

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:

Selak, G., 2016. Vpliv jeklenih vlaken na sprejemnost med armaturo in betonom običajne trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D., somentor Lopatič, J.): 47 str.

Datum arhiviranja: 20-09-2016

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:

Selak, G., 2016. Vpliv jeklenih vlaken na sprejemnost med armaturo in betonom običajne trdnosti. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D., co-supervisor Lopatič, J.): 47 pp.

Archiving Date: 20-09-2016

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 ŠTUDIJSKI  
PROGRAM GRADBENIŠTVO  
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidat:

**GAŠPER SELAK**

**VPLIV JEKLENIH VLAKEN NA SPRIJEMNOST MED  
ARMATURO IN BETONOM OBIČAJNE TRDNOSTI**

Diplomska naloga št.: 585/KS

**THE INFLUENCE OF STEEL FIBRES ON BOND  
BETWEEN REBAR AND NORMAL STRENGTH  
CONCRETE**

Graduation thesis No.: 585/KS

**Mentor:**

doc. dr. Drago Saje

**Somentor:**

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 14. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

Spodaj podpisani/-a študent/-ka Gašper Selak, vpisna številka \_26106053, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Vpliv jeklenih vlaken na sprijemnost med armaturo in betonom običajne trdnosti

### IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*

- a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
- b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;

5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Podpis študenta/-ke:

\_\_\_\_\_

## BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2(497.4)(043.2)
Avtor:	Gašper Selak
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Somentor:	izr. prof. dr. Jože Lopatič
Naslov:	Vpliv jeklenih vlaken na sprijemnost med armaturo in betonom običajne trdnosti
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	47str., 23sl., 14pregl., 5en.
Ključne besede:	izvlečni test, sprijemna napetost, beton običajne trdnosti, vlaknasti beton

### Izvleček

V okviru diplomske naloge smo preiskovali vpliv jeklenih vlaken na sprijemno trdnost med armaturno palico premera 20 mm in betonom običajne trdnosti z vodovezivnim razmerjem 0,52 ter vpliv jeklenih vlaken na tlačno trdnost betonov. Preiskovani betoni so vsebovali enako količino jeklenih vlaken in se razlikovali glede vrste vsebovanega cementa. Primerjalni beton ni vseboval jeklenih vlaken. Uporabili smo tri različne vrste cementov. Med sabo so se razlikovali po deležu cementnega klinkerja. Osnovni cement je vseboval 65% klinkerja, specialni 80% in čisti portlandski cement 95%. Osnovne recepture betonov temeljijo na recepturah iz doktorske naloge dr. Draga Sajeta iz leta 2001. Na svežem betonu smo izvedli tudi ustrezne standardne teste. Ugotovili smo, da imajo jeklena vlakna na sprijemno trdnost med betonom in armaturo največji vpliv pri betonih, ki so vsebovali osnovni portladski cement.

## **BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

<b>UDK:</b>	624.014.2(497.4)(043.2)
<b>Author:</b>	Gašper Selak
<b>Supervisor:</b>	Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D.
<b>Co-supervisor:</b>	Assoc. Prof. Jože Lopatič, Ph.D.
<b>Title:</b>	The influence of steel fibres on bond between rebar and normal strength concrete
<b>Document type:</b>	Graduation Thesis – Higher professional studies
<b>Notes:</b>	47p., 23fig., 14tab., 5eq.
<b>Key words:</b>	pull-out test, bond stress, normal-strength concrete, fibre-reinforced concrete

