

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:

Juvanec, B., 2015. Sprijemnost med vlaknastim betonom in armaturo. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 52 str.

Datum arhiviranja: 06-10-2015

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:

Juvanec, B., 2015. Sprijemnost med vlaknastim betonom in armaturo. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 52 pp.

Archiving Date: 06-10-2015

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

**VISOKOŠOLSKI STROKOVNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

BLAŽ JUVANEC

**SPRIJEMNOST MED VLAKNASTIM BETONOM IN
ARMATURO**

Diplomska naloga št.: 103/OG-MK

**BOND BETWEEN FIBRE REINFORCED CONCRETE
AND REINFORCING BARS**

Graduation thesis No.: 103/OG-MK

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 22. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Blaž Juvanec izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Sprijemnost med vlaknastim betonom in armaturo«.

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

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

Ljubljana, 12.9.2015

Blaž Juvanec

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.012.4(043.2)
Avtor:	Blaž Juvanec
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Sprijemnost med vlaknastim betonom in armaturo
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	52 str., 39 sl., 17 pregl., 6 en.
Ključne besede:	sprijemna napetost, vlaknasti beton, visokotrden beton, izvlečni test

Izvleček

Diplomsko delo obsega preiskave na področju sprijemnih napetosti med visokotrdnim vlaknastim betonom in armaturo. Za potrebe preiskave smo zasnovali izvlečni test armaturne palice iz betona po navodilih, ki jih podaja standard SIST EN 10080:2005 v dodatku D. Držali smo se navodil za izdelavo preizkušancev ter samega poteka preizkusa. V lesenem kalupu smo izdelali kocke z robom 20 cm, ki smo jim skozi sredino vgradili armaturno palico s premerom 12 mm. 28 dni po betoniranju smo palico s pomočjo preizkuševalne naprave izvlekli iz betona, sproti pa smo beležili rezultate. Sprijemno napetost smo določili kot strižno napetost, ki deluje na obodu armaturne palice sidrane v betonu. Preizkusili smo tri različne mešanice visokotrdnega betona z različnim prostorninskim deležem jeklenih ali polipropilenskih vlaken. Za vsako mešanico smo izdelali po tri preizkušance. Eksperimentalni rezultati raziskave so pokazali, da vsebnost vlaken v betonu povečuje sprijemno trdnost med betonom in armaturo.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDK:	624.012.4(043.2)
Author:	Blaž Juvanec
Supervisor:	Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
Title:	Bond between fibre reinforced concrete and reinforcing bars
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes:	52 p., 39 fig., 17 tab., 6 eq.
Key words:	bond stress, fibre reinforced concrete, high strength concrete, pull-out test

Abstract

The following thesis covers the researches on bonds between fibre reinforced high strength concrete and reinforcing bars. For the purpose of research we had conceived a pull-out test specified on directions in standard SIST EN 10080:2005 in annex D. This standard defines how the specimens and the test are conducted. In a wooden mold we made a cube-shaped concrete specimens with an edge of 20 cm and a rebar with a diameter of 12 mm embedded through the middle. After 28 days the pull-out tests were carried out on hardened concrete specimens using a special testing machine. The bond stress was determined as the stress acting on the circumference of a reinforcing bar. We tested three different types of high-strength concrete which were made with different proportion of steel and polypropylene fibres. Three specimens were made for each type of concrete. The experimental results showed that the fibre reinforcement significantly increased the bond strength between concrete and reinforcement bars.

ZAHVALA

Najlepše se zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu za prijaznost, razlago in potrpežljivost pri nastajanju diplomskega dela. Zahvaljujem se tudi izr. prof. dr. Jožetu Lopatiču in laborantu Igorju Valjavcu za nasvete, pomoč in potrpežljivost pri delu v laboratoriju.

Zahvaljujem se kolegoma Nejcju Legatu in Andražu Dežmanu za pomoč pri pripravi in izvedbi eksperimentalnih raziskav.

Nazadnje se zahvaljujem vsem svojim prijateljem in bližnjim za podporo skozi celotno študijsko obdobje.

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1 UVOD	1
2 UVOD V BETON	2
2.1 Posebnosti betonov visoke trdnosti.....	3
2.2 Mineralni agregat	4
2.3 Portland cement.....	5
2.3.1 Označevanje cementa	6
2.4 Voda	7
2.5 Kemijski in mineralni dodatki.....	8
3 VLAKNASTI BETON	11
3.1 Vrste vlaken.....	14
4 SPRIJEMNOST MED BETONOM IN ARMATURO	18
4.1 Sprejemna napetost v Evrokodu 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe	21
4.1.1 Osnovna sidrna dolžina	21
4.1.2 Projektna sidrna dolžina.....	21
5 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE	22
5.1 Zasnova eksperimentalne raziskave	22
5.2 Uporabljeni materiali	22
5.2.1 Agregat.....	22
5.2.2 Cement.....	23
5.2.3 Dodatki betonu	24
5.2.4 Sestava preiskovanega betona.....	25

5.3	Preiskave svežega betona	28
5.4	Rezultati preiskav svežega betona	31
5.5	Merjenje tlačne trdnosti vlaknastih betonov	32
5.6	Rezultati in analiza tlačne trdnosti vlaknastih betonov	32
5.7	Vpliv vlaken na sprejemnost med vlaknastim betonom in armaturo	34
5.7.1	<i>Opis kalupa za izdelavo preizkušancev</i>	<i>35</i>
5.7.2	<i>Sestava preiskovanega betona.....</i>	<i>36</i>
5.7.3	<i>Vgrajevanje sveže betonske mešanice</i>	<i>36</i>
5.7.4	<i>Merilna oprema in zajem podatkov</i>	<i>39</i>
5.8	Rezultati testiranja	41
5.8.1	<i>Beton visoke trdnosti z 0,5% deležem jeklenih vlaken</i>	<i>42</i>
5.8.2	<i>Beton visoke trdnosti z 0,75% deležem jeklenih vlaken</i>	<i>44</i>
5.8.3	<i>Beton visoke trdnosti z 0,5% deležem polipropilenskih vlaken</i>	<i>46</i>
5.8.4	<i>Primerjava sprejemnih napetosti preizkušancev betonov z različnim prostorninskim deležem in različno vrsto vlaken</i>	<i>48</i>
6	ZAKLJUČEK.....	50
VIRI	51

KAZALO SLIK

Slika 1: Prostorninski deleži sestavin (a) v svežem in (b) v otrdelem betonu (Saje, 1997).	2
Slika 2: Odvisnosti med napetostmi in deformacijami pri enoosnem tlačnem preizkusu za (A) agregat, (B) cementni kamen in (C) beton (CEB, 1990).	3
Slika 3: Zrnavost agregata v betonskem prerezu (Žarnić, 2003).	4
Slika 4: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001.	6
Slika 5: Vpliv poroznosti na tlačno trdnost cementne paste.	9
Slika 6: Vpliv superplastifikatorja in mikrosilike na razpored cementne paste.	10
Slika 7: Vpliv velikosti agregata na razpored vlaken (D. Muravljov, 2003).	12
Slika 8: Značilne oblike vlaken.	13
Slika 9: Delovni diagram za: zelo trdno vlakno in krhko matrico (a), kompozite z zelo nizko (b), srednjo (c) in visoko vsebnostjo vlaken (d) (Zajc, 1994).	14
Slika 10: Jeklena vlakna z deformiranimi konci za boljše sidranje.	16
Slika 11: Skupek polipropilenskih vlaken dolžine 30 mm.	17
Slika 12: Prečni prerez mikrorazpok v območju ob armaturni palici.	18
Slika 13: Primer rebrastega armaturnega jekla.	19
Slika 14: Prikaz shematske razporeditve sil ki se prenašajo preko armaturne palice v beton (Tepfers, 1973).	20
Slika 15: Idealiziran diagram nepetost-zdrs, ki ga podaja CEB-FIP.	20
Slika 16: Lastnosti mivke Termit iz Moravč.	23
Slika 17: Lastnosti kamnine agregata iz Separacije Kresnice.	23
Slika 18: Mineralna sestava cementnega klinkerja.	24
Slika 19: Izgled sveže betonske mešanice.	27
Slika 20: Merjenje poseda sveže betonske mešanice.	28
Slika 21: Merjenje razleza sveže betonske mešanice.	29
Slika 22: Čiščenje prirobnice in odčitavanje vsebnosti zračnih por.	30
Slika 23: Sveži preizkušanci vgrajeni v kalupe za merjenje tlačne trdnosti.	32
Slika 24: Porušitev preizkušanca pri enoosnem tlačnem testu.	33
Slika 25: Shematski prikaz izvležnega testa.	34
Slika 26: Priprava kalupa za izdelavo preizkušancev.	36
Slika 27: Zatesnitev stika med plastično cevjo in armaturno palico.	37
Slika 28: Vgrajevanje sveže betonske mešanice v kalup.	38
Slika 29: Preizkušance smo 28 dni hranili v vodi.	38
Slika 30: Programski vmesnik za zajem rezultatov.	39
Slika 31: Naprava za preizkušanje in konzola za upravljanje.	40

Slika 32: Namestitev merilnih inštrumentov.....	40
Slika 33: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona HSC-1600-JV-0,5%.....	42
Slika 34: Potek napetosti armaturne palice v odvisnosti od deformacije, HSC-1600-JV-0,5%.	43
Slika 35: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona HSC-1600-JV-0,75%.	44
Slika 36: Potek napetosti armaturne palice v odvisnosti od deformacije, HSC-1600-JV-0,75%.	45
Slika 37: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona HSC-1600-PPV-0.5%.	46
Slika 38: Potek napetosti armaturne palice v odvisnosti od deformacije, HSC-1600-PPV-0,5%.	47
Slika 39: Primerjava poteka sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za različne vrste in deleže vlaken.	48

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Glavni sestavni minerali cementa (Saje, 2001).....	6
Preglednica 2: Oznake in imena mineralnih dodatkov (Žarnić, 2003).....	7
Preglednica 3: Tipične mehanske lastnosti vlaken glede na material.	15
Preglednica 4: Skupine jeklenih vlaken glede na način izdelave.	16
Preglednica 5: Delitev polipropilenskih vlaken glede na velikosti premera (SIST EN 14899-2-2006).....	17
Preglednica 6: Kemijske in mehanske lastnosti cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (Salonit Anhovo).	24
Preglednica 7: Lastnosti Antikorodina.	25
Preglednica 8: Sestava preiskovane mešanice HSC-1600-JV-0,5%.	25
Preglednica 9: Sestava preiskovane mešanice HSC-1600-JV-0,75%.	26
Preglednica 10: Sestava preiskovane mešanice HSC-1600-PPV-0,5%_6+18 mm.	26
Preglednica 11: Rezultati preiskav sveže betonske mešanice.....	31
Preglednica 12: Teže kalupov, teže skupaj in gostote svežega betona.	31
Preglednica 13: Rezultati merjenja tlačne trdnosti preiskušancev pri starosti 28 dni.	33
Preglednica 14: Maksimalne vrednosti sprejemnih napetosti, HSC-1600-JV-0,5%.....	43
Preglednica 15: Maksimalne vrednosti sprejemnih napetosti, HSC-1600-JV-0,75%.....	45
Preglednica 16: Maksimalne vrednosti sprejemnih napetosti, HSC-1600-PPV-0,5%.....	47
Preglednica 17: Maksimalne sprejemne napetosti vlaknastih visokotrdnih betonov in primerljivega betona visoke trdnosti brez vlaken.	49

1 UVOD

Z razvojem gradbeništva se je sočasno razvijala tudi tehnologija izdelave in uporabe betona. Tako je beton postal eden najpogosteje uporabljenih materialov v gradbeništvu, predvsem zaradi nekaterih dobrih lastnosti, kot so: visoka tlačna trdnost, relativno nizka cena, zmožnost oblikovanja poljubnih oblik in dobra obstojnost. Beton ima zaradi vsebnosti mineralnih agregatov visoko požarno odpornost, kar je ena večjih prednosti pred ostalimi gradbenimi materiali. Z uporabo različnih dodatkov in tehnoloških ukrepov pa lahko znatno izboljšamo tudi slabše lastnosti betona.

Nekaj teh lastnosti lahko izboljšamo z mikroarmiranjem, kjer uporabimo vlakna anorganskega ali organskega izvora. S tem ne moremo nadomestiti potrebne statične armature, lahko pa izboljšamo odpornost betona na natezne obremenitve, povečamo lahko strižno trdnost betona, odpornost na obrabo in poškodbe zaradi velikega nihanja temperature.

Za doseg te rezultate pa je potrebno skrbno vmešanje vlaken, saj le tako lahko dosežemo enakomerno razporeditev vlaken po volumnu betonske mešanice. Oteženo je tudi vgrajevanje svežega betona. To seveda podraži celoten postopek priprave in vgradnje betonske mešanice in posledično tudi zviša ceno konstrukcije ali gradbenega polizdelka. Za doseg ustreznega učinka mikroarmiranja je potrebno uporabiti smiselno vrsto in količino vlaken, ki je cenovno še dovolj ugodna.

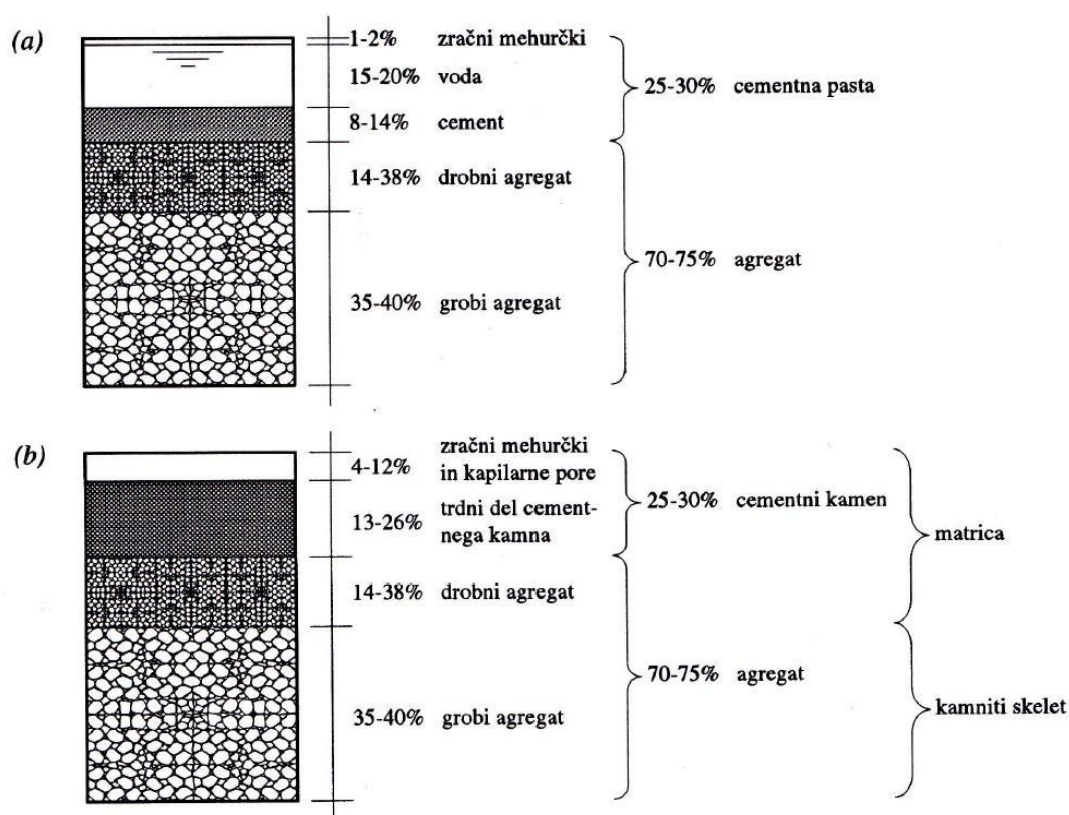
Mikroarmiranje se najpogosteje uporablja pri sanacijah, preplastitvah, pri gradnji predorov in proizvodnji montažnih betonskih izdelkov ter polizdelkov v industrijskih obratih. Mikroarmiran beton se v praksi praviloma ne uporablja za običajne konstrukcije.

V okviru diplomskega dela smo raziskovali, kakšne prednosti prinašajo mikroarmirani betoni na področju stika med betonom in armaturo. V sklopu praktičnega dela diplomske naloge smo preverjali, kako na kvaliteto stika med betonom in armaturo vpliva količina in vrsta vlaken. Uporabili smo jeklena in polipropilenska vlakna, saj ta v praksi veljajo za najbolj učinkovita. Zasnovali in izvedli smo test izvleka armature iz betona.

2 UVOD V BETON

Beton je dandanes obravnavan kot eden izmed glavnih gradbenih materialov. V splošnem njegova sestava temelji na osnovi štirih osnovnih materialov, in sicer:

- mineralni agregat,
- cement,
- voda,
- razni dodatki.

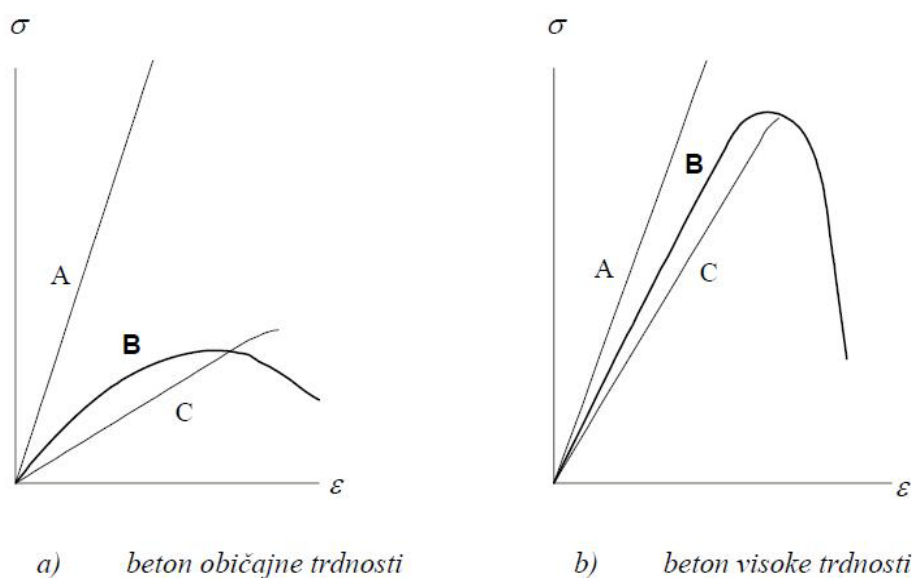


Slika 1: Prostorninski deleži sestavin (a) v svežem in (b) v otrdelem betonu (Saje, 1997).

Za optimalno obnašanje betona v posameznih fazah pa je poleg zgoraj naštetih sestavin potrebna prava receptura betona. Z različnimi recepturami betona vplivamo na način vgrajevanja betona, na način obdelave ter na nego in zorenje betona. Z zamešanjem mineralnega agregata in cementa v mešalcu zmes homogeniziramo, voda pa nam v stiku z cementom povzroči kemijsko reakcijo, ki jo imenujemo hidratacija cementa. Ta reakcija je pogoj za prehod zmesi iz suhe faze preko svežega betona v otrdeli beton. Z dodajanjem raznih kemijskih ali mineralnih dodatkov pa spreminjamo izgled in lastnosti tako svežega, kot tudi otrdelega betona. S tem zelo povečamo možnosti uporabe betona v gradbeništvo.

2.1 Posebnosti betonov visoke trdnosti

Visokotrdni betoni so v Evropi prisotni že vsaj 40 let, zato že lahko z dokaj veliko verjetnostjo ocenjujemo uspešnost gradnje s to vrsto betonov. Betoni visoke trdnosti so zaželeni povsod tam, kjer se zahteva povečana tlačna trdnost, zmrzljinska in kemijska odpornost in odpornost betona na obrabo. V standardu SIST EN 206-1 je beton visoke trdnosti definiran z razredom tlačne trdnosti, ki je višja od 55 MPa pri običajnem oziroma normalno težkem in težkem betonu ter višja od 50 MPa pri lahkem betonu. Betoni visokih trdnosti se, glede na sestavo, od običajnih betonov le malo razlikujejo. Sestavljeni so iz enakih osnovnih materialov (mineralni agregat, cement, voda, razni dodatki), se pa razlikujejo glede na strukturo in vodocementno razmerje. Vodocementno razmerje nam pove, kakšno je razmerje med količino uporabljene vode in cementa v izbrani betonski mešanici. Zaradi nizkega vodocementnega razmerja, ki je pogoj za doseganje visokih tlačnih trdnosti, lahko dosežemo primerno konsistenco betonske mešanice le z dodajanjem kemijskih dodatkov – plastifikatorjev, superplastifikatorjev in v zadnjem času čedalje bolj uveljavljenih hiperplastifikatorjev. Spreminja se tudi količina veziva, ki v običajnih betonih znaša od 300 do 400 kg/m³, v visokotrdnih betonih pa od 400 do 550 kg/m³ svežega betona.



Slika 2: Odvisnosti med napetostmi in deformacijami pri enosnem tlačnem preizkusu za (A) agregat, (B) cementni kamen in (C) beton (CEB, 1990).

2.2 Mineralni agregat

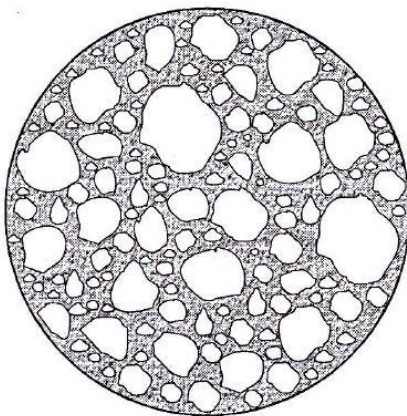
Mineralni agregat je količinsko najbolj zastopana komponenta (60 do 80%) v betonski mešanici, zato je ključnega pomena, da za beton visoke trdnosti izberemo kvaliteten mineralni agregat. Na splošno, lahko agregat definiramo kot čist, trd in inerten material, ki ga vgrajujemo v beton. Vloga agregata v betonu je, da (Žarnić, 2003):

- znižuje ceno betona, saj je agregat razmeroma poceni,
- ustrezno sestavljen agregat po frakcijah ustvarja koheziven beton,
- znižuje hidratacijsko temperaturo betona,
- zmanjšuje krčenje betona.

Poleg zgoraj navedenega lahko agregat služi tudi za:

- uravnavanje površinske trdote betona,
- ustvarjanje barvitosti betonske površine, kar je predvsem estetskega pomena,
- kontrolo gostote,
- zvišanje požarne odpornosti betona.

Za običajne vrste betona uporabljamo agregat, ki je mešanica peska, gramoza ali drobljenca. V Sloveniji se za pripravo betona najpogosteje uporablja drobljeni mineralni agregat, ki nastane z drobljenjem večjih kosov vezanega hribinskega materiala. Primerna granulometrijska sestava agregata omogoča izdelavo sveže betonske mešanice z ustreznimi plastičnimi lastnostmi in ustreznimi lastnostmi otrdelega betona. Pomembna je tudi oblika zrn grobega agregata. Velja, da zaobljena zrna pripomorejo k boljši obdelovalnosti sveže betonske mešanice, oglata ali lomljena zrna pa se zaradi svojih ostrih robov med seboj zaklinjajo in tako izboljšujejo mehanske lastnosti betona, kar prikazuje slika 3.



Slika 3: Zrnavost agregata v betonskem prerezu (Žarnić, 2003).

Agregat obravnavamo kot grobi, če je premer njegovega maksimalnega zrna večji od 4 mm. Agregat, kjer maksimalno zrno ne presega premera večjega od 4 mm pa opredelimo kot drobni agregat. Za običajne konstrukcije velja, da je premer maksimalnega zrna nekje med 16 in 32 mm. Pri betonih visoke trdnosti premer največjega zrna praviloma ne sme presegati 16 mm. S tem dosežemo, da ima beton visoke trdnosti bolj homogeno strukturo z manjšo vsebnostjo por, kar pripomore k bolj enakomerni razporeditvi napetosti v betonu.

2.3 Portland cement

Cement je vezivo, ki zavzema le približno 10 % volumna betonske mešanice, vendar je njegova kvaliteta ključnega pomena za trdnost in obstojnost samega betona. Ob stiku z vodo veže in se kasneje strdi v cementni kamen. Ker je cement hidravlično vezivo, veže tudi v vodi. V gradbeništvu se najpogosteje uporablja silikatni Portland cement. Pridobivamo ga z žganjem laporja, apnenca in gline pri visokih temperaturah. Žganje surovin poteka v treh intervalih (Žarnić, 2003) in sicer:

- prvem s temperaturo do 1300 °C,
- drugem s temperaturo od 1300 do 1500 °C,
- tretjem, ko se produkt žganja počasi ohlaja.

Po končanem žganju osnovnih surovin dobimo granule cementnega klinkerja s premerom 3 do 5 cm. Tako dobljeni klinker zmeljemo v zrna do velikosti od 1 do 50 µm, tako dosežemo, da so zrna v stiku z vodo izredno reaktivna. Med mletjem se klinkerju dodajajo različne snovi v predpisanih razmerjih, najbolj pogoste med njimi pa so (Žarnić, 2003):

- sadra (3-5%) uravnava hitrost vezanja in proces hidratacije,
- žindra v manjših količinah zmanjšuje potrebo po vodi v sveži betonski mešanici,
- naravni ali umetni pucolani izboljšujejo obdelovalnost sveže betonske mešanice, zmanjšujejo potrebno količino vode,
- apnenec zvišuje začetno in končno trdnost betona,
- elektrofilterski pepel, ki povečuje pucolanske in hidravlične lastnosti cementa.

Cemente z večjo vsebnostjo žindre imenujemo metalurški cement, če pa dodamo cementu večje količine pucolanov, dobimo pucolanski cement. Obe vrsti cementa imata zaradi večje vsebnosti žindre oziroma pucolanov povišano odpornost na agresivno delovanje okolja.

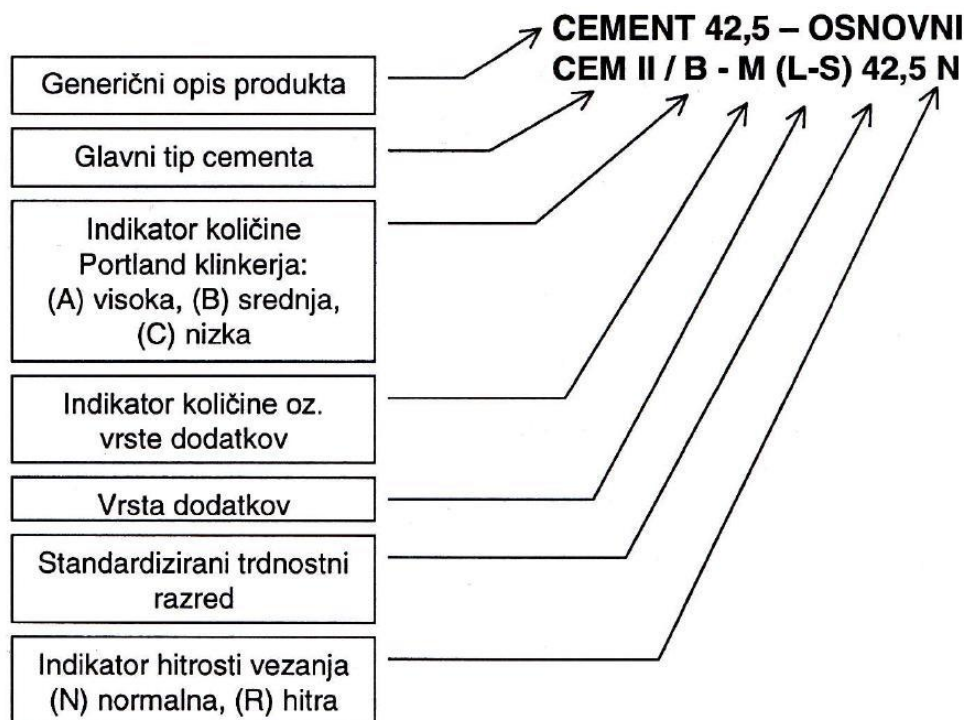
Preglednica 1: Glavni sestavni minerali cementa (Saje, 2001).

mineral	kemijska formula	okrajšano	delež v %
trikalcijev silikat (aliti)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45 - 60
dikalcijev silikat (beliti)	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	20 - 30
trikalcijev aluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	4 - 12
tetrakalcijev aluminat	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	10 - 20

K trdnosti cementnega kamna najbolj prispevajo silikati in so zaradi tega tudi najpomembnejši minerali v cementu. Aluminat sicer prispeva k začetnemu naraščanju trdnosti, ni pa zaželen zaradi zmanjševanja vgradljivosti same betonske mešanice, v večjih količinah lahko negativno vpliva na mehanske lastnosti cementnega kamna.

2.3.1 Označevanje cementa

Cement se označuje z standardiziranimi oznakami. Iz oznake je moč razbrati vrsto, sestavo in tlačno trdnost cementa. Standard SIST EN 197-1 določa zahteve za običajne cemente, njihovo sestavo in merila za določitev skladnosti. Na sliki je prikazan standardizirani sistem označevanja cementov (Žarnić, 2003):



Slika 4: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001.

Standard ureja tudi razporeditev običajnih cementov v pet glavnih skupin:

- CEM I – portlandski cement,
- CEM II – portlandski mešani cement,
- CEM III – metalurški cement,
- CEM IV – pucolanski cement,
- CEM V – mešani cement.

Cementnem klinkerju je lahko dodano več dodatkov, to nam pove oznaka M in oznake teh dodatkov, ki so podane v oklepaju, kot prikazuje to slika 4. V primeru, da cementni klinker vsebuje le eno vrsto dodatka, se to ustrezno označi s simbolom tega dodatka. V preglednici 2 so prikazane standardizirane oznake dodatkov.

Preglednica 2: Oznake in imena mineralnih dodatkov (Žarnić, 2003).

Oznaka dodatka	Ime dodatka
S	Granulirana žindra
D	Mikrosilika
P	Naravni pucolani
Q	Naravni kalcinirani pucolani
V	Silikatni elektrofilterski pepel
W	Karbonski elektrofilterski pepel
T	Žgani skriljevec
L	Apnenec
LL	Apnenec
M	Dva ali več od zgoraj naštetih dodatkov

V standardu so vrste cementov razdeljene v tri trdnostne razrede. Oznaka razreda (32,5, 42,5 in 52,5) predstavlja minimalno tlačno trdnost cementa po 28 dneh v MPa. Poleg minimalne tlačne trdnosti cementa pa je iz oznake cementa razvidno ali cement veže z normalno hitrostjo (N) ali pa veže pospešeno (R).

2.4 Voda

Voda predstavlja eno od osnovnih komponent za pripravo betonske mešanice. V splošnem velja da nižje vodocementno razmerje pripomore k višji tlačni trdnosti betona, vendar pa mora biti vode v betonski mešanici toliko, da hidratizira ves cement. Za doseganje visokih tlačnih trdnosti betona pa je pomembna tudi kvaliteta vode, saj voda ne sme vsebovati snovi, ki bi negativno vplivale na vgradnjo, čas začetka vezanja cementa in začetno ter končno

trdnost betona. Prav tako je kvaliteta vode zelo pomembna v armiranih ali prednapetih konstrukcijah, saj je lahko uporaba neprimerne vode škodljiva s stališča korozije armature. Skladno s standardom velja, da je voda, ki je primerna za pitje posledično primerna tudi za pripravo betona. Morska voda zaradi visoke vsebnosti soli ni primerna za pripravo betona. S preiskusi po SIST EN 1008 pa je za uporabo potrebno dokazati primernost:

- vode, ki se črpa iz podzemnih virov,
- površinske vode in industrijske odpadne vode,
- vode, reciklirane iz proizvodnje betona.

Standard v tabelah določa tudi najvišje, še dovoljne vrednosti škodljivih kemijskih substanc, ki jih voda lahko vsebuje.

2.5 Kemijski in mineralni dodatki

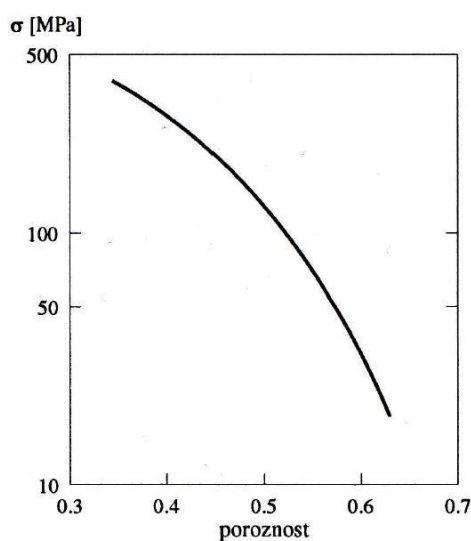
Dodatki so snovi, ki jih v manjših količinah dodajamo v svežo betonsko mešanico tekom mešanja ali transporta z namenom izboljšanja oziroma spreminjanja izbranih lastnosti betona. Namen uporabe dodatkov v betonu je lahko tudi znižanje cene betona, na primer uporaba mineralnih dodatkov. Prva znana uporaba dodatkov z namenom izboljševanja lastnosti sveže betonske mešanice sega v obdobje antičnega Rima, ko so pucolanskim maltam dodajali naravne aditive.

Sodobne **kemijske dodatke** v betonu so prvi pričeli uporabljati v ZDA v zgodnjih 30 letih prejšnjega stoletja. Učinek kemijskih dodatkov pa je seveda odvisen od lastnosti betona, npr: vrsta in količina cementa, količina vode v betonu ter temperature betona in zraka. Včasih je smotno premisliti ali je uporaba kemijskih dodatkov v betonu nujna, ali pa se lahko zahtevane lastnosti betona doseže že z zmanjšanjem vodocementnega razmerja, večjo količino ali drugačno vrsto cementa, drugačno vrsto agregata ali s spremembo granulometrijske sestave samega agregata. To velja predvsem za betoniranje v ekstremnih temperaturnih razmerah, saj se lahko v takih razmerah lastnosti kemijskih dodatkov poslabšajo.

Glede na vpliv v betonu lahko kemijske dodatke razdelimo na:

- plastifikatorje, superplastifikatorje in hiperplastifikatorje,
- aerante,
- pospeševalce ali zaviralce,
- dodatki za vodonepropustnost,
- dodatki za povečanje zmrzlinke in kemijske odpornosti.

Izdelava betonov visoke trdnosti brez ustreznih dodatkov je dandanes praktično nemogoča. Z nižanjem vodocementnega faktorja dosegamo sicer visoke tlačne trdnosti betona, je pa v tem primeru glede vgradljivosti in obdelovalnosti svežega betona nujna uporaba **plastifikatorjev, superplastifikatorjev ali hiperplastifikatorjev**. Dodatki te vrste zmanjšujejo trenje med molekulami vode in zrnji cementa, s čimer dosežemo boljšo vgradljivost in obdelovalnost, zmanjša se tudi potreba po vodi. Slaba lastnost te vrste dodatkov je sorazmerno visoka cena. Obenem je učinek delovanja časovno omejen, zato se ponavadi dodajajo betonu na samem mestu vgradnje. Neville (2011) navaja, da je optimalen čas za vgradnjo svežega betona z dodanim plastifikatorjem do 30 minut po zamešanju mešanice svežega betona, po preteku 1 ure pa se učinek dodatka praktično že izniči. Betonu je v takem primeru možno ponovno dodati plastifikator v velikih količinah, vendar to lahko neugodno vpliva na lastnosti strjenega betona, lahko povzroči »krvavenje« betona ali pa v primeru uporabe aeranta izniči njegov učinek (A.M.Neville, 2011).



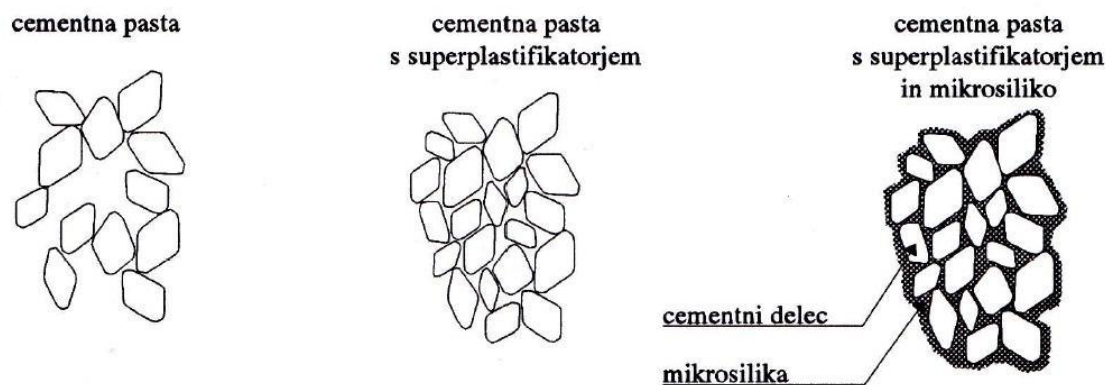
Slika 5: Vpliv poroznosti na tlačno trdnost cementne paste.

Aerante dodajamo betonu z namenom, da kontrolirano ustvarimo drobne mehurčke zraka v betonski mešanici. Z enakomerno razporeditvijo zračnih mehurčkov preprečimo rast kapilar v cementni pasti. Na ta način dobimo betone z povišano odpornostjo glede na zmrzovanje, poveča se vodonepropustnost in kohezivnost betona. Slednjo lastnost pridoma uporabljamo pri črpnih betonih. Vendar pa se mešanici z dodatkom zračnih mehurčkov nekoliko zmanjša tlačna trdnost, zato velja premisliti, ali je uporaba aeranta v betonu smotrna.

Pospeševalci in zaviralci vezanja uravnavajo dolžino začetnega mirujočega obdobja procesa hidratacije, lahko ga skrajšujejo ali podaljšujejo. Pri gradnji z betoni visoke trdnosti se pogosteje uporabljajo zaviralci vezanja cementa, saj počasnejše razvijanje hidratacije cementa prispeva k počasnejšemu naraščanju hidratacijske toplote. Počasnejše naraščanje trdnosti cementnega kamna pozitivno vpliva na končno trdnost betona.

Glavni razlog za začetek uporabe **mineralnih dodatkov** v betonskih mešanica je bil ekonomski, saj so bili mineralni dodatki v splošnem cenejši od cementa. Mineralni dodatki so odpadni materiali, stranski produkti industrije ali naravni sedimenti. Pri betonih visoke trdnosti se kot mineralni dodatek najpogosteje uporablja mikrosilika in elektrofilterski pepel.

Mikrosilika nastane kot stranski produkt pri proizvodnji ferosilicija v elektro obločnih pečeh. Vsebuje okrog 90% silicijevega dioksida SiO_2 . Premer zrn mikrosilike je zelo majhen (od 0.1 do 0.2 μm) v primerjavi z zrnji cementa (od 1 do 50 μm). Zaradi velike specifične površine so zrna mikrosilike zelo reaktivna, kar ugodno vpliva na lastnosti betona. Z uporabo mikrosilike se v betonu zmanjša volumen por, znatno se poveča prirast trdnosti pri betonih višjih starosti. Mikrosilika reagira z kalcijevim hidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in nastane kalcijev silikat hidrat, kar ugodno vpliva na trdnost in trajnost betona (Saje, 2001).



Slika 6: Vpliv superplastifikatorja in mikrosilike na razpored cementne paste.

Elektrofilterski pepel se pridobiva z elektrostatičnim ali mehničnim kondenziranjem iz izpušnih plinov premogovnih elektrarn. V betonu ima podoben učinek kot mikrosilika, zmanjša porabo superplastifikatorja, predvsem pa je cenejši od mikrosilike. Vendar imajo betoni ob uporabi elektrofilterskega pepela manjše končne tlačne trdnosti kot betoni z dodano mikrosiliko.

3 VLAKNASTI BETON

Dobro poznano dejstvo je, da beton spada v skupino krhkih gradbenih materialov. Zanje je značilno, da zelo dobro prenašajo tlačne obremenitve, slabo pa prenašajo natege. To so ugotovili že pred približno 3500 leti v starem Egiptu in Mezopotamiji, ko so na soncu posušenim opekam iz gline dodajali slamo, ki je delovala kot neke vrste mikroarmatura. Take vrste opeka je bila trdnejša in posledično trajnejša (Bentur in Mindess, 2007). Konjske dlake so uporabljali za ojačitev malte. Konec devetnajstega in začetek dvajsetega stoletja je uporaba vlaken in vlaknastega betona v gradbeništvu doživela razcvet z razvojem azbestnih vlaken. V šestdesetih letih se je uporaba tovrstnih vlaken opustila predvsem zaradi ugotovljenega škodljivega vpliva azbesta na zdravje. Razvile so se alternativne vrste vlaken, ki pa se v gradbeništvu zaradi številnih pozitivnih lastnosti s pridom uporabljajo še danes (Brodnik, 2010).

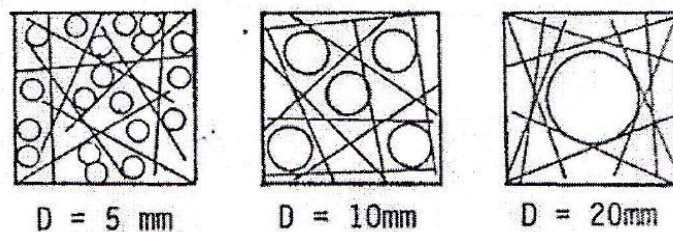
Vlaknasti ali mikroarmirani beton je zmes agregata, cementa, vode, dodatkov in vlaken. Od običajnih betonov se razlikuje le po tem, da vsebuje določeno količino vlaken, ki nadomeščajo del agregata v betonski mešanici.

Medsebojno delovanje vlaken in matrice je osnovna lastnost, ki vpliva na lastnosti vlaknastega betona. Ko na cementno matrico deluje obtežba, se napetosti prenesejo na vlakno preko njegove površine. Zato je ravno kvaliteta stika cementne matrice in vlaken pogoj za kvaliteten in trajen beton. Parametri, ki vplivajo na stik med vlakni in matrico so (Zajc, 1994):

- stanje matrice, ki je lahko brez ali z razpokami,
- sestava matrice,
- geometrijska oblika vlaken,
- tip vlaken,
- lastnosti površine vlakna,
- togost vlaken v primerjavi s togostjo matrice,
- porazdelitev ali orientacija vlaken,
- prostorninski delež vlaken v kompozitu,
- velikost obremenitev,
- obstojnost vlaken v kompozitu in spreminjanje lastnosti vlaken s časom.

Za pripravo vlaknastega betona ne veljajo nobene posebne zahteve glede cementa. Količina cementa se pri projektiranju mešanice izbere na podlagi zahtevane tlačne trdnosti betona.

Agregat, ki je primeren za običajne betone lahko uporabljamo tudi za pripravo vlaknastih betonov. Pomembna je omejitev maksimalnega zrna agregata in je praviloma manjša kot pri običajnih betonih. Navadno se uporablja maksimalno zrno z premerom 8 ali 16 mm. Zrnovostna sestava agregata vlaknastega betona je pomembna iz vidika enakomernega razporejanja vlaken v cementni pasti in lažje vgradljivosti samega betona. Z uporabo prevelike količine grobega agregata ali povečanjem vsebnosti vlaken se lahko pojavi problem oblikovanja gnezd, kot je prikazano na sliki 7. Vlaknasti betoni z daljšimi vlakni so bolj podvrženi nastanku gnezd in segregiranju kot vlaknasti betoni z enako vsebnostjo krajših vlaken (Muravljov, 2003). Smiselna je uporaba mikrosilike, ki izboljša obdelovalnost sveže betonske mešanice in doprinese k povečanju odpornosti otrdelega betona.



Slika 7: Vpliv velikosti agregata na razpored vlaken (D. Muravljov, 2003).

Tip vlaken pomembno vpliva na lastnosti betona. Če mikroarmiranje betona izvedemo z jeklenimi vlakni, dosežemo, da je nastali kompozit zelo duktilen. Z polimernimi vlakni dosežemo spet drugačen učinek, saj so vlakna sicer zelo trdna, vendar pa je njihov modul elastičnosti nižji od modula elastičnosti matrice.

Različne lastnosti kompozita dobimo tudi z različno orientacijo vlaken. V splošnem obstajajo tri možnosti:

- 1.) Vlakna so različno porazdeljena po kompozitu. Lastnosti kompozita so izotropne. Taka porazdelitev je značilna za betone z nizkim deležem vlaken.
- 2.) Vlakna so naključno orientirana po kompozitu. Taka porazdelitev se pojavi povsod tam, kjer je nanos kompozita tanek ali pa tehnologija izvedbe omogoča tako orientacijo.
- 3.) Vlakna so v ravnini usmerjena v eno smer. Tako orientacijo je možno doseči s posebno tehnologijo izvedbe.

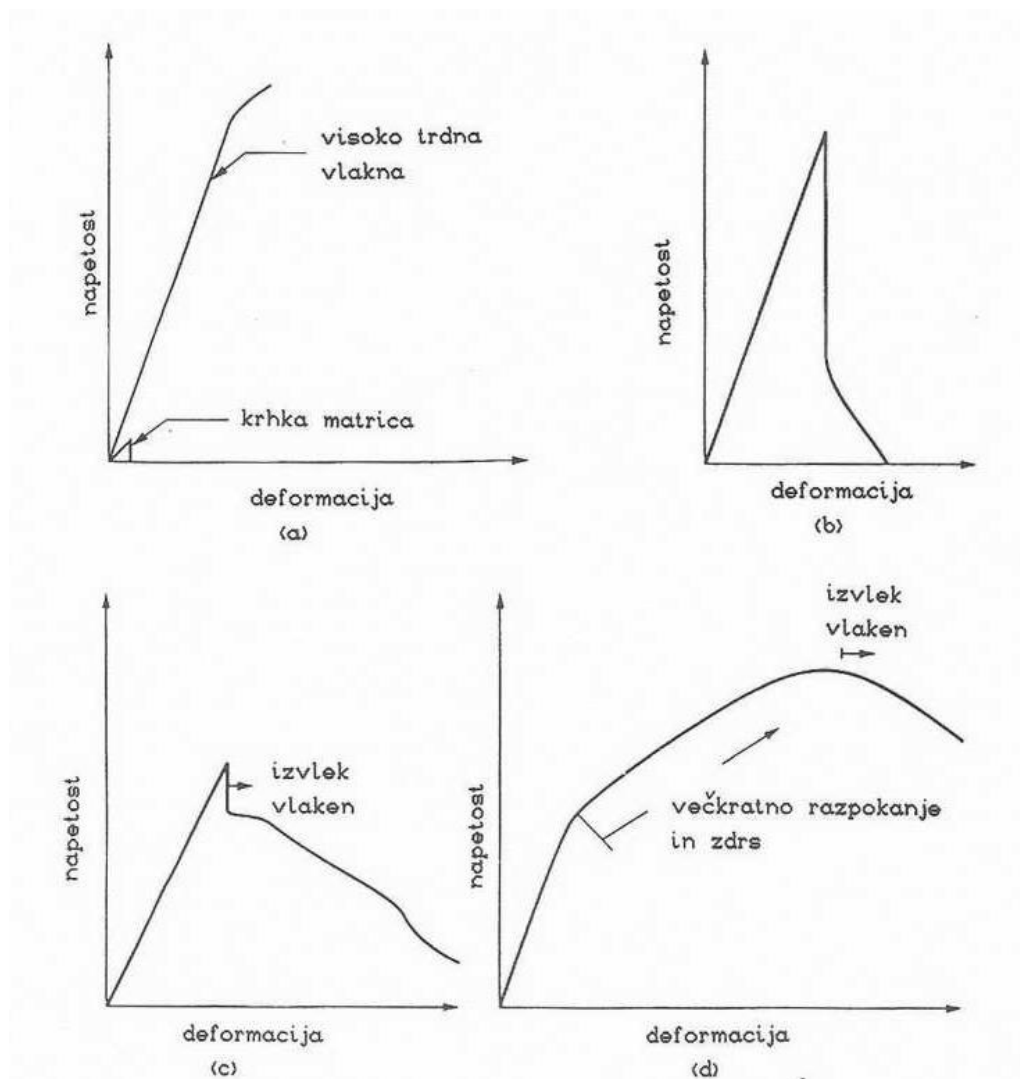
Če je v kompozitu uporabljena zelo nizka vsebnost vlaken, se ta obnaša podobno kot sama matrica. Takoj po porušitvi matrice sledi tudi porušitev kompozita. Pri kompozitu s srednjo vsebnostjo vlaken se po porušitvi matrice zniža nosilnost kompozita, a še vedno nosi

obremenitev, ki se prenaša preko razpok po vlaknih. Ko še povečujemo obremenitev postopno pride do porušitve stika med matrico in vlakni, kar privede do porušitve kompozita. Pri kompozitu z visoko vsebnostjo vlaken ta po porušitvi prevzamejo obremenitev. Ker je količina vlaken visoka, ima kompozit večjo nosilnost. Pomembno pa na lastnosti vlaknastega betona vpliva tudi faktor oblike vlaken, ki je razmerje med dolžino in premerom vlaken. Faktor oblike vlaken vpliva na mešanje, vgrajevanje in reološke lastnosti betona. Manjši kot je faktor, lažje se vlakna vmešavajo in razporejajo v sveži betonski mešanici. Na lastnosti otrdelega betona pa boljše vpliva večji faktor oblike vlaken. Iz tega lahko sklepamo, da uporaba tanjših vlaken daje bistveno boljše lastnosti kompozita. Najpogostejše oblike vlaken so prikazane na sliki 8.



Slika 8: Značilne oblike vlaken.

Naklon krivulje na grafu napetost – deformacija se po porušitvi matrice bistveno spremeni, kot je to prikazano na sliki 9. Naklon je odvisen od količine vlaken in stika vlaken z matrico. Različni avtorji so pokazali, da se razpoke tvorijo vzdolž preizkušanca. Pri določeni velikosti obremenitve se porušijo stiki med matrico in posameznimi vlakni. V tem trenutku graf napetost – deformacija doseže maksimalno vrednost. Nosilnost kompozita prične naglo padati, povečuje se tudi deformacija.



Slika 9: Delovni diagram za: zelo trdno vlakno in krhko matrico (a), kompozite z zelo nizko (b), srednjo (c) in visoko vsebnostjo vlaken (d) (Zajc, 1994).

3.1 Vrste vlaken

Za mikroarmiranje se uporabljajo vlakna, ki bistveno izboljšajo lastnosti nastalega kompozita in so ekonomsko še upravičena zaradi primerne cene. Uporabljajo se naslednja vlakna:

- kovinska iz običajnega ali nerjavečega jekla,
- sintetična vlakna iz polipropilena, akrila, aramida, ogljika, poliestra ali polietilena,
- mineralna vlakna iz alkalno odpornega stekla,
- naravna vlakna, najpogosteje celulozna.

V preglednici 3 so opisane mehanske lastnosti najbolj pogosto uporabljenih vrst vlaken (Bentur in Mindess, 2007):

Preglednica 3: Tipične mehanske lastnosti vlaken glede na material.

Vlakna	Premer [μm]	Specifična teža [kg/m ³]	Modul elastičnosti [Gpa]	Natezna trdnost [Gpa]	Raztezek pri poružitvi [%]
Jeklena	5 - 500	7840	200	0,5 - 2	0,5 – 3,5
Steklena	9 - 15	2600	70 - 80	2 - 4	2 – 3,5
Azbestna	0,02 – 0,4	3400	196	3,5	2,0 – 3,0
Polipropilenska	20 - 400	900 - 950	3,5 - 10	0,45 – 0,76	15 - 25
Kevlar	10 - 12	1440	63 - 120	2,3 – 3,5	2 – 4,5
Karbonska	8 - 9	1600 - 1700	230 - 380	2,5 – 4,0	0,5 – 1,5
Celulozna	/	1200	10	0,3 – 0,5	/
Cemntna matrica (za primerjavo)	/	1200 - 2500	10 - 45	0,003 – 0,007	0,02

V veliko primerih se armiranje izvaja s sočasno uporabo vlaken in armaturnih palic. Zavedati pa se je treba, da sekundarna mikroarmatura v obliki vlaken v splošnem ne more nadomestiti primarne armature v obliki armaturnih palic, izjemoma pa jo lahko nadomestimo v nekaterih specifičnih primerih, kjer z mikroarmaturo dosežemo boljše rezultate (Bentur in Mindess, 2007):

- Za armiranje zelo tankih ploščatih elementov, kjer običajnih armaturnih palic ne moremo uporabiti. Količina vlaken je razmeroma visoka, za običajna vlakna 5%, za modificirana posebna vlakna pa 2% glede na prostornino mešanice. Vlakna pripomorejo k večji trdnosti elementa, izboljšajo pa tudi duktilnost otrdelega betona.
- Kjer so elementi lokalno obremenjeni z veliko obtežbo ali deformacijami, npr: v tunelogradnji, pri konstrukcijah, kjer je zahtevana odpornost na eksplozije in pri prefabriciranih pilotih, ki se z postopkom zabijanja vgrajujejo v zemlino.
- V elementih, ki so izpostavljeni ciklični obremenitvam zaradi sprememb vlage ali temperature. V teh primerih so vlakna dodana predvsem z razlogom kontrole razpok in zagotavljanja duktilnega obnašanja elementa po nastanku primarnih razpok.

Najpogosteje se v praksi uporabljajo jeklena in polipropilenska vlakna, saj največ doprinesejo k izboljšanju lastnosti otrdelega betona, hkrati pa so tudi cenovno najbolj ugodna.

Jeklena vlakna so izdelana iz običajnih ali nerjavečih jekel. Modul elastičnosti običajnih jeklenih vlaken je približno 200 GPa, nerjavečih jekel pa 170 GPa. Natezna trdnost jeklenih vlaken je med 345 MPa in 2100 MPa. Prečni prerez vlaken je lahko pravokotne, krožne ali druge nepravilne oblike. Dolžina vlakna je praviloma manjša od 75 mm. Vlakna glede na obliko razdelimo na ravna, mehansko deformirana, zakrivljena na koncih in na vlakna s spremenljivim prerezom (Bandelj, 2010). V okolju z visoko temperaturo se zahteva uporaba vlaken iz nerjavečega jekla (ACI 544.1R-96). Za zagotovitev primerne konsistence, vgrajevanja in zgoščenosti svežega betona je priporočena prostorninska vsebnost vlaken med 0,25% in 1,50% kompozita (ACI 544.1R-96). Slovenski standard SIST EN 14889-1-2006 glede na postopek izdelave jeklena vlakna deli v naslednje skupine, prikazane v preglednici 4.

Preglednica 4: Skupine jeklenih vlaken glede na način izdelave.

SKUPINA I	Hladno oblikovana žica
SKUPINA II	Rezana vrv
SKUPINA III	Ločeno s topljenjem
SKUPINA IV	Mehansko rezana topljena žica
SKUPINA V	Valjana z blokov



Slika 10: Jeklena vlakna z deformiranimi konci za boljše sidranje.

Pri proizvodnji vlaken vseh zgoraj naštetih skupin je obvezna kontrola oblike, premaza, dimenzij, natezne trdnosti in duktilnosti. Postopek proizvodnje pomembno vpliva na ceno, mehanske in fizikalne lastnosti ter na namen končne uporabe jeklenih vlaken.

Polipropilenska vlakna imajo nizek modul elastičnosti in sicer od 3,5 GPa do 5 GPa.

Njihove lastnosti so odvisne od kemijske sestave, molekularne teže in drugih značilnosti polipropilena. Vlakna so lahko ravna ali deformirana, debela približno 0,1 mm in dolga od 12 mm do 50 mm. Polipropilenska vlakna se uporabljajo zaradi vpliva na zgodnje trdnosti, kar je posebej uporabno za izdelavo montažni betonskih izdelkih, so tudi cenovno ugodna, zato se pogosto uporabljajo za mikroarmiranje. Polipropilenska vlakna ugodno vplivajo na požarno odpornost kompozita, saj se zaradi nizkega tališča stalijo in tako ustvarijo drobne kanale v betonu, s pomočjo katerih vplivamo na spremembe vlage in toplote v elementu (Bandelj, 2010). So kemično inertna, kar pomeni, da so odporna na kisline in baze. V primerjavi z jeklenimi vlakni ne omogočajo tako dobre sprejemnosti z cementno matrico. Vlakno se poruši pri 15% deformaciji. Polipropilenska vlakna se po slovenskem standardu SIST EN 14899-2-2006 glede na velikost premera delijo v dve skupini, prikazani v preglednici 5.

Preglednica 5: Delitev polipropilenskih vlaken glede na velikosti premera (SIST EN 14899-2-2006).

SKUPINA I	Premer vlaken manjši od 0,3 mm
SKUPINA II	Premer vlaken večji od 0,3 mm



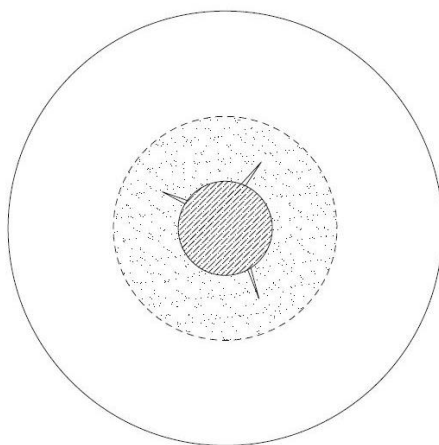
Slika 11: Skupek polipropilenskih vlaken dolžine 30 mm.

4 SPRIJEMNOST MED BETONOM IN ARMATURO

Beton je v osnovi krhek material, saj slabo prenaša natezne obremenitve. Zato se za konstrukcijske namene vedno uporablja armiran beton. Iz tega lahko sklepamo, da je pri armiranem betonu potrebno največ pozornosti posvečati predvsem stiku med betonom in armaturo. Z sodelovanjem betonske matrice, ki dobro prenaša tlak in jeklene armature, ki se v nategu obnaša duktilno, lahko tvorimo kompozit, ki je v gradbeništvu vsestransko uporaben. Velikost sprijemnih napetosti med armaturo in betonom je posledica treh komponent (Gan, 2000):

- kemične adhezije, ki predstavlja sprijemnost med betonom in površino armature,
- trenja med rebri armature in betonom,
- mehanskega zagozdenja armaturnih reber in betona.

Prva komponenta prenašanja napetosti prevladuje, ko je nivo obremenitev zadostno nizek. Če se obremenitev na armaturo poveča, pride do zdrsa armaturne palice in napetosti se prenašajo z trenjem med hrapavo površino armaturne palice in betonom. Takrat se aktivira prenos sil z naslanjanjem reber armaturne palice na beton. Običajne rebraste armaturne palice omogočajo dobre pogoje sprijemnosti ter prenos obremenitev pod kotom od 45° do 80° glede na os palice. V ožjem območju ob konicah reber se ob višjih nivojih obremenitev prične tvoriti prečne mikrorazpoke, kar povečuje zdrs armature. Na spodnji sliki je prikazan prečni prerez obremenjene armaturne palice in formiranje cepilnih razpok v njenem ožjem območju. Če se nivo obremenitev še povečuje, se mikrorazpoke razširijo globlje v okoliški beton, ki se prične drobiti.



Slika 12: Prečni prerez mikrorazpok v območju ob armaturni palici

Sprejemne napetosti omogočajo prenos obtežbe z betona na armaturo s strižnim delovanjem in so odvisne predvsem od (CEB-FIP MODEL CODE 1990):

- kvalitete betona, ki obdaja armaturno palico,
- velikosti in razporeditve reber na armaturni palici,
- premera armaturne palice ter razdalje med palicami,
- velikosti in dinamičnih vplivov obtežbe,
- sidrne dolžine.

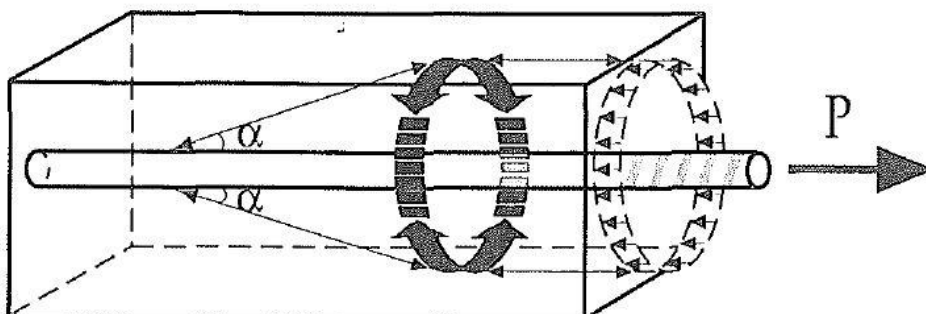


Slika 13: Primer rebrastega armaturnega jekla.

Gladke armaturne palice ne zagotavljajo dobrih sprejemnih pogojev med betonom in armaturo, zato se za armiranje konstrukcijskih elementov ne uporabljajo. Bentur in Mindess (2007) navajata, da se sprejemne napetosti med armaturo in betonom zmanjšujejo z povečevanjem sidrne dolžine in premera armaturnih palic. Porušitev se lahko zgodi na dva načina, odvisno od pogojev sprejemnosti. Glede na pogoje sprejemnosti lahko nastopi izvlek armature ali cepljenje betona. Izvlek armaturne palice nastopi, ko se cepilne razpoke okrog armature razvijejo do te mere, da se prične beton, ki obdaja rebra drobiti. Taka porušitev je do neke mere duktilna in posledično zato zaželjena, zunanost betona ostane po porušitvi nepoškodovana. Druga vrsta porušitve pa se pojavi, ko cepilne razpoke začnejo prodirati čedalje globlje v beton. Beton ne more prenesti nateznih napetosti, zato se razpre. Porušitev te vrste je neduktilna in zato manj zaželjena.

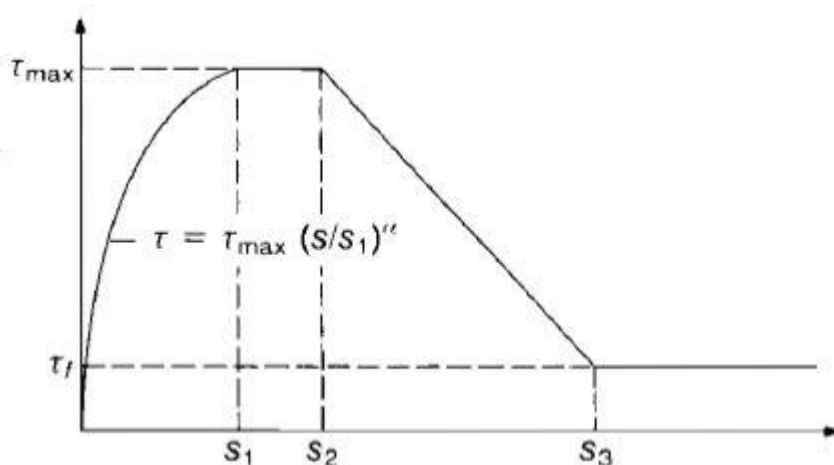
V betonu razpoke nastajajo tudi zaradi sušenja cementa, kar pomembno vpliva na sprejemne napetosti. V primeru, ko je armaturna palica v tlaku, razpoke v betonu bistveno ne povečujejo

zdrsa armature. Ko pa je armatura v nategu, pa ima razpokanost cementne matrice pomemben vpliv na sprijemne napetosti. Na sliki 14 je shematsko prikazana razporeditev sil ob natezni obremenitvi armature.



Slika 14: Prikaz shematske razporeditve sil ki se prenašajo preko armaturne palice v beton (Tepfers, 1973).

CEB-FIP Model Code 1990 podaja analitični diagram relacije napetost – zdrs, ki je razdeljen na štiri značilna območja, kot je prikazano na sliki 15. V območju $\leq s_1$ je prisotno naraščanje sprijemne napetosti do maksimalne vrednosti, v območju med s_1 in s_2 se pojavi plato, kjer se zdrs konstantno povečuje, vrednost napetosti pa ostaja približno ista. V območju med s_2 in s_3 napetost pada, zdrs se povečuje vse do območja $\geq s_3$, ko je dosežena končna sprijemna napetost, ki je posledica trenja med rebri armature, zdrobljenim betonom med rebri in preostalim betonom.



Slika 15: Idealiziran diagram napetost-zdrs, ki ga podaja CEB-FIP.

4.1 Sprejemna napetost v Evrokodu 2: Projektiranje betonskih konstrukcij – 1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe

Armaturne palice, žice ali varjene mreže morajo biti sidrane tako, da se njihove sile varno prenesejo na beton ter se preprečita vzdolžno razpokanje in cepljenje elementa. Kadar je potrebno, je treba namestiti ustrezno prečno armaturo. Standard definira sprejemno napetost kot strižno napetost, ki deluje po plašču palice in povzroča v betonu sile, ki so nasprotno enake reakciji. Mejna sprejemna napetost mora biti zadostna za preprečitev porušitve sidranja. Projektna vrednost mejne napetosti sidranja f_{bd} se pri rebrastih palicah lahko izračuna z izrazom

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd}, \quad (4.1.1)$$

kjer je: f_{ctd} = projektna vrednost natezne trnosti betona, η_1 = koeficient, ki je odvisen od kakovosti pogojev sidranja in od lege palice med betoniranjem in η_2 = koeficient, ki je odvisen od premera palice.

4.1.1 Osnovna sidrna dolžina

Za porazdelitev napetosti v armaturni palici je potrebno zagotoviti osnovno sidrno dolžino $l_{b,rqd}$, ki je definirana z izrazom

$$l_{b,rqd} = \frac{\emptyset}{4} \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}, \quad (4.1.1.1)$$

kjer je: \emptyset = premer palice za armiranje, σ_{sd} = projektna napetost v palici na mestu, od katerega se meri dolžina sidranja in f_{bd} = mejna snapetost sidranja.

4.1.2 Projektna sidrna dolžina

Projektna sidrna dolžina l_{bd} je v standardu določena z izrazom

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min}, \quad (4.1.2.1)$$

kjer je: α_1 = koeficient, ki upošteva vpliv oblike krivljenja palice v področju sidranja, α_2 = koeficient, ki upošteva vpliv najmanjšega krovnega sloja betona, α_3 = koeficient za upoštevanje vpliva objekta s prečno armaturo, α_4 = koeficient za upoštevanje vpliva ene ali več privarjenih palic, α_5 = koeficient za upoštevanje učinka tlačnih napetosti prečno na ravnino cepitve vzdolž projektne sidrne dolžine in $l_{b,min}$ = minimalna potrebna sidrna dolžina.

5 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE

Pospešen razvoj vlaknastega betona v gradbeništvu se je začel v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Do sedaj so bile opravljene številne raziskave na podlagi mehanskih in reoloških lastnosti vlaknastih betonov (Bandelj, 2010). Manj raziskav pa je bilo opravljenih na področju izvleka armature iz vlaknastega betona. V okviru diplomske naloge Sprejemnost med vlaknastim betonom in armaturo smo poskušali raziskati, kako količina in vrsta vlaken vpliva na sprijemne napetosti med betonom in armaturo.

5.1 Zasnova eksperimentalne raziskave

Raziskavo smo izvedli na treh različnih betonskih mešanicah, s po tremi preizkušanci za vsako izmed mešanic. Opravljene raziskave se nanašajo na lastnosti betonov visoke trdnosti z dodatkom vlaken, ki služijo kot mikroarmatura. Uporabili smo jeklena vlakna s prostorsko vsebnostjo 0,5% in 0,75%, ter polipropilenska vlakna z prostorski deležem 0,5%. Na svežem betonu smo izvedli standardizirane preizkuse. Vsem mešanicam smo izmerili tlačno trdnost pri starosti betona 28 dni. Zasnovali in izvedli smo izvlečni test armature iz preizkušancev dimenzij 20x20x20 cm pri starosti betona 28 dni, za katere smo izdelali tudi poseben kalup.

5.2 Uporabljeni materiali

Pri raziskovalnem delu smo za izdelavo mešanic uporabili sestavine, ki so razpoložljive na domačem trgu. Uporabili smo recepture betonov, ki jih je v okviru doktorskega študija za raziskave betonov visoke trdnosti uporabil doc. dr. D. Saje leta 2001, le da smo izbranim recepturam dodali izbrane deleže in vrsto vlaken ter ustrezno zmanjšali delež agregata v mešanici. Primerljive sestave betonskih mešanic brez in z dodatkom vlaken je zaradi možnosti medsebojne primerjave rezultatov v sočasnem raziskovalnem delu uporabil študent na univerzitetnem študiju gradbeništva Andraž Dežman v svoji diplomski nalogi.

5.2.1 Agregat

Za izdelavo betonske mešanice smo uporabili prani drobljeni apnenčev agregat iz separacije Kresnice, frakcije 0/4, 4/8 in 8/16 in mivko Termit iz Moravč. Na naslednjih slikah podajamo lastnosti uporabljenih agregatov (Saje, 2001).

Nahajališče	Moravče
Opis	Mivka je značilne rjavkasto sive barve s posameznimi temnejšimi zrnci. Mineraloško pregledan vzorec pod mikroskopom kaže kremenovo sestavo (> 99%). Oblika zrn je večinoma zaobljena do zaobljeno/ostroroba, v podrejeni količini nastopajo samo ostroroba zrna. Primerjava osi a, b in c (ocenjena dimenzija pod mikroskopom, glede na relief) v zrnih kaže, da imajo zrna visok volumski koeficient - dimenzije a, b in c so približno enako velike. Mivka ne vsebuje delcev s premerom pod 0.09 mm, ugodno sestavo ima tudi v zgornjem delu z nizkim deležem zrn velikosti nad 0.4 mm.

Slika 16: Lastnosti mivke Termit iz Moravč.

Nahajališče	kannolom Ušenišče		
Vrsta kamnine	<i>apnenec</i>		
Mineraloško-petrografska analiza	makroskopski opis	Vzorec je svetlo siv apnenec. Kamnina je trdna in gosta. Razpoke v obliki stilolitnih šivov so zapolnjene z rjavim netopnim ostankom - glineni materiali. Del razpok je zapolnjen s prekristaliziranim kalcitom.	
	mikroskopski opis	Osnova kamnine je mikrit, v katerem opazujemo stilolitne šive in tektonske žilice, zapolnjene z netopnim ostankom - glineni materiali. V mikritni osnovi opazimo redke ostanke bioklastov. Ponekod je mikrit prekristaljen v mikrosparit oz. sparit, predvsem v zapolnitvah žilic. Dolomit nastopa v skupkih v obliki kristalčkov.	
Tlačna trdnost kamnine	v suhem stanju	min	151 MPa
		max	211 MPa
		srednja	178 MPa
	v mokrem stanju	min	139 MPa
		max	210 MPa
		srednja	174 MPa

Slika 17: Lastnosti kamnine agregata iz Separacije Kresnice.

5.2.2 Cement

Uporabili smo vrsto portlandskega mešanega cementa z oznako CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (Blaine = 355 m²/kg) iz cementarne v Anhovem. Produkt spada v skupino specialnih cementov in je namenjen za zahtevne gradnje, saj omogoča doseganje visokih zgodnjih in končnih trdnosti, kar predstavlja oznaka R. Oznaka A nam pove, da cement vsebuje visoko količino Portland klinkerja, LL-S pa da je elementu dodan apnenec in granulirana žindra z vsebnostjo do 20%. Cement ustreza zahtevam standarda SIST EN 197-1. Na sliki 18 je podana mineralna sestava cementnega klinkerja (Saje, 2001), v preglednici 6 pa kemijske in mehanske vrednosti cementa, ki jih jamči proizvajalec.

Vrsta cementa	Vrsta cementnega klinkerja	Minerali klinkerja			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R	Običajni klinker	64%	15%	9%	9%

Slika 18: Mineralna sestava cementnega klinkerja.

Preglednica 6: Kemijske in mehanske lastnosti cementa
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (Salonit Anhovo).

CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	
SESTAVA	
Portland klinker	≥ 80%
Apnenec, žindra	12 - 20%
Dodatki, polnila	≤ 5%
KEMIJSKE ZAHTEVE	
Vsebnost sulfata	2,60%
Vsebnost klorida	0,05%
MEHANSKE IN FIZIKALNE ZAHTEVE	
Zgodnja trdnost, 2 dni	29 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	57 Mpa
Čas začetka vezanja	190 min
Prostorninska obstojnost	< 1 mm

5.2.3 Dodatki betonu

Za doseganje boljših tlačnih trdnosti betona, vodonepropustnosti in po predpostavki tudi boljših sprejemnih napetosti smo cementni mešanici dodali Cementol Antikorodin. Izbrani produkt je suha mešanica superplastifikatorja (sulfonirani naftalen – formaldehid kondenzat) in mikrosilike v suhem stanju. Uporablja se za izdelavo specialnih betonov visoke trdnosti in gostote. Antikorodin močno zmanjša vodo-cementno razmerje v betonu z nespremenjeno obdelavnostjo betona, tudi posledično zaradi mletja na zelo drobno frakcijo. Dodatek je produkt kemične tovarne TKK Srpenica v Sloveniji. V preglednici 7 so napisane osnovne značilnosti dodatka, podane v tehničnem listu proizvajalca na njihovi spletni strani.

Preglednica 7: Lastnosti Antikorodina.

Lastnost	
Izgled	prah temno sive barve
Nasipna teža [g/L]	530-630
pH, 10% raztopina	5,5

5.2.4 Sestava preiskovanega betona

Pričakovali smo, da dodatek jeklenih in propilenskih vlaken vpliva na vgradljivost sveže betonske mešanice in mehanske lastnosti otrdelega betona. Predviden je bil posed od 15 cm do 18 cm. Za vse tri mešanice smo zaradi primerljivosti zasnovali enako recepturo betona, spreminjali smo le vrsto in prostorninski delež vlaken, da smo dobili rezultate, ki so odvisni le od omenjenih dveh spremenljivk v betonski mešanici. Vodovezivni faktor je za vse mešanice znašal 0,36. Mešanice smo projektirali za prostornino 0,036 m³, kar je zadostovalo za 3 kocke 15x15x15 cm za preizkus tlačne trdnosti betona pri starosti 28 dni in 3 kocke 20x20x20 cm za test izvleka armature iz betona pri starosti 28 dni. V preglednici 8, 9 in 10 so prikazane sestave vseh treh vrst preiskovanih betonov. Na sliki 19 je prikazan izgled sveže betonske mešanice v mešalcu.

Preglednica 8: Sestava preiskovane mešanice HSC-1600-JV-0,5%.

Vrsta betona:		HSC-1600-JV-0,5%			
Količina betona:		0,036 m ³			
Vodovezivni faktor:		0,36			
Vhodne surovine	Procenti	Teža v kg	Specifična teža v kg/dm ³	Volumen v litrih	Sestava za 0,036 m ³
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	90,00	360,0	3,100	116,1	12,96 kg
Antikorodin	12,05	48,0	2,200	21,9	1735 g
Voda		144,0	1,000	144,0	5,18 l
DODATKI BETONU:					
vlakna-JV (IRI 3 cm)	0,50	39,0	7,800	5,0	1,404 kg
AGREGAT:					
Mivka Termit	15,00	283,0	2,710	104,5	10,20 kg
0/4 Kresnice	45,00	847,0	2,700	313,6	30,49 kg
4/8 Kresnice	15,00	282,0	2,700	104,5	10,16 kg
8/16 Kresnice	25,00	470,0	2,700	174,2	16,94 kg

Preglednica 9: Sestava preiskovane mešanice HSC-1600-JV-0,75%.

Vrsta betona:		HSC-1600-JV-0,75%			
Količina betona:		0,036 m ³			
Vodovezivni faktor:		0,36			
Vhodne surovine	Procenti	Teža v kg	Specifična teža v kg/dm ³	Volumen v litrih	Sestava za 0,036 m ³
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	90,00	360,0	3,100	116,1	12,96 kg
Antikorodin	12,05	48,0	2,200	21,9	1735 g
Voda		144,0	1,000	144,0	5,18 l
DODATKI BETONU:					
vlakna-JV (IRI 3 cm)	0,75	58,5	7,800	7,5	2,106 kg
AGREGAT:					
Mivka Termit	15,00	282,0	2,710	104,2	10,16 kg
0/4 Kresnice	45,00	844,0	2,700	312,5	30,38 kg
4/8 Kresnice	15,00	281,0	2,700	104,2	10,13 kg
8/16 Kresnice	25,00	469,0	2,700	173,6	16,88 kg

Preglednica 10: Sestava preiskovane mešanice HSC-1600-PPV-0,5%_6+18 mm.

Vrsta betona:		HSC-1600-PPV-0,5%_6+18 mm			
Količina betona:		0,036 m ³			
Vodovezivni faktor:		0,36			
Vhodne surovine	Procenti	Teža v kg	Specifična teža v kg/dm ³	Volumen v litrih	Sestava za 0,036 m ³
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	90,00	360,0	3,100	116,1	12,96 kg
Antikorodin	12,05	48,0	2,200	21,9	1735 g
Voda		144,0	1,000	144,0	5,18 l
DODATKI BETONU:					
Vlakna-PPV 6 mm	0,25	2,3	0,910	2,5	0,082 kg
Vlakna-PPV 18 mm	0,25	2,3	0,910	2,5	0,082 kg
AGREGAT:					
Mivka Termit	15,00	283,0	2,710	104,5	10,20 kg
0/4 Kresnice	45,00	847,0	2,700	313,6	30,49 kg
4/8 Kresnice	15,00	282,0	2,700	104,5	10,16 kg
8/16 Kresnice	25,00	470,0	2,700	174,2	16,94 kg



Slika 19: Izgled sveže betonske mešanice.

Pred zamešanjem smo agregat in mivko zračno osušili v laboratoriju in s tem preprečili vnos dodatne količine vode v betonsko mešanico. Najprej smo natehtali vse sestavine, nato pa zamešali vse frakcije agregata in cementa, dodali Antikorodin ter ročno raztresli vlakna in vse skupaj na suho zamešali. Z konstantnim dolivanjem smo v času suhega zamešanja dodali vodo in z protitočnim mešalcem mešali pet minut. Kalupe smo premazali z opažnim oljem in tako omogočili lažje razkalupljanje. Po končanem zamešanju smo izmerili temperaturo sveže betonske mešanice in opravili preiskave na svežem betonu.

5.3 Preiskave svežega betona

Opravili smo preiskave svežega betona po navodilih, ki jih določajo veljavni standardi SIST EN 12350-2, SIST EN 12350-5 in SIST EN 12350-7.

- Metoda s posedom

Z to preprosto metodo določamo konsistenco tekočih in srednje ter mehko plastičnih betonskih mešanic. Pred izvedbo preskusa z zidarsko žlico betonsko mešanico v mešalni posodi dobro premešamo. Uporabljamo Abrahamsov konus, ki ga z zidarsko žlico napolnimo v treh plasteh, vsako plast pa zgostimo z standardno kovinsko palico ($\Phi 16$ mm, $l=60$ cm) s 25 udarci z prebadanjem. Presežek pri tretji plasti odstranimo in poravnamo površino. Počakamo trideset sekund, in nato počasi (5-10 sekund) dvigamo konus. Postavimo ga ob betonski stožec, na zgornji rob konusa postavimo jekleno palico in z ravnilom odčitamo razliko višin. Mera za konsistenco betona je višina poseda vzorca. Celoten postopek ne sme trajati več kot 150 sekund (po SIST EN 12350-2).



Slika 20: Merjenje poseda sveže betonske mešanice.

- Metoda z razlezom

Metodo uporabljamo za plastične betone. Pred izvedbo preskusa v posodi za mešanje vzorec dobro premešamo z zidarsko žlico. Jekleno razlezno mizo, ki je postavljena na vodoravni podlagi in ni izpostavljena zunanjim vibracijam obrišemo, da preprečimo

sprijemanje betona z podlago. Na sredino mize postavimo prisekan stožec, kateremu smo predhodno navlažili stene. Napolnimo ga v dveh slojih in zgostimo z 10 udarci nabijala. Med polnjenjem in zbijanjem stojimo na jeklenih ušesih in tako dosežemo, da je kalup pritisnjen ob razlezno mizo. Nato z pomočjo zidarske žlice odstranimo odvečni beton in poravnamo površino na zgornji strani stožca. Po tridesetih sekundah začnemo z počasnim dviganjem stožca. Nato 15-krat počasi dvignemo zgornji del razlezne mize za 4 cm in sputimo da prosto pade na spodnji del. Z merilom izmerimo največjo dimenzijo razleznega betona v dveh, med seboj pravokotnih smereh. Potem vzamemo povprečje obeh izmer in odčitamo konsistenco sveže betonske mešanice (po SIST EN 12350-5).



Slika 21: Merjenje razleza sveže betonske mešanice.

- Merjenje vsebnosti zraka

Pred izvedbo preskusa vzorec dobro premešamo. Beton z lopatico vgradimo v posodo za merjenje vsebnosti zraka. Pri tem pazimo, da v beton zajamemo čim manj zraka. Posodo napolnimo v več slojih, betonsko mešanico po slojih zgostimo z ročnim vibratorjem, da zagotovimo potrebno zgoščenost betona. Prekomerno vibriranje lahko povzroči izhajanje segregacijo betona. Nato odstranimo višek materiala in očistimo prirobnico na posodi, da pokrov lepo nalega na posodo, kot je prikazano na sliki 22. Zapremo zračni ventil in z brizgalko polnimo vodo, dokler ne iztopi skozi drugi ventil. Zapremo preostala ventila in pričnemo z črpalko polniti zračno komoro toliko časa, da se kazalec na manometru pomakne v skrajno lego. Nato z gumbom za sproščanje zračnega pritiska zrak spustimo v posodo z

betonsko mešanico. Na manometru odčitamo vsebnost zraka na 0,1% natančno (slika 16). Predem odpremo posodo moramo odpreti ventile, da razbremenimo pritisk v posodi (po SIST EN 12350-7).



Slika 22: Čiščenje prirobnice in odčitavanje vsebnosti zračnih por.

5.4 Rezultati preiskav svežega betona

V preglednici 11 so prikazani rezultati preiskav svežega betona za vse tri preiskovane mešanice. V preglednici 12 so prikazane teže kalupov in teže sveže betonske mešanice skupaj s kalupom ter gostota svežega betona. Na podlagi teh podatkov lahko dobimo vrednosti teže betonskih preizkušancev.

Preglednica 11: Rezultati preiskav sveže betonske mešanice.

HSC-1600-JV-0,5%	
Vsebnost por, dobljeno:	1,2%
Temperatura svežega betona:	27,7 °C
Posed:	17,0 cm
Razlez:	40,0 cm
HSC-1600-JV-0,75%	
Vsebnost por, dobljeno:	1,3%
Temperatura svežega betona:	28,0 °C
Posed:	5,0 cm
Razlez:	39,5 cm
HSC-1600-PPV-0,5%	
Vsebnost por, dobljeno:	2,4%
Temperatura svežega betona:	27,7 °C
Posed:	4,0 cm
Razlez:	37,0 cm

Preglednica 12: Teže kalupov, teže skupaj in gostote svežega betona.

Oznaka	Teža kalupa [kg]	Teža skupaj [kg]	Gostota svežega betona [kg/m ³]
HSC-1600-JV-0,5%/1	11,65	20,02	2480
HSC-1600-JV-0,5%/2	11,51	19,89	2483
HSC-1600-JV-0,5%/3	11,50	19,82	2465
HSC-1600-JV-0,75%/1	11,64	20,06	2495
HSC-1600-JV-0,75%/2	11,74	20,14	2489
HSC-1600-JV-0,75%/3	10,98	19,28	2459
HSC-1600-PPV-0,5%_6 in 18 mm/1	11,54	19,78	2441
HSC-1600-PPV-0,5%_6 in 18 mm/2	11,46	19,60	2412
HSC-1600-PPV-0,5%_6 in 18 mm/3	11,80	20,00	2430

5.5 Merjenje tlačne trdnosti vlaknastih betonov

Enoosno tlačno trdnost betonskih preizkušancev pri starosti 28 dni smo merili na betonskih kockah z robom 15 cm, s pomočjo elektromehaničnega stroja za statične preiskave s silo do 5000 kN. Preizkušance smo razkalupili po 24 urah in jih 28 dni pri sobni temperaturi hranili v vodi, da je beton dosegel končno trdnost.



Slika 23: Sveži preizkušanci vgrajeni v kalupe za merjenje tlačne trdnosti.

5.6 Rezultati in analiza tlačne trdnosti vlaknastih betonov

V preglednici 13 so prikazane vrednosti maksimalnih tlačnih trdnosti pri enoosnem tlačnem testu za tri različne vrste betonov. Iz dobljenih rezultatov lahko vidimo, da z večjim deležem dodanih vlaken v betonski mešanici dosežemo višje tlačne trdnosti betona. Pri enakem volumskem deležu pa betoni z vsebnostjo jeklenih vlaken dosegajo višje tlačne trdnosti kot betoni z vsebnostjo polipropilenskih vlaken. Na podlagi izračunanih vrednosti standardne deviacije tlačne trdnosti opazimo, da so si najbolj podobne vrednosti tlačnih trdnosti tistih betonov, ki so vsebovali največji delež jeklenih vlaken. Tako sklepamo, da z večjim deležem vlaken lahko dosegamo manjša odstopanja med tlačnimi trdnostmi posameznih preizkušancev. Na sliki 24 je prikazana značilna porušitev preizkušanca z vsebnostjo jeklenih vlaken.



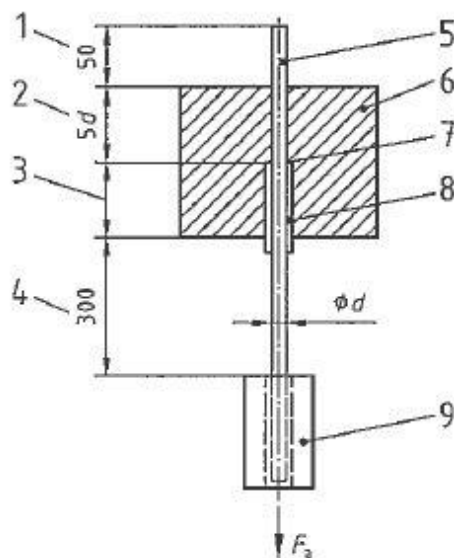
Slika 24: Porušitev preizkušanca pri enoosnem tlačnem testu.

Preglednica 13: Rezultati merjenja tlačne trdnosti preizkušancev pri starosti 28 dni.

Datum testiranja vzorcev:	30.7.2015							
Način vzdrževanja do preizkusa:	28 dni v vodi pri sobni temperaturi							
Preizkuševalni stroj:	Preša za preizkus tlačne trdnosti							
Oznaka vzorca	a [mm]	b [mm]	h [mm]	Masa [kg]	Maks. osna sila [kN]	Tlačna trdnost [MPa]	Povp. tlačna trdnost [MPa]	Standardna deviacija povp. tlačnih trdnosti [MPa]
HSC-1600-JV-0,5%/1	150,4	150,4	148,5	8,35	1960	86,6	84,0	1,86
HSC-1600-JV-0,5%/2	150,4	150,5	149,3	8,40	1870	82,6		
HSC-1600-JV-0,5%/3	150,2	150,4	148	8,35	1870	82,8		
HSC-1600-JV-0,75%/1	150,1	150,1	149,5	8,41	2015	89,4	88,3	0,81
HSC-1600-JV-0,75%/2	150,2	150,3	149,3	8,45	1980	87,7		
HSC-1600-JV-0,75%/3	149,8	149,9	147	8,28	1970	87,7		
HSC-1600-PPV-0,5%/1	150,8	150,5	150,7	8,18	1700	74,9	70,6	8,70
HSC-1600-PPV-0,5%/2	149,9	150,3	151,5	8,25	1765	78,3		
HSC-1600-PPV-0,5%/3	149,9	150,2	152,5	8,26	1315	58,4		

5.7 Vpliv vlaken na sprejemnost med vlaknastim betonom in armaturo

Glavne raziskave za potrebe diplomske naloge so se nanašale na to, kako vrsta in količina vlaken vpliva na sprejemnost med vlaknastim betonom in armaturo. V veljavnem standardu SIST EN 10080:2005 je v dodatku D obravnavana metoda testiranja sprejemnih napetosti za rebraste palice in žice, ki se uporabljajo kot armatura. Izvede se test izvleka armature. Omejitev velja za palice premera ≤ 32 mm. Armatura palica je vgrajena v betonsko kocko tako, da del palice prosto gleda ven. Efektivna dolžin sidranja znaša $5d$, kjer je d premer armature palice, ostala dolžina v betonu je izolirana z gumijasto cevjo, ki je nataknjena na palico. Na prostem koncu armature palice poteka merjenje pomika v odvisnosti od sile, ki jo vnašamo v armaturno palico na daljšem koncu, vpetem v stroj za testiranje. Za merjenje pomikov standard predpisuje uporabo merilnikov, ki so natančni na $\pm 0,01$ mm. Princip testa je prikazan na sliki 25, vse dimenzije so v milimetrih.



Slika 25: Shematski prikaz izvležnega testa.

Legenda:

- 1 prosti del armature palice za merjenje pomikov
- 2 dolžina sidranja
- 3 izoliran del armature palice, min. 200 mm – 5d
- 4 del palice med kalupom in testnim strojem
- 5 armatura palica, preizkušanelec
- 6 beton
- 7 zatesnitev
- 8 plastična cev, ki deluje kot izolator
- 9 čeljusti za prijem armature palice

Sprejemna napetost τ [N/m²] se izračuna z naslednjim izrazom

$$\tau = \frac{P}{\pi d_b l_b}, \quad (5.7.1)$$

kjer je: P = sila, s katero obremenimo armaturno palico (N), d_b = premer armaturne palice (mm) in l_b = dolžina sidranja (mm).

Hitrost nanašanja obtežbe v_p [N/s] je predpisana v standardu in sicer z enačbo

$$v_p = 0,56 d^2, \quad (5.7.2)$$

kjer je: d = premer armaturne palice (mm).

5.7.1 Opis kalupa za izdelavo preizkušancev

Za potrebe testa izvleka armature iz betona smo zasnovali lesen kalup za devet preizkušancev v obliki kocke z robom 20 cm. Pri izdelavi so sodelovali študent univerzitetnega študija gradbeništva Andraž Dežman, doc. dr. Drago Saje in izr. prof. dr. Jože Lopatič. Kalup je narejen iz vezane plošče debeline 21 mm. Plošča je prevlečena s fenolnim filmom. Poleg tega, da je plošča vodoodporna je odporna tudi na kemijske reakcije cementa in dodatkov v betonu. Kalup je v celoti montažno zvijačen z nerjavečimi jeklenimi vijaki premera 6 mm in ga je mogoče v celoti razstaviti. Vse robove smo dodatno zaščitili z vodoodporno zaščitno barvo. Luknje za vstavljanje armaturnih palic v kalupu so premera 40 mm. Dodatne plošče na notranji strani kalupa so debele 12 mm in imajo na sredini plošče luknjo premera 14 mm in so montažne, za preizkuse z debelejšimi armaturnimi palicami je možno vstaviti druge plošče z luknjami poljubnega premera.



Slika 26: Priprava kalupa za izdelavo preizkušancev

5.7.2 Sestava preiskovanega betona

Uporabili smo mešanice, ki so predstavljene v preglednicah 8, 9 in 10 v poglavju 5.2.4. V protitočni mešalec smo v naslednjem vrstnem redu dozirali agregat, cement, antikorodin in ročno raztresli še vlakna, s čimer smo dosegli bolj enakomerno porazdelitev vlaken v betonski mešanici in tako preprečili tvorjenje gnezd, ki negativno vplivajo na mehanske lastnosti otrdelega betona. Vse sestavine smo suho zamešali, kasneje pa smo dodali še predpisano količino vode. Po pet minutnem mešanju smo izmerili temperaturo sveže betonske mešanice in opravili preiskave po navodilih, ki jih določajo veljavni standardi SIST EN 12350-2, SIST EN 12350-5 in SIST EN 12350-7, opisane v poglavju 5.3, z naslovom Preiskave svežega betona.

5.7.3 Vgrajevanje sveže betonske mešanice

Preden smo beton vgradili v kalup smo skozi odprtine kalupa namestili armaturne palice s premerom 12 mm. Uporabili smo običajno rebrasto betonsko jeklo za armirane betone, kvalitete S 500. Palice smo na daljšem koncu podprli in s tem preprečili ukrivitev palic zaradi lastne teže v času strjevanja betona. Kalupe smo premazali z opažnim oljem in tako poskrbeli za enostavno razkalupljanje. Da smo dosegli omejitev sidrne dolžine 5d, kot to predvideva standard SIST EN 10080:2005 v dodatku D, smo na palice nataknili plastično cev ter jo na koncu zatesnili z steklarskim kitom, s čimer smo preprečili vtekanje cementnega mleka v območje stika med armaturno palico in cevjo, kot to prikazuje slika 27. Beton smo

vgrajevali v dveh plasteh, vsako izmed plasti smo zgoščevali z vibriranjem. Presežek smo odstranili in površino zgladili z zidarsko žlico. Opazili smo, da se betonske mešanice z dodatkom jeklenih vlaken težje vgrajujejo kot mešanice z enakim deležem polipropilenskih vlaken. Opazno težje je bila vgradljiva betonska mešanica z 0,75% prostorskim deležem jeklenih vlaken kot enaka betonska mešanica z manjšim deležem jeklenih vlaken. Po končanem vgrajevanju vseh treh betonskih mešanic smo kalupe pokrili z PVC folijo in tako preprečili prekomerno sušenje betona. Po 24 urah smo razkalupili preizkušance, jih ustrezno označili in potem 28 dni pri sobni temperaturi hranili v vodi, kot je prikazano na sliki 29. Po 28 dneh smo preizkušance vzeli iz vode in pričeli z merjenjem sprejemnih napetosti.



Slika 27: Zatesnitev stika med plastično cevjo in armaturno palico.



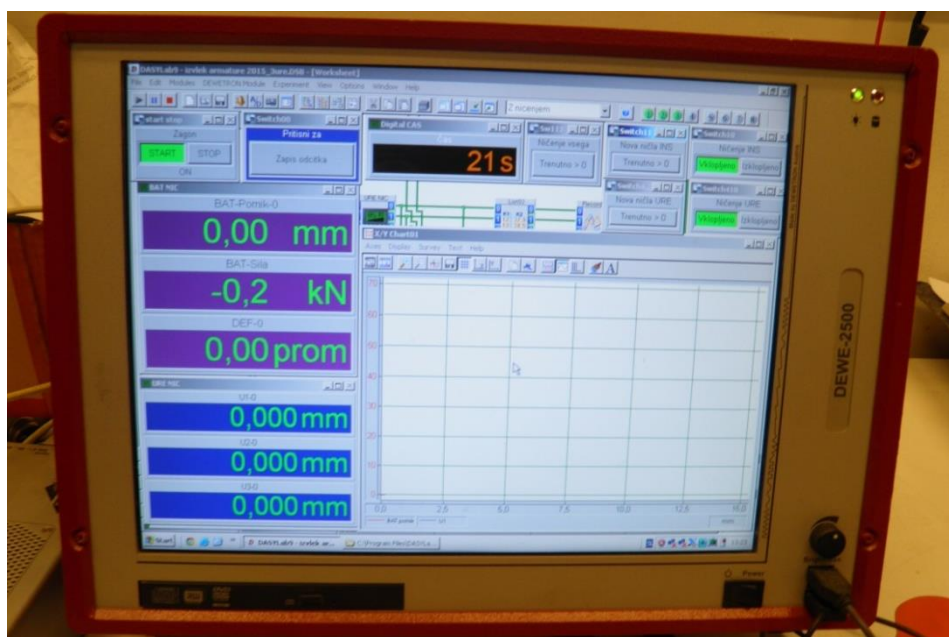
Slika 28: Vgrajevanje sveže betonske mešanice v kalup.



Slika 29: Preizkušance smo 28 dni hranili v vodi.

5.7.4 Merilna oprema in zajem podatkov

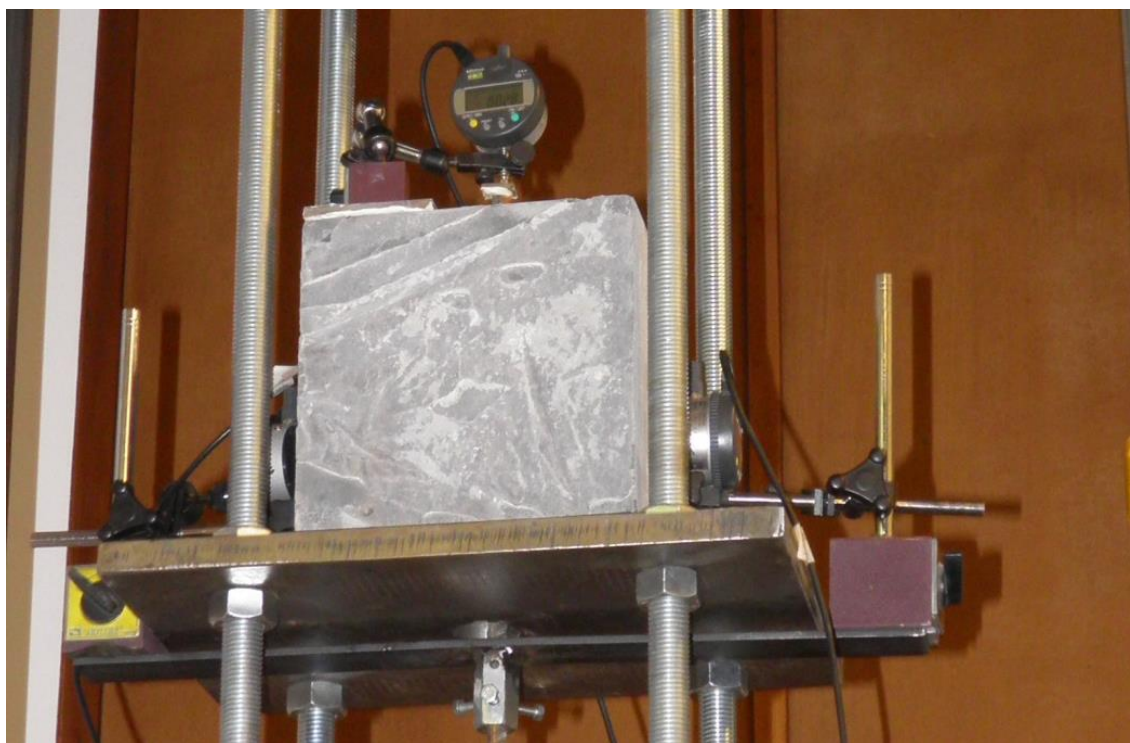
Preiskave smo opravljali v Konstrukcijsko prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani na univerzalni preizkuševalni napravi Instron, kapacitete ± 1000 kN, v skladu s postopkom, ki je opisan v standardu SIST EN 10080:2005, v diplomski nalogi pa je postopek opisan v poglavju 5.7. Za elektronsko zapisovanje podatkov je bil uporabljen sistem Dewetron. Doc. dr. Drago Saje je pripravil jekleno konstrukcijo, preko katere smo naše preizkušance vpeli v vpenjalno glavo na preizkuševalni napravi. Preizkušance smo natezno obremenjevali s pomočjo pomika glave preizkuševalnega stroja Instrona. Preizkuševalna naprava omogoča hod bata 100 mm in sile do 1000 kN v tlaku in nategu. Hitrost pomika bata smo določili na podlagi zahteve v veljavnem standardu SIST EN 10080:2005. Merilna oprema je merila pomike in silo v hidravličnem batu. Dodatno smo podatke pomikov armaturne palice pridobivali še z 3 mehanskimi uricami z natančnostjo $\pm 0,001$ mm. Merilno napravo sestavlja tipalo, ki meri pomike, rezultate pa naprava beleži elektronsko preko računalniške enote. Uporabljeni merilec pomikov omogoča merjenje pomikov dolžine ± 5 mm. Celoten postopek raziskave je zajemal pripravljala dela, porušni test in beleženje podatkov. Pripravljala dela so obsegala namestitve vzorca v preizkuševalno napravo, montažo vseh merilnih aparatov na sam vzorec, ter preizkus delovanja merilnih naprav. Nato smo nastavili hitrost pomika bata in izničili vse vrednosti, ki so jih odčitavale merilne naprave. Rezultate naprava beleži v elektronski obliki, odčitki se samodejno izvajajo v intervalu 0,5 sekunde. Celoten postopek raziskave je v povprečju trajal 30 minut.



Slika 30: Programski vmesnik za zajem rezultatov.



Slika 31: Naprava za preizkušanje in konzola za upravljanje.



Slika 32: Namestitev merilnih inštrumentov.

5.8 Rezultati testiranja

Dobljene rezultate smo izvozili v elektronski obliki v program Excel in tam nadaljevali z samim urejanjem. Dobili smo podatke o pomiku bata (mm), silo v batu (kN), pomike armature na prostem koncu in na mestu pred sidranjem v betonu (mm) ter deformacijo armaturne palice v promilih. Test smo zasnovali tako, da smo preko bata v armaturno palico vnašali natezno silo z hitrostjo, opisano v enačbi 5.7.2 in je v našem primeru za armaturno palico premera 12 mm znašala približno 0,08 kN/s. Dobljeno silo smo pretvorili v sprijemno napetost tako, da smo silo delili z površino, na kateri delujejo sprijemnosti. Za vse tri betonske mešanice smo dobili odnos med sprijemno napetostjo in zdrsom armaturne palice. Izvlečni test smo zaključili, ko je spodnja vpenjalna glava dosegla hod 50 mm, kar je polovica hoda, ki ga preizkuševalna naprava omogoča. Pri preizkušancih z 0,75% prostorninskim deležem jeklenih vlaken nismo dosegli maksimalnih vrednosti sprijemnih napetosti, saj smo pred porušitvijo že dosegli maksimalno vrednost pomika spodnjega bata. Pri načrtovanju preizkusa smo predvideli, da je pomik 50 mm zadosten, vendar smo tekom testiranja dosegali višje izvlečne sile in posledično plastificiranje armaturne palice in nam pomik 50 mm ni zadoščal za doseganje maksimalnih sprijemnih napetosti med betonom in armaturo. Meja tečenja se za jeklo kvalitete S 500 in palico premera 12 mm pojavi pri sili okrog 60 kN ali sprijemni napetosti 2,5 kN/cm², kot je to prikazano z naslednjo enačbo

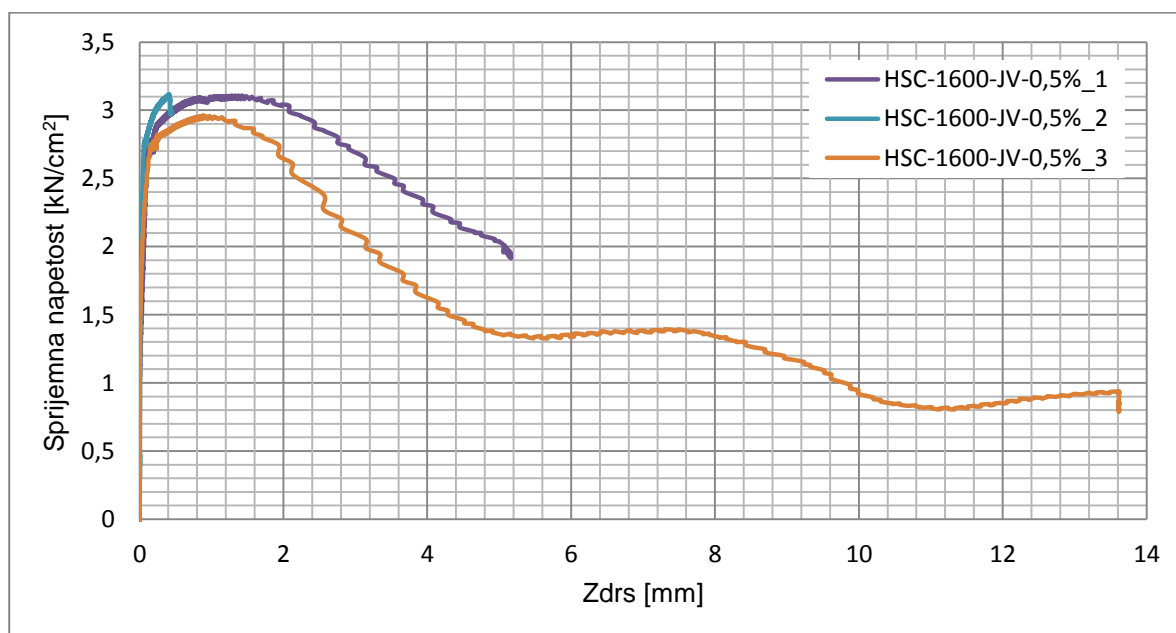
$$P = \sigma \cdot A = 50 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 1,13 \text{ cm}^2 = 56,5 \text{ kN} , \quad (5.8.1)$$

kjer je: P = natezna sila s katero dosežemo plastificiranje armaturne palice (kN), σ = napetost na meji tečenja za jeklo kvalitete S 500 (kN/cm²) in A = površina prečnega prereza palice s premerom 12 mm (cm²).

Pomika hidravličnega bata zaradi medsebojne primerljivosti rezultatov nismo spreminjali. Kljub temu pa je možno iz dobljenih rezultatov povzeti nekatere zanimive ugotovitve, ki so opisane v nadaljevanju diplomskega dela. Del krivulje na koncu testa, ko sprijemna napetost naglo pade ponazarja, da smo dosegli končni pomik bata in smo pričeli z vračanjem bata v začetno pozicijo. S tem smo dosegli izničenje napetosti v armaturni palici pred odprtjem hidravličnih čeljusti.

5.8.1 Beton visoke trdnosti z 0,5% deležem jeklenih vlaken

Spodnja slika prikazuje sprejemne napetosti v odvisnosti glede na zdrs armaturne palice v betonu. Opazimo, da na začetku izvlečnega testa palica na prostem koncu miruje, sprejemne napetosti pa hitro naraščajo. Opazimo, da krivulje dosežejo maksimalno vrednost sprejemnih napetosti okrog 3 kN/cm^2 pri zdrs 1 mm. Pri vrednosti $2,5 \text{ kN/cm}^2$ se pričnejo opaznejši zdrsi armaturne palice in se potem povečujejo vse do konca preizkusa. Potem so se v betonu pojavile razpoke in velikost sprejemnih napetosti je začela padati sorazmerno z povečevanjem zdrsa armaturne palice. Iz grafa lahko razberemo, da se je pri zdrs 5 mm zgodilo zaklinjanje zdrobljenega betona in je sprejemna napetost spet narasla na približno $0,45 \tau_{\max}$. Preizkušane številka 2 ni dosegel maksimalne vrednosti sprejemnih napetosti, saj smo zaradi plastifikacije armaturne palice že dosegli pomik bata 50 mm in s tem smo test zaključili. Najmanjše vrednosti smo dosegli s preizkušancem številka 3, kot je to razvidno iz Slike 33.



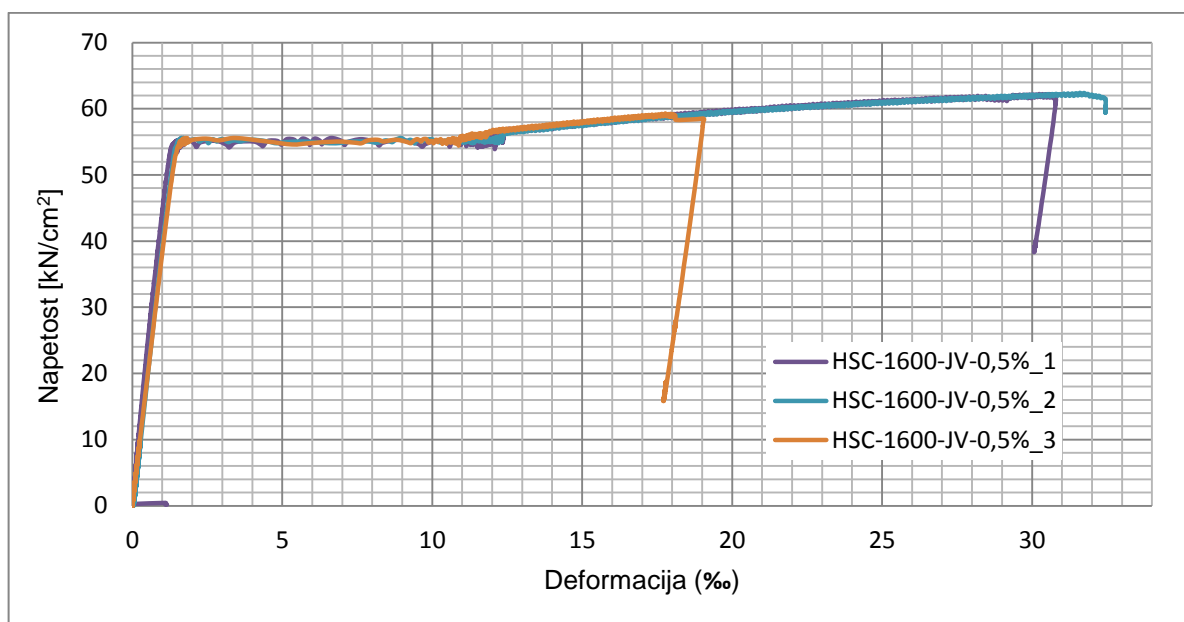
Slika 33: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona HSC-1600-JV-0,5%.

V preglednici 14 so prikazane največje dosežene vrednosti sprejemnih napetosti, povprečje vseh treh vrednosti ter standardna deviacija. Raztros vrednosti sprejemnih napetosti, dobljen na podlagi standardne deviacije sprejemne napetosti, je majhen.

Preglednica 14: Maksimalne vrednosti sprijemnih napetosti, HSC-1600-JV-0,5%.

HSC-1600-JV-0,5%	Maksimalna sprijemna napetost [kN/cm ²]	Povprečna sprijemna napetost [kN/cm ²]	Standardna deviacija sprijemne napetosti [kN/cm ²]
1	3,11	3,06	0,07
2	3,12		
3	2,96		

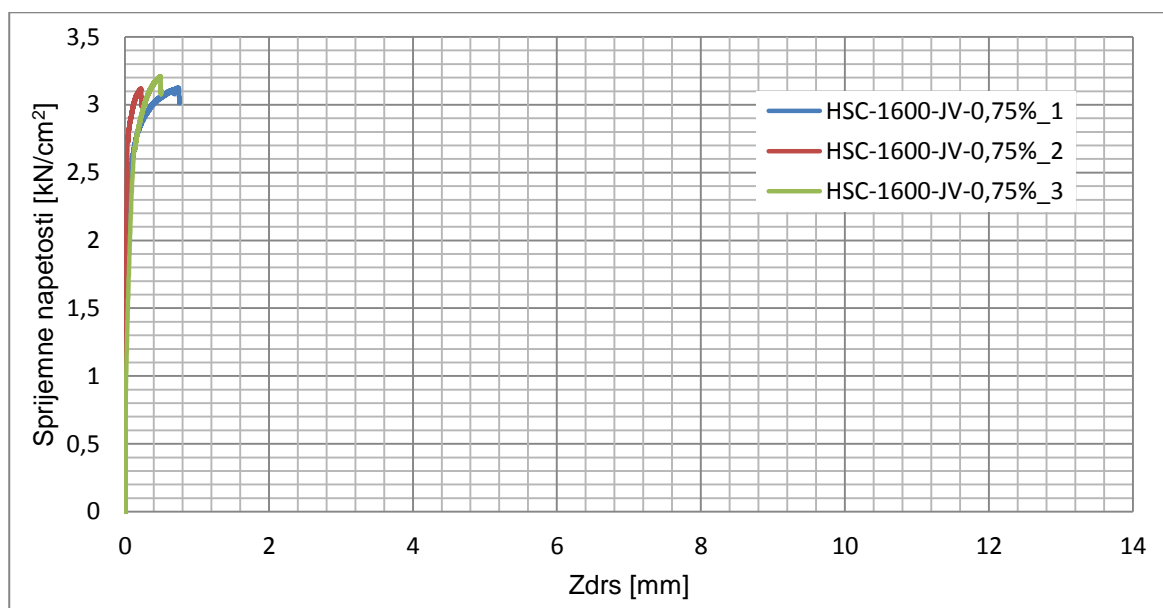
Obnašanje armaturne palice med samim testom lahko natančneje obrazložimo s pomočjo slike 34. Med preizkusom smo s pomočjo ekstenziometra, nameščenega na vpetem koncu armaturne palice in priključenega na preizkuševalno napravo, odčitavali tudi deformacije v armaturni palici, ki so bile posledica natezne obremenitve. Na spodnji sliki lahko vidimo, da se je pri napetosti 55 kN/cm² in deformaciji 3‰ začela palica plastificirati. Potem je na sliki vidno območje utrujanja materiala, ki ga prepoznamo po značilnem platoju. Pri deformaciji nad 10‰ pa nastopi utrditev materiala in sila spet začne naraščati do vrednosti 60 kN/cm². Potem sledi le še počasno razbremenjevanje samega preizkušanca.



Slika 34: Potek napetosti armaturne palice v odvisnosti od deformacije, HSC-1600-JV-0,5%.

5.8.2 Beton visoke trdnosti z 0,75% deležem jeklenih vlaken

Iz slike 35 je vidno, da je povečanje prostorninskega deleža jeklenih vlaken povečalo sprejemne napetosti. Prvi del krivulje je podoben krivuljam, ki smo jih dobili pri preizkušancih z 0,5% prostorninskega deleža jeklenih vlaken. Značilno je strmo naraščanje krivulje, kar pomeni velik prirast sprejemnih napetosti z razmeroma zelo majhnim zdrsom armaturne palice. Maksimalnih vrednosti preizkušancev nismo dosegli, saj je bil merodajen 50 mm pomik hidravličnega bata in s tem smo preizkus zaključili. Predvidevamo, da bi preizkušanci te vrste lahko dosegli sprejemne napetosti okrog $3,5 \text{ kN/cm}^2$ pri zdrsuh armature 2 mm. Potek krivulj v nadaljevanju pa bi bil podoben kot pri preizkušancih z manjšim deležem jeklenih vlaken, najbrž bi iste vrednosti sprejemnih napetosti dosegali pri manjših vrednostih zdrsa, kar nakazuje na izboljšanje sprejemnosti na račun višjega deleža jeklenih vlaken.



Slika 35: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona HSC-1600-JV-0,75%.

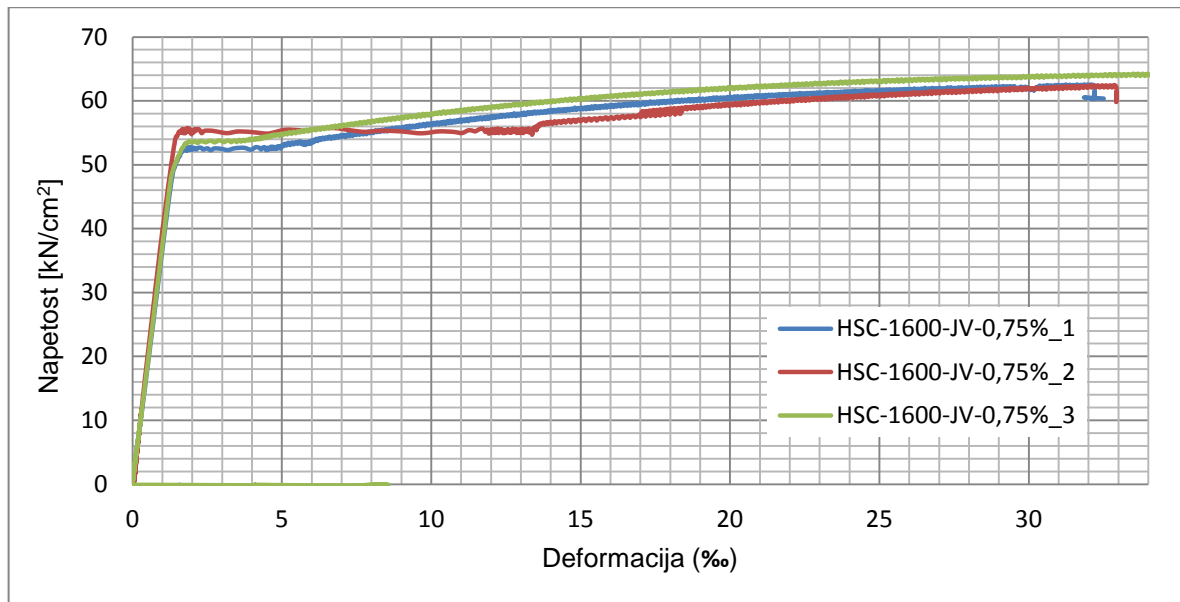
V preglednici 15 so prikazane dosežene vrednosti sprejemnih napetosti posameznih preizkušancev preiskovanega betona, povprečna vrednost ter vrednost standardne deviacije sprejemnih napetosti. Na podlagi rezultatov lahko zaključimo, da je raztros rezultatov zelo majhen in da s povečanjem deleža vlaken iste vrste dobimo bolj reprezentativne preizkušance. Upoštevati moramo, da bi bile vrednosti sprejemne napetosti precej višje kot pri preizkušancih, izdelanih iz enake betonske mešanice z manjšim deležem vlaken, saj v

našem primeru, zaradi omejitve hoda bata in zaradi plastičnega deformiranja armaturne palice, nismo dosegli maksimalnih sprijemnih napetosti.

Preglednica 15: Maksimalne vrednosti sprijemnih napetosti, HSC-1600-JV-0,75%.

HSC-1600-JV-0,75%	Maksimalna sprijemna napetost [kN/cm ²]	Povprečna sprijemna napetost [kN/cm ²]	Standardna deviacija sprijemne napetosti [kN/cm ²]
1	3,13	3,15	0,04
2	3,12		
3	3,21		

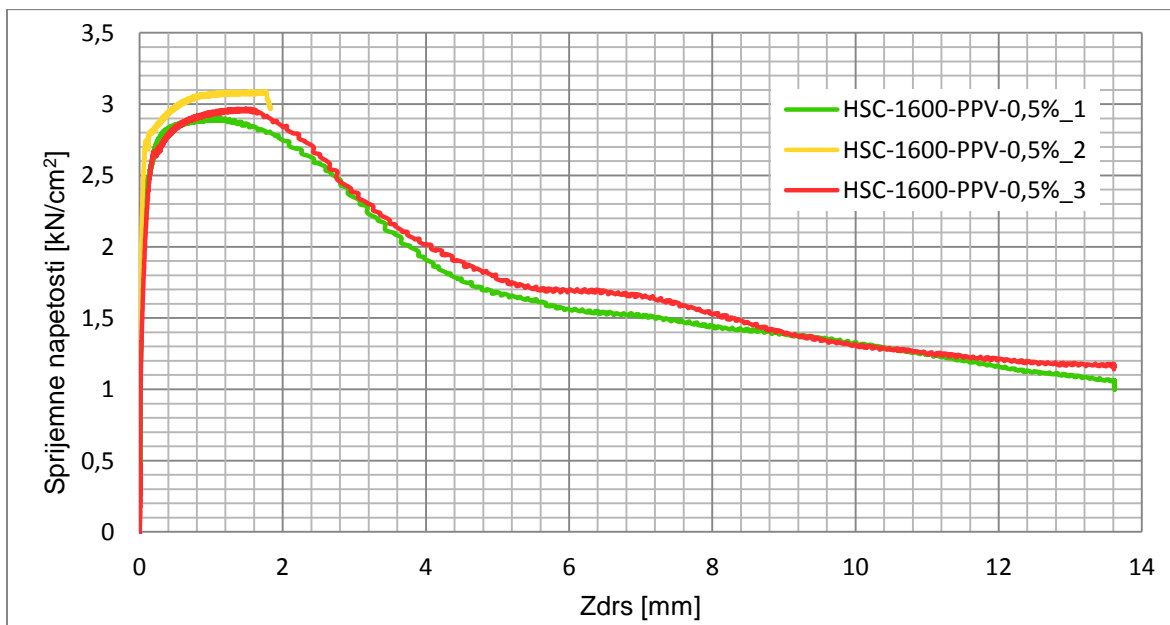
Tudi pri diagramu napetost-deformacija za armaturno palico lahko opazimo podobnost z grafom za preizkušance HSC-1600-JV-0,5%. Napetosti so se brez večjih deformacij palice povečevale do vrednosti 55 kN/cm², potem pa se je pričela plastifikacija armaturnega jekla. Plastifikacija se je najprej pričela pri preizkušancih 1 in 3.



Slika 36: Potek napetosti armaturne palice v odvisnosti od deformacije, HSC-1600-JV-0,75%.

5.8.3 Beton visoke trdnosti z 0,5% deležem polipropilenskih vlaken

Tudi pri preizkušancih z 0,5% deležem polipropilenskih vlaken smo dosegli podobne rezultate kot pri predhodnih preizkušancih z vsebnostjo jeklenih vlaken. Dosegli smo nekoliko nižje vrednosti sprijemnih napetosti, v primerjavi preizkušanci iz primerljive betonske mešanice z enakim prostorskim deležem jeklenih vlaken. Lahko sklepamo, da jeklena vlakna bolj pripomorejo k zvišanju sprijemnih napetosti med betonom in armaturo, saj bolj okrepijo stično območje med betonom in armaturno palico. Na sliki 37 lahko opazimo, da po zdrsu armature 1,5 mm, sprijemne napetosti padajo počasneje. Na podlagi tega dejstva sklepamo, da imajo polipropilenska vlakna boljši vpliv na zaklinjanje zdrobljenega betona na stičnem območju med betonom in armaturo. V primeru preizkušanca 2 smo sicer dosegli vrednost maksimalne sprijemne napetosti, vendar pa smo zaradi plastifikacije armaturne palice dobili le vrednosti do zdrsa 1,8 mm. Ker smo skupaj uporabili vlakna dolžine 6 mm in 18 mm v enakem razmerju, ne moremo sklepati, katera dolžina vlaken ima boljši vpliv na velikost sprijemnih napetosti.



Slika 37: Potek sprijemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona HSC-1600-PPV-0.5%.

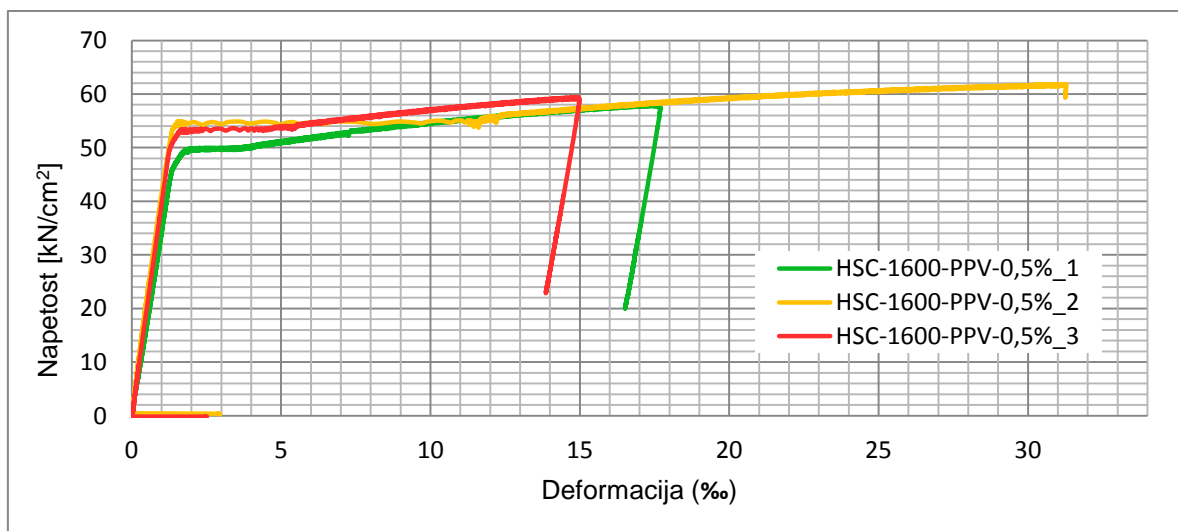
V preglednici 16 so tako kot v predhodnih primerih prikazane maksimalne vrednosti sprijemnih vrednosti posazmenih preizkušancev, njihova povprečna vrednost ter vrednost standardne deviacije sprijemnih napetosti.

Preglednica 16: Maksimalne vrednosti sprejemnih napetosti, HSC-1600-PPV-0,5%.

HSC-1600-PPV-0,5%	Maksimalna sprejemna napetost [kN/cm ²]	Povprečna sprejemna napetost [kN/cm ²]	Standardna deviacija sprejemne napetosti [kN/cm ²]
1	2,90	2,99	0,08
2	3,09		
3	2,97		

Opazimo lahko, da smo pri betonih z vsebnostjo polipropilenskih vlaken dosegli v povprečju 2,3% nižje vrednosti sprejemnih napetosti kot v primeru betona z enakim deležem jeklenih vlaken. V primerjavi z betonsko mešanico z 0,75% deležem jeklenih vlaken pa smo dosegli 5,4% nižje vrednosti sprejemnih napetosti, ob upoštevanju dejstva, da pri omenjeni mešanici z jeklenimi vlakni zaradi plastifikacije armaturne palice nismo dosegli maksimalnih vrednosti sprejemne napetosti. Tudi na podlagi standardne deviacije sprejemnih napetosti lahko ugotovimo, da beton visoke trdnosti z vsebnostjo polipropilenskih vlaken izkazuje največji raztros rezultatov.

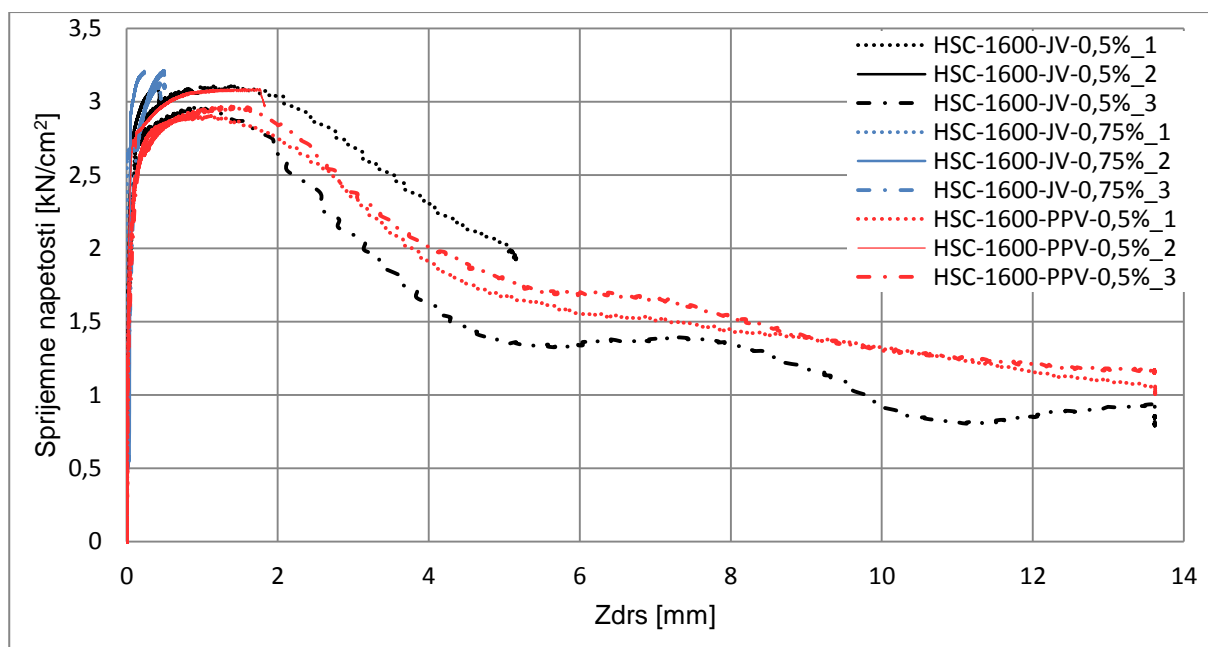
Slika 38 prikazuje zvezo napetost – deformacija za armaturno palico, ki je bila vgrajena v beton z vsebnostjo polipropilenskih vlaken. Pri napetosti okrog 50 kN/cm² opazimo plastificiranje armaturne palice, podobno kot pri predhodnih preizkušancih z vsebnostjo jeklenih vlaken.



Slika 38: Potek napetosti armaturne palice v odvisnosti od deformacije, HSC-1600-PPV-0,5%.

5.8.4 Primerjava sprijemnih napetosti preizkušancev betonov z različnim prostorninskim deležem in različno vrsto vlaken

Na sliki 39 so združene krivulje vseh devetih preizkušancev. Opazimo lahko, da vlakna v betonu povečujejo sprijemno napetost med betonom in armaturo. Opazno višje vrednosti dosegamo s povečanjem prostorninskega deleža vlaken v betonu. Z dodajanjem jeklenih ali polipropilenskih vlaken v enakem prostorninskem deležu dosegamo skoraj enake vrednosti sprijemnih napetosti. Vsi preizkušanci so dosegli maksimalno sprijemno napetost pri zdrsu palice med 1 in 2 mm. Vsi preizkušanci se po doseženi maksimalni vrednosti sprijemnih napetosti obnašajo podobno.



Slika 39: Primerjava poteka sprijemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za različne vrste in deleže vlaken.

Primerjavo doseženih sprijemnih trdnosti prikazuje tudi preglednica 17. V preglednici so kot primerljivi podatki dodatno vpisani tudi rezultati povzeti po diplomu z naslovom Sprijemnost med betonom in armaturo, katere avtor je študent univerzitetnega programa gradbeništva, Andraž Dežman. Za svoje raziskave sva ravno zaradi primerljivosti rezultatov uporabila betonske mešanice z enako osnovno recepturo. V preglednici 17 se sklicujem na rezultate sprijemne napetosti primerljivega visokotrdega betona HSC-1600 brez dodanih vlaken iz poglavja 4 z naslovom Eksperimentalni del (A. Dežman, 2015).

Preglednica 17: Maksimalne sprejemne napetosti vlaknastih visokotrdnih betonov in primerljivega betona visoke trdnosti brez vlaken.

Oznaka betona	Povprečna sprejemna napetost [kN/cm ²]	Povečanje sprejemne trdnosti glede na primerljivi beton HSC-1600 [%]
HSC-1600-JV-0,5%	3,06	6,99
HSC-1600-JV-0,75%	3,15	10,14
HSC-1600-PPV-0,5%	2,99	4,55
HSC-1600	2,86	0,00

Kot je razvidno iz preglednice 17, vsebnost vlaken v betonu visoke trdnosti prispeva k povečanju odpornosti na izvlek armature iz betona. Ker beton v območju armaturne palice pri preizkušancih z 0,75% prostorninskim deležem jeklenih vlaken ni popuščal in smo morali preizkus zaključiti pred poružitvijo stika, lahko sklepamo da bi ti trije preizkušanci dosegli vrednost sprejemne napetosti okoli 3,5 kN/cm². S to vrednostjo bi se sprejemna trdnost glede na primerljiv visokotrdni beton povečala za 20%.

6 ZAKLJUČEK

Diplomska naloga obravnava sprejemnost med visokotrdnim vlaknastim betonom in armaturo. Z raziskavami smo poskušali ugotoviti, kako vrsta in količina vlaken v betonski mešanici vpliva na sprejemnost med betonom in armaturo. Za potrebe diplomskega dela smo zasnovali preizkus izvleka armaturne palice iz betonske kocke po navodilih standarda SIST EN 10080:2005. Uporabili smo armaturno palico običajne kvalitete s premerom 12 mm. Izdelali smo kalup iz vodoodporne vezane plošče, ki omogoča hkratno betoniranje devetih preizkušancev v obliki kocke z robom 20 cm. Preizkušance smo izdelali iz treh različnih betonskih mešanic, spreminjali smo prostorninski delež in vrsto uporabljenih vlaken. Pri univerzalni preizkuševalni napravi Instron v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo smo prilagodili ležišča za naleganje naših preizkušancev. Standardni izvlečni test smo izvedli pri starosti betona 28 dni. Obdelali smo dobljene rezultate preiskav in prišli do naslednjih ugotovitev:

- 1) Zaradi dobrih sprejemnih pogojev in sidrne dolžine 5d pri nekaterih preizkušancih nismo dosegli porušitve na območju stika armaturne palice in betona. Merodajen je bil pomik spodnjega hidravličnega bata, ki smo ga pred preizkusom omejili na 50 mm. Najbolj je to opazno pri preizkušancih iz betonske mešanice, ki so vsebovali najvišji delež jeklenih vlaken. V tem primeru je prišlo do plastifikacije armaturne palice predno je bil porušen stik med betonom in armaturo.
- 2) Najvišje sprejemne trdnosti je imel beton, ki je vseboval 0,75% prostorninskega deleža jeklenih vlaken. Do podobnih ugotovitev smo prišli tudi pri standardnem enosnem tlačnem preizkusu. Z večjim deležem vlaken v betonu se izboljšujejo tudi mehanske lastnosti otrdelega betona.
- 3) Pri vseh preizkušancih so maksimalne vrednosti sprejemnih napetosti povzročile zdrs armaturne palice, ki je znašal med 1 in 2 mm. Podobne ugotovitve je mogoče zaslediti pri primerljivih preizkusih z strani nekaterih tujih raziskovalcev.
- 4) Betoni z vsebnostjo jeklenih vlaken so dosegli v povprečju višje vrednosti sprejemnih napetosti kot betoni z enako vsebnostjo polipropilenskih vlaken.
- 5) Pri vseh preizkušancih, ki so razvili celoten potek diagrama »sprejemna napetost – zdrs«, lahko pri zdrsu okoli 5 mm opazimo ponovno rahlo naraščanje sprejemnih napetosti τ do vrednosti približno $0,5 \tau_{max}$.

VIRI

ACI Committee 544.1R-96. State-of-art report on fiber reinforced concrete, Farmington hills, American concrete institute: 66 p.

Appa Rao, G., Pandurangan, K., Sultana, F., Eligehausen, R. 2007. Studies on the pull-out strength of ribbed bars in high-strength concrete: proceedings of the FraMCoS-6, Catania, Italy, 2007. Chennai, Indian Institute of Technology Madras, Stuttgart, University of Stuttgart: 6 p.

Bandelj, B. 2010. Reološke lastnosti vlaknastih betonov. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Konstrukcijska smer (samozaložba B. Bandelj): 223 str.

Bentur, A., Mindess, S. 2007. Fibre reinforced cementitious composites. 2nd edition. Abingdon, Taylor and Francis: 624 p.

Brodnik, A. 2010. Tehnološki in organizacijski vidik gradnje z mikroarmiranimi betoni z jeklenimi vlakni. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Operativna smer (samozaložba A. Brodnik): 96 str.

Comité Euro-International du Béton. 1993. CEB-FIP MODEL CODE 1990, Design Code, Thomas Telford: loč. pag.

Dežman, A. 2015. Sprijemnost med betonom in armaturo. Diplomaska naloga v izdelavi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Dežman): 34 str.

Gan, Y. 2000. Bond stress and slip modeling in nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures. PhD thesis. Toronto, University of Toronto, Departement of Civil Engineering. 251 p.

Izjava o lastnostih cementa CEM II/A-S 42,5 R. 2013. Anhovo, Salomit Anhovo: loč. pag.

Muravljov, M. 2007. Građevinski materijali. 6 izd. Beograd, Građevinska knjiga: 587 str.

Neville, A. M. 2011. Properties of concrete. 5th edition. Harlow, Pearson Education Limited: 846 p.

Poročilo o preiskavi kamnine iz kamnoloma Ušenišče. 1997. Ljubljana, IGMAT: loč. pag.

Saje, D. 1997. Posebnosti betonov visoke trdnosti. Magistrska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer (samozaložba D. Saje): 90 str.

Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 157 str.

SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.

SIST EN 206-1: 2003. Beton – 1. del: Specifikacija, lastnost, proizvodnja in skladnost.

SIST EN 1991-1-1:2004. Evrokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcij-1-1. Del: Splošna pravila in pravila za stavbe.

SIST EN 10080:2005. Jeklo za armiranje betona – Varivo armaturno jeklo – Splošno.

SIST EN 14889-1:2006. Vlakna za beton – 1. del: Jeklena vlakna – definicija, specifikacije in skladnost: 26 str.

SIST EN 14889-2:2006. Vlakna za beton – 2. del: Polimerna vlakna – definicija, specifikacije in skladnost: 27 str.

Šušteršič, J. 1998. Vlaknasti betoni visokih uporabnih svojstava. Disertacija. Zagreb, Sveučilište v Zagrebu, Građevinski fakultet: 211 str.

Šušteršič, J. 1998. Učinkovitost vlaken v mikroarmiranih betonih. V: Nova spoznanja pri proizvodnji in uporabi betonskih mešanic, Gornja Radgona, 14. april. 1999, Zbornik referatov: str. 37-46.

Tehnični list Cementol Antikorodin. 2005. TKK, Serpenica

http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni_listi/cementol/antikorodin_slo.pdf (Pridobljeno 25. 8. 2015.)

Zajc, A. 1994. Mikroarmirani betoni. V: Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, Slovenija, 26. maj. 1994. Ljubljana: IRMA: str. 9 – 13.

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.