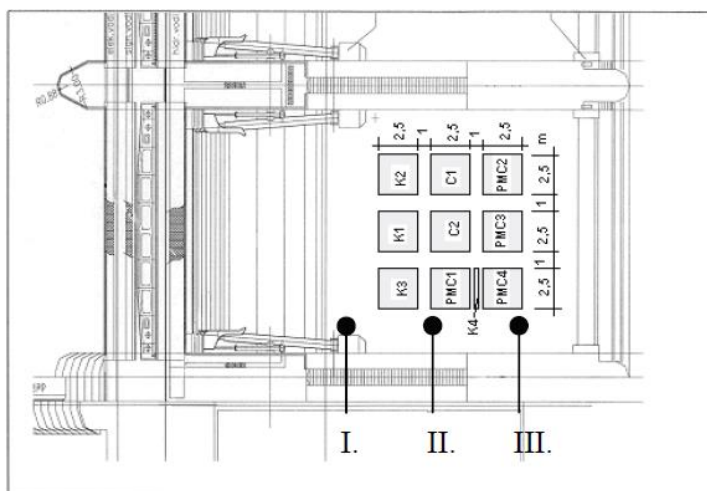
V laboratoriju so s standardiziranimi postopki določili lastnosti svežega in strjenega betona. Parametri strjenega betona, ki so jih določili v laboratoriju na preskušancih, so tlačna trdnost, natezna/upogibna trdnost, modul elastičnosti itd. S pomočjo teh parametrov so posredno dokazovali odpornost na obrabo. Abrazijsko odpornost betona so določili s standardiziranim postopkom ASTM C 1138.



Preglednica 4: V laboratoriju določeni parametri betonskih sestav (Kryžanowski et al., 2012)

	Tlačna trdnost SIST EN 12390-3		Modul elastičnosti DIN 1048-5	Obraba ASTM C 1138	
	[MPa]		[GPa]	[mm]	
	28 dni	90 dni	90 dni	90 dni	900 dni
C1	62.33	67.17	31.17	1.79	0.98
C2	73.09	79.17	35.43	1.64	1.16
PMC1	51.12	54.05	26.43	2.09	2.42
PMC2	22.45	23.81	16.37	0.61	0.60
PMC3	46.90	49.06	22.36	1.79	1.92
PMC4	54.79	58.4	25.75	2.81	1.84

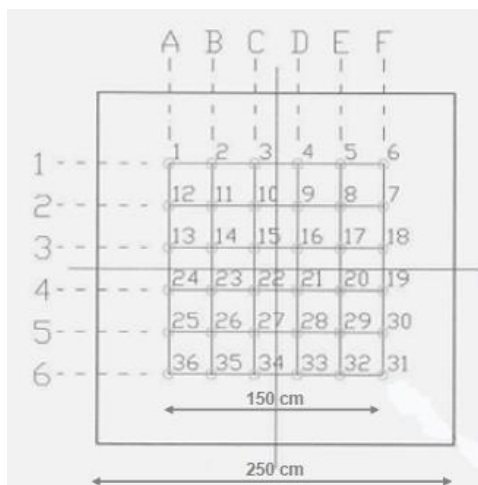
Oktober 2001 so v okviru raziskovalnega projekta na dnu podslapja HE Vrhovo na I. prelivnem polju vgradili 9 preizkusnih polj. Dimenzija posameznega polja je znašala 2,5/2,5m, debelina pa 10 cm. V polja z oznakami C1, C2, PMC1, PMC2, PMC3 in PMC4 so vgradili betonske mešanice, ki so bile po sestavi enake v laboratoriju preizkušenim betonskim sestavam, medtem ko so v polja z oznakami K1, K2, K3 in K4 vgradili komercialne betone, ki jih proizvajalci ponujajo kot abrazijsko odporne in katerih sestava ni poznana.



Slika 23: Situacijski prikaz poskusnih polj v podslapju prelivnega polja HE Vrhovo in kontrolnih profilov za meritev obrabe osnovnega betona (Kryžanowski, 2009)

Pred preplavitvijo podslapja je bila na preizkusnih poljih izvedena poravnava vseh nepravilnosti z osnovnim betonom ter geodetska izmera njihove površine. Izmera je bila opravljena z mersko opremo, ki omogoča natančnost odčitka  $\pm 10^{-4}$  m. Izmera površine je bila opravljena zgolj v centralnem delu preizkusnih polj (150x150cm), v rastru 30x30, v skupno 36 točkah. Z izmero površine zgolj v centralnem delu polj je bil izločen vpliv robov. Po geodetski izmeri so bila poskusna polja v podslapju poplavljen in obratovanje prelivnega

polja fizično blokirano, dokler niso vgrajeni preizkusni betoni dosegli predpisane 90 dnevne starosti.

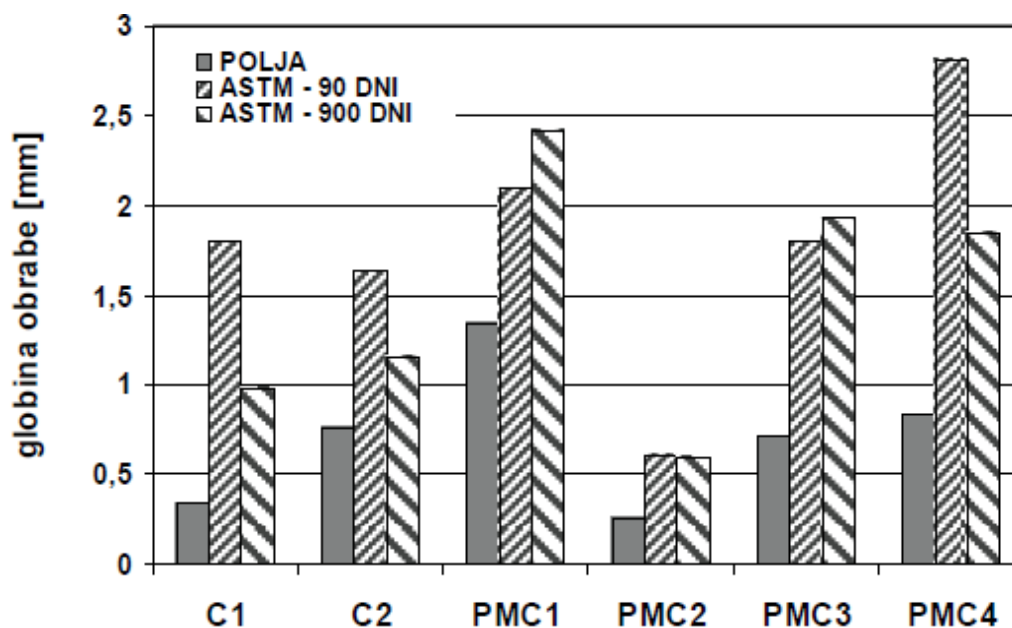


Slika 24: Situacijski prikaz razporeditve merskih točk na posameznem preizkusnem polju (Kryžanowski, 2009)

Program spremljanja hidroloških in hidravličnih parametrov za oceno abrazije na preizkusnih poljih v I. prelivnem polju je bil začel februarja 2002, ko je prelivno polje začelo obratovati, končal pa se je avgusta 2004. V tem obdobju sta bili leti 2002 in 2004 hidrološko povprečni, leto 2003 pa je bilo izrazito sušno. V opazovanem obdobju je bilo zabeleženih 804 obratovalnih ur, pogoj za premeščanje proda pa je bil izpolnjen 297 ur. V tem času se je čez jezovno zgradbo transportiralo 1937 ton plavin in prelilo 204,7 hm<sup>3</sup> vode.

Leta 2004 je bil opravljen prvi vizualni kontrolni pregled, pri čemer so raziskovalci ugotavljali uspešnost sanacijskih del in stanje obrabe preizkusnih polj. V tem času je bilo prelivno polje zaprto, vodo iz podslapja pa so izčrpali. Ob vizualnem pregledu je bilo ugotovljeno, da na nobenem od poskusnih polj ni večjih poškodb površin, obrabljenost površine v centralnem delu poskusnih polj pa je bila enakomerna. Na podlagi izvrtanih valjev so ugotovili, da so bili vsi betoni kvalitetno vgrajeni s homogeno strukturo, razen sestave PMC2. Prav tako je bil pri vseh betonih zagotovljen kvaliteten stik z osnovnim betonom, izjema je bila le sestava PMC2.

V istem času kot vizualni pregled je bila opravljena tudi geodetska izmera obrabe površine poskusnih polj. Opravljena je bila v merskih točkah z višinsko navezavo na reperje na pregradi, po enakem postopku in z isto opremo kot izmera po izvedbi preizkusnih polj.



Slika 25: Primerjava obrabe med sestavami betonov po ASTM C 1138 in meritvami na prelivnem polju HE Vrhovo (Kryžanowski, 2009)

Na podlagi laboratorijskih rezultatov in meritev v naravi so raziskovalci ugotovili:

- Betonske sestave zagotavljajo dobro abrazijsko odpornost in so primerne za izdelavo abrazijsko obremenjenih elementov na vodnih objektih na spodnji Savi.
- Obstaja dobra korelacija med rezultati abrazijske odpornosti po postopku ASTM C 1138 in meritvijo v naravi za betone, stare 900 dni.
- Z zgornjo ugotovitvijo je povezana tudi ustreznost metode za napovedi abrazijskih procesov in dinamike obrabe betonskih površin na jezovnih zgradbah na Savi.
- Beton z dodatkom gumenega granulata (PMC2) je izkazal visoko abrazijsko odpornost.
- Abrazijska odpornost betonov se s starostjo povečuje.
- Na analizo rezultatov abrazijske odpornosti po postopku ASTM C 1138 in interpretacijo meritev v naravi pomembno vplivata čas raziskovanja in starost betonskih preskušancev.

Podatki v podpoglavju so povzeti po Kryžanowski (2009), Kryžanowski (1999), Kryžanowski et al. (2009), Kryžanowski et al. (2012).

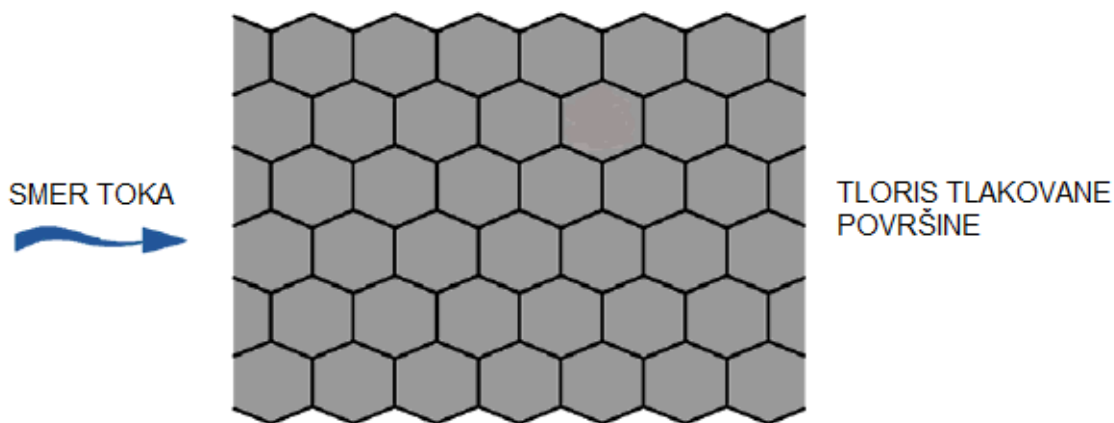
## **5 MATERIALI IN TEHNIKE, S KATERIMI IZBOLJŠAMO ABRAZIJSKO ODPORNOST**

Abrazijska odpornost je sposobnost materiala, da se upira abrazijskim obremenitvam, ki se pojavljajo zaradi drsanja, kotaljenja in udarjanja abrazivnih delcev po njegovi površini. Za zagotovitev abrazijske odpornosti izpostavljenih površin pri izgradnji oziroma popravilu objektov se uporabljajo različni materiali in tehnologije, ki pa v praksi niso vsi enako uspešni. Na samo uspešnost zaščite pred abrazijsko erozijo vplivajo tudi pogoji v okolici. Posamezni materiali in tehnologije pri določenih pogojih dosegajo zelo dobre rezultate, medtem ko se pri drugačnih pogojih ne obnesejo najbolje, zato lahko zapišemo, da trenutno še ne poznamo tehnologije in materiala, ki bi v vseh možnih pogojih izkazovala konstantno boljšo abrazijsko odpornost od drugih. Z uporabo različnih tehnik in materialov ter z njihovimi izboljšavami lahko v tem trenutku le zmanjšamo stopnjo škode, povzročene zaradi abrazijske erozije (ACI 210, 2013; Jacobs, 2001).

### **5.1 Zaščita izpostavljenih površin pred abrazijsko erozijo s tlakovanjem površine**

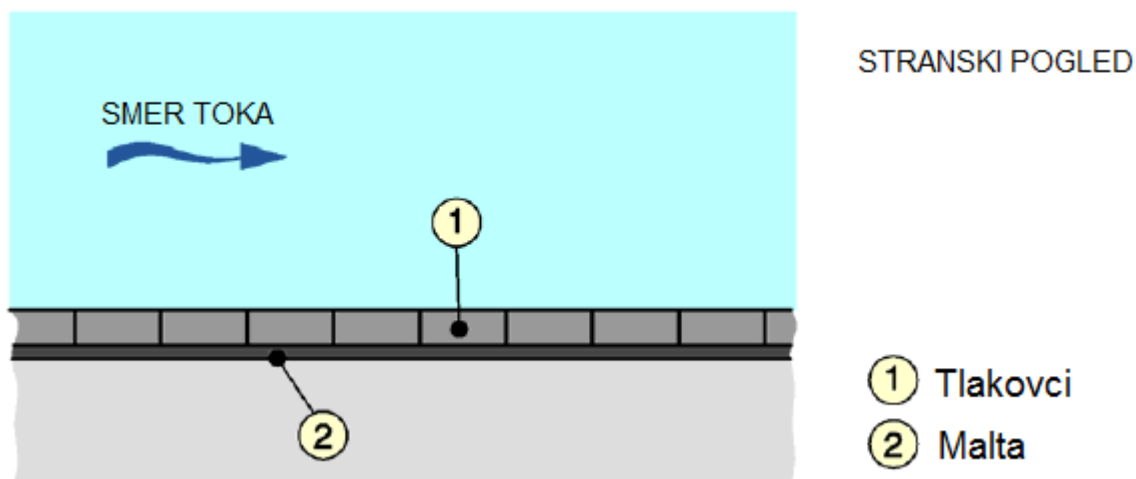
Zaščita izpostavljenih površin pred abrazijsko erozijo s tlakovci je dokaj pogosto uporabljen način zaščite. Izpostavljenih površin lahko zaščitimo s tlakovci iz različnih materialov, kot so bazalt, naravni kamen, les, beton, itd. Tlakovanje nudi posebno dobro zaščito pred abrazijsko erozijo, kadar do obremenitev izpostavljenih površin prihaja zaradi abrazijske erozije z obrusom. V primeru, da prihaja tudi do udarne abrazijske erozije, je potrebno zagotoviti dobro vez med posameznimi tlakovci, prav tako pa moramo biti pozorni na to, da uporabimo tlakovce z zadostno debelino.

Tlakovce kar se da natančno položimo na vnaprej pripravljeno in utrjeno podlago. Za nastanek abrazijske erozije so bolj dovzetna mesta, kjer potekajo fuge med tlakovci, zato moramo biti pozorni na to, da tlakovce polagamo tako, da fuge niso vzporedne s smerjo vodnega toka. S tem upočasnimo oziroma preprečimo nastanek žlebičev vzdolž fug in nadaljnjo obrabo površine zaradi podvodne abrazije.



Slika 26: Prikaz pravilne razporeditve fug glede na smer toka (Jacobs et al. 2001)

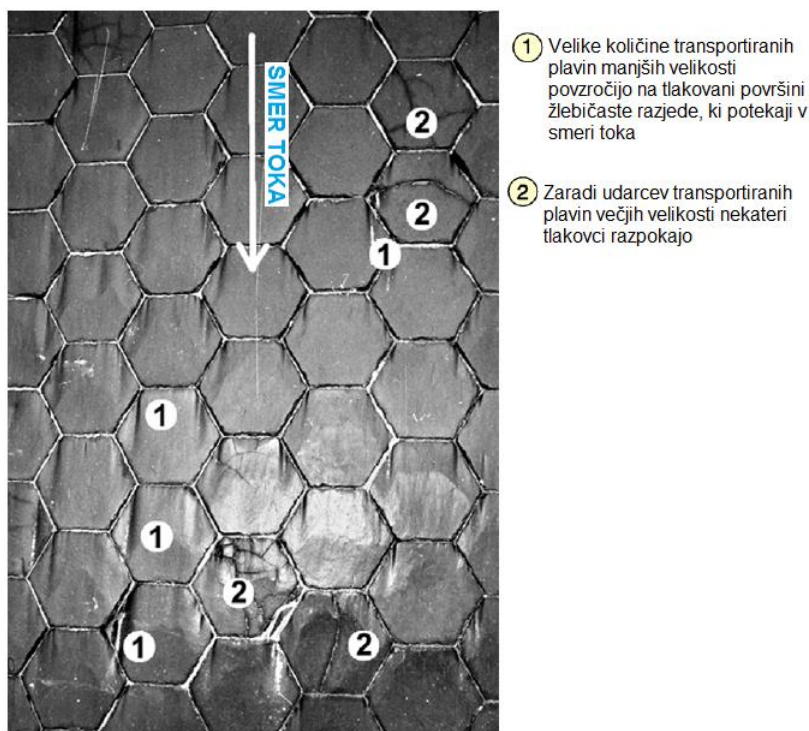
Materiali, iz katerih so običajno izdelani tlakovci, praviloma izkazujejo dobro abrazijsko odpornost, še posebno kadar gre za odpornost proti abrazijski eroziji z brusom. Poleg samega materiala na abrazijsko odpornost vplivajo tudi pogoji, v katerih se izvaja tlakovanje, ki so v primeru vodnih objektov praviloma zahtevni (npr. problem vdora vode). Zelo pomembna je izvedba dobrega spoja med podlago in tlakovci, kar pa zaradi prej omenjenih težjih pogojev gradnje pogosto predstavlja problem. V praksi velja, da tanjša kot je tlakovana plast, toliko bolj pomemben je dober spoj med podlago in tlakovci.



Slika 27: Prikaz vgradnje tlakovcev na podlago (Jacobs et al. 2001)

Po izgraditvi in določenem času izpostavljenosti tlakovanih površin obremenitvam, ki nastanejo zaradi vodnega toka in z njim nošenega materiala, nastanejo poškodbe, kot so žlebičaste razjede na površini, razpoke posameznih tlakovcev in izbitje tlakovca. Pri izbitju enega tlakovca pogosto obremenitve na tem mestu v smeri toka tako narastejo, da obstaja

nevarnost, da pride do poškodb sosednjih tlakovcev in se obseg razgradnje tlakovane površine hitro poveča (Jacobs et al., 2001).



Slika 28: Poškodbe tlakovane površine, nastale zaradi abrazijske erozije  
(Jacobs et al. 2001)

### 5.1.1 Bazaltni tlakovci

V primeru, da za zaščito obremenjenih površin pred pojavom abrazijske erozije izberemo iz mletega bazalta izdelane tlakovce, so le-ti pravokotne ali šesterokotne oblike ter okrog 5 cm debeli. V prid uporabi bazaltnih tlakovcev za zaščito obremenjene površine govori njihova dobra odpornost na obrabo. Sama oblika bazaltnih tlakovcev omogoča dokaj lahko zamenjavo v primeru popravila, vendar pa je zaradi dokaj majhne debeline potrebno zagotoviti močno vez med tlakovci in podlago. Slabost bazaltnih tlakovcev je njihova krhkost, tako da lahko v primeru visoke obremenitve tlakovcev zaradi udarjanja proda po površini pride do pojava razpok na tlakovcih (Jacobs et al., 2001).

### 5.1.2 Tlakovci iz naravnega kamna

Ugotovljeno je bilo, da na samo kvaliteto zaščite pred abrazijsko abrazijo ugodno vplivajo naravne lastnosti kamnine. Zato tlakovce iz naravnega kamna običajno izklešemo iz granita ali drugih primerno trdnih kamnin. Tlakovci iz naravnega kamna so debeli približno 20 cm,

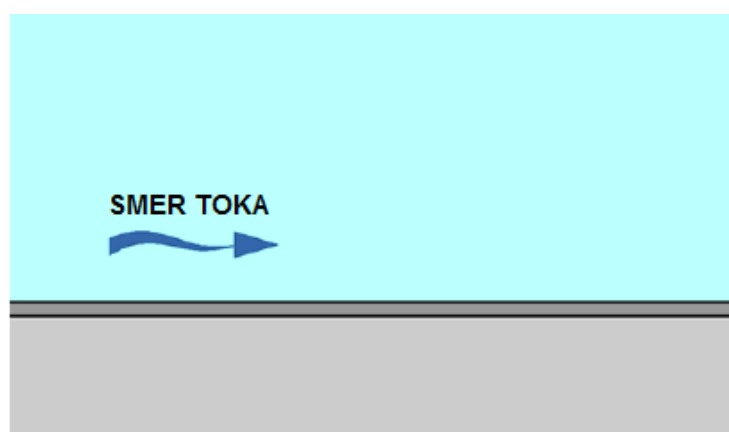
zaradi česar zagotovitev kvalitetne vezi med podlago in tlakovci ni tako pomembna, kot če bi uporabili tlakovce manjše debeline (Jacobs et al., 2001).

### 5.1.3 Les

Za zaščito obremenjene površine se uporabljajo kocke debeline 30 cm ter deske. V primerjavi z drugimi materiali, ki se uporabljajo za zaščito površin pred abrazijo, je les bolj žilav, vendar pa dosega manjšo trdnost. Navkljub nekaterim dobrim izkušnjam z uporabo lesa za zaščito površin pred pojavom abrazijske erozije se les le redko uporablja (Jacobs et al., 2001).

## 5.2 Zaščita izpostavljenе površine pred abrazijsko erozijo s premazi in tankimi oblogami

Z zaščitnimi premazi in tankimi oblogami iz malte ali umetne smole lahko z ustrezno izvedbo del in z uporabo v primernih pogojih zmanjšamo stopnjo abrazijske erozije. Pri uporabi abrazijsko odpornih zaščitnih premazov in tankih oblog v primeru velikih obremenitev se moramo zavedati, da abrazijske erozije ne moremo povsem zaustaviti, ampak lahko le upočasnimo njen razvoj, trajanje zaščite pa je časovno omejeno. Prav zaradi zelo majhne debeline premazov in oblog je zelo pomembno, da zagotovimo dober spoj med podlago in premazom oziroma oblogo (Jacobs et al., 2001).



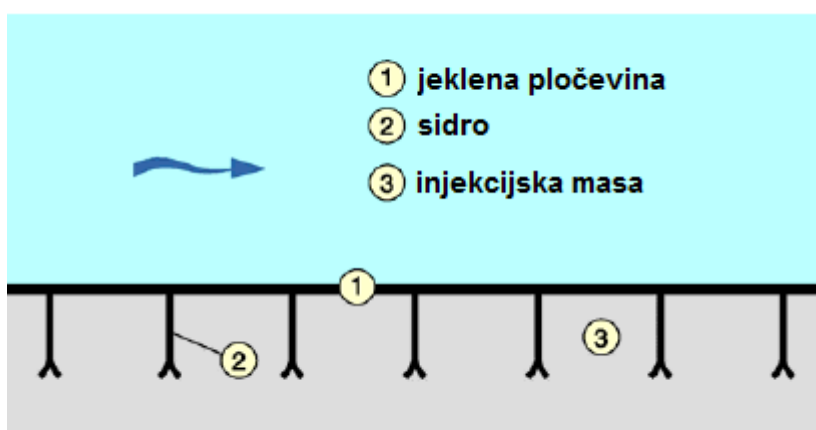
Slika 29: Zaščita podlage z oblogo (Jacobs et al. 2001: str. 87)

## 5.3 Zaščita izpostavljenе površine pred abrazijsko erozijo z jekleno pločevino

Z izbiro pločevine iz ustreznega jekla lahko izboljšamo abrazijsko odpornost na izpostavljenih mestih. Tudi pri zaščiti površine z jekleno pločevino pa moramo zagotoviti dobro vez med podlago in jekleno pločevino. Slabost jeklene pločevine je v njeni visoki ceni, zato take vrste

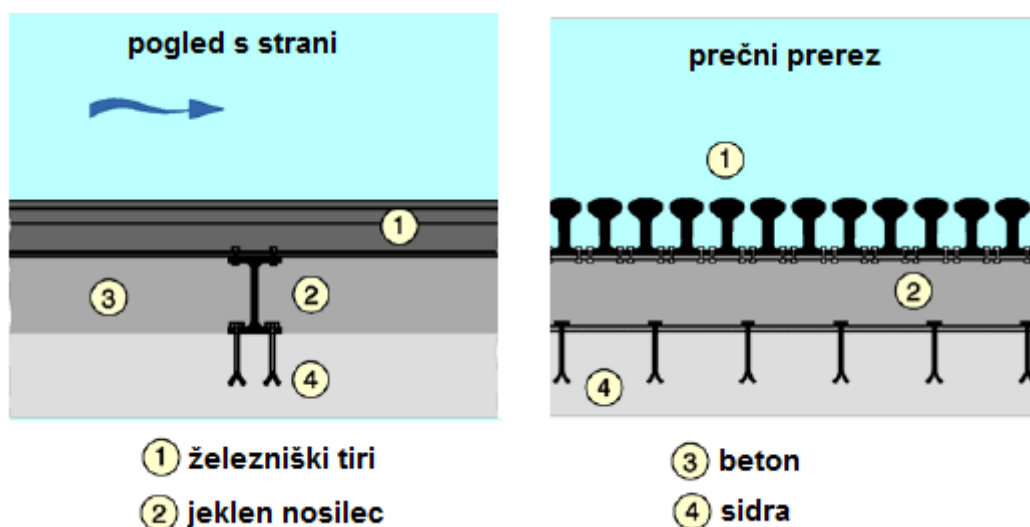


zaščito površin uporabljamo zgolj lokalno, na najbolj obremenjenih delih. Že z uporabo dokaj tenke plasti jeklene pločevine lahko na obremenjenih mestih precej zmanjšamo obrabo zaradi abrazije. V praksi se je sidranje jeklene pločevine v podlago in vbrizgavanje injekcijske mase izkazalo za težavno. Težave povzročajo tudi vibracije, ki nastanejo v področjih, kjer pride do vodnega skoka. Zaradi oscilacij pride do utrujanja materiala, predvsem sider, ta nihanja pa lahko v najslabšem primeru povzročijo, da se jeklena pločevina odtrga od podlage (Jacobs et al., 2001).



Slika 30: Zaščita podlage z jekleno pločevino (Jacobs et al. 2001: str. 88)

#### 5.4 Zaščita izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo z rešetkami iz železniških tirov



Slika 31: Zaščita podlage z rešetkami iz železniških tirov (Jacobs et al. 2001)

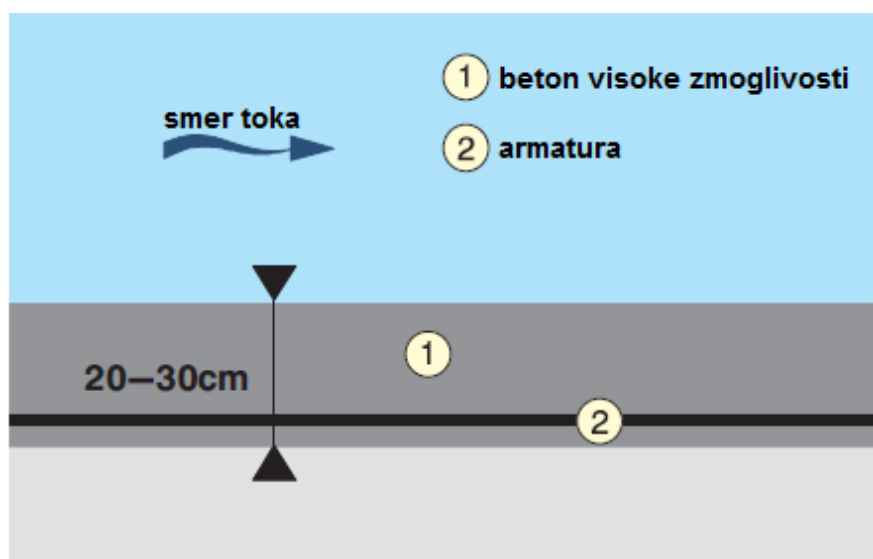
Praviloma izdelamo rešetke iz železniških tirov, ki jih položimo enega zraven drugega v smeri toka. Tire položimo na betonsko plast in jih zasidrmo v osnovno podlago. Zaščita obremenjene površine z rešetkami iz železniških tirov se je v praksi izkazala za dobro,



vendar pa so zaradi oblike tirov in njihovega težkega preoblikovanja zelo omejene možnosti uporabe le-teh (Jacobs et al., 2001).

## 5.5 Zaščita izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo z betonsko oblogo

V primeru, da podlago pred abrazijsko erozijo zaščitimo z debelo betonsko oblogo, problemov z zagotovitvijo kvalitetnega stika s podlago nimamo. Prav tako masivna betonska zaščita ni tako občutljiva na pojav začetne obrabe, saj je betonska obloga dovolj debela in izdelana iz monolitnega masivnega betona, brez konstrukcijskih stikov (Jacobs, 2001). Ustrežno zasnovan beton odlikujejo odlična vgradljivost, možnost poljubnega oblikovanja konstrukcije, široka dostopnost sestavin, ekonomičnost ter obstojnost (Kryžanowski, 2009).



Slika 32: Zaščita podlage z betonom visoke zmogljivosti (Jacobs et al. 2001: str. 89)

Pogoji, v katerih običajno poteka gradnja, so večinoma zahtevni, zato je toliko bolj pomembno, da gradnjo izvedemo strokovno in kvalitetno. Sama gradnja se lahko olajša z načrtovanjem konstrukcije, sestavljene iz večinoma ravnih in ploščatih elementov.

Vrsta in dimenzija obremenitve vplivata na izbiro betona za gradnjo zaščitne plasti. Na tistih mestih, kjer so obremenitve manjše, lahko zadovoljivo abrazijsko odpornost dosežemo že z običajnimi betoni. Mesta, kjer so obremenitve večje, pa se pred obrabo zaščiti z uporabo betonov visokih zmogljivosti, z lastnostmi, ki izboljšajo odpornost na abrazijsko erozijo (Jacobs et al., 2001).

## 6 ABRAZIJSKO ODPORNI BETON

Beton je v ožjem pomenu kompozit, ki je pripravljen z mešanjem več sestavin: cementa, vode, agregata in različnih dodatkov. Mineralni agregat v betonu nastopa kot polnilo v matrici iz cementnega kamna. Takoj, ko zamešamo sestavine z vodo, se začne proces hidratacije, pri katerem nastane cementi kamen (Žarnić, 2005, Kryžanowski, 2009). Kot že prej omenjeno, ustrezno zasnovan beton odlikujejo odlična vgradljivost, možnost poljubnega oblikovanja konstrukcije, široka dostopnost sestavin, ekonomičnost ter obstojnost (Kryžanowski, 2009).

Beton se zaradi svojih dobrih mehanskih in tehnoloških lastnosti dokaj pogosto uporablja kot material za izdelavo vodnih objektov, saj med drugim nudi dobro zaščito obremenjenih površin pred abrazijsko erozijo. V primeru velikih obremenitev betonskih površin zaradi abrazije beton, izdelan po običajnih recepturah in postopkih, ne nudi zadostne odpornosti pred abrazijsko erozijo. Na podlagi novih tehnologij in materialov je danes možno izdelati beton visokih zmogljivosti, ki je abrazijsko bolj odporen ter primeren za uporabo na mestih, kjer je pojav abrazijske erozije bolj verjeten (Jacobs et. al. 2001).

Način izdelave in izbira materialov sta odvisna od pogojev, v katerih bo vodni objekt služil svojemu namenu. Tako pri majhnih obremenitvah včasih zadostuje uporaba zaščitnega premaza, v drugih primerih, kadar so prisotne velike obremenitve na izpostavljenih površinah, pa moramo uporabiti več centimetrov debel sloj betona visokih zmogljivosti (Jacobs et. al., 2001).

Hu et al. (2006) je izpostavil najpogostejše načine za izboljšanje abrazijske odpornosti betona, uporabljenega za izdelavo vodnih zgradb. Ti načini so:

- dodatek polimernega veziva v betonsko mešanico za izboljšanje vgradljivosti betona,
- dodatek mikrosilike v betonsko mešanico za izboljšanje trdnostnih karakteristik,
- uporaba plastifikatorjev in superplastifikatorjev za izboljšanje vgradljivosti betona,
- dodatek vlaken v betonsko mešanico za doseg žilavosti.

### 6.1 Parametri, ki vplivajo na abrazijsko odpornost betona

Razgradnja betona zaradi delovanja abrazije lahko nastopi na cestnih površinah, kjer obremenitve povzročajo vozila, na industrijskih površinah, tu obremenitve prav tako povzročajo vozila in druga mehanizacija, in vodnih zgradbah, kjer obremenitve na izpostavljenih površinah povzročajo z vodo nošene plavine, ki se kotalijo, drsajo ali udarjajo po

površini (Atis, 2002). Obrabo na izpostavljeni površini zaradi delovanja abrazije lahko povzročijo tudi z vetrom nošeni delci (ACI 210, 2013). Ob pregledu literature ugotovimo, da so bile raziskave abrazijsko odpornih betonov opravljene na betonih, ki se uporabljajo za izdelavo vodnih zgradb (Kryžanowski, 2009, Horszczaruk, 2005, Liu et al., 2005, Kang et. al, 2012), industrijskih površin (Dhir et al., 1991) ter cestnih površin (Dong-Hyun in Chan-Gi, 2012).

Pri načrtovanju in gradnji abrazijsko odporne plasti betona je potrebno upoštevati parametre, ki vplivajo na odpornost betona. S pravilnim načrtovanjem in gradnjo izpostavljene betonske površine zmanjšamo obrabo zaradi delujočih sil, ki nastanejo kot posledica drsanja, kotaljenja in udarjanja drugih teles ob izpostavljeno površino. Pogosto se je izkazalo, da so poškodbe betona zaradi abrazijske erozije nastale zaradi seštevka več faktorjev, kot so slaba kvaliteta agregata, nezadovoljiva tlačna trdnost, neustrezna nega in površinska obdelava betona (Bakke, 2006).

Kot že prej napisano, pri načrtovanju vodnih zgradb ne obstaja splošni kriterij za zagotovitev odpornosti betona na abrazijsko erozijo. Na odpornost betona pred pojavom abrazijske erozije vplivajo tlačna trdnost, natezna trdnost, trdnost agregata, uporaba specialnih cementov, elastični modul, vodo-cementno razmerje, površinska obdelava betona, nega betona ter dodatki (mineralni dodatki, polimeri, vlakna).

### **6.1.1 Kvaliteta agregata**

Različne raziskave so pokazale, da na sposobnost abrazijske odpornosti betona močno vpliva trdnost grobega agregata (Liu, 1981, Laplante, 1991, cit. po Bakke, 2006). Z uporabo agregata visoke gostote in trdnosti lahko precej izboljšamo abrazijsko odpornost betona. Izkazalo se je, da je bila izguba materiala zaradi abrazije v primeru betona, izdelanega iz apnenčevega agregata, dvakrat večja kot pri betonu, izdelanem iz kremenčevega agregata (Liu, 1981, cit. po Bakke, 2006).

V priročniku ACI 210 (2013) je zapisano, da mora abrazijsko odporen beton vsebovati največji možen delež maksimalnih zrn. Dahir et al. (1991) je v okviru raziskave, ki jo je opravil, ugotovil, da na abrazijsko odpornost vpliva velikost maksimalnega zrna. Abrazijska odpornost betona, ki je vseboval maksimalno zrno velikosti 5 mm oziroma 40 mm, je bila slabša v primerjavi z betonom, katerega maksimalno zrno je znašalo 10 oziroma 20 mm.

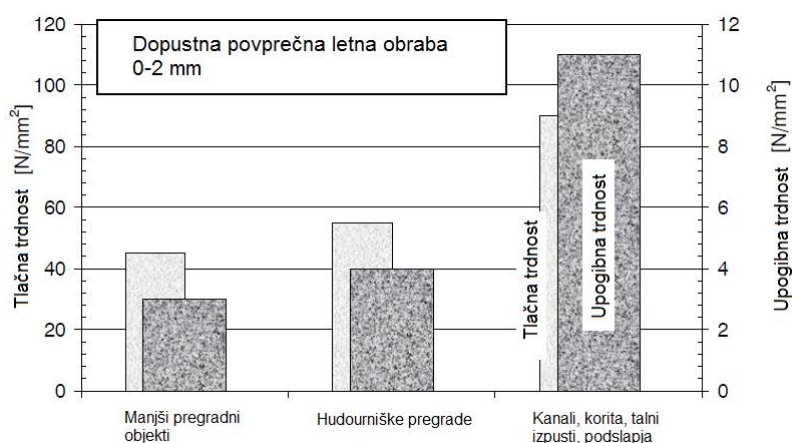
Bakke (2006) povzema po Schumanu in Tuckerju (1939), da na abrazijsko odpornost betona vpliva tudi oblika agregata, saj ta med drugim vpliva na potrebo po vodi za izdelavo betona.

Z uporabo agregata, ki je večinoma kubične oblike (drobljen agregat), izboljšamo abrazijsko odpornost betona, saj s tem zagotovimo ustrezno povezavo med agregatom in cementnim kamnom.

### 6.1.2 Tlačna trdnost

Nekatere pretekle raziskave so pokazale, da je tlačna trdnost eden izmed najpomembnejših faktorjev, ki vplivajo na abrazijsko odpornost. Primerjava dveh sestav betona, obeh izdelanih iz enakega agregata ter obeh enako površinsko obdelanih, vendar z različnima tlačnima trdnostnima, je pokazala, da je abrazijsko bolj odporna sestava z višjo tlačno trdnostjo (Liu, 1980, cit. po Bakke, 2006).

Jacobs et al. (2001) je izdelal splošna priporočila za tlačno in upogibno trdnost betona za nekatere vodne objekte in njihove elemente, ki so grafično podani v sliki 33.



Slika 33: Splošna priporočila za tlačno in upogibno trdnost betona pri starosti 28 dni za nekatere vodne objekte in njihove elemente (Jacobs et al., 2001)

Kot lahko razberemo iz slike 33. je Jacobs et. al. (2001) ugotovil, da za manjše pregradne objekte, kot so na primer drče ter pragovi, zadostuje uporaba betona s tlačno trdnostjo okrog 40 MPa po 28. dneh in upogibno trdnostjo okrog 3 MPa po 28. dneh. Za izpostavljene dele hudourniške pregrade zadostuje beton s tlačno trdnostjo okrog 50 MPa po 28. dneh in upogibno trdnostjo 4 MPa po 28. dneh. Za bolj izpostavljene obremenjene vodne objekte in njihove elemente, kot so na primer kanali, korita, talni izpusti in podslapja, zadostuje beton, ki dosega po 28. dneh tlačno trdnost okrog 90 MPa in upogibno trdnost okoli 11 MPa.

Na samo abrazijsko odpornost betona močno vpliva vrhnja plast betona. V priročniku ACI 210 (2013) so navedene možnosti za izboljšanje tlačne trdnosti vrhnje plasti betona.

Tlačno trdnost vrhnje plasti betona izboljšamo s tem, da:

- preprečimo segregacijo,
- preprečimo izcejanje,
- beton ustrezno površinsko obdelamo,
- minimaliziramo v/c razmerje vrhnje plasti betona,
- poskrbimo za ustrezno nego betona.

Kot že prej omenjeno, so pretekle študije pokazale, da je tlačna trdnost eden izmed najpomembnejših faktorjev, ki vplivajo na abrazijsko odpornost. Vendar pa so novejšje študije, kjer so preučevali abrazijsko odpornost betonov, pokazale, da večja tlačna trdnost ne pomeni nujno boljše abrazijske odpornosti. Pri primerjavi različnih sestav betona so gumi betoni, to so betoni, kjer določen del mineralnega agregata nadomestimo z gumenim granulatom, dosegli najboljšo abrazijsko odpornost, navkljub temu, da je bila njihova tlačna trdnost nižja v primerjavi z drugimi sestavami betona (Kryžanowski, 2009, Kang et al., 2012). Šušteršič (2004) je preučeval abrazijsko odpornost preskušancev s podvodno metodo ASTM C 1138 in po Böhmejevi metodi. Preučeval je betone z zelo različnimi sestavami in tlačnimi trdnostmi. Zato je kot najvplivnejši parameter za ocenjevanje abrazijske odpornosti betonov določil razmerje med modulom elastičnosti in tlačno trdnostjo. Ugotovil je, da je podvodna abrazijska odpornost večja, če je razmerje med modulom elastičnosti in tlačno trdnostjo večje. Med vsemi preučevanimi sestavami betonov je največje razmerje med modulom elastičnosti in tlačno trdnostjo dosegel s polimerom modificirani beton z granulirano gumo, pri tej sestavi betona pa je bila ugotovljena tudi najboljša podvodna abrazijska odpornost.

### **6.1.3 Vodocementno razmerje**

Velikost vodocementnega količnika vpliva na kakovost betona. Na splošno velja, da večji kot je vodocementni količnik, slabši je beton in obratno, seveda ob pogoju enake vgradljivosti (Žarnić, 2005). Prav tako so številne študije pokazale, da velikost vodocementnega razmerja vpliva tudi na abrazijsko odpornost betona. Z zmanjšanjem vodocementnega razmerja se izboljša njegova abrazijska odpornost (Liu, 1981). Dodatki, s katerimi zmanjšamo potrebo po vodi za pripravo betona z določeno vgradljivostjo, so plastifikatorji in superplastifikatorji. Plastifikatorji zmanjšajo potrebno količino vode za izdelavo betona za okoli 12 %, superplastifikatorjipa tudi do 30 %. Ameriška agencija U.S. Army Corps of Engineers je določila največjo vrednost vodocementnega količnika za vodne objekte. Ta vrednost znaša 0,45 (Bakke, 2006). Kryžanowski (2009) je ob pregledu literature ugotovil, da optimalne vrednosti vodocementnega razmerja znašajo med 0,3 in 0,4. V kolikšni meri se izboljša abrazijska odpornost betona zaradi znižanja vodocementnega razmerja, je odvisno tudi od

načina delovanja razgraditvenega procesa. Kryžanowski (2009) je zapisal, da je Kunterding (1991) v svoji raziskavi ugotovil, da se z zmanjšanjem vodocementnega razmerja z 0,7 na 0,3 poveča odpornost na obrabo pri udarni abraziji za 400 %, pri abraziji z brusom pa za 50 %, podobno pa sta ugotovila tudi Liu in McDonald (1981), ki sta zapisala, da se z zmanjšanjem vodocementnega razmerja z 0,72 na 0,4 poveča odpornost na obrabo pri abraziji z brusom za 43 %, preiskave pa sta opravila po metodi, ki je bila takrat še v fazi preskušanja, ASTM C 1138.

#### **6.1.4 Cement in cementni kamen**

Proces vezanja vode in cementa, ki je hidravlično vezivo, imenujemo hidratacija. Posledica hidratacije je, da iz židke cementne paste nastane trd in trden cementni kamen (Žarnić, 2005). Trdnost cementnega kamna ključno vpliva na abrazijsko odpornost betonov (Kryžanowski, 2009).

Kryžanowski (2009) je ob pregledu literature ugotovil, da se za izdelavo abrazijsko odpornih betonov glede na razvrstitev cementov po klasifikaciji ASTM C 150 največkrat priporoča uporaba cementov, ki so uvrščeni v dva razreda: Tip I, čisti portlandski cement ali cement z mineralnimi dodatki, in Tip II, portlandski cement z nižjo toploto hidratacije in zmerno ali srednjo sulfatno odpornostjo. Po standardu SIST EN 197-1:2002 se uporabljani cementi razvrščajo v naslednje razrede: CEM I – portlandski cement, CEM II – portlandski cement z dodatki elektrofiltrskega pepela in mikrosilike in CEM III – žlindrin cement. Maksimalna količina portland cementa za abrazijsko odporne betone je 415 kg, večja količina ni priporočljiva, ker ne prispeva k povečanju odpornostnih karakteristik, poslabšuje vgradljivost in povečuje verjetnost pojava razpok (Holland, 1987, cit. po Kryžanowski, 2009).

Na splošno naj bi cementni kamen nudil nizko odpornost proti abraziji. Zato je potrebno abrazijsko odporne betone izdelati iz primerne agregata in cementnega kamna z nizko poroznostjo in visoko trdnostjo (Naik et al., 1995).

### **6.1.5 Dodatki**

S pomočjo dodatkov lahko povečamo abrazijsko odpornost betona. V raziskavah abrazijske odpornosti betona so za izdelavo betona uporabili mineralne dodatke, kot so elektrofiltrski pepel (Atis, 2002), žindra (Ozby, Lachemi in Sevim, 2011) in mikrosilika (Kryžanowski, 2009; Ghafoori in Diawara, 1999; Horszczaruk 2005). Uporabili so tudi druge dodatke, kot so vlakna (Kryžanowski, 2009; Ghafoori in Diawara, 1999; Horszczaruk, 2005; Šušteršič et al., 2001) in polimere (Kryžanowski, 2009; Dong-Hyun in Chan-Gi, 2012; Horszczaruk, 2005).

### **6.1.6 Vrste betonov**

Kot že prej omenjeno, na odpornost betona na abrazijo vpliva več faktorjev. Z izbiro kvalitetnega betona lahko izboljšamo njegovo abrazijsko odpornost. Ker z običajnim betonom ne moremo izpolniti vseh zahtev, ki jim mora abrazijsko odporen beton ustrezati, lahko danes z znanjem, ki ga imamo, izdelamo visoko zmogljive betone, z izboljšano abrazijsko odpornostjo. V nadaljevanju so predstavljene vrste betonov, ki se jih dokaj pogosto uporablja za izdelavo abrazijsko odpornih betonov.

### **6.1.7 Beton z dodatkom mikrosilike**

Z dodatkom mikrosilike izboljšamo adhezijo med agregatom in cementnim kamnom z zapolnitvijo por v mikro-strukturi cementnega kamna. Betonu se zaradi tega poveča njegova tlačna trdnost, posledično pa se poveča tudi abrazijska odpornost betona (Laplante, 1991; Holland, 1986 cit. po Bakke, 2006). Raziskava, ki sta jo opravila Ghafoori in Diawara, je pokazala, da povečanje deleža mikrosilike v betonu z 0 na 10 % poveča njegovo abrazijsko odpornost za 57 % po 28. dneh, oziroma 61 % po 91. dneh in ni v sorazmerju s povečanjem tlačne trdnosti. Tlačna trdnost se ob povečanju deleža mikrosilike z 0 na 10 % poveča za 49 % po 28. dneh, oziroma 56 % po 91. dneh. Za izdelavo abrazijsko odpornih betonov je priporočena količina mikrosilike vsaj 15 %, glede na maso cementa in jo dodajamo kot samostojni dodatek (Holland, 1987; Shi, 1997, cit. po Kryžanowski, 2009).

Z uporabo mikrosilike v betonih lahko izdelamo beton visoke trdnosti, pri katerem ima povečan vpliv na odpornost betona na abrazijo cementni kamen, posledično lahko zato za izdelavo betona uporabimo agregat slabše kvalitete. To je smiselno predvsem na tistih območjih, kjer ni možno pridobiti agregata zadovoljive kvalitete (Bakke, 2006).

Dodajanje mikrosilike betonu poveča potrebo po vodi, zato se mikrosilika vedno uporablja v kombinaciji s superplastifikatorji. Zaradi dodatka mikrosilike se izboljšata obdelovalnost in kohezivnost, zmanjša pa se nagnjenost k segregiranju (Zajc, 2007).

Z dodatkom mikrosilike torej izboljšamo številne lastnosti betona. Uporaba betona z mikrosiliko za izdelavo izpostavljenih površin vodnih zgradb je priporočljiva predvsem zaradi izboljšanja tlačne trdnosti in povečanja abrazijske odpornosti. Njegova uporaba pa je priporočljiva tudi tam, kjer za izdelavo betona nimamo na razpolago kvalitetnega agregata.

Po poročanju ACI 210 (2013) so izkušnje z uporabo betona z mikrosiliko za sanacijo podslapja in za preplastitev osnovnega korita zaradi povečanja odpornosti na abrazijo zelo dobre.

#### 6.1.8 Beton s polimeri

Glede na način uporabe polimerov ločimo naslednje skupine betonov:

- a) **S polimeri impregnirani beton** se izdelava tako, da običajen beton prepojimo z monomernim premazom, ki polimerizira »in situ«. Globina penetracije premaza je odvisna od poroznosti betona in od tega, pod kakšnim tlakom je bil impregniran premaz (ACI 210, 2013). Za kvalitetno in varno izvedbo, nekateri monomeri so lahko namreč zdravju nevarni, morajo poskrbeti izurjeni in izkušeni izvajalci. Izdelava s polimeri impregniranega betona je draga (DePuy, 1975, cit. po ACI 210, 2013). Izkušnje pri sanacijah so pokazale dobre rezultate pri povečevanju abrazijske odpornosti (Liu, 1980, cit. po Kryžanowski, 2009).
- b) **Polimerno modificiran beton** je običajen beton z dodatkom polimerne disperzije, ki jo zamešamo v svežo betonsko mešanico. Pri porabi vode za hidratacijski proces se polimerna disperzija zgosti in tvori polimerni film na površini hidratacijskih produktov (Zajc, 2007). V primerjavi z običajnimi betoni ima polimerno modificiran beton višjo tlačno trdnost, nižji modul elastičnosti, izboljšano adhezijo, običajno je bolj zmrzlinško odporen, povečani pa sta tudi njegova abrazijska in udarna odpornost. Te lastnosti so odvisne od vrste dodanega materiala (ACI 210, 2013). Bistvena prednost s polimeri modificiranih betonov je izboljšanje sprijemljivosti s podlago in zmanjšanje vodovpojnosti, zato se največkrat uporabljajo pri sanacijah poškodb betonskih površin ali kot obloge na obremenjenih površinah (Holland 1987; Ukrainczyk, 1994, cit. po Kryžanowski, 2009). Izmed polimerno modificiranih betonov se najpogosteje uporabljajo betoni, modificirani z lateksom. Dong-Hyun in Chan-Gi (2012) sta v svoji raziskavi ugotovila, da dodatek lateksa izboljša abrazijsko odpornost betona, v



nasprotju s tem pa je Horszczaruk (2005) ugotovila, da dodatek lateksa nima vpliva na abrazijsko odpornost.

- c) **Polimerni beton** je mešanica agregata in polimera, ki služi kot vezivo. Tak beton odlikujejo hiter čas vezanja, velika odpornost na kemijsko agresivnost ter izjemne trdnostne karakteristike v stičnem območju. Širšo uporabo polimernega betona omejuje njegova visoka cena, zato se uporablja v manjšem obsegu, predvsem pri sanacijah betonskih površin (ACI 210, 2013).

### **6.1.9 Vlakanasto armirani beton**

Vlakna, ki se dodajajo betonu, so lahko različnih oblik, izdelana iz jekla, polimerov, stekla ali naravnih organskih ali keramični materialov. Vlakna, ki se najpogosteje dodajajo z namenom izboljšanja abrazijske odpornosti, so jeklena vlakna. Mnenja glede uspešnost jeklenih vlaken v zvezi z abrazijsko odpornostjo so deljena. Liu in McDonald (1981) sta v svoji raziskavi zapisala, da je abrazijska odpornost betona z dodatkom jeklenih vlaken slabša v primerjavi z betonom z enakim vodocementnim razmerjem ter enakim agregatom, ki pa ni vseboval jeklenih vlaken. Ugotovila sta, da naj bi bila slabša abrazijska odpornost betona z dodatkom jeklenih vlaken posledica dveh razlogov. Prvi razlog je manjša vsebnost agregata na volumen betona na račun jeklenih vlaken v primerjavi s konvencionalnim betonom. Drugi razlog pa so napetosti, ki nastanejo potem, ko se vrhnja plast cementnega kamna izrabi, delci v vodi pa udarjajo v jeklena vlakna. Posledica teh napetosti je razgradnja betona. Slednji, drugi razlog, je kot razlog slabše odpornosti betona z jeklenimi vlakni na abrazijsko erozijo navedla tudi Horszczaruk (2009). Medtem pa Šušteršič (2001) ugotavlja, da z dodatkom vlaken, izdelanih iz mehkejšega jekla, ki se ob udarcih delcev sploščijo, izboljšamo abrazijsko odpornost betona. Prav tako poroča, da je obraba izpostavljene površine bolj enakomerna pri betonih z dodatkom jeklenih vlaken. Izboljšanje abrazijske odpornosti betona zaradi dodatka jeklenih vlaken je v raziskavi zabeležil tudi Hu et al. (2006). Proces abrazijske odpornosti so simulirali s curkom vode in abrazivnih delcev, ki so ga pod različnimi koti usmerili v preskušane. S primerjavo betonov so ugotovili, da se obraba betona z jeklenimi vlakni v primerjavi z betonom brez vlaken najbolj zmanjša, kadar curek obremenjuje površino pod kotom 15°. Pri vpadnem kotu 90° pa bistvene razlike med betonoma ni.

### **6.1.10 Beton z dodatkom gumenega granulata**

Kot že prej omenjeno, trenutno še ne obstaja splošni kriterij za zagotovitev odpornosti betona na abrazijsko erozijo. Zato strokovnjaki še vedno opravljajo raziskave in izboljšave tehnik in materialov, s katerimi bi lahko omejili nastalo škodo zaradi podvodne abrazije. Eden takšnih

materialov je beton z dodatkom gumenega granulata. Beton z dodatkom gumenega granulata, imenovan tudi gumi beton, je beton, pri katerem del mineralnega agregata nadomestimo z gumenim granulatom. Gumeni granulati se dobi z mletjem odpadnih pnevmatik, tako da dobimo granulati želeno granulacije. Uporaba gumi betona je zanimiva tudi z ekološkega vidika, saj z uporabo reciklirane gume prispevamo k zmanjšanju onesnaževanja okolja. Pri pregledu znanstvene literature s področja fizikalnih lastnosti betona je razvidno, da ima beton z dodatkom gumenega granulata v primerjavi z navadnim betonom vrsto prednosti, kot so večja deformabilnost, boljša sposobnost dušenja mehanskih vibracij, manjša toplotna prevodnost in boljša zmrzljiva odpornost. V primerjavi z navadnim betonom pa se zmanjšata njegova obdelovalnost ter tlačna in natezna trdnost (Popit, Nikonov in Emri, 2012). Možnosti uporabe betona z dodatkom gumenega granulata je več. Lahko ga uporabimo za izdelavo estrihov v stanovanjski gradnji in drugih tlakov z manjšo nosilnostjo, za izdelavo betonov, odpornih na podvodno abrazijo, pri hidrogradnjah ter za izdelavo podložnih betonov predvsem v industriji, ki naj bi preprečevali prenašanje deformacij (Šušteršič, 2012). Kryžanowski (2009) je po izvedbi laboratorijskih preiskav ugotovil, da je med primerjanimi sestavami betona najmanjšo obrabo izkazala sestava z dodatkom gumenega granulata, prav tako pa je beton z dodatkom gumenega granulata izkazal najmanjšo obrabo tudi na preizkusnih poljih v naravi. Prav tako je občutno izboljšanje abrazijske odpornosti betona v primerjavi z navadnim betonom zabeležil Kang et al. (2012). Slednji so kot razloge za izboljšano abrazijsko odpornost gumi betona v primerjavi z navadnim betonom navedli njegovo boljšo sposobnost dušenja vibracij, večjo žilavost ter zmožnost, da prenese večjo deformacijo pred poružitvijo.

### **6.1.11 Površinska obdelava betona**

Na abrazijsko odpornost betona vpliva tudi površinska obdelava betona. Raziskave, ki sta jih opravila Kettle in Sadegzadeh (1987, cit. po Bakke, 2006), so pokazale, da so betonske površine, glajene s strojem, abrazijsko bolj odporne kot ročno obdelane površine, saj s strojno obdelavo dobimo dobro zgoščeno površino z nižjim vodocementnim faktorjem. Tako Liu (1980, cit. po Bakke, 2006) kot Jacobs et al. (2001) sta zapisala, da z vakuumiranjem površine občutno izboljšamo abrazijsko odpornost, saj s tem postopkom zmanjšamo količino vode na betonski površini in zmanjšamo vodocementno razmerje.

Vpliv uporabe različnih orodij za površinsko obdelavo na abrazijsko odpornost betona je analiziral Fentress (1973, cit. po Bakke, 2006). Med seboj je primerjal leseno, magnezijevo in jekleno gladilko. Kot najbolj ustrezna se je izkazala jeklena gladilka, z njeno uporabo dobimo gladko površino brez nepravilnosti. Pri končni obdelavi površine z leseno in magnezijevo

gladilko dobimo bolj hrapavo in neenakomerno površino, zaradi česar se zmanjša tudi abrazijska odpornost.

Abrazijsko odpornost lahko izboljšamo tudi z uporabo posipov, pripravljenih iz cementa in agregata. Posip potresemo po površini še na svež beton, nato pa posip pustimo delovati toliko časa, da posrka vodo. Po tem betonsko površino obdelamo z gladilko. Preskusi, ki so jih opravili pri združenju Portland Cement Association v sedemdesetih, so pokazali, da s posipi bistveno izboljšamo abrazijsko odpornost betona (Bakke, 2006). Jacobs et al. (2001) je zapisal, da s posipom iz cementa in kvarcita povečamo abrazijsko odpornost na brušenje za faktor 2–10, pri posipu iz silicijevega karbida pa se abrazijska odpornost na udarjanje zmanjšuje.

#### **6.1.12 Nega betona**

Dalj čas traja nega betona, boljša je njegova abrazijska odpornost. Zahtevan čas nege betona je odvisen tudi od okoliških pogojev, kot so na primer izpostavljenost soncu, vetru ter različnim temperaturam. Z nego betona se mora začeti takoj po vgradnji betona z zagotovitvijo ustrezne vlažnosti (Jacobs et al., 2001).

## **7 IZVEDBA EKSPERIMENTALNEGA DELA**

Preiskave smo opravili v laboratoriju Inštituta za raziskave materialov in aplikacij (IRMA) v Trzinu in v prostorih laboratorija Katedre za optodinamiko in lasersko tehniko, na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani. Preiskave so potekale med marcem in junijem 2013. Izdelali smo šest različnih betonskih mešanic in določili lastnosti svežega betona. V štirih izdelanih mešanicah smo del agregata zamenjali z gumenim granulatom. Iz betonskih mešanic smo izdelali preskušance različnih oblik na katerih smo kasneje opravili preiskave tlačne trdnosti, elastičnega modula in abrazijske odpornosti. Poleg raziskave abrazijske odpornosti betonskih preskušancev, ki smo jih izdelali, je bil glavni namen opravljenih preiskav v diplomski nalogi primerjava metod za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po standardiziranem postopku ASTM C 1138.

### **7.1 Projektna izhodišča**

Sestavo betonskih mešanic smo določili na podlagi predhodnih raziskav abrazijsko odpornih betonov za HE na Savi. Na abrazijsko odpornost betonov vpliva niz parametrov kot so tlačna trdnost, natezna trdnost, trdnost agregata, uporaba specialnih cementov, elastični modul, vodo-cementno razmerje, površinska obdelava betona, nega betona ter dodatki (mineralni dodatki, polimeri, vlakna) (Kryžanowski et. al., 2009). Glede na spoznanja v literaturi lahko abrazijsko odporne betone izdelamo tako, da uporabimo materiale s katerimi izdelamo visoko trden beton ali pa lahko izdelamo beton pri katerem del agregata nadomestimo z gumenim granulatom.

### **7.2 Uporabljeni materiali**

#### **7.2.1 Cement**

Uporabili smo cement CEM II/A-M (L-S) 42,5 R, ki ga proizvaja Salanit Anhovo. To je portlandski mešani cement z dvema dodatkom, apnenecem (LL) in žlindro (S), trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo. Namenjen je za najzahtevnejše gradnje, pri katerih se zahtevajo visoke začetne trdnosti. Cement je skladen s standardom EN 197-1 in vsebuje minimalno 80 % portlandskega klinkerja, 6–20 % mešanega dodatka (apnenec, žindra) in maksimalno 5 % polnil in sadro.

### **7.2.2 Agregat**

Za izdelavo betonskih mešanic smo uporabili frakcioniran naravni in drobljeni mineralni agregat. Drobljenec frakcije 0–4 mm je bil s separacije Drnovo, savski prod frakcije 4–8 mm in frakcije 8–16 mm pa s separacije Stari Grad. Mineralni agregat je priskrbelo podjetje CGP, d.d.

### **7.2.3 Voda**

Betonske mešanice so bile pripravljene s pitno vodo iz vodovodnega omrežja.

### **7.2.4 Mineralni dodatek**

V raziskavi smo uporabili mineralni dodatek MD, ki ga proizvaja IRI Ljubljana in je v skladu s standardom SIST EN 13263. Po sestavi gre za večfazni material, v katerem prevladujejo naslednje komponente:  $\text{SiO}_2 > 90\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 - 0,5\sim 1\%$ ,  $\text{CaO} - 0,5\sim 1\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} - 0,5\sim 1\%$ . Mineralni dodatek je v praškasti obliki, z dodatkom le-tega pa smo povečali kohezivnost svežega betona, prav tako pa dodatek poveča tlačno trdnost betona.

### **7.2.5 Kemijski dodatki**

V okviru diplomske naloge smo za izdelavo betonskih mešanic uporabili naslednje dodatke:

- Polimerni superplastifikator z učinkom pospešenega strjevanja KEMAMENT HIPER X proizvajalca Kema Puconci, d.o.o.
- Vodno disperzijo karboksilatnega stiren-butadienskega polimera LATEKS S (Z deležem suhe snovi v disperziji  $45,6 \pm 0,3\%$ ) dobavitelja IRI Ljubljana.

Dodatek superplastifikatorja zmanjša porabo vode za doseg enake konsistence svežega betona, s čimer zagotovimo nizko vodo-cementno razmerje.

Z dodatkom polimerne disperzije se izboljšajo vgradljivost, vodotesnost in trdnostne karakteristike.

### **7.2.6 Vlakna**

Uporabljena so bila vlakna naslednje vrste:

- Jeklena vlakna JV 50/16 izdelana iz jeklene žice dolžine 16 mm in premera 0,5 mm. Vlakna so ravna in na obeh koncih zakrivljena zaradi boljšega sidranja v cementno matrico. Proizvaja jih IRI Ljubljana.
- Polipropilenska vlakna PV 10 dolžine 10 mm in debeline od 30 do 40  $\mu\text{m}$  narezana iz traku. Proizvajalec je IRI Ljubljana.



Slika 34: Jeklena vlakna a) in polipropilenska vlakna b)

### 7.2.7 Gumeni granulati

Gumeni granulati se pridobivajo iz odpadnih avtomobilskih gum. Obstajajo različni načini pridobivanja gumenega granulata. Pri mehanski reciklaži trgalni stroj odpadne gume natrga ali nareže, nato pa z drobljenjem in mletjem teh delcev dobimo granulati želenih oblik in velikosti gumenega granulata. Tekom procesa se iz odpadnih gum izloči še jeklene niti in tekstilne delce (Urek, 2005).

Glavni problem pri uporabi gumenega granulata v betonih je ustrezna granulacija. Velika odstopanja granulata po velikosti in obliki vplivajo na lastnosti iz njih izdelanih kompozitnih materialov in s tem končnih izdelkov (Šušteršič, 2012).

Za potrebe diplomske naloge smo pri izdelavi betona z dodatkom gumenega granulata uporabili dve vrsti gumenega granulata. Uporabili smo gumeni granulati bolj podolgovate oblike (nekakšni lističi) in gumeni granulati, proizvajalca Eco Recycling d.o.o iz Novega Sada, iz Srbije. Ta gumeni granulati pa je bil kubične oblike, bolj podobne mineralnemu agregatu. Slika uporabljenih gumenih granulata je prikazana spodaj. Na levi vidimo gumeni granulati podolgovate oblike, na desni pa je prikazan granulati kubične oblike.



Slika 35: Gumeni granulati podolgovate in kubične oblike

Pri podolgovatih granulih so se posamezni granulji sprijeli med seboj v grude, tako da smo jih morali pred vgradnjo razbiti na manjše kose.

### 7.3 Sestave betonskih mešanic

Sestave betonskih mešanic so bile izbrane na podlagi preverjenih receptur za betone, ki izkazujejo visoko abrazijsko odpornost in na podlagi betonskih mešanic, ki so bile uporabljene v raziskavah abrazijsko odpornih betonov na HE Vrhovu. V nadaljevanju je podana preglednica 5 z recepturami za vse betone, ki smo jih izdelali.

Izdelali smo šest mešanic. Prvo mešanico smo poimenovali C1, ki je tudi edina, v katero smo vgradili agregat frakcije 8–16 mm. Pri vseh preostalih petih mešanicah smo zaradi lažje vgradljivosti izbrali največje zrno agregata velikosti 8 mm. V mešanico C1, kot tudi v mešanico C2, smo dodali superplastifikator, mineralni dodatek s prevladujočo komponento mikrosilike ter jeklena vlakna. Pri recepturah za mešanice, katerim smo dodali gumeni granulati, smo mineralni dodatek in superplastifikator nadomestili s polimerno disperzijo, delež polipropilenskih vlaken pa smo podvojili. Pri izdelavi mešanice PMC2-1 smo nadomestili 10 % mineralnega agregata z gumenim granulatom podolgovate oblike, pri mešanicah PMC2-SR-1 in PMC2-SR-2 pa smo del agregata nadomestili z gumenim granulatom kubične oblike (10 % pri prvi in 20 % pri drugi). Mešanico PMM-G smo izdelali samo z uporabo gumenega granulata, brez mineralnega agregata, zaradi pomanjkanja drobnega agregata frakcije 0,5–1 mm pa smo recepturi dodali še kameno moko. Recepture posameznih betonskih mešanic so podane v preglednici 5.

Preglednica 5: Recepture posameznih betonskih mešanic

SESTAVA BETONSKE MEŠANICE	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMMG
cement [kg/m <sup>3</sup> ]	440	450	450	450	450	450
voda [kg/m <sup>3</sup> ]	193,22	207,02	150,84	150,84	149,31	141,26
v/v	0,39	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
superplastifikator [kg/m <sup>3</sup> ]	3,23	3,31	/	/	/	/
polimerna disperzija [kg/m <sup>3</sup> ]	/	/	90	90	90	90
mineralni dodatek (SiO <sub>2</sub> > 90%) [kg/m <sup>3</sup> ]	22	22,5	/	/	/	/
jeklena vlakna [kg/m <sup>3</sup> ]	40	40	/	/	/	/
polipropilenska vlakna [kg/m <sup>3</sup> ]	0,5	0,5	1	1	1	1
agregat 0-4 [kg/m <sup>3</sup> ]	817,59	1167,77	888,45	888,45	88,57	/
agregat 4-8 [kg/m <sup>3</sup> ]	225,5	476,98	514,37	514,37	389,67	/
agregat 8-16 [kg/m <sup>3</sup> ]	633,08	/	/	/	/	/
podolgovato oblikovana guma [kg/m <sup>3</sup> ]	/	/	58,82	/	/	380,14
kubično oblikovana guma [kg/m <sup>3</sup> ]	/	/	/	58,82	117,64	38,01
kamena moka [kg/m <sup>3</sup> ]	/	/	/	/	/	337,24

#### 7.4 Priprava betonskih mešanic

Betonske mešanice smo pripravili v preizkusnem laboratoriju IRMA. Posamezne mešanice smo izdelali s pomočjo protitočnega laboratorijskega mešalca s prostornino 75 l. Naenkrat smo zamešali 50 litrov betona. Za posamezno mešanico betona smo morali zamešati po dva mešalca. Na dan smo zamešali en mešalec, saj zaradi premajhnega števila potrebnih kalupov nismo mogli zamešati celotne betonske mešanice v enem dnevu.

Pred samim mešanjem smo si za posamezno sestavo betona pripravili potrebne sestavine, podane na recepturi. Potrebne količine sestavin smo določili s tehtanjem. Najprej smo v mešalec stresli agregat, če je bilo podano v recepturi tudi gumeni granulati, nato pa smo dodali polipropilenska vlakna. Vlakna smo enakomerno raztresli po površini agregata ter jih z zidarsko žlico premešali toliko, da so se razporedila med zrnji agregata. Dodane sestavine smo mešali od 30 do 60 sekund, tako da smo dobili homogeno zmes. Posebno pozorni smo bili na to, da se vlakna niso sprijela med seboj. Po tem smo med mešanjem dodali polovico predpisane količine vode ter zmes mešali še nadaljnjih 15 do 30 sekund. Nato smo mešalec ustavili in dodali še cement, mineralni dodatek (pri sestavah betona C1 in C2) in jeklena vlakna (za sestavi betona C1 in C2) in mešali 3–4 minute. Med mešanjem smo dodali še preostalo polovico vode skupaj s kemijskim dodatkom. Ko je bila betonska mešanica pripravljena smo opravili preiskave svežega betona. Najprej smo izmerili temperaturo betona, nato pa določili konsistenco s posedom. Konsistenco s posedom smo izmerili še enkrat čez 30 minut. Prav tako smo določili še prostorninsko maso in vsebnost zraka.



Sveže betonske mešanice so bile vgrajene v kalupe za kocke z robom 15 cm, prizme z dimenzijami 10x10x40 cm, prizme z dimenzijami 10x10x50 cm in valje s premerom 29,5 cm in višino 10 cm. Svež beton smo zgostili z vibriranjem na vibracijski mizi. Prvih 24 ur smo kalupe s preskušanci hranili v preizkusnem laboratoriju, nato pa smo en dan stare preskušance razkalupili in jih hranili v vodi s temperaturo  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ .



Slika 36: Vgrajevanje svežega betona v kalupe

## 7.5 Določitev lastnosti svežega betona

Vse lastnosti svežega betona smo določali po standardiziranih postopkih. Temperaturo smo merili v skladu s SIST EN 12350-1:2001, konsistenco s posedom v skladu s SIST EN 12350-2:2001, prostorninsko maso v skladu s SIST EN 12350-6:2001, vsebnost zraka pa smo določili v skladu s SIST EN 12350-7:2001. V preglednici 6 so podane povprečne vrednosti rezultatov po opravljenih postopkih.

Preglednica 6: Rezultati preizkušanja svežega betona za posamezne sestave betona

PREIZKUS		SESTAVA BETONA					
		C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMMG
temperatura svežega betona	[°C]	13,5	16,6	12,7	14,0	14,5	19,8
konsistenca s posedom t = 0	[mm]	125	90	185	100	100	10
konsistenca s posedom t = 30 min	[mm]	80	60	125	70	85	/
prostorninska masa	[kg/m <sup>3</sup> ]	2372	2315	2069	2137	2027	1546
vsebnost zraka	[%]	3	5,4	9,5	6,1	7	8,9

Razen pri betonski mešanici PMM-G, kjer je bila obdelavnost površine malce slabša, je bila obdelavnost površine pri vseh drugih betonskih mešanicah zelo dobra. Ta betonska mešanica se je tudi težje vgrajevala, pri vseh drugih mešanicah je bila vgradljivost zadovoljiva. Iz preglednice 6 lahko vidimo, da imajo mešanice, ki vsebujejo gumeni granulati, višjo vsebnost zraka. Prostorninska masa je odvisna od uporabljenih materialov za posamezno betonsko mešanico. V našem primeru najmanjšo prostorninsko maso dosega betonska mešanica PMM-G, kjer smo mineralni agregat zamenjali z gumenim granulatom. Po SIST EN 206-1:2003, ki je podan v preglednici 7, znaša stopnja konsistence pri sestavi betona C1, PMC2-SR-1 in PMC2-SR-2 S3, pri mešanici C2 znaša stopnja S2, pri PMC2-1 S4, pri mešanici PMM-G pa znaša stopnja konsistence S1.



Slika 37: Merjenje poseda a) in določanje vsebnosti zraka b)

### Preglednica 7: Stopnje poseda po SIST EN 206-1:2003

Stopnja	Posed v mm
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	več kot 220

## 7.6 Preiskave na strjenem betonu

### 7.6.1 Preskus tlačne trdnosti betona po standardu SIST EN 12390-2



Slika 38: Prikaz tlačne preše

Do preskusa tlačne trdnosti smo preskušance hranili v vodi s temperaturo  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  v skladu s standardom SIST EN 12390-2. Tlačno trdnost (TT) strjenega betona  $f_c$  smo določali po dveh in 28-ih dneh na betonskih kockah z robom 150 mm, v skladu z navodili standarda SIST EN 12390-3:2002. Za vsako sestavo betona smo izdelali po štiri preskušance za preskus tlačne trdnosti po dveh dneh in štiri preskušance za preskus tlačne trdnosti po 28-ih dneh, razen pri sestavi betona C1, kjer smo izdelali po tri preskušance za preskus po dveh dneh. Tlačno trdnost preskušancev se izračuna po izrazu:

$$f_c = F/A_c \quad (1)$$

kjer je:

$f_c$  tlačna trdnost [MPa]

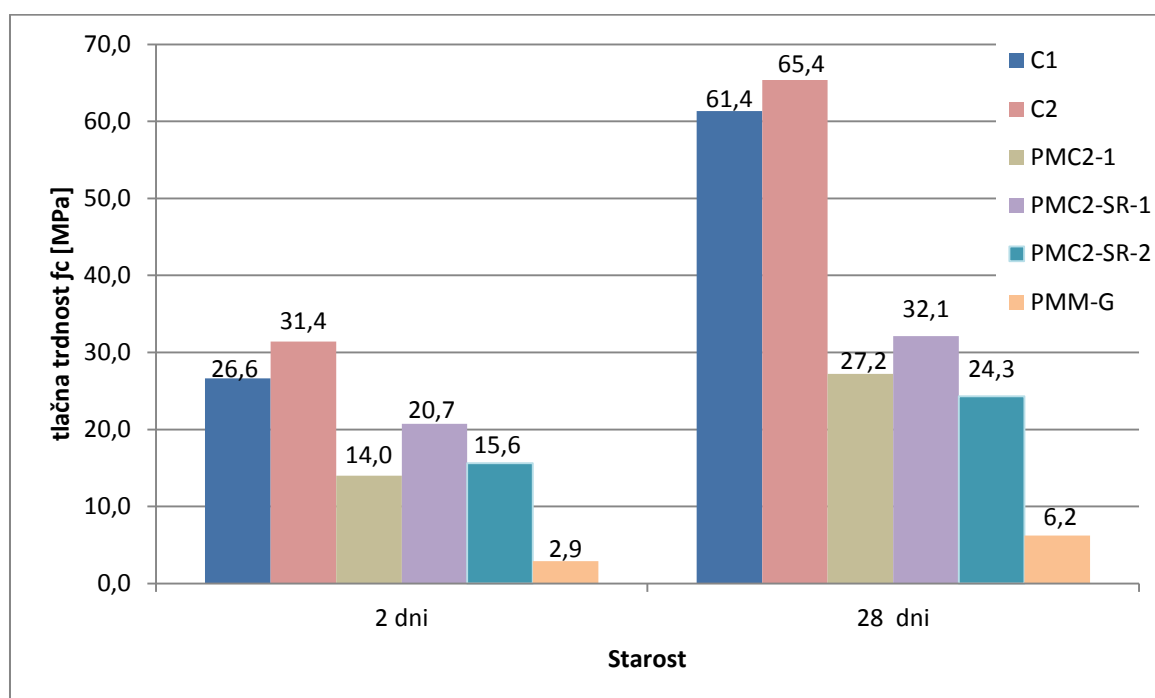
$F$  maksimalna obtežba ob poružitvi preskušanca [N]

$A_c$  površina preskušanca na katero deluje tlačna sila [ $\text{mm}^2$ ]

V našem primeru smo centrično tlačno silo nanašali preko hidravlične preše s hitrostjo 0,6 MPa/s, katera je že imela vgrajeno elektronsko napravo, ki je samodejno podala tlačno trdnost. Potek porušitve je bil pri vseh preskušancih v skladu s standardom, v katerem je s slikami prikazan pravilen potek porušitve. Raztros rezultatov je bil dokaj majhen, kar kaže na to, da je bil beton kvalitetno vgrajen v kalupe, mešanice za posamezno sestavo betona pa homogene. Dobljene povprečne vrednosti tlačne trdnosti so prikazane v preglednici 8 in na sliki 39.

Preglednica 8: Povprečne vrednosti tlačnih trdnosti preskušancev po dveh in 28-ih dneh

SESTAVA BETONA	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMMG
2 dni [Mpa]	26,6	31,4	14,0	20,7	15,6	2,9
28 dni [Mpa]	61,4	65,4	27,2	32,1	24,3	6,2



Slika 39: Povprečne vrednosti tlačne trdnosti preskušancev po dveh in 28-ih dneh

Sestava betona z doseženo najvišjo tlačno trdnostjo, tako po dveh kot po osemindvajsetih dneh, je bila sestava C2. Sestave betona, pri katerih smo del mineralnega agregata nadomestili z gumenim granulatom, so izkazale nižje tlačne trdnosti, kar smo tudi pričakovali. Če primerjamo sestavi betona PMC2-1 in PMC2-SR-1, katerih sestava se razlikuje le v tem, da smo pri sestavi PMC2-1 uporabili gumeni granulati podolgovate oblike, pri PMC2-SR-1 pa gumeni granulati kubične oblike, ugotovimo, da sestava z vsebnostjo gumenega granulata

kubične oblike izkazuje višjo tlačno trdnost. Prav tako na tlačno trdnost vpliva delež nadomeščenega mineralnega agregata z gumenim granulatom, saj vidimo, da sestave betona z višjim deležem gumenega granulata dosegajo nižjo tlačno trdnost. To je razvidno tudi pri sestavi PMM-G, ki ne vsebuje mineralnega agregata in je dosegla najnižjo tlačno trdnost.

### 7.6.2 Preskus statičnega elastičnega modula betona po standardu DIN 1048, Teil 5

Do določanja statičnega elastičnega modula smo preskušance v obliki prizme, dimenzije 100x100x400mm, hranili v vodi s temperaturo  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ , kar predstavlja odstopanje od standarda DIN 1048, Teil 5. Preskus smo izvajali na treh preskušancih pri starosti 28 dni. Preskušance smo s pomočjo preše centrično obremenjevali in razbremenjevali s silami tako, da smo povzročili napetosti med  $\sigma_u = 0,5\text{ MPa}$  in  $\sigma_o$ , ki znaša  $1/3$  povprečne tlačne trdnosti, katero smo dobili s preskusom tlačne trdnosti na kockah z robom 150 mm. Po tem, ko smo vstavili preskušane v prešo in nanj namestili merilni sistem za merjenje raztezkov, smo začeli obremenjevati/razbremenjevati preskušance s hitrostjo  $0,5 \pm 0,2\text{ MPa/s}$ . Preskus je sestavljen iz treh ciklov obremenjevanja in razbremenjevanja. Med postopkom smo z za to namenjeno napravo zajemali podatke, s pomočjo katerih smo z računalniškim programom dobili elastični modul.



Slika 40: Prikaz namestitve merilne opreme na preskušane

Preglednica 9: Povprečne vrednosti statičnih elastičnih modulov pri 28 dneh

SESTAVA BETONA	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
POVPREČNI ELASTIČNI MODUL [MPa]	36100	31800	19000	22400	17800	3300

Iz preglednice 9 vidimo, da je najvišjo povprečno vrednost elastičnega modula po 28 dneh dosegla sestava betona C1, najnižjo vrednost pa je dosegla sestava PMM-G, ki je za 91 % manjša kot sestava betona C1. Prav tako je iz preglednice razvidno, da sestave betona pri katerih smo del mineralnega agregata nadomestili z gumenim granulatom, izkazujejo nižje vrednosti povprečnega elastičnega modula.

## **7.7 Preskušanje abrazijske odpornosti**

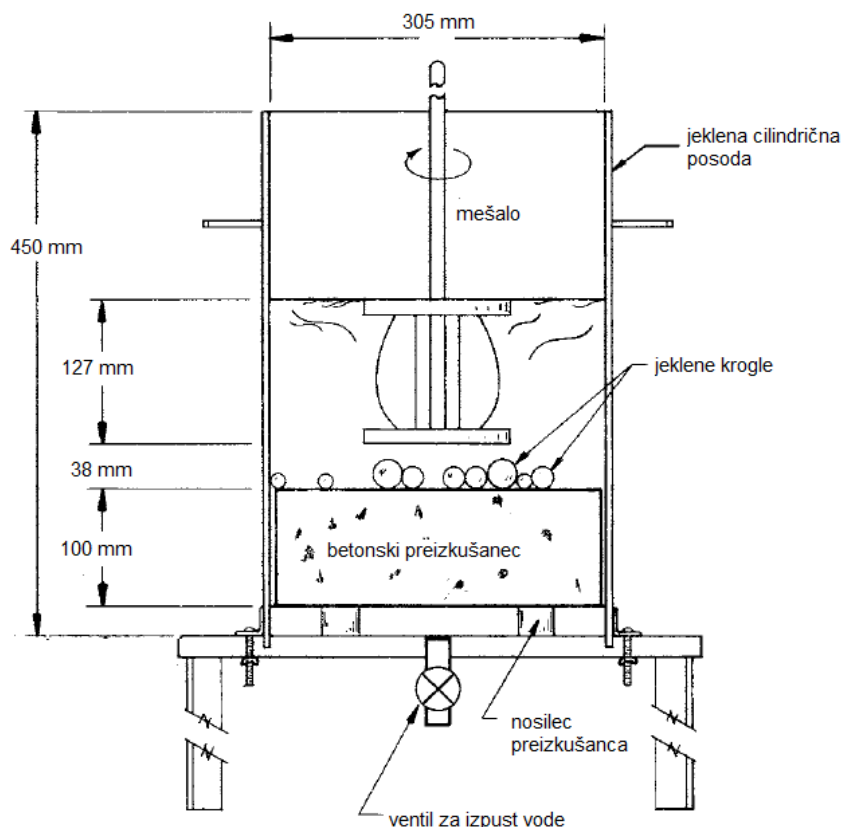
Za potrebe diplomske naloge smo abrazijsko odpornost betonskih preskušancev določali po postopku, podanem v standardu ASTM C 1138. Po končanem postopku smo obrabo preskušancev določali s tremi različnimi metodami, nato pa smo opravili primerjavo med posameznimi metodami in analizo dobljenih rezultatov.

### **7.7.1 Preskus abrazijske odpornosti po standardu ASTM C 1138**

Gre za standardiziran postopek, s katerim preizkušamo abrazijsko odpornost preskušancev. S postopkom kvalitativno simuliramo proces abrazijske erozije z brusom.

Metodo, ki ponazarja delovanje z vodo nošenih delcev na izpostavljeno površino, so razvili v Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Gre za podvodno metodo, ki je podana v standardu ASTM C 1138.

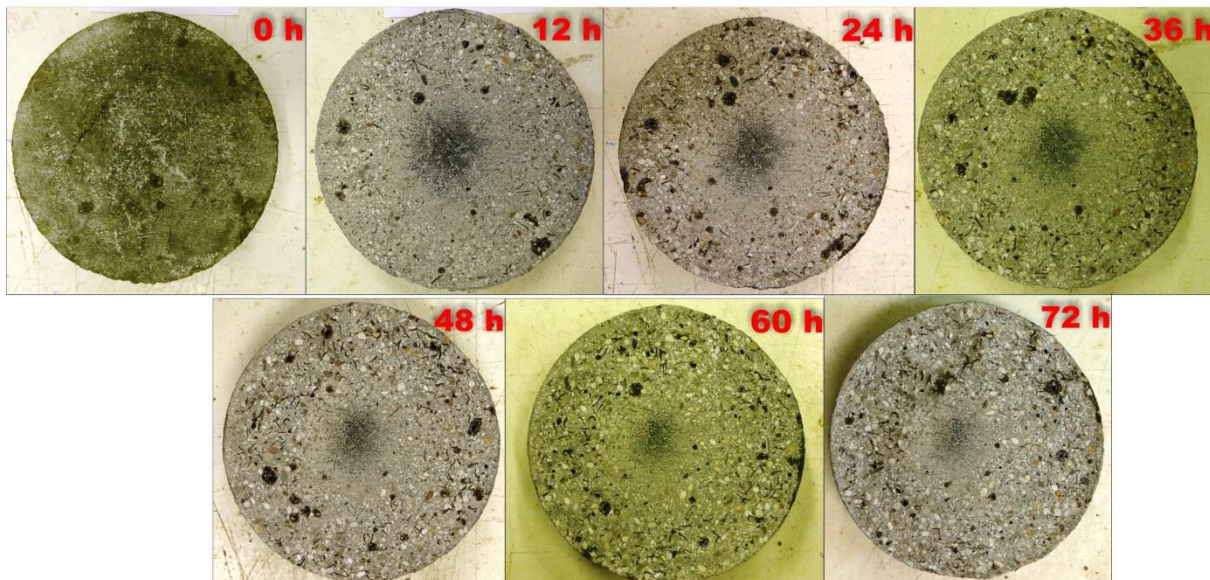




Slika 41: Preskusna naprava za izvedbo postopka ASTM C 1138 (Šušteršič in Dobnikar, 1999)

Za izvedbo metode potrebujemo jekleno cilindrično posodo z notranjim premerom 305 mm  $\pm$ 6 mm in višino 450 mm  $\pm$ 25 mm, v katero se vstavi betonski preskušaneč s premerom 295 mm in višino 100 mm. V jekleno posodo nalijemo vodo do višine 165 mm  $\pm$  5mm nad površino preskušanca. Na preskusni površini leži 70 jeklenih krogel različnih dimenzij: 10 krogel premera 25,4 mm (1 palec), 35 krogel premera 19,0 mm (0,70 palca) in 25 krogel premera 12,6 mm (0,45 palca). Potrebujemo še pogonsko napravo z možnostjo regulacije hitrosti vrtenja. Na pogonsko napravo je pritrjeno mešalo, ki se vrti s hitrostjo 1200  $\pm$ 100 obratov na minuto. Ko je preskušaneč nameščen in mešalo spuščeno centrično nad preskušancem, razdalja med zgornjo površino preskušanca in mešalom znaša 38  $\pm$ 5 mm. Pogonsko napravo vklopimo za 12 ur, nato določimo obrabo preskušanca. Standardni preskus je sestavljen iz 6 delov po 12 ur, skupaj 72 ur (ASTM C 1138, 1997).

Na sliki 42 je prikazan isti preskušaneč po različnih časih preskusa. Prikazana je začetna podoba preskušanca in potem stanje obrabe po posameznem delu postopka ASTM C 1138.



Slika 42: Prikaz stanja obrabe preskušanca po posameznih delih (osebni arhiv)

Med postopkom rotirajoča voda v posodi vleče jeklene kroglice po površini betonskega preskušanca in ustvarja proces abrazijske obrabe, zaradi katerega pride do abrazijske erozije. Povprečna hitrost vode na površini preskušanca znaša okoli 1,8 m/s. Hitrost vode in vpliv tresenja tako nista dovolj velika, da bi dvigovala jeklene kroglice nad površino preskušanca in bi te povzročale večjo udarno delovanje na površino. Vrteče mešalo povzroči nastanek vrtinca. V jedru vrtinca, ki je omejeno z območjem delovanja mešala, se pojavi vrtinčni tok, izven jedra vrtinca pa nevtinčni tok. V jedru vrtinca hitrost vode narašča premo sorazmerno z odmikom od osi mešala proti obodu in doseže maksimalno vrednost na zunanjem robu mešala. V območju nevtinčnega toka pa hitrost vode upada obratno sorazmerno z odmikom od jedra vrtinca proti obodu posode, kjer doseže minimum. Obraba betonske površine je najmanjša v območju delovanja mešala, poveča pa se na območju nevtinčnega toka in doseže maksimum približno na polovici širine tega območja (Kryžanovski, 2009, Liu in McDonald, 1981).

Na sliki 43 je nazorno prikazana odvisnost stopnje razvitosti abrazijske erozije od oddaljenosti od osi mešala.





Slika 43: Prikaz stopnje razvitosti abrazijske erozije na preskušancu po opravljenem preskusu ASTM C 1138

## 7.8 Opis metod, s katerimi določamo obrabo

Na podlagi izkušenj iz raziskav na HE Vrhovo smo za potrebe diplomske naloge izdelali preskušance iz abrazijsko odpornih betonov. To smo storili z izdelavo visoko trdnih betonov ter gumi betonov. Visoko trdne betone smo izdelali s pomočjo visokega deleža cementa in z uporabo agregata visoke trdote. Gumi beton pa smo izdelali tako, da smo del agregata zamenjali z gumenim granulatom. Lastnost teh betonov je majhna obraba izpostavljene površine pri obremenitvah zaradi abrazije. O veliki abrazijski odpornosti betonov so poročali Sonebi in Khayat (2001), Horszczaruk (2005), Kryžanowski (2009) in Kang et al. (2012). Soneb in Khayat ter Horszczaruk so abrazijsko odporne betone izdelali iz visoko trdnih betonov, Kryžanowski (2009) in Kang et al. (2012) pa sta poleg visoko trdnih betonov visoko abrazijsko odpornost dosegla z uporabo gumi betonov.

Glede na to, da smo za izdelavo preskušancev uporabili beton z visoko abrazijsko odpornostjo smo pričakovali majhno obrabo le teh, še posebno preskušancev, izdelanih iz gumi betona. Prav majhna obraba preskušancev pa je razlog, da smo si v okviru diplomske naloge za primarni cilj določili, da med seboj primerjamo tri metode za določanje obrabe po končanem postopku ASTM C1138. S primerjavo metod smo ugotavljali njihovo ustreznost za določanje obrabe pri preskušancih z visoko abrazijsko odpornostjo. Med primerjanimi metodami je tudi trenutno uporabljana metoda s tehtanjem. Poleg obstoječe metode za

določanje obrabe preskušancev smo obrabo preskušancev določali še z metodo z rotacijskim laserskim profilmerom in z metodo z merjenjem spremembe prostornine.

### **7.8.1 Postopek določanja obrabe preskušancev z metodo s tehtanjem**

Za določitev obrabe betonskega preskušanca po preskusu abrazijske odpornosti po postopku ASTM C 1138 se običajno uporablja metoda s tehtanjem vzorca.

#### **7.8.1.1 Opis postopka tehtanja**

- 1) Preskušanec površinsko osušimo.
- 2) Površinsko suh preskušanec stehtamo na gram natančno\*.
- 3) Preskušanec položimo v košaro, ki je povezana s tehtnico.
- 4) Preskušanec skupaj s košaro položimo v posodo, napolnjeno z vodo, tako da je preskušanec popolnoma pod vodo, vendar se v nobeni točki ne dotika posode, v katero smo ga potopili. Temperatura vode v posodi naj bo  $23 \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ , tako da gostota vode znaša  $997 \pm 2 \text{ kg/m}^3$ . V primeru, da temperatura vode ne znaša toliko kot zgoraj omenjeno, izmerimo še temperaturo ter nato določimo gostoto vode pri izmerjeni temperaturi.
- 5) Poskrbimo, da višina vode v posodi, potem ko smo preskušanec potopili, vedno sega do istega nivoja.
- 6) Preskušanec stresemo, da se znebimo zračnih mehurčkov na površini preskušanca.
- 7) Počakamo, da se gladina vode v posodi umiri, ter nato stehtamo maso preskušanca, potopljenega v vodi.

\*V standardu je zapisano, da se rezultati tehtanja zaokrožijo na 25 gramov natančno, vendar smo zaradi pričakovane manjše obrabe, maso preizkušanca določali na gram natančno.

Na sliki 44 je prikazano tehtanje preskušanca v vodi. Preskušanec leži v košari, povezani z elektronsko tehtnico, potopljen v posodi.



Slika 44: Preskušane med tehtanjem v vodi

#### 7.8.1.2 Izračun prostornine preskušanca:

$$V_t = \frac{(W_z - W_v)}{G_v} \quad (2)$$

kjer je:

$t$ – čas trajanja preskusa	[h]
$V_t$ – prostornina preskušanca po določenem trajanju preskusa $t$	[m <sup>3</sup> ]
$W_z$ – masa preskušanca na zraku po določenem trajanju preskusa $t$	[kg]
$W_v$ – masa preskušanca v vodi po določenem trajanju preskusa $t$	[kg]
$G_v$ – gostota vode	[kg/m <sup>3</sup> ]

#### 7.8.1.3 Izračun prostornine obrabe zaradi abrazivsko erozijskega procesa v času trajanja preskusa $t$

$$V_{Lt} = V_i - V_t \quad (3)$$

kjer je:

$V_{Lt}$ – prostornina obrabe preskušanca v času trajanja preskusa $t$	[m <sup>3</sup> ]
$V_i$ – prostornina preskušanca pred pričetkom preskusa	[m <sup>3</sup> ]
$V_t$ – prostornina preskušanca po določenem trajanju preskusa $t$	[m <sup>3</sup> ]

#### 7.8.1.4 Izračun globine obrabe v času trajanja preskusa $t$ :

$$ADA_t = \frac{V_{Lt}}{A_{presk.}} \quad (4)$$

kjer je:

$ADA_t$ – povprečna globina obrabe v času trajanja preskusa $t$	[m]
$V_{Lt}$ – prostornina obrabe preskušanca v času trajanja preskusa $t$	[m <sup>3</sup> ]
$A_{presk.}$ – zgornja površina preskušanca	[m <sup>2</sup> ]

## 7.8.2 Postopek določanja obrabe preskušancev po metodi z rotacijskim laserskim profilomerom

### 7.8.2.1 Izvedba tridimenzionalnega (3D) merjenja

Metoda z uporabo rotacijskega laserskega profilomera je tehnološko napredna metoda. Za izvedbo tridimenzionalnega (3D) merjenja površine objekta potrebujemo rotacijski laserski profilomer, fotografski stativ, računalnik za sprejem podatkov in osebo, usposobljeno za rokovanje z napravo in obdelavo zajetih podatkov.

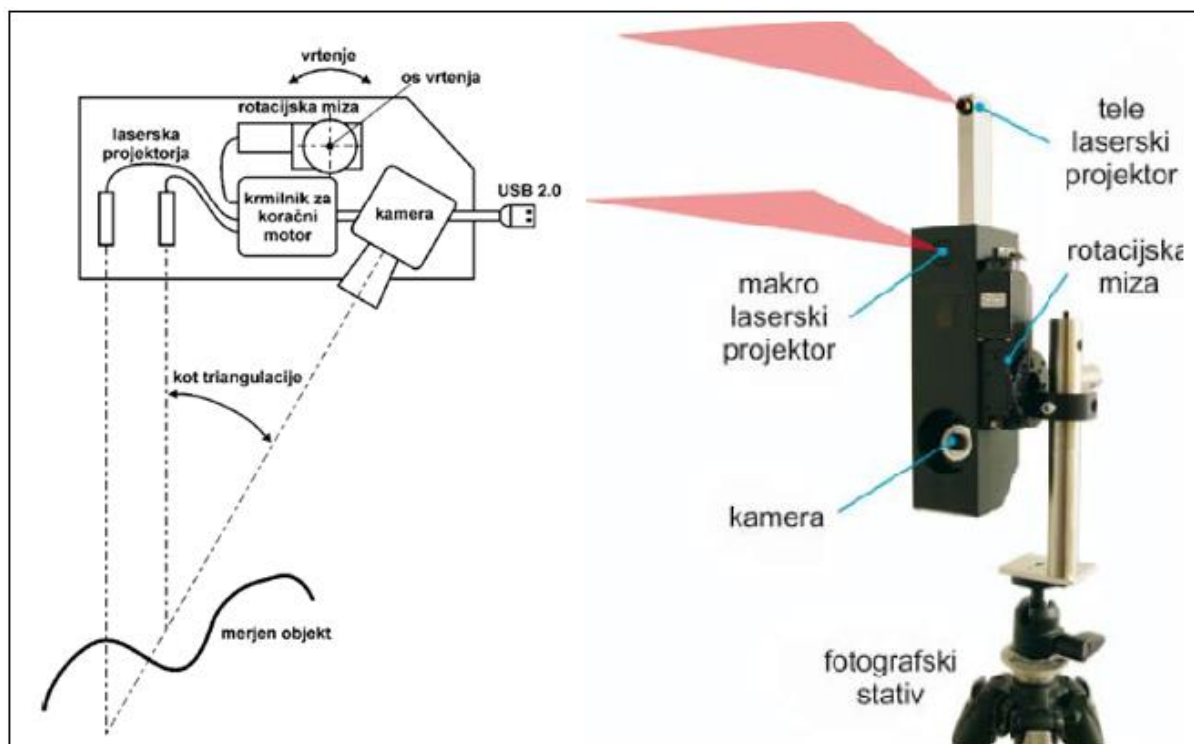
Meritve smo izvedli v laboratoriju Katedre za optodinamiko in lasersko tehniko, na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani. Meritve so potekale pod nadzorom Urbana Pavlovčiča, uni. dipl. inž. str.

### 7.8.2.2 Opis rotacijskega laserskega profilomera

Rotacijski laserski profilomer so razvili na Katedri za optodinamiko in lasersko tehniko, na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani, v sodelovanju z zunanjimi partnerji. Merilnik je bil razvit za izvajanje meritev statičnih teles večjih dimenzij.

Rotacijski laserski profilomer temelji na principu linijske triangulacije in na rotacijskem premikanju merilnega modula. Laserski projektor projicira na merjeno površino svetlobno ravnino, ki jo pod kotom triangulacije opazuje kamera. Svetlobni vzorec, ki ga projektor projicira na telo, je linijske oblike. S pomočjo rotacijske mize, ki vrti sklop kamere in laserskega projektorja, je zagotovljeno relativno premikanje svetlobne ravnine glede na merjeni objekt. To omogoča, da se izmeri celotna površina telesa.

Z uporabo dveh laserskih linijskih projektorjev je omogočeno izvajanje meritev v bližnjem (makro) in daljnem (tele) območju. Meritve preskušancev smo opravili v daljnem območju. Merilno območje je trapezne oblike. Za tele način znaša 350 mm pri razdalji do objekta 550 mm ter 1800 pri razdalji do objekta 3300 mm, ločljivost po širini pa znaša 0,45 mm. Razdalja med kamero in projektorjem je za tele način 274 mm. Kot triangulacije je 15°.

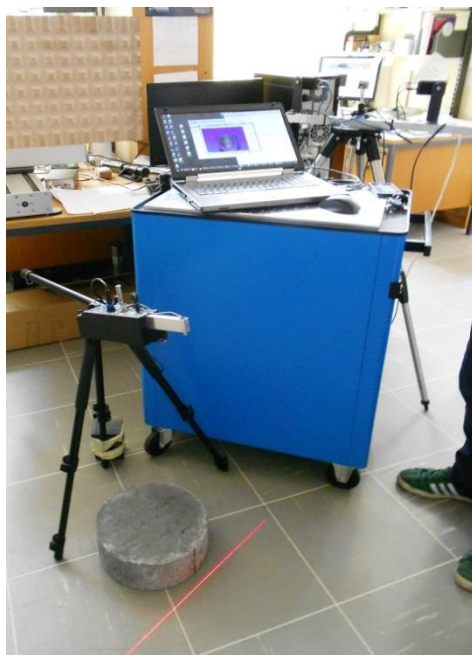


Slika 45: Shema rotacijskega laserskega profilomera (Pavlovčič et al. 2010)

Hitrost merjenja je povečana z uporabo kamere Opromotive Cameleon, ki omogoča lokalno procesiranje zajete slike. S tem razbremenimo komunikacijsko vodilo za prenos signala v računalnik, s čimer se posledično zmanjša potrebna procesorska moč računalnika. Tako sproščene zmogljivosti se uporabijo za generiranje 3D-modelov iz zajetih izmerkrov. Celoten merilni sistem je pritrjen na fotografski stativ. Merilnik povežemo z osebnim računalnikom preko enega samega USB-vmesnika (Pavlovčič et al., 2010).

### 7.8.2.3 Postopek merjenja

Meritve površine preskušancev smo izvedli pred izvedbo in po izvedbi (po 72 urah) preskusa abrazijske odpornosti preskušancev po standardu ASTM C 1138. Vmesnih meritev na 12 h zaradi različnih lokacij izvajanja meritev in preskusov nismo izvedli.



Slika 46: Prikaz tridimenzionalnega (3D) merjenja površine preskušancev z rotacijskim laserskim profilomerom

Najprej smo določili primerno razdaljo med preskušancem in rotacijskim laserskim profilomerom. S tem smo poskrbeli, da je bila lega preskušanca znotraj merilnega območja naprave. Zaradi morebitnih napak med samim merjenjem smo izmerili vsak preskušanec petkrat. Na ta način smo dobili tridimenzionalni model preskušanca.

#### 7.8.2.4 Obdelava zajetih podatkov

Za referenčno ravnino smo izbrali tla, na katera smo postavili preskušanec. S postopkom tridimenzionalnega merjenja zajamemo podatke, ki jih nato obdelamo z ustreznim programskim orodjem. To smo storili s programskim orodjem Geomagic. Poenostavljeno povedano je postopek obdelave meritev potekal tako, da smo s programskim orodjem Geomagic medsebojno poravnali v isto ravnino tridimenzionalna modela, ki smo ju izmerili pred in po preskusu ASTM C 1138. Na ta način smo dobili povprečno globino obrabe, najmanjšo in največjo globino obrabe, standardni odklon in povprečen premer preskušancev. Na podlagi teh podatkov smo s pomočjo računalniškega programa Microsoft Excel izračunali spremembo volumna preskušanca po opravljenem preskusu. Poleg tega smo izdelali tudi grafične podobe obrabljene površine preskušancev.

### 7.8.3 Postopek določanja obrabe preskušancev po metodi z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi

Metodo za določanje obrabe z merjenjem spremembe vodne gladine v posodi smo razvili za potrebe diplomske naloge. Postopek smo opravili pred pričetkom preskusa po metodi ASTM C 1138 in nato na vsakih 12 h do konca postopka pri 72 h. V primerjavi z metodo s tehtanjem in metodo za določanje obrabe z rotacijskim laserskim profilmerom je metoda določanja obrabe z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi preprosta, poceni in lokacijsko skoraj neodvisna.



Slika 47: Prikaz pripomočkov za izvedbo postopka določanja obrabe preskušancev po metodi z merjenjem spremembe vodne gladine v posodi

#### 7.8.3.1 Zahteve in pripomočki

Za izvedbo metode določanja obrabe z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi potrebujemo naslednje:

- Dovolj veliko posodo, v katero položimo preskušanec. Posoda mora biti suha in čista.
- Ravno površino, na katero postavimo posodo.
- Dva merilna valja. Enega z volumnom 1l in natančnostjo 5 ml ter drugega z volumnom 20 ml in natančnostjo 1 ml.
- Ostno merilo z natančnostjo odčitka 0,1 mm.
- Stojalo in držala za ostno merilo.
- Posodo, iz katere zajemamo vodo.



### 7.8.3.2 Opis postopka določanja obrabe z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi

Najprej si pripravimo posodo z vodo, katera ima 20 °C. Drugo posodo, v katero bomo položili preskušane, postavimo na ravna tla. Posodo smo pred vsakim postopkom postavili na enak način na isto mesto. Na to posodo smo nato s pomočjo držal namestili stojalo z ostnim merilom. Stojalo z ostnim merilom smo vsakič postavili na označeno mesto. Nato smo položili površinsko suh preskušane v čisto in suho posodo. Najprej smo s pomočjo merilnega valja počasi in natančno natočili 1 liter vode. Preskušane smo rahlo privzdignili in zavrteli, da smo se znebili zračnih mehurčkov, ujetih pod preskušancem. Za tem smo dolili še 5 litrov vode, vse skupaj je bilo torej v posodi 6 litrov. Preskušane, ki je bil sedaj popolnoma pod vodo, smo narahlo nekajkrat privzdignili. S tem smo se znebili še zračnih mehurčkov, ujetih na površini preskušanca. Počakali smo, da se je gladina popolnoma umirila. Nato smo konico ostnega merila spustili do gladine in odčitali razdaljo z ostnega merila.



Slika 48: Prikaz merjenja višine gladine vode v posodi s preskušancem

Za določitev prostornine obrabe moramo poznati dimenzije posode, v katero smo položili preskušane, ali pa moramo prostornino posode pri določeni višini gladine določiti s točkovnim merjenjem. Razdaljo med posameznimi točkami izberemo glede na pričakovano intenziteto nihanja gladine med samim postopkom.



V našem primeru smo uporabljali posodo, kateri se je z višino večal premer odprtega dela. Zato smo se odločili, da bomo določili prostornino za posamezne višine na točkah, ki jih bomo dobili po opravljenih meritvah.

### 7.8.3.3 Določanje prostornine obrabe preskušanca

1. Preskušanec v posodi zalijemo s šestimi litri vode.
2. Zabeležimo nivo gladine vode v posodi s preskušancem.
3. Iz posode vzamemo preskušanec in vanjo vlivamo vodo do višine, ki smo je v prejšnjem koraku zabeležili. To storimo s pomočjo merilnega valja z ustrezno natančnostjo, da poznamo prostornino vode, ki smo jo vlili.
4. Sedaj poznamo prostornino vode v posodi brez preskušanca in volumen vode v posodi s preskušancem. Zato lahko izračunamo volumen preskušanca po naslednjem postopku:

$$V_{\text{presk.}} = V_1 - V_2 \quad (5)$$

kjer je:

$V_{\text{presk.}}$ – prostornina preskušanca	[m <sup>3</sup> ]
$V_1$ – prostornina, ki ga zavzame preskušanec in 6 litrov vode	[m <sup>3</sup> ]
$V_2$ – prostornina vode, ki smo jo nalili v posodo, do zabeležene višine	[m <sup>3</sup> ]

5. Prostornino obrabe dobimo:

$$V_{\text{obrabe}} = V_{\text{presk.}_0} - V_{\text{presk.}_t} \quad (6)$$

kjer je:

$V_{\text{presk.}_0}$ – prostornina preskušanca pred preskusom	[m <sup>3</sup> ]
$V_{\text{presk.}_t}$ – prostornina preskušanca v času trajanja preskusa $t$	[m <sup>3</sup> ]
$V_{\text{obrabe}}$ – prostornina obrabe preskušanca v času trajanja preskusa $t$	[m <sup>3</sup> ]

## 7.9 Analiza rezultatov

### 7.9.1 Meritve po standardnem postopku

#### 7.9.1.1 Analiza rezultatov, dobljenih z metodo s tehtanjem

V preglednici 10 sta prikazani prostornina obrabe preskušancev pri starosti 28 dni in pa povprečna globina obrabe preskušancev pri starosti 28 dni po opravljenem standardiziranem postopku ASTM C 1138. Rezultate smo dobili z metodo s tehtanjem.

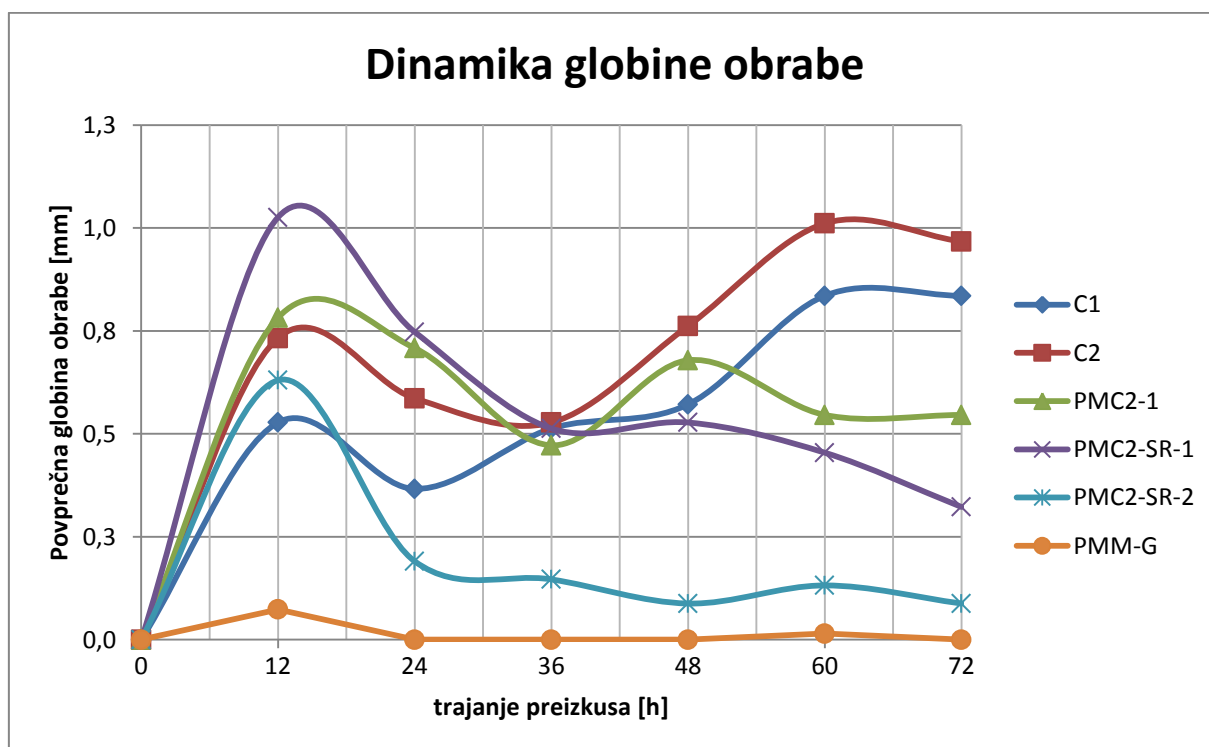
Preglednica 10: Prikaz rezultatov preskusa abrazijske odpornosti po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo s tehtanjem za različne sestave betona

<b>REZULTATI PREIZKUSA ABRAZIJSKE ODPORNOSTI</b>						
sestava betona	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
premer preizkušanca [mm]	295	295	294	295	295	294
starost preizkušancev [dan]	29	29	31	28	28	28
trajanje preizkusa		prostornina obrabe preizkušancev -28 dni				
[h]	[mm <sup>3</sup> ]					
0	0	0	0	0	0	0
12	36058	50080	53085	70112	43069	5008
24	61098	90144	101162	121194	56090	5008
36	96154	126202	133213	156250	66106	5008
48	135216	178285	179287	192308	72115	5008
60	192308	247396	216346	223357	81130	6010
72	249399	313502	253405	245393	87139	6010
trajanje preizkusa		povprečna globina obrabe preizkušancev				
[h]	[mm]					
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,53	0,73	0,78	1,03	0,63	0,07
24	0,89	1,32	1,49	1,77	0,82	0,07
36	1,41	1,85	1,96	2,29	0,97	0,07
48	1,98	2,61	2,64	2,81	1,06	0,07
60	2,81	3,62	3,19	3,27	1,19	0,09
72	3,65	4,59	3,73	3,59	1,27	0,09

Na osnovi rezultatov smo zabeležili največjo prostornino obrabe kot tudi globino obrabe pri preskušancu C2. Pri vseh preskušancih in sestavah betona je dosežena dokaj majhna globina obrabe, izstopata pa preskušanca PMC2-SR-2 in PMM-G, pri katerih je globina obrabe manjša kot 2 mm. Določanje prostornine obrabe pri preskušancu PMM-G z metodo s tehtanjem je težavno, saj je obraba tako majhna, da zaradi premajhne natančnosti tehtnice

težko določimo maso izgubljenega materiala. Preskušanci, pri katerih smo del mineralnega agregata nadomestili z gumenim granulatom, so izkazali večjo abrazijsko odpornost v primerjavi s preskušanci, ki ne vsebujejo gumenega granulata. Iz rezultatov vidimo, da z večanjem deleža gumenega granulata dosegamo boljše abrazijsko odpornost. Sestavi betona PMC2-1 in PMC2-SR-1 se razlikujeta le v tem, da smo pri sestavi PMC2-1 uporabili gumeni granulati podolgovate oblike, pri sestavi betona PMC2-SR-1 pa kubične oblike. Glede na rezultate smo ugotovili, da sestava betona z gumenim granulatom kubične oblike dosega večjo abrazijsko odpornost v primerjavi s sestavo betona, ki vsebuje gumeni granulati podolgovate oblike.

Na podlagi raziskave, ki jo je opravila Horszczaruk (2005), smo analizirali dinamiko napredovanja obrabe s časom. Avtorica je preučevala dinamiko obrabe za standardne in visokotrjne betone po metodi ASTM C 1138. Na podlagi raziskave je dinamiko napredovanja obrabe s časom razdelila v tri faze. V prvi fazi, ki jo je poimenovala **faza akumulacije**, opazujemo hitro povečanje obrabe. Faza akumulacije za standardne betone traja 2 uri, za visokotrjne betone pa 12 do 24 ur od začetka preskusa. Drugo fazo je poimenovala **faza pojemanja**, za katero je značilno zmanjšanje dinamike obrabe in je pri običajnem betonu bolj izrazita in krajša kot pri visokotrdnem betonu, pri katerem je pojemanje manj izrazito. Faza pojemanja pri običajnih betonih traja do 48 ur od začetka preskusa, pri visokotrdnih betonih pa traja do 36 ur oziroma največ 60 ur po začetku preskusa. Tretja faza se imenuje **faza stabilnosti**. Pri tej fazi je dinamika obrabe konstantna.



Slika 49: Prikaz dinamike obrabe preskušancev

Na podlagi dinamike obrabe preskušancev smo ugotovili:

- Dinamike obrabe preskušancev C1 in C2 ne moremo razdeliti v faze tako kot jih je razdelila Horszczaruk.
- Dinamika obrabe pri preskušancih PMC2-1, PMC2-SR-1, PMC2-SR-2 in PMM-G je potekala na način, kot ga je razdelila Horszczaruk.
- Pri preskušancu PMC2-SR-1 je obraba v prvih 12 urah bolj intenzivna kot pri drugih preskušancih.

### **7.9.1.2 Predlagane izboljšave metode s tehtanjem**

Metoda določanje obrabe s tehtanjem preskušanca je podana v standardu ASTM C 1138, razvita pa je bila razvita v osemdesetih letih dvajsetega stoletja. V tem času je prišlo do razvoja betonov, ki izkazujejo zelo dobro abrazijsko odpornost. Standard predpisuje, da se masa suhih preskušancev, kot tudi preskušancev v vodi zaokroži na 25 g natančno. V okviru diplomskega dela smo izdelali betonske preskušance s tako dobro abrazijsko odpornostjo, da smo se odločili tehtati preskušance na 1 g natančno. V primeru, da tega ne bi storili, bi dobili rezultate, ki bi preveč odstopali od dejanskih vrednosti obrabe. To odločitev lahko utemeljimo s primerom preskušanca PMM-G, kateremu se je masa tekom 72-urnega postopka ASTM C 1138 zmanjšala le za 21 g. Prav tako smo ugotovili, da je potrebno preskušance pred suhim tehtanjem površinsko dobro osušiti, saj na končne rezultate precej vpliva, kako dobro preskušance površinsko osušimo. V primeru preskušanca PMM-G, ko smo preskušanec slabo osušili, se je masa pri tehtanju ob enakem času trajanja preskusa razlikovala tudi za 4 g od površinsko ustrezno posušenega preskušanca.

## **7.9.2 Meritve z rotacijskim laserskim profilometrom**

### **7.9.2.1 Analiza rezultatov, dobljenih po metodi z rotacijskim laserskim profilomerom**

V preglednici 2 sta prikazani prostornina obrabe preskušancev pri starosti 28 dni in pa povprečna globina obrabe preskušancev pri starosti 28 dni po opravljenem standardiziranem postopku ASTM C 1138. Rezultate smo dobili z rotacijskim laserskim profilomerom. Meritve smo opravili pred začetkom postopka in po koncu postopka ASTM C 1138 in ne na vsakih 12 h, kot je predpisano v standardu, saj sta bila naprava za izvajanje postopka ASTM C 1138 in rotacijski laserski profilomer na različnih lokacijah.

Preglednica 11: Prikaz rezultatov preskusa abrazijske odpornosti (povprečna prostornina in globina obrabe) po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom za različne sestave betona

<b>REZULTATI PREIZKUSA ABRAZIJSKE ODPORNOSTI</b>						
<b>sestava betona</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>PMC2-1</b>	<b>PMC2-SR-1</b>	<b>PMC2-SR-2</b>	<b>PMM-G</b>
<b>starost preizkušancev [dan]</b>	<b>29</b>	<b>29</b>	<b>31</b>	<b>28</b>	<b>28</b>	<b>28</b>
<b>premer preizkušanca [mm]</b>	<b>290,51</b>	<b>290,60</b>	<b>290,98</b>	<b>290,26</b>	<b>292,19</b>	<b>292,30</b>
<b>trajanje preizkusa</b>	<b>prostornina obrabe preizkušancev -28 dni</b>					
<b>[h]</b>	<b>[mm<sup>3</sup>]</b>					
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>72</b>	<b>265328</b>	<b>313046</b>	<b>281561</b>	<b>260064</b>	<b>101679</b>	<b>34089</b>
<b>trajanje preizkusa</b>	<b>povprečna globina obrabe preizkušancev</b>					
<b>[h]</b>	<b>[mm]</b>					
<b>0</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>
<b>72</b>	<b>3,96</b>	<b>4,73</b>	<b>4,23</b>	<b>3,92</b>	<b>1,53</b>	<b>0,51</b>

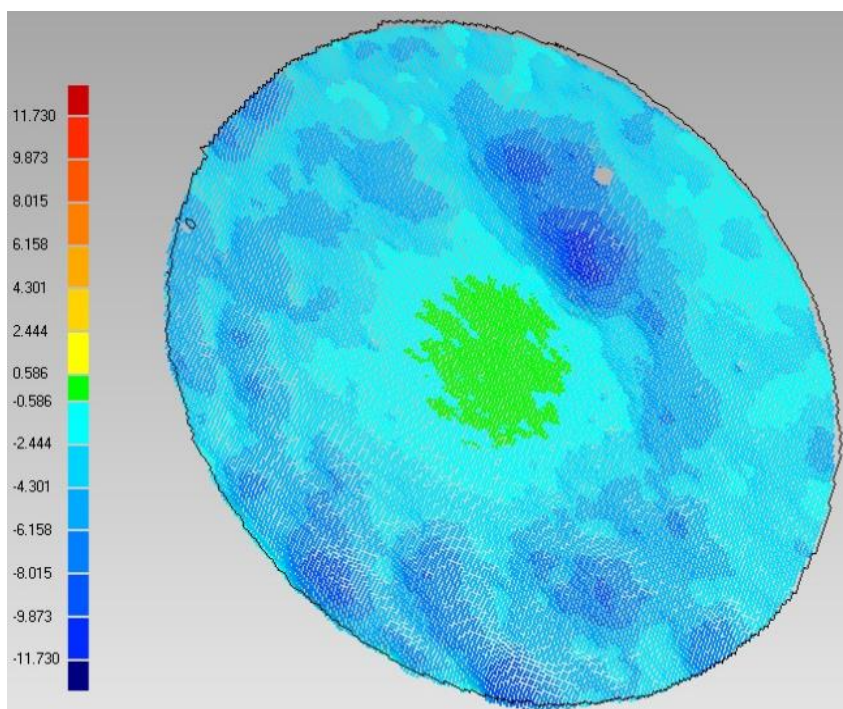
Na podlagi rezultatov podanih v preglednici 11, smo ugotovili, da je prišlo do največje prostornine obrabe pri preskušancu C2, prav tako smo pri preskušancu zabeležili največjo povprečno globino obrabe. Preskušanca PMC2-SR-2 in PMM-G sta izkazala boljšo abrazijsko odpornost kot ostali preskušanci. Preskušanci, pri katerih smo del mineralnega agregata nadomestili z gumenim granulatom, so izkazali večjo abrazijsko odpornost v primerjavi s preskušanci, ki ne vsebujejo gumenega granulata. Iz rezultatov vidimo, da z večanjem deleža gumenega granulata dosegamo boljšo abrazijsko odpornost. Sestavi betona PMC2-1 in PMC2-SR-1 se razlikujeta le v tem, da smo pri sestavi PMC2-1 uporabili gumeni granulati podolgovate oblike, pri sestavi betona PMC2-SR-1 pa kubične oblike. Glede na rezultate smo ugotovili, da sestava betona z gumenim granulatom kubične oblike dosega večjo abrazijsko odpornost v primerjavi s sestavo betona, ki vsebuje gumeni granulati podolgovate oblike.

V nadaljevanju so na podlagi rezultatov, dobljenih z uporabo rotacijskega laserskega profilomera, in na podlagi podob, zajetih z rotacijskim laserski profilomerom, podane natančnejše analize obrabe posameznih preskušancev.

Preglednica 12: Prikaz rezultatov preskusa abrazijske odpornosti (največja in najmanjša globina obrabe ter standardni odklon) po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo z rotacijskim laserskim profilmerom za različne sestave betona

<b>REZULTATI PREIZKUSA ABRAZIJSKE ODPORNOSTI</b>						
sestava betona	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
največja globina obrabe [mm]	-11,730	-15,561	-9,768	-10,228	-5,854	-2,568
najmanjša globina obrabe [mm]	0,171	0,400	0,886	0,845	2,017	2,869
standardni odklon [mm]	1,962	2,490	1,711	2,006	0,985	0,617

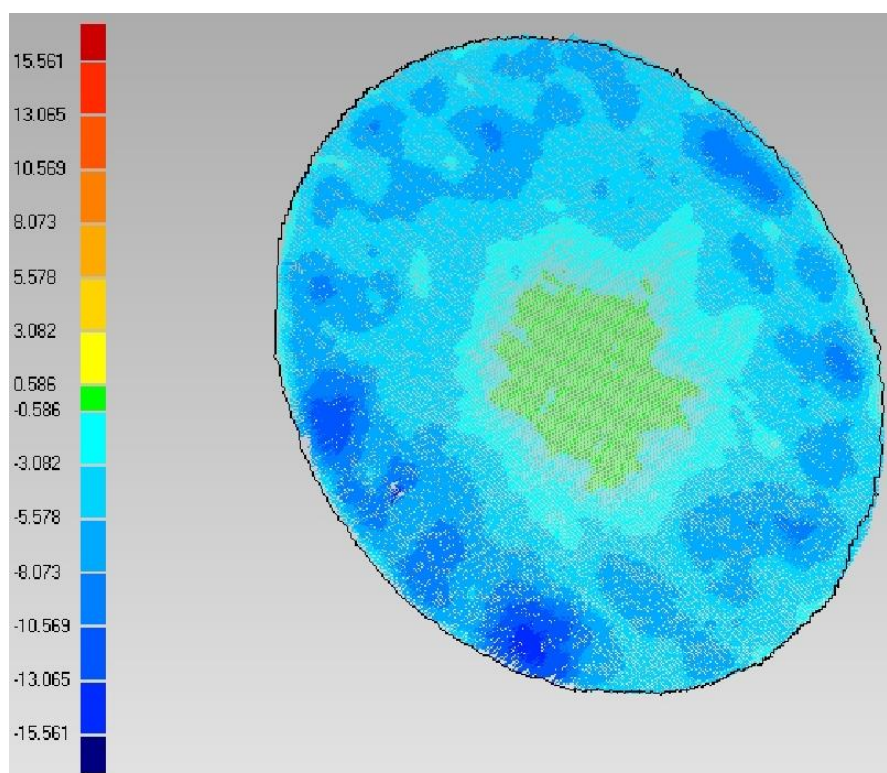
Iz preglednice 12 je razvidno, da smo maksimalno vrednost največje globine obrabe zabeležili pri preskušancu C2, -15,730 mm, minimalno vrednost največje globine obrabe pa pri preskušancu PMM-G, -2,568. Glede na definicijo obrabe iz uvodnega poglavja, ki opisuje obrabo kot napredujočo odstranitev materiala s površine trdnega telesa, lahko ugotovimo, da vrednosti najmanjše globine obrabe, ki so pri vseh preskušancih pozitivne, niso pravilne. Možni razlogi za te nepravilnosti so natančneje razloženi v nadaljevanju.



Slika 50: Prikaz podobe površine preskušanca C1 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserskim profilmerom

Na sliki 50 je prikazana podoba obrabljene površine preskušanca C1 po končanem preskusu ASTM C 1138. Podobo smo dobili po tem, ko smo obdelali podatke, ki smo jih zajeli z rotacijskim laserskim profilmerom. Hladne barve označujejo mesta kjer je obraba večja, toplejše barve pa označujejo mesta kjer je obraba manjša. Barvna legenda je v milimetrih.

Glede na primerjalno ravnino največja globina obrabe pri preskušancu C1, ki smo jo izmerili z rotacijskim laserskim profilomerom, znaša -11,730 mm, najmanjša pa 0,171 mm. Kot že prej omenjeno lahko sklepamo, da glede na definicijo obrabe pozitivne vrednosti najmanjše obrabe niso pravilne. Pozitivne vrednosti so lahko posledica nepravilne postavitve preskušanca, jeklenih vlaken, ki zaradi obrabe cementnega kamna gledajo ven iz površine preskušanca ali drugih razrahljanih delcev (agregat, polipropilenska vlakna), ki tako kot jeklena vlakna zaradi obrabe cementnega kamna na nekaterih mestih izstopajo iz površine preskušanca. Iz slike je razvidno, da je v primeru preskušanca C1 v območju delovanja mešala obraba najmanjša, največja obraba pa je v območju nevrtničnega toka.

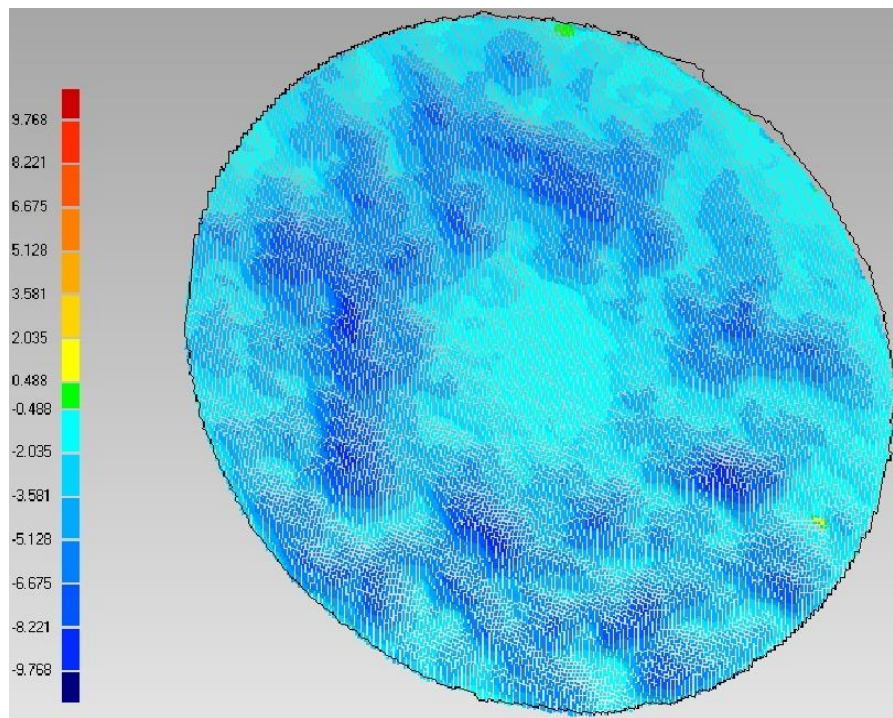


Slika 51: Prikaz podobe površine preskušanca C2 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserski profilomerom

Na sliki 51 je prikazana podoba obrabljenе površine preskušanca C2 po končanem preskusu ASTM C 1138. Podobo smo dobili po tem, ko smo obdelali podatke, ki smo jih zajeli z rotacijskim laserskim profilomerom. Hladne barve označujejo mesta kjer je obraba večja, toplejše barve pa označujejo mesta kjer je obraba manjša. Barvna legenda je v milimetrih. Glede na primerjalno ravnino največja globina obrabe pri preskušancu C2, ki smo jo izmerili z rotacijskim laserskim profilomerom, znaša -15,561 mm, najmanjša pa 0,400 mm. Kot že prej omenjeno lahko sklepamo, da glede na definicijo obrabe pozitivne vrednosti najmanjše obrabe niso pravilne. Pozitivne vrednosti so lahko posledica nepravilne postavitve



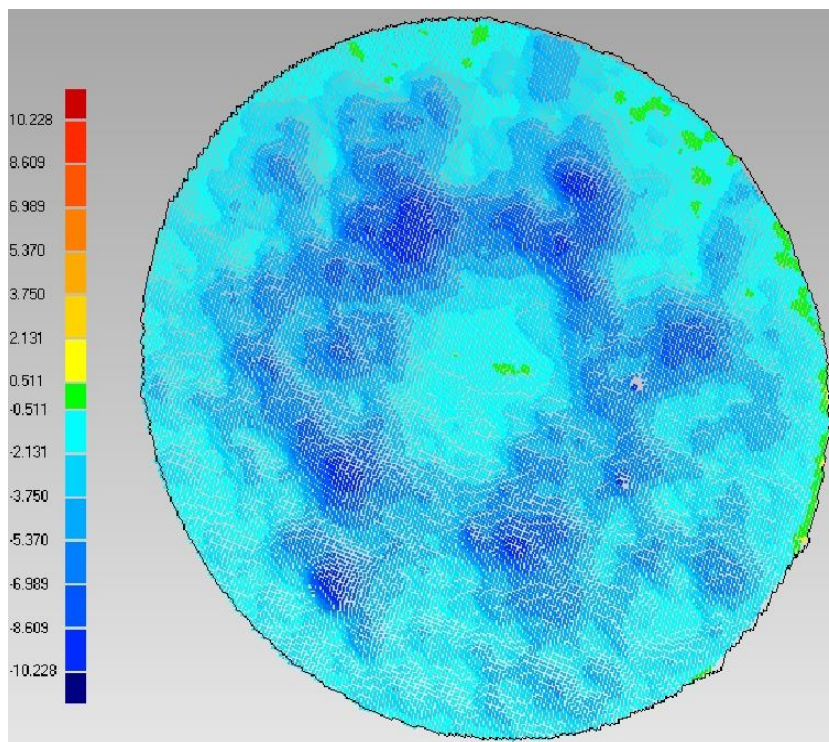
preskušanca, jeklenih vlaken, ki zaradi obrabe cementnega kamna gledajo ven iz površine preskušanca ali drugih razrahljanih delcev (agregat, polipropilenska vlakna), ki tako kot jeklena vlakna zaradi obrabe cementnega kamna na nekaterih mestih izstopajo iz površine preskušanca. Iz slike je razvidno, da je v primeru preskušanca C2 v območju delovanja mešala obraba najmanjša, največja obraba pa je v območju nevrtničnega toka.



Slika 52: Prikaz podobe površine preskušanca PMC2-1 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserski profilometerom

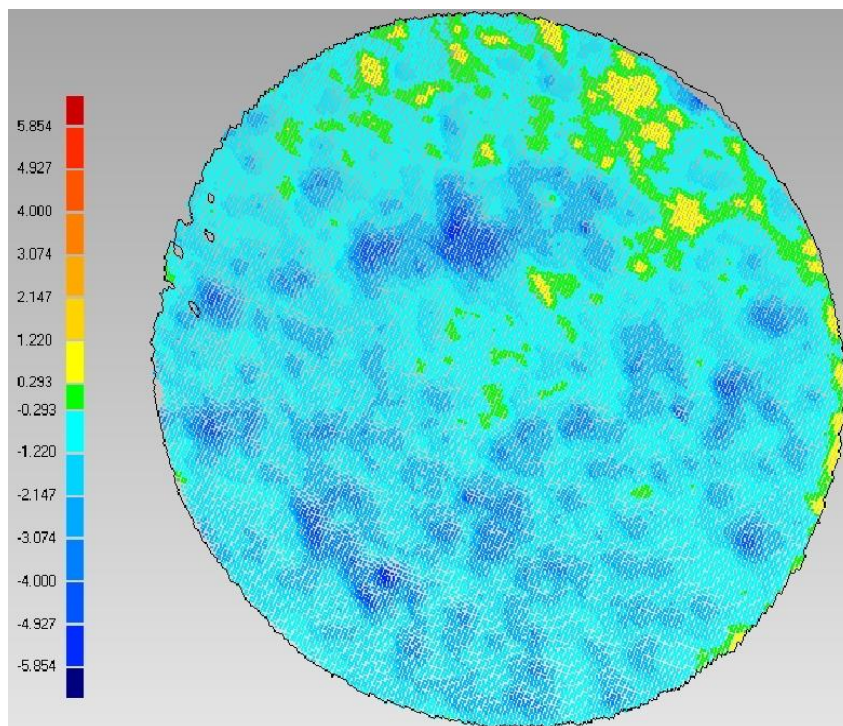
Na sliki 52 je prikazana podoba obrabljene površine preskušanca PMC2-1 po končanem preskusu ASTM C 1138. Podobo smo dobili po tem, ko smo obdelali podatke, ki smo jih zajeli z rotacijskim laserskim profilometerom. Hladne barve označujejo mesta, kjer je obraba večja, toplejše barve pa označujejo mesta, kjer je obraba manjša. Barvna legenda je v milimetrih. Glede na primerjalno ravnino največja globina obrabe pri preskušancu PMC2-1, ki smo jo izmerili z rotacijskim laserskim profilometerom, znaša  $-9,768$  mm, najmanjša pa  $0,886$  mm. Kot že prej omenjeno, lahko sklepamo, da glede na definicijo obrabe pozitivne vrednosti najmanjše obrabe niso pravilne. Pozitivne vrednosti so lahko posledica nepravilne postavitve preskušanca, gumenega granulata, ki zaradi obrabe cementnega kamna gleda ven iz površine preskušanca, ali drugih razrahljanih delcev (agregat, polipropilenska vlakna), ki tako kot gumeni granulati zaradi obrabe cementnega kamna na nekaterih mestih izstopajo iz površine preskušanca. Iz slike je razvidno, da je v primeru preskušanca PMC2-1 v območju delovanja mešala obraba najmanjša, največja obraba pa je v območju nevrtničnega toka.





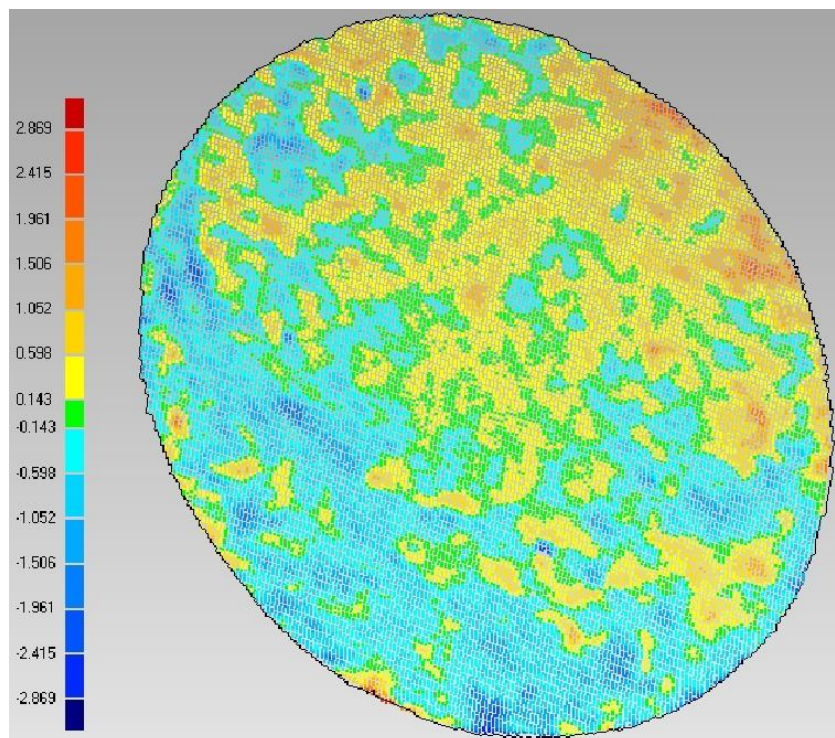
Slika 53: Prikaz podobe površine preskušanca PMC2-SR-1 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserski profilmerom

Na sliki 53 je prikazana podoba obrabljene površine preskušanca PMC2-SR-1 po končanem preskusu ASTM C 1138. Podobo smo dobili po tem, ko smo obdelali podatke, ki smo jih zajeli z rotacijskim laserskim profilmerom. Hladne barve označujejo mesta, kjer je obraba večja, toplejše barve pa označujejo mesta, kjer je obraba manjša. Barvna legenda je v milimetrih. Glede na primerjalno ravnino največja globina obrabe pri preskušancu PMC2-SR-1, ki smo jo izmerili z rotacijskim laserskim profilmerom, znaša -10,228 mm, najmanjša pa 0,845 mm. Kot že prej omenjeno, lahko sklepamo, da glede na definicijo obrabe pozitivne vrednosti najmanjše obrabe niso pravilne. Pozitivne vrednosti so lahko posledica nepravilne postavitve preskušanca, gumenega granulata, ki zaradi obrabe cementnega kamna gleda ven iz površine preskušanca, ali drugih razrahljanih delcev (agregat, polipropilenska vlakna), ki tako kot gumeni granulati zaradi obrabe cementnega kamna na nekaterih mestih izstopajo iz površine preskušanca. Iz slike je razvidno, da je v primeru preskušanca PMC2-SR-1 v območju delovanja mešala obraba najmanjša, največja obraba pa je v območju nevrtničnega toka.



Slika 54: Prikaz podobe površine preskušanca PMC2-SR-2 po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserski profilmerom

Na sliki 54 je prikazana podoba obrabljene površine preskušanca PMC2-SR-2 po končanem preskusu ASTM C 1138. Podobo smo dobili po tem, ko smo obdelali podatke, ki smo jih zajeli z rotacijskim laserskim profilmerom. Hladne barve označujejo mesta, kjer je obraba večja, toplejše barve pa označujejo mesta, kjer je obraba manjša. Barvna legenda je v milimetrih. Glede na primerjalno ravnino največja globina obrabe pri preskušancu PMC2-SR-2, ki smo jo izmerili z rotacijskim laserskim profilmerom, znaša -5,854 mm, najmanjša pa 2,017 mm. Kot že prej omenjeno lahko, sklepamo, da glede na definicijo obrabe pozitivne vrednosti najmanjše obrabe niso pravilne. Pozitivne vrednosti so lahko posledica nepravilne postavitve preskušanca, gumenega granulata, ki zaradi obrabe cementnega kamna gleda ven iz površine preskušanca, ali drugih razrahljanih delcev (agregat, polipropilenska vlakna), ki tako kot gumeni granulati zaradi obrabe cementnega kamna na nekaterih mestih izstopajo iz površine preskušanca. Iz slike je še vedno razvidno, da je v primeru preskušanca PMC2-SR-1 v območju delovanja mešala obraba najmanjša, največja obraba pa je v območju nevrtinčnega toka, vendar v veliko manjši meri kot pri drugih preskušancih.



Slika 55: Prikaz podobe površine preskušanca PMM-G po opravljenem preskusu, zajete z rotacijskim laserski profilometerom

Na sliki 55 je prikazana podoba obrabljene površine preskušanca PMM-G po končanem preskusu ASTM C 1138. Podobo smo dobili po tem, ko smo obdelali podatke, ki smo jih zajeli z rotacijskim laserskim profilometerom. Hladne barve označujejo mesta, kjer je obraba večja, toplejše barve pa označujejo mesta, kjer je obraba manjša. Barvna legenda je v milimetrih. Glede na primerjalno ravnino največja globina obrabe pri preskušancu PMC2-SR-1, ki smo jo izmerili z rotacijskim laserskim profilometerom, znaša -2,568 mm, najmanjša pa 2,896 mm. Kot že prej omenjeno, lahko sklepamo, da glede na definicijo obrabe pozitivne vrednosti najmanjše obrabe niso pravilne. Pozitivne vrednosti so lahko posledica nepravilne postavitve preskušanca, gumenega granulata, ki zaradi obrabe cementnega kamna gleda ven iz površine preskušanca, ali drugih razrahljanih delcev (agregat, polipropilenska vlakna), ki tako kot gumeni granulati zaradi obrabe cementnega kamna na nekaterih mestih izstopajo iz površine preskušanca. Iz slike je še vedno razvidno, da je v primeru preskušanca PMC2-SR-1 v območju delovanja mešala obraba najmanjša, največja obraba pa je v območju nevrtinčnega toka, vendar v veliko manjši meri kot pri drugih preskušancih.

S postopkom ASTM C 1138 simuliramo proces abrazijske erozije, posledica le-te pa je obraba izpostavljene površine. Glede na to, da z obrabo označujemo napredujočo odstranitev materiala s površine trdnega telesa, lahko predvidevamo, da so pozitivne



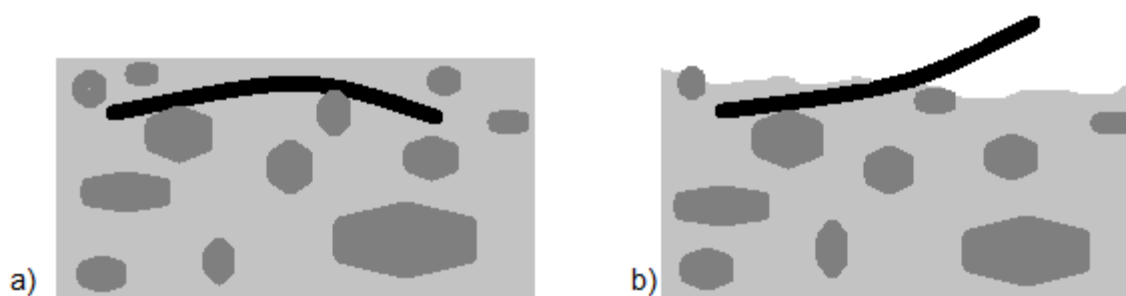
vrednosti obrabe, ki smo jih dobili z izmero površine preskušancev z rotacijskim laserskim profilmerom, posledica določenih nepravilnosti.

Predvidevamo, da so pozitivne vrednosti obrabe posledica:

- nepravilne postavitve preskušanca,
- gumenega granulata, ki izstopa iz obrabljene površine,
- drugih sestavin betona (agregat, jeklena vlakna, polipropilenska vlakna), ki so se deformirala zaradi obremenitev tekom postopka in zaradi tega izstopajo iz obrabljene površine preskušanca.

Do nepravilne postavitve preskušanca je prišlo zaradi tega, ker smo meritve opravili v dveh fazah. Prvo fazo meritev smo opravili pred izvedbo preskusa abrazijske odpornosti po standardu ASTM C 1138, drugo pa po končanem preskusu. Zato je možno, da smo v prvi fazi meritev preskušane postavili drugače kot v drugi fazi meritev, kar je privedlo do ne povsem točnih rezultatov.

Določena stopnja gumenega granulata se je pri vgradnji betona v kalupe deformirala. Guma je elastomer, zato so se nekateri gumeni granuli po obrabi cementnega kamna, kateri je obdajal gumene granule, vrnili v obliko pred deformacijo. Po ogledu slike 11 in preskušanca PMM-G smo ugotovili, da pride do večjih deformacij gumenega granulata na robu, kjer je beton obdajal kalup, za večje deformacije pa so dovezetni gumeni granuli podolgovate oblike. Tekom preskusa cementni kamen in agregat, ki obdaja gumene granule, odpada s površine, gumeni granulati pa se povrne v prvotno obliko. Proces je prikazan na sliki 56. Slika a prikazuje gumeni granulati podolgovate oblike, obdani s cementnim kamnom in agregatom. Med preskusom pride do obrabe materiala, predvsem cementnega kamna in agregata, tako da del gumenega granulata še vedno ostaja v stiku z betonom, del pa izstopa izven površine. Zaradi elastičnosti gume se izstopajoč del granulata povrne v prvotno obliko (slika b).



Slika 56: Prikaz gumenega granulata, ki se po obrabi cementnega kamna in agregata, katera ga obdajata, vrne v prvotno obliko

Po obrabi površine lahko iz nje izstopa tudi agregat, katerega so jeklene kroglice le deloma izbile izven cementnega kamna, ki je oblepljal agregat.

Tako kot pri gumenem granulatu opazimo, da je lahko del jeklenih in polipropilenskih vlaken še vedno oblepljen s cementnim kamnom, del vlaken pa gleda ven iz površine. Zaradi obremenitev z jeklenimi kroglicami se vlakna deformirajo in spremenijo obliko.

### **7.9.2.2 Predlagane izboljšave metode z rotacijskim laserskim profilmerom**

Z namenom, da bi pri ponovni uporabi rotacijskega laserskega profilmera dobili še popolnejše rezultate, bi veljalo izboljšati nekaj stvari. Zato predlagamo, da bi meritve obrabe preskušancev opravili na vsakih 12 ur. Z namenom zmanjšanja vpliva postavitve preskušanca predlagamo, da bi vsak preskušanec med meritvijo z rotacijskim laserskim profilmerom postavili na ploščo, ki bi bila vedno na istem mestu (ali vsaj vseh 72 ur postopka). S tem bi zagotovili vedno enako površino, na katero bi postavili preskušanec. Prav tako predlagamo, da se preskušanec predhodno označi tako, da lahko s pomočjo oznak preskušanec med meritvami vedno orientiramo v isto smer. Veljalo bi čim bolj zmanjšati vse tri vrste merilnih pogreškov, kot so: 1) merilne napake, ki nastanejo zaradi napačnih odčitavanj in napak, 2) sistematični merilni pogreški, ki nastanejo zaradi nenatančno umerjenih merilnih naprav oziroma zaradi končne ločljivosti le-teh, 3) statistični ali slučajni merilni pogreški, ki nastanejo zaradi slučajnih sprememb merilnih naprav. Za zagotovitev čim bolj natančno izmerjenih vrednosti predlagamo ponavljanje meritev in povprečenje rezultatov, kot tudi ocenitev merilne negotovosti. Predlagamo tudi, da se preveri faktor človeškega vpliva na postavitve preskušanca, navkljub poizkušanju doseganja vedno iste postavitve preskušanca s pomočjo oznak, saj lahko pride do manjših razlik pri postavitvi preskušanca zaradi nenatančnosti pri postavitvi.

### **7.9.3 Meritve z volumetrično metodo**

#### **7.9.3.1 Analiza rezultatov, dobljenih po metodi z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi**

V preglednici 13 so prikazani delni rezultati preskusa abrazijske odpornosti pri starosti preskušancev 28 dni po končanem postopku ASTM C 1138, dobljeni z metodo z merjenjem spremembe prostornine preskušancev.

Preglednica 13: Prikaz delnih rezultatov preskusa abrazijske odpornosti po izvedbi standardiziranega postopka ASTM C 1138, dobljenih z metodo z merjenjem spremembe prostornine preskušancev

<b>REZULTATI PREIZKUSA ABRAZIJSKE ODPORNOSTI</b>						
<b>sestava betona</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>PMC2-1</b>	<b>PMC2-SR-1</b>	<b>PMC2-SR-2</b>	<b>PMM-G</b>
<b>starost preizkušancev [dan]</b>	29	29	31	28	28	28
<b>trajanje preizkusa</b>	<b>oddaljenost vodne gladine od točke merjenja</b>					
<b>[h]</b>	<b>[cm]</b>					
0	32,36	32,10	32,35	32,16	32,19	32,37
12	32,07	32,18	32,35	32,24	32,24	32,30
24	32,39	32,18	32,33	32,28	32,24	32,35
36	32,37	32,20	32,35	32,30	32,25	32,37
48	32,37	32,26	32,37	32,36	32,25	32,37
60	32,35	32,30	32,38	32,36	32,27	32,37
72	32,32	32,37	32,40	32,37	32,26	32,37

Po pregledu vrednosti, navedenih v preglednici 13, ki smo jih izmerili z ostnim merilom, lahko vidimo, da se vrednosti za posamezen preskušaneec zelo malo razlikujejo med seboj. Pri preskušancu C1 je razlika med oddaljenostjo vodne gladine od točke merjenja pred postopkom in oddaljenostjo po končanem postopku ASTM C 1138 samo 0,4 mm. Poleg tega lahko iz preglednice razberemo, da se pri preskušancu C1 oddaljenost vodne gladine od točke merjenja celo zmanjša, kar bi pomenilo, da se je prostornina preskušanca povečala. Pri preskušancu C2 razlika med oddaljenostjo vodne gladine od točke merjenja pred postopkom in oddaljenostjo po 72 urah postopka ASTM C 1138 znaša 1,7 mm, pri preskušancu PMC2-1 0,5 mm, pri preskušancu PMC2-SR-1 2,1 mm, pri preskušancu PMC2-SR-2 0,7 mm ter pri preskušancu PMM-G 0,0 mm. Poleg preskušanca C1 se je tudi pri preskušancih PMC2-1, PMC2-SR-2 in PMM-G pri vmesnih meritvah oddaljenost vodne gladine od točke merjenja med postopkom zmanjšala, glede na prejšnjo izmerjeno oddaljenost.

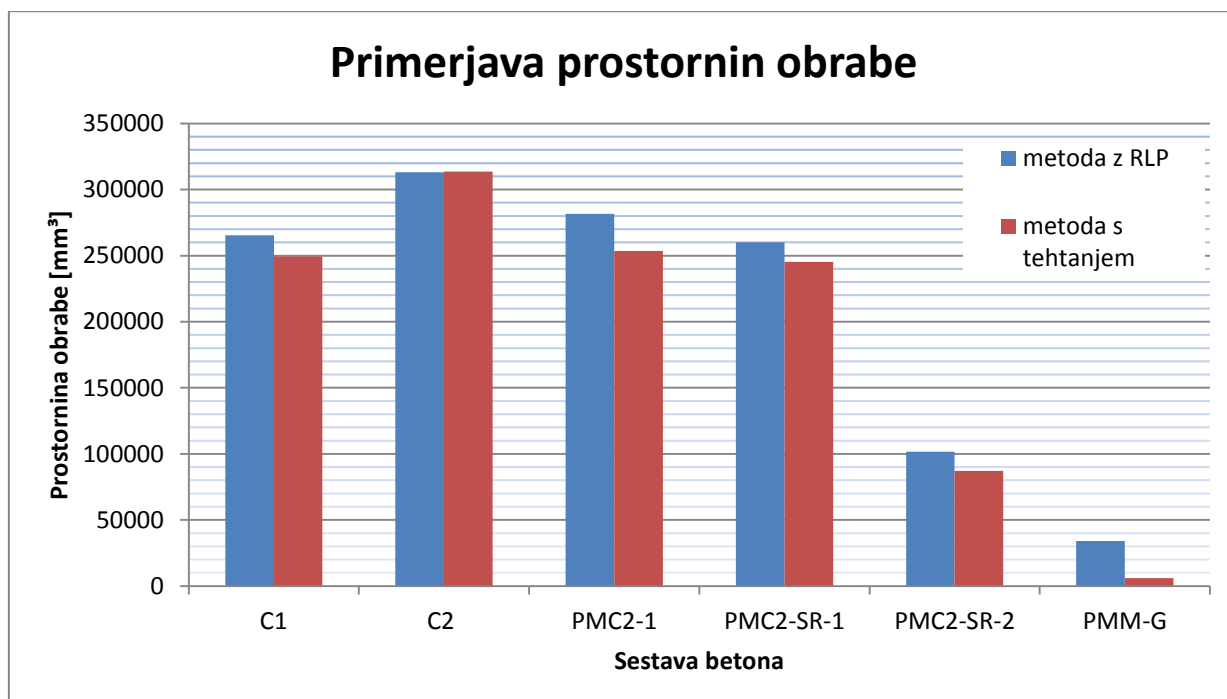
Na podlagi zelo majhnih razlik med izmerjenimi oddaljenostmi vodne gladine od točke merjenja pred začetkom postopka in po končanem postopku ASTM C 1138 smo se odločili, da zaradi premajhne natančnosti naših merilnih naprav ter težkega umerjanja prostornine posode, zaradi tako majhnih razlik med vrednostmi pred in po postopku, ne bomo določili prostornine obrabe preskušancev po metodi z merjenjem spremembe prostornine.

### 7.9.3.2 Predlagane izboljšave metode z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi

Z namenom, da bi pri ponovni uporabi metode z merjenjem spremembe prostornine preskušanca dobili boljše rezultate, bi veljalo izboljšati nekaj stvari. Predlagamo, da naj bo premer odprtine posode čim manjši, saj s tem zagotovimo večje spremembe višine gladine zaradi dodajanja ali odvzemanja vode. Prav tako predlagamo, da je nivo gladine poravnan z višino opazovalčevih oči, saj s tem zagotovimo bolj točno določanje kontakta ostnega merila z vodno gladino. Predlagamo tudi, da mora biti vsaj del posode, kjer opazujemo kontakt ostnega merila in vodne gladine, izdelan iz materiala, skozi katerega lahko jasno vidimo. Vseeno pa smo mnenja, da bi tudi z izboljšanjem metode le s težavo določili pravilne rezultate obrabe preskušancev, saj so vsi preskušanci dosegli zelo majhno obrabo in bi navkljub izboljšavam s to metodo dosegli premajhno natančnost meritev.

### 7.9.4 Primerjava rezultatov med standardno metodo in metodo z rotacijskim laserskim profilmerom

Na sliki 57 in v preglednici 14 so prikazani rezultati prostornine obrabe preskušancev, ki smo jih dobili z metodo s tehtanjem in z metodo z rotacijskim laserskim profilmerom pri starosti preskušancev 28 dni.



Slika 57: Prikaz prostornine obrabe preskušancev, ki smo jih dobili z metodo s tehtanjem in z metodo z rotacijskim laserskim profilmerom

Preglednica 14: Prikaz primerjav prostornine obrabe preskušancev po končanem postopku ASTM C 1138 po metodi s tehtanjem in po metodi z rotacijskim laserskim profilomerom

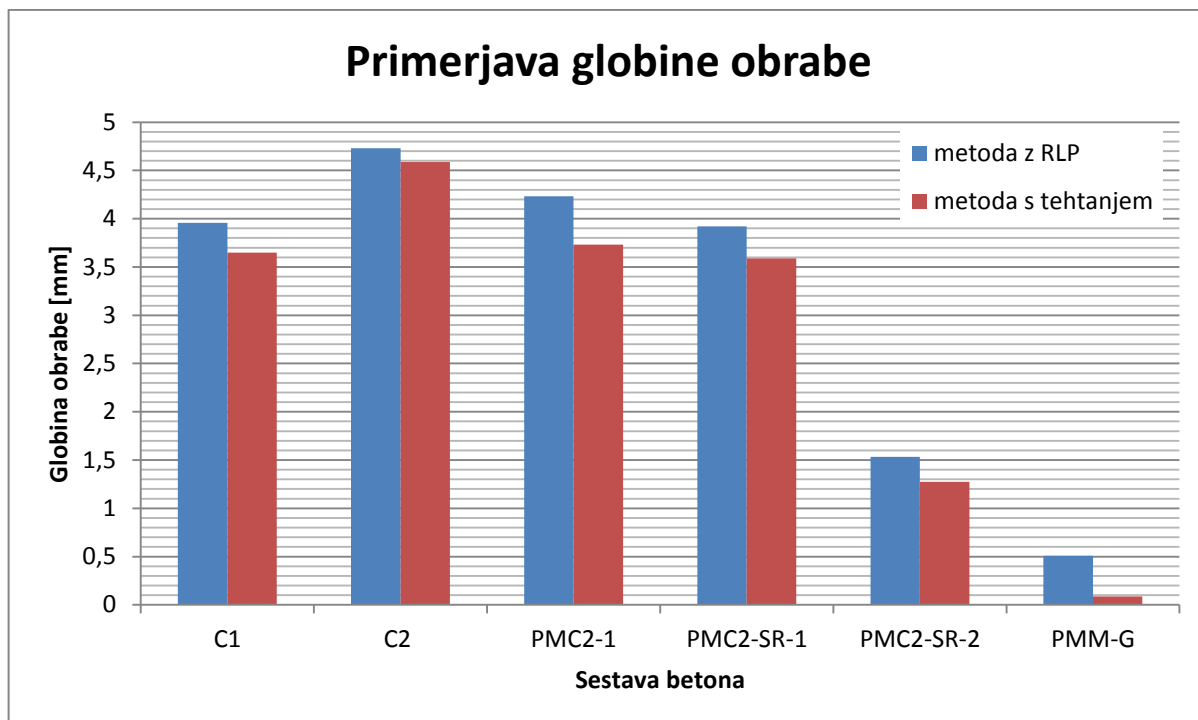
<b>PROSTORNINA OBRABE PREIZKUŠANCEV PO 72 h</b>						
<b>[mm<sup>3</sup>]</b>						
<b>sestava betona</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>PMC2-1</b>	<b>PMC2-SR-1</b>	<b>PMC2-SR-2</b>	<b>PMM-G</b>
<b>metoda s tehtanjem</b>	<b>249399</b>	<b>313502</b>	<b>253405</b>	<b>245393</b>	<b>87139</b>	<b>6010</b>
<b>metoda z RLP</b>	<b>265328</b>	<b>313046</b>	<b>281561</b>	<b>260064</b>	<b>101679</b>	<b>34089</b>
<b>razlika v prostornini [%]</b>	<b>6,00</b>	<b>-0,15</b>	<b>10,00</b>	<b>5,64</b>	<b>14,30</b>	<b>82,37</b>

Na podlagi rezultatov, ki smo jih dobili, lahko podamo naslednje ugotovitve:

- Rezultati med metodama se najbolj razlikujejo pri preskušancu PMM-G, ki je izkazal najboljšo abrazijsko odpornost.
- Rezultati med metodama so se najbolj ujemali pri preskušancu C2. Prostornina obrabe preskušanca, ki smo jo dobili z metodo s tehtanjem, je le za 0,15 % večja kot prostornina obrabe, ki smo jo dobili z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom.
- Manjša, kot je prostornina obrabljenega materiala večje so razlike med rezultati, ki smo jih dobili z eno ali drugo metodo.
- Meritev prostornine obrabe z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom je primerna za preskušance iz sestave betona, ki izkazujejo višjo abrazijsko odpornost.

Na sliki 58 in v preglednici 15 je prikazana globina obrabe preskušancev, ki smo jih dobili z metodo s tehtanjem in z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom pri starosti preskušancev 28 dni.





Slika 58: Prikaz globine obrabe preskušancev, ki smo jih dobili z metodo s tehtanjem in z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom

Preglednica 15: Prikaz primerjave globin obrabe preskušancev po končanem postopku ASTM C 1138 po metodi s tehtanjem in po metodi z rotacijskim laserskim profilomerom

GLOBINA OBRABE PREIZKUŠANCEV PO 72 h						
[mm]						
sestava betona	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
metoda s tehtanjem	3,65	4,59	3,73	3,59	1,27	0,09
metoda z RLP	3,96	4,73	4,23	3,92	1,53	0,51
razlika v globini [%]	7,79	3,05	11,84	8,43	16,89	82,57

Na podlagi rezultatov, ki smo jih dobili lahko podamo naslednje ugotovitve:

- Rezultati med metodama se najbolj razlikujejo pri preskušancu PMM-G, ki je izkazal najboljšo abrazijsko odpornost.
- Rezultati med metodama so se najbolj ujemali pri preskušancu C2. Globina obrabe, ki smo jo dobili z metodo s tehtanjem, je le za 3,05 % manjša kot globina obrabe, ki smo jo dobili z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom.
- Pri preskušancih z manjšo globino obrabe smo zabeležili večje razlike med rezultati, ki smo jih dobili z eno ali drugo metodo.
- Meritev globin obrabe z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom je primerna za preskušance iz sestave betona, ki izkazujejo višjo abrazijsko odpornost.

V primerjavi z metodo s tehtanjem, kjer kot rezultat dobimo le povprečno globino obrabe, z uporabo metode z rotacijskim laserskim profilmerom poleg povprečne globine obrabe dobimo največjo in najmanjšo globino obrabe ter standardni odklon rezultatov obrabe. Poleg tega z uporabo rotacijskega laserskega profilmera dobimo grafično podobo površine preskušancev, iz katere lahko glede na barvni odtenek razberemo območja z večjo ali manjšo obrabo.

### 7.9.5 Vpliv premera na globino obrabe

Pri primerjavi rezultatov med metodo s tehtanjem in metodo z laserskim rotacijskim profilmerom smo ugotovili, da se izmerjene vrednosti premera istega preskušanca, izmerjene z eno oziroma drugo metodo, med seboj razlikujejo.

Izmerjene vrednosti premera pri metodi s tehtanjem in metodi z rotacijskim laserskim profilmerom so prikazane v preglednici 16.

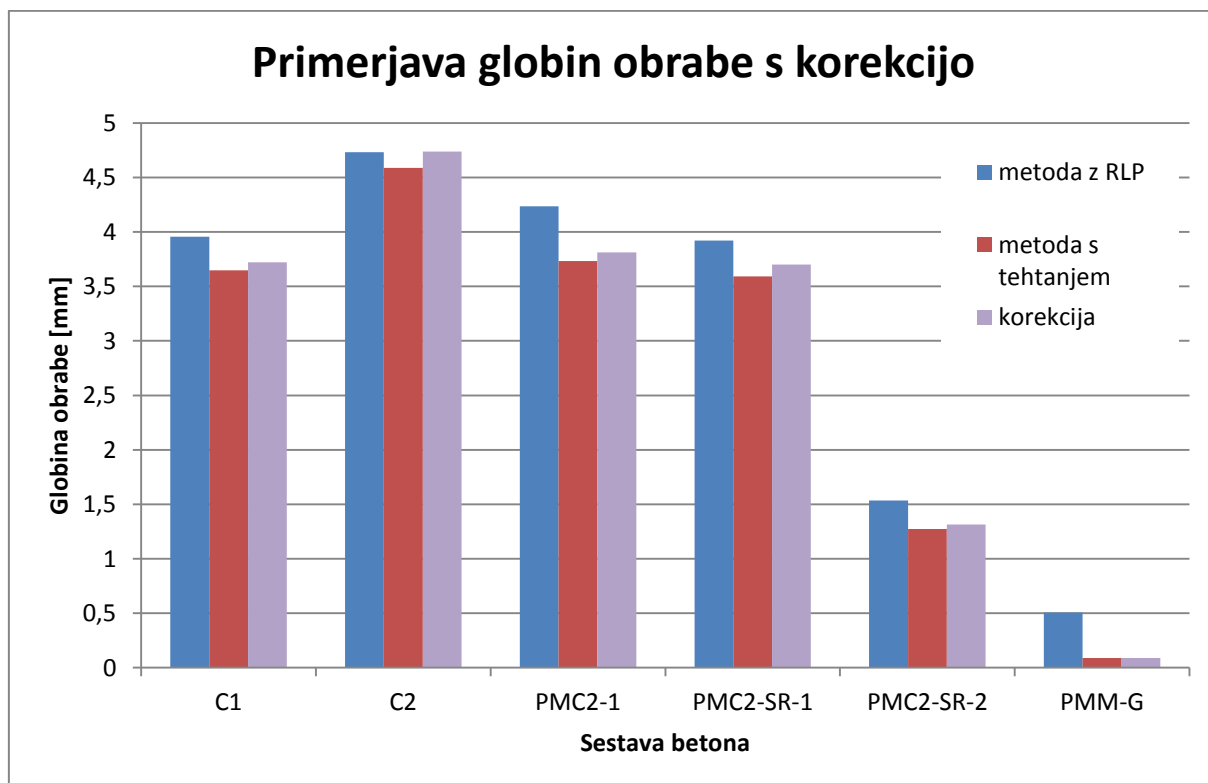
Preglednica 16: Prikaz izmerjenih vrednosti premera pri metodi s tehtanjem in metodi z RLP

sestava betona	premer preizkušanca [mm]					
	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
metoda s tehtanjem	295	295	294	295	295	294
metoda z RLP	290,51	290,60	290,98	290,26	292,19	292,30

Glede na to, da smo pri obeh metodah uporabljali iste preskušance, bi pričakovali, da se bodo ohranila razmerja, ki smo jih dobili pri primerjavi rezultatov prostornine obrabe, tudi pri primerjavi rezultatov globine obrabe. Vendar smo ugotovili, da se zaradi različnih vrednosti premera, ki smo jih izmerili pri eni oziroma drugi metodi, ta razmerja spremenijo. Da bi izločili vpliv premera na rezultate globine obrabe preskušancev, smo se odločili, da bomo opravili korekcijo radija pri metodi s tehtanjem pri vseh preskušancih. To smo storili na način, da smo pri korekciji namesto vrednosti izmerjenega premera, ki smo jih dobili pri metodi s tehtanjem, uporabili vrednosti za premer, ki smo jih dobili z uporabo metode z rotacijskim laserskim profilmerom. Rezultati globine obrabe po opravljeni korekciji premera pri metodi s tehtanjem so prikazani v preglednici 17 ter na sliki 59.

Preglednica 17: Rezultati globine obrabe po korekciji premera pri metodi s tehtanjem

GLOBINA OBRABE PREIZKUŠANCEV PO 72 h						
[mm]						
	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
metoda s	3,65	4,59	3,73	3,59	1,27	0,09
metoda z RLP	3,96	4,73	4,23	3,92	1,53	0,51
korekcija	3,72	4,74	3,81	3,70	1,31	0,09



Slika 59: Primerjava globin obrabe po korekciji premera pri metodi s tehtanjem

Kot lahko razberemo iz preglednice 18, se je razlika v globini obrabe po opravljeni korekciji premera, v primerjavi z rezultati, ki smo jih dobili, ko nismo opravili korekcije, spremenila. Ugotovili smo tudi, da se je po opravljeni korekciji razlika v globini obrabe spremenila v enakem razmerju, kot se je spremenila razlika v prostornini pri primerjavi rezultatov prostornine obrabe med metodo s tehtanjem in metodo z rotacijskim laserskim profilmerom (glej preglednico 14).

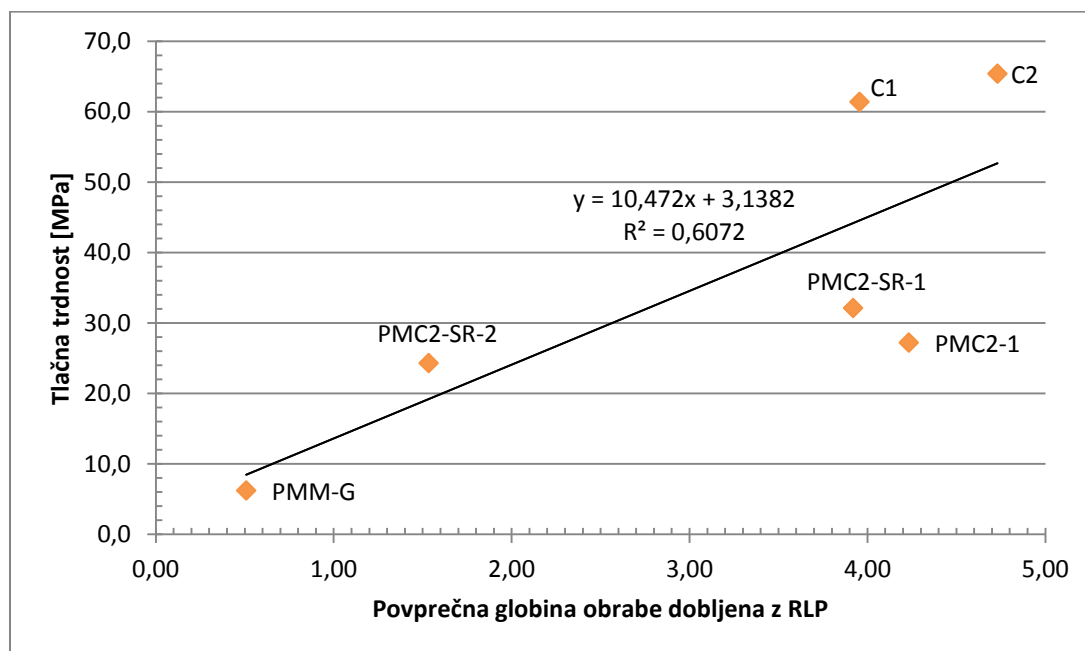
Preglednica 18: Rezultati razlike v obrabi brez korekcije in po opravljeni korekciji

Razlika v globini obrabe med metodama brez korekcije						
sestava betona	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
razlika v globini [%]	7,79	3,05	11,84	8,43	16,89	82,57
Razlika v globini obrabe med metodo z RLP in korekcijo						
sestava betona	C1	C2	PMC2-1	PMC2-SR-1	PMC2-SR-2	PMM-G
razlika v globini [%]	6,00	-0,15	10,00	5,64	14,30	82,37

## 7.10 Primerjave soodvisnosti

### 7.10.1 Soodvisnost med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo

V okviru diplomske naloge smo določili tlačno trdnost preskušancev pri dveh in 28-ih dneh. Glede na rezultate preteklih raziskav abrazijske odpornosti betona naj bi bila tlačna trdnost betona eden izmed najpomembnejših faktorjev, ki vplivajo na abrazijsko odpornost betona (Bakke, 2006). Zato smo v diplomski nalogi opravili analizo soodvisnosti tlačne trdnosti in abrazijske odpornosti preskušancev pri starosti 28 dni.

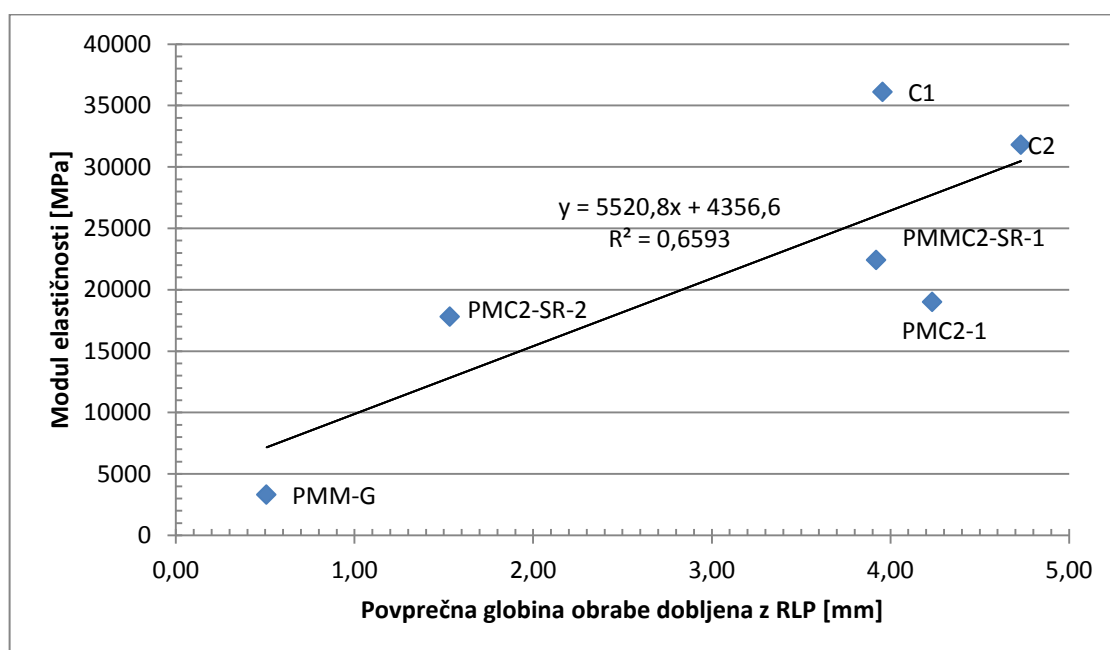


Slika 60: Soodvisnost med globino obrabe po ASTM C 1138 in povprečno tlačno trdnostjo pri starosti 28 dni

Ugotovili smo, da je na podlagi primerjave dobljenih rezultatov soodvisnost med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo betonskih preskušancev različnih sestav pri starosti 28 dni dokaj skromna.

## 7.10.2 Soodvisnost med modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo

V okviru diplomske naloge smo določili statični modul elastičnosti betonskih preskušancev pri starosti 28 dni. Rezultati preskusov preteklih znanstvenih raziskav so pokazali, da se statični modul elastičnosti z naraščajočim deležem gumenega granulata v betonu zmanjšuje (Popit, Nikonov in Emri, 2012). Podobno smo ugotovili tudi na podlagi rezultatov, dobljenih za potrebe diplomske naloge. Prav tako smo preverili, ali obstaja soodvisnost med statičnim modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo.



Slika 61: Soodvisnost med globino obrabe po ASTM C 1138 in statičnim modulom elastičnosti pri starosti 28 dni

Ugotovili smo, da je na podlagi primerjave dobljenih rezultatov soodvisnost med statičnim modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo betonskih preskušancev različnih sestav pri starosti 28 dni dokaj skromna.

## 7.11 Zaključki analize rezultatov

- Rezultate obrabe, primerne za analizo, smo pridobili z metodo s tehtanjem (obstoječa metoda) in z metodo z uporabo rotacijskega laserskega profilomera. Metoda z določanjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi se je izkazala kot neprimerna, saj je bila preveč nenatančna.

- Ne glede na uporabljeni metodi, s katerima smo dobili zadovoljive rezultate, je najslabšo abrazijsko odpornost izkazal preskušavec C2, najboljšo pa preskušavec PMM-G. Na podlagi rezultatov obrabe preskušancev, dobljenih po postopku ASTM C 1138, lahko ugotovimo, da se v primeru, ko del mineralnega agregata nadomestimo z gumenim granulatom, abrazijska odpornost betona izboljša. Iz rezultatov je razvidno tudi, da na abrazijsko odpornost vpliva oblika gumenega granulata.
- Pri vseh preskušancih in sestavah betona je dosežena dokaj majhna globina obrabe, izstopata preskušanca PMC2-SR-2 in PMM-G, pri katerih je globina obrabe, ne glede na uporabljeno metodo za določanje obrabe, manjša kot 2 mm.
- V standardu ASTM C 1138 je zapisano, da se rezultati tehtanja zaokrožijo na 25 gramov natančno, vendar smo zaradi pričakovane manjše obrabe, maso preizkušanca določali na gram natančno. Glede na to, da smo za potrebe diplomske naloge izdelali betonske preskušance z zelo dobro abrazijsko odpornostjo, smo preskušance tehtali na 1 g natančno, saj bi v primeru upoštevanja navodil v standardu prišlo do prevelikega odstopanja dobljenih rezultatov od dejanske obrabe.
- Pri preskušancih, ki so dosegli najboljšo abrazijsko odpornost (PMM-G), se je izkazalo, da na rezultate tehtanja površinsko suhega preskušanca precej vpliva, kako dobro smo preskušavec površinsko osušili.
- V primerjavi z metodo s tehtanjem, kjer kot rezultat dobimo povprečno globino obrabe, z uporabo metode z rotacijskim laserskim profilmerom poleg povprečne globine obrabe dobimo največjo in najmanjšo globino obrabe ter standardni odklon rezultatov obrabe. Poleg tega z uporabo rotacijskega laserskega profilmera dobimo grafično podobo površine preskušancev, iz katere lahko, glede na barvni odtenek, razberemo območja z večjo ali manjšo obrabo. Vse to nam omogoča natančnejšo analizo obrabe preskušancev.
- V primeru uporabe rotacijskega laserskega profilmera je glede na analizo izdelanih grafičnih podob obrabe in rezultatov najmanjše obrabe razvidno, da so bile na nekaterih mestih izmerjene pozitivne vrednosti obrabe. Glede na definicijo obrabe vemo, da pozitivne vrednosti obrabe niso pravilne. Sklepamo, da so pozitivne vrednosti obrabe posledica: 1) nepravilne postavitve preskušanca, 2) gumenega granulata, ki izstopa iz obrabljene površine, 3) drugih sestavin betona (agregat, jeklena vlakna, polipropilenska vlakna), ki so se deformirala zaradi obremenitev tekom postopka in zaradi tega izstopajo iz obrabljene površine preskušanca.

- Razlike med rezultati, ki smo jih dobili ali z metodo s tehtanjem ali z metodo z rotacijskim laserskim profilomerom so dokaj majhne. Rezultati med metodama se najbolj razlikujejo pri preskušancu PMM-G, ki je izkazal najboljšo abrazijsko odpornost, najbolj pa so se rezultati ujemali pri preskušancu C2, ki je izkazal najslabšo abrazijsko odpornost. Uporaba rotacijskega laserskega profilomera je smiselna pri preskušancih, ki izkazujejo zelo dobro abrazijsko odpornost. V takem primeru je obraba preskušanca zelo majhna, določanje obrabe po obstoječi metodi pa se je v praksi izkazalo za zamudno ter nenatančno.
- Za zagotovitev čim bolj pravilnih rezultatov pri uporabi rotacijskega laserskega profilomera je potrebno zmanjšati vpliv merilnih pogreškov na rezultate. Predlagamo ponavljanje meritev in povprečenje rezultatov, kot tudi ocenitev merilne negotovosti. Prav tako bi v primeru nadaljnjih meritev bilo priporočljivo meritve z rotacijskim laserskim profilomerom izvajati na vsakih 12 ur.
- Pri metodi s tehtanjem smo izmerili različne premere kot pri metodi z rotacijskim laserskim profilomerom. Pri primerjavi globin obrabe preskušancev smo ugotovili, da premer vpliva na rezultate globine obrabe. Da bi izločili vpliv premera na rezultate globine obrabe smo opravili korekcijo premerov pri metodi s tehtanjem. Po opravljeni korekciji smo dobili enaka razmerja med rezultati, kot smo jih dobili pri primerjavi rezultatov prostornine obrabe.
- Ugotovili smo, da je soodvisnost med tlačno trdnostjo in rezultati abrazijske odpornosti, dobljenimi z metodo ASTM C 1138, dokaj skromna. Enako smo ugotovili za soodvisnost med modulom elastičnosti in rezultati abrazijske odpornosti, dobljenimi z metodo ASTM C 1138.

## 8 ZAKLJUČEK

V preteklem desetletju je Kryžanowski s sodelavci raziskoval problematiko abrazijske erozije betonskih površin na vodnih zgradbah. V okviru raziskovanj so med drugim laboratorijsko raziskovali abrazijsko odpornost več sestav betona. Rezultati preskušanja abrazijske odpornosti betonov po standardiziranem postopku ASTM C 1138 so pokazali, da so izdelali sestave, ki so izkazovale visoko abrazijsko odpornost. Prav zaradi visoke abrazijske odpornosti teh betonov ter posledično majhne povprečne globine obrabe preskušancev se je pojavil dvom o ustreznosti obstoječe metode za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po postopku ASTM C 1138. Zaradi tega smo v okviru diplomske naloge opravili primerjavo treh metod za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti. Poleg tega smo opravili tudi analizo abrazijske odpornosti uporabljenih betonskih sestav, hkrati pa smo opravili tudi preskuse na svežem betonu, strjenemu betonu pa smo določili tlačno trdnost pri 28 dneh ter modul elastičnosti pri 28 dneh. Preverili smo tudi soodvisnost med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo preskušancev ter soodvisnost med modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo preskušancev.

Uvodni del diplomske naloge sestavlja opis abrazijske erozije ter predstavitev problematike pojava abrazijske erozije na betonskih površinah vodnih zgradb. Podani so ključni dejavniki, ki vplivajo na abrazijsko erozijo, opisane pa so tudi tehnike in materiali, s katerimi zaščitimo izpostavljene površine pred abrazijsko erozijo. Zaradi njegove pogoste uporabe za zaščito izpostavljenih površin so natančneje opisani abrazijsko odporen beton in faktorji, ki vplivajo na njegovo abrazijsko odpornost. Pred uporabo betona v praksi je dobro, da pred tem opravimo laboratorijske raziskave načrtovanih betonskih sestav. Metod za določanje abrazijske odpornosti betona v laboratoriju je več, v diplomski nalogi so predstavljene tri. Predstavljene so tiste tri, ki se v znanstvenih raziskavah in monografijah, katere se ukvarjajo z vodno abrazijo na betonskih površinah, največkrat uporabljajo. Z laboratorijskimi raziskavami abrazijske odpornosti betonov ne moremo ustvariti povsem identičnih razmer, kot nastopajo v naravnem okolju. Zato sta v diplomski nalogi predstavljeni tudi dve raziskavi, opravljeni v naravi.

Za potrebe medsebojne primerjave metod za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti betonov po postopku ASTM C 1138 in preskušanje tlačne trdnosti ter določanja modula elastičnosti smo izdelali šest različnih betonskih sestav. V štirih izmed šestih sestav smo del mineralnega agregata nadomestili z gumenim granulatom. Pri betonskih sestavah smo z dodatkom gumenega granulata, na podlagi predhodnih raziskav, pričakovali zelo majhno obrabo. Preskus abrazijske odpornosti betonov smo opravili pri starosti



preskušancev 28 dni. Za vsak betonski preskušanec, teh je bilo šest, smo opravili preskus abrazijske odpornosti po standardiziranem postopku ASTM C 1138. Preskus traja 72 ur, na začetku preskusa, ter nato na vsake 12 ur, pa je potrebno opraviti meritve obrabe preskušanca. To smo storili s tremi različnimi metodami za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti. Z metodo pri kateri smo uporabili rotacijski laserski profilomer, smo obrabo beležili le pred in po koncu postopka ASTM C 1138, saj smo meritve opravili v laboratoriju Katedre za optodinamiko in lasersko tehniko, na Fakulteti za strojništvo, Univerze v Ljubljani, kjer so napravo tudi razvili.

Kot omenjeno, smo medsebojno primerjali tri metode za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti. Te tri metode so: 1) metoda s tehtanjem (obstoječa metoda), 2) metoda z rotacijskim laserskim profilomerom, 3) metoda z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi. Ob izvajanju metode z merjenjem spremembe nivoja vodne gladine v posodi se je izkazalo, da je metoda premalo natančna, zaradi česar nismo pridobili ustreznih rezultatov. Posledično rezultatov te metode nismo uporabili v primerjavi. Pri primerjavi rezultatov ostalih dveh metod smo ugotovili, da se rezultati med seboj najmanj razlikujejo pri preskušancu C2, ki je izkazal najslabšo abrazijsko odpornost, najbolj pa so se rezultati med metodama razlikovali pri preskušancu PMM-G, ki je med vsemi uporabljenimi betonskimi sestavami izkazal najboljšo abrazijsko odpornost. Izkazalo se je, da je uporaba rotacijskega laserskega profilomera smiselna pri preskušancih, ki izkazujejo zelo dobro abrazijsko odpornost. Na osnovi rezultatov in spoznanj, ki smo jih pridobili tekom izvajanja meritev smo opravili podrobnejšo analizo rezultatov, prav tako pa smo podali tudi predloge za izboljšanje uporabljenih metod.

V okviru raziskovalnega dela smo uporabljenim betonskim sestavam določili tlačno trdnost in modul elastičnosti. Tlačno trdnost smo merili po dveh in 28 dneh, modul elastičnosti pa po 28 dneh. Ugotovili smo, da je največjo tlačno trdnost, tako po dveh kot po 28 dneh, dosegla betonska sestava z oznako C2. Najslabšo tlačno trdnost, prav tako pri obeh merjenjih, pa je dosegla sestava PMM-G, ki je vsebovala tudi največji delež gumenega granulata. Pri merjenju modula elastičnosti smo najvišjo vrednost zabeležili pri preskušancu C1, najmanjšo pa pri preskušancu PMM-G. Prav tako smo preverili soodvisnost med tlačno trdnostjo in abrazijsko odpornostjo betona ter soodvisnost med modulom elastičnosti in abrazijsko odpornostjo betona. V obeh primerih smo ugotovili dokaj skromno povezavo.

Omeniti velja, da na podlagi ugotovitev, do katerih smo prišli v okviru diplomske naloge; že poteka obširnejši raziskovalni projekt na področju uporabe rotacijskega laserskega

profilomera za vrednotenje rezultatov preskusa abrazijske odpornosti po postopku ASTM C 1138.

## **VIRI**

ACI 201.2R-08. 2013. Guide to durable concrete – part 1. Farmington Hills: 41 str.

ACI 210R-93. 2013. Erosion of concrete in hydraulic structures. ACI manual of concrete practise – part 1. Farmington Hills: 24 str.

ASTM C 1138. 1997. Standard test method for abrasion resistance of concrete (Underwater Method). American society for testing and materials: 1-4.

Atiş, C.D. 2002. High volume fly ash abrasion resistant concrete. Journal of materials in civil engineering 14, 3: 274-277.

Bakke, K.J. Abrasion resistance. V: Lamond J.F. (ur.), Pielert J.H. (ur.). 2006. Significance of test and properties of concrete & concrete-making materials. Philadelphia, ASTM International: str. 184-193.

Dhir, R.K., Hewlett, P.C., Chan, Y.N. 1991. Near-surface characteristics of concrete: abrasion resistance. Materials and Structures/Matériaux et Constructions 24: 122-128.

Dong-Hyun, K., Chang-Gi, P. 2013. Permeability, abrasion, and impact resistance of latex-modified fibre reinforced concrete for precast concrete pavement applications. Progress in rubber, plastics and recycling technology 29, 4: 239-254.

Ghafoori, N., Diawara, H. 1999. Abrasion resistance of fine aggregate replaced silica fume concrete. ACI Materials journal 96, 5: 559-567.

Horszczaruk, E.K. 2004. The model of abrasive wear of concrete in hydraulic structures. Wear 256: 787-796.

Horszczaruk, E.K. 2005. Abrasion resistance of high-strength concrete in hydraulic structures. Wear 259: 62-69.

Horszczaruk, E.K. 2009. Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete. Wear 267: 110-115.

Hu. X.G., Momber, A.W., Yin, Y. 2006. Erosive wear of hydraulic concrete with low steel fiber content. *Journal of hydraulic engineering* 132, 12: 1331-1340.

Jacobs, F., Winkler, K., Hunkeler, F., Volkart, P. 2001. Betonabrasion im Wasserbau. Grundlagen-Feldversuche-Empfehlungen. Vol. 168. Zürich. VAW-ETH:162 str.  
[http://people.ee.ethz.ch/~vawweb/vaw\\_mitteilungen/168/168\\_g.pdf](http://people.ee.ethz.ch/~vawweb/vaw_mitteilungen/168/168_g.pdf) (Pridobljeno 21. 6. 2013.)

Kang, J., Zhang, B., Li G. 2012. The abrasion-resistance investigation of rubberized concrete. *Journal of Wuhan University of Technology, Materials science edition* 27, 6: 1144-1148.

Kryžanowski, A. 1991. Analiza mehanične odpornosti betonov na erozijsko in abrazijsko delovanje vodnega toka. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Kryžanowski): 131 str.

Kryžanowski, A., Mikoš, M., Šušteršič, J., Planinc, I. 2009. Abrasion resistance of concrete in hydraulic structures. *ACI Materials Journal* 106, 4: 349-356.

Kryžanowski, A. 2009. Abrazijska odpornost betonskih površin na vodnih zgradbah. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Kryžanowski): 148 str.

Križanowski, A., Mikoš, M., Šušteršič, J., et al. 2012. Testing of concrete abrasion resistance in hydraulic structures on the lower Sava river. *Strojniški vestnik* 58, 4: 245-254.

Liu, Y.W., Tsong, Y., Hsu, T.H. 2005. Abrasion erosion of concrete by water-borne sand. *Cement and concrete research* 36: 1814-1820.

Mikoš, M. 1993. Fluvial abrasion of gravel sediments. *Acta hydrotechnica* 11, 10: 107 str.

Mikoš, M. 2007. Urejanje vodotokov: skripta, verzija 2007. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za splošno hidrotehniko: 200 str.

Naik, T.R., Singh, S.S., Hossain, M.M., 1995. Abrasion resistance of high-strength concrete made with class C fly ash. *ACI Materials Journal* 92, 4: 649-659.

Ozbay, E., Lachemi, M., Sevim, U.K. 2011. Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption of rubberized concretes with and without slag. *Materials and structures* 44: 1297-1307.

Pavlovčič, U., Jezeršek, M., Gorkič, A., Kosler, H., Možina, J. 2010. Izmera objektov kulturne dediščine z rotacijskim laserskim profilomerom. *Ventil* 16, 2: 146-151.

Pehan, S., Flašker, J. 2008. *Tribologija*. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo: 438 str.

Popit, A., Nikonov, A., Emri, I. 2012. Pregled raziskav lastnosti in uporabnosti betonov z dodatkom mlete gume iz odpadnih pnevmatik. *Gradbeni vestnik* 61, december: 284-295.

Senegačnik, J. 2002. *Obča geografija*. Ljubljana, Modrijan: 183 str.

SIST EN 197-1:2002. Cement – 1 del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.

SIST EN 206-1:2003. Beton - Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.

SIST 1026:2008. Beton-1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost

SIST EN 12350-1:2001. Testing fresh concrete – Part 1: Sampling.

SIST EN 12350-2:2001. Testing fresh concrete – Part 2: Slump test.

SIST EN 12350-6:2001. Testing fresh concrete – Part 6: Density.

SIST EN 12350-7:2001. Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure Methods.

SIST EN 12390-3:2002. Tlačna trdnost preskušancev.

Šušteršič, J., Dobnikar, V. 1999. Odpornost hidrotehničnih betonov proti obrabi. V: Zajc, A. (ur.). *Hidrotehnični betoni: 6. slovenski kolokvij o betonih*, Ljubljana, 27. maj 1999, Ljubljana, IRMA:41-49.

Šušteršič, J. 2012. Sposobnost dušenja vibracij betonov z granulirano gumo. V: Zajc, A. (ur.). Doseganje posebnih lastnosti betonov z uporabo odpadnih materialov: 19. slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, 23. maj 2012, Ljubljana, IRMA: 31-40.

Šušteršič, J., Komel, M. Hudej, M., Zajc, A. 2001. Underwater abrasion resistance of waterway tunnel concrete linings. V: Figueiras, J. (ur.). Composites in construction : proceedings of the International Conference Composites in Construction, Porto, Portugal 10-12 October. Lise [etc], Balkema: 385-389.

Šušteršič, J. 2004. Abrazijsko odporni betoni. V: Zajc, A. (ur.). Gradnja z betoni visokih zmogljivosti: 11. slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, 31. maj 2004, Ljubljana, IRMA: 41-48.

Uetz, H. 1986. Abrasion und Erosion. Carl Hanser Verlag München: 829 str.

Urek, A. 2005 Pomen reciklaže avtopnevmatik. Specialistično delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Ekonomska fakulteta (samozaložba A. Urek): 65 str.

Zajc, J. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. V: Zajc, A. (ur.). Posebne lastnosti betonov z dodatki: 14. slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, 29. maj 2007, Ljubljana, IRMA:1-7.

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.

Prikaz podslapja. 2013.

<http://scialert.net/abstract/?doi=ajaps.2009.436.445> (Pridobljeno 28. 12. 2013)

Zaradi delovanja abrazije močno poškodovan deflektor v podslapju. 2013.

<http://www.waterpowermagazine.com/features/featureprevention-is-better-than-a-cure-722/>  
(Pridobljeno 18. 12. 2013)

Poškodbe v podslapju pregrade Kinuza Dam. 2013.

<http://www.kenalsilicafume.com/en/products11.asp> (Pridobljeno 18. 12. 2013)

Poškodovan razbijač. 2013.

<http://www.waterpowermagazine.com/features/featureprevention-is-better-than-a-cure-722/featureprevention-is-better-than-a-cure-722-5.html> (Pridobljeno 18. 12. 2013)

Pojav abrazijske erozije na betonski podlagi. 2013.

<http://civil-engg-world.blogspot.com/2013/03/What-Erosion-Concrete.html> (Pridobljeno 18. 12. 2013)

Hidroelektrarna Vrhovo. 2014.

vir: <http://www.sel.si/?p=8&s=4> (Pridobljeno 23. 1. 2014)