### **Abstract**

The thesis examines the influence of steel fibres on the bond strength between a reinforcing steel bar with a diameter of 20 mm and standard-strength concrete with a water-binder ratio of 0.52 and the influence of steel fibres on the compressive strength of different types of concrete. The types of concrete researched contained an identical amount of steel fibres and only differed in type of cement used. The control concrete contained no steel fibres. Three types of cement were used, differing from each other in the amount of cement clinker. The standard cement contained 65% of clinker, the special cement contained 80% and the pure Portland cement contained 95%. The basic formulations of the mixtures were based on the formulations from Drago Saje's doctoral thesis from 2001. Appropriate standard tests were also carried out on fresh concrete. We have found that the effect of steel fibres on the bond strength between concrete and rebar was greatest in those types of concrete that contained standard Portland cement.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorju doc. dr. Dragu Sajetu za pomoč in nasvete pri nastajanju diplomske naloge. Pri raziskovalnem delu v laboratoriju se za pomoč zahvaljujem Nejcju Legatu in laborantu Igorju Valjavcu. Za pomoč pri izvajanju izvlečnega testa se zahvaljujem izr. prof. dr. Jožetu Lopatiču. Zahvaljujem se družini in prijateljem, ki so mi v času študija stali ob strani.

---

KAZALO VSEBINE

IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA	V
1. <b>UVOD</b> .....	1
2. <b>SPLOŠNO O BETONU</b> .....	1
2.1. AGREGAT .....	2
2.2. CEMENT.....	2
2.2.1. OZNAKE CEMENTA.....	3
2.3. VODA .....	3
2.4. DODATKI BETONU .....	4
2.4.1. MINERALNI DODATKI.....	4
2.4.2. KEMIČNI DODATKI .....	6
3. <b>MIKROARMIRANI BETONI</b> .....	6
3.1. NARAVNA VLAKNA .....	7
3.2. KOVINSKA VLAKNA .....	8
3.3. MINERALNA VLAKNA .....	9
3.4. SINTETIČNA VLAKNA.....	10
3.5. PROPILENSKA VLAKNA.....	11
4. <b>SPRIJEMNOST MED ARMATURO IN BETONOM</b> .....	11
4.1. MEJNA SPRIJEMNA NAPETOST .....	13
4.2. OSNOVNA SIDRNA DOLŽINA .....	14
5. <b>EKSPERIMENTALNI DEL</b> .....	14
5.1. ZASNOVA EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE .....	14
5.2. UPORABLJENI MATERIALI .....	15
5.2.1. AGREGAT .....	15
5.2.2. CEMENT.....	16
5.2.3. JEKLENA VLAKNA.....	17
5.2.4. REBRATA PALICA .....	18
5.4. TESTIRANJA UPORABLJENEGA BETONA .....	20
5.5. REZULTATI TESTIRANIH SVEŽIH BETONOV .....	23
5.6. TLAČNA TRDNOST BETONOV .....	24
5.7. EZULTATI TLAČNEGA PREIZKUSA BETONOV.....	25
5.8. IZVLEČNI TEST PO STANDARDU SIST EN 10080: DODATEK D.....	27
5.9. VGRAJEVANJE SVEŽIH BETONSKIH MEŠANIC.....	28



Selak, G. 2016. Vpliv jeklenih vlaken na sprijemnost med armaturo in betonom ...  
Dipl. nal. – VSS. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

---

5.10. IZVLEČNI TEST IZVEDEN V LABORATORIJU .....	29
5.11. REZULTATI PREISKAV .....	30
5.12. PREIZKUŠANCI IZ BETONA BETON-A .....	31
5.13. PREIZKUŠANCI IZ BETONA BETON-B .....	34
5.14. PREIZKUŠANCI IZ BETONA BETON-C .....	40
6. <b>ANALIZA REZULTATOV EKSPERIMENTALNIH PREISKAV</b> .....	44
7. <b>ZAKLJUČEK</b> .....	45
VIRI .....	46

---

## KAZALO SLIK

Slika 2.0 Povprečna sestava betona (how-concrete-is-made).....	2
Slika 2.21: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN197-1:2001 .....	3
Slika 2.4.1: Mikroskopski posnetek mikrosilike ( <i>Institut für Bauingenieurwesen</i> ).....	5
Slika 3.1: Kokosova vlakna v betonu (Libo Yan, 2013 ).....	8
Slika 3.2: Jeklena mikrovlakna v betonu (Niko) .....	9
Slika 3.3: Stekljena vlakna (Lorenčič) .....	10
Slika 3.4: Sintetična vlakna v betonu (Tornadoplus).....	11
Slika4.: Rebrasta armaturna palica (DIN488-2, 1984) .....	12
Slika 4.01: Prečni prerez, nastanek cepilnih razpok (Juan Murcia-Delso, 2011).....	13
Slika 4.02: Področje zdrobljenega betona (1), mikro razpoke (2), zdrs (3) (Juan Murcia- Delso, 2011) .....	13
Slika 4.1: Pogoji sidranja po EC2 .....	14
Slika 5.2.4: Rebra z ene in druge strani .....	18
Slika 5.40: Prikaz merjenja poseda svežega betona. ....	21
Slika 5.41: Merjenje razleza sveže betonske mešanice .....	21
Slika5.42: Porozimeter .....	22
Slika 5.6: Sveži beton, vgrajen v kalupe za preizkus tlačne trdnosti. ....	25
Slika 5.70: Porušitev betona pri enosnem tlačnem preizkusu.....	26
Slika 5.80: Prikaz izvlečnega testa po standardu SIST EN 10080.....	27
Slika 5.90: 3D-model kalupa (Dežman 2015).....	28
Slika 5.91: Prikaz kalupa z že vgrajenimi tremi preizkušanci.....	29
Slika5.10: Prikaz izvlečnega testa v laboratoriju.....	30
Slika 5.142: Prikaz razcepa betona pri izvleku armaturne palice.....	41

---

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 5.2.1: Lastnosti kremenčeve mivke (Termit iz Moravč.)	15
Preglednica 5.2.20: Kemijske in mehanske zahteve za cement 42,5 specialni (Salonit Anhovo)	16
Preglednica 5.2.21: Kemijske in mehanske zahteve za cement 42,5osnovni (Salonit Anhovo)	17
Preglednica 5.2.22: Kemijske in mehanske zahteve za CEM I_52_5R (Salonit Anhovo)	17
Preglednica 5.3.0: Sestava preiskovane mešanice za BETON-C	19
Preglednica5.3.01: Sestava preiskovane mešanice za BETON -C–JV 1 %	20
Preglednica 5.51: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona, ki je vseboval cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R –BETON-A	23
Preglednica 5.52: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona, ki je vseboval cement CEM II/B-M (LL-V) 42,5N	23
Preglednica 5.50: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona, ki je vseboval cement CEM I-52R	24
Preglednica 5.70: Rezultati tlačne trdnosti betona	25
Preglednica 5.71: Rezultati tlačne trdnosti vlaknastega betona	26
Preglednica 5.12: Primerjava sprejemne trdnosti in napetosti v palici pri betonu z vlakni in brez njih.	34
Preglednica 5.13: Primerjava sprejemnih trdnosti in napetosti palicah pri preizkušancihz vlakni in brez njih	39
Preglednica 5.14: Primerjava sprejemnih napetosti in napetostih v palicah pri preizkušancih z vlakni in brez njih	44

## KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 5.121: Diagram sprejemnih napetosti -zdrs za preizkušance iz betona BETON-A	32
Grafikon 5.122: Diagram sprejemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-A-JV 1 % (l=30mm)	33
Grafikon 5.123: Potek napetosti v odvisnosti od deformacije armature	33
Grafikon 5.13: Diagram sprejemnih napetosti -zdrs za preizkušance iz betona BETON-B	35
Grafikon 5.131: Potek napetosti armature v odvisnosti od njene deformacije	36
Grafikon 5.132: Diagram sprejemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-B in betona BETON-B JV 1 % (l=30mm)	37
Grafikon 5.133: Potek napetosti armature v odvisnosti od njene deformacije	38
Grafikon 5.141: Diagram sprejemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-C	40
Grafikon 5.142: Diagram sprejemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-C- JV 1 % (l=30mm).	41
Grafikon 5.144: Potek napetosti armature v odvisnosti od njene deformacije	42
Grafikon 5.145: Diagram sprejemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETONA-C JV 1 % (l=30mm) in betona BETONA-C	43

## 1. UVOD

Morda je bil prvi pojav cementa znan že pred dvanajstimi milijoni let. Depozit cementa je nastal po nastanku naftnega skrilavca, ki je bil v bližini nahajališča apnenca in se je zažgal iz naravnih razlogov. Običajni betoni segajo tisoče let nazaj. Betonu podobne materiale so pred 6.500 leti pred našim štetjem uporabili Nabataei, trgovci ali Beduini, ki so zasedali številne oaze in s tem razvili majhen imperij v religijah južne Sirije in severni Jordaniji. Rimljani so agregatu dodali vulkanski pepel in vodo, s čimer so dobili beton. Rimljani so izdelovali tudi mikro armirani beton, za mikro armaturo pa so uporabili konjsko dlako. Tako izdelan beton je manj pokal. (wikipedia)

Beton je eden izmed najbolj trajnih gradbenih materialov. Zagotavlja vrhunsko požarno odpornost v primerjavi z leseno konstrukcijo. Strukture iz betona imajo lahko dolgo življenjsko dobo. Beton je najbolj uporabljen gradbeni material na svetu, saj ima visoko tlačno trdnost in nizko natezno trdnost. Njegove slabe lastnosti pa so: majhna upogibna trdnost, natezna trdnost, strižna trdnost, udarna trdnost ter krčenje in lezenje.

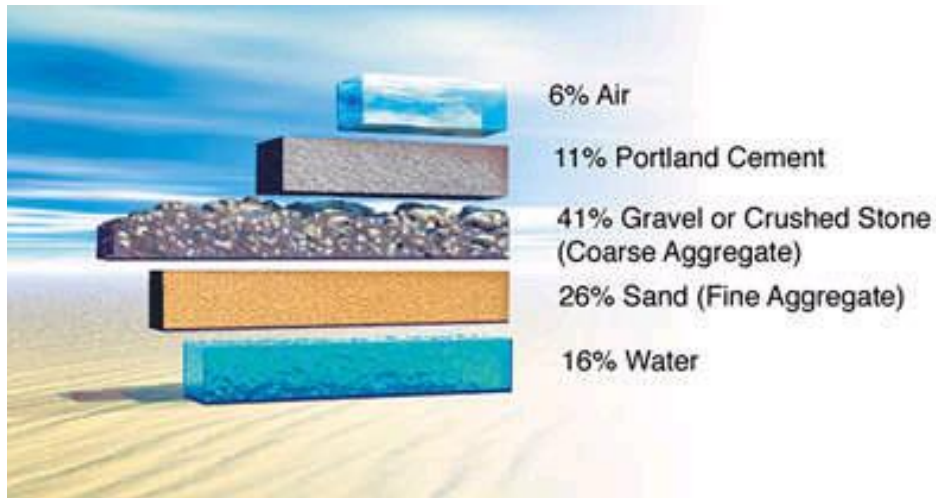
Nekaj slabih lastnosti betona lahko popravimo z mikro armiranjem betona. Mikrovlakna so običajno relativno enakomerno porazdeljena in obrnjena v vseh smereh v betonu. Vlakna v betonu ne morejo nadomestiti statične armature, vendar pa se v nekaterih primerih, kot na primer, če je beton na tleh, lahko uporabi mikro armirani beton brez tradicionalne armature, če se dokaže, da izpolnjuje vse zahteve standardov. Vlakna so lahko iz jekla, stekla, sintetičnih in naravnih materialov. Mikro armirani beton se največkrat uporablja za pločnike, parkirišča, tla, vzletno-pristajalne steze, bazene, fundacije, montažne elemente za predore in podobno. Mikro armirani betoni so nekoliko slabše vgradljivi, zato moramo bit pri vgradnji pazljivi, da med betonom ni večjih praznin

V okviru diplomske naloge smo raziskovali, kakšne prednosti ima mikroarmirani beton na področju tlačne trdnosti ter sprijemnost betona in armature. V diplomski nalogi smo najprej naredili preizkušance iz treh različnih cementov brez vlaken in jih preizkušali. To so bili primerjalni betoni. Nato smo naredili še mikroarmirane preizkušance iz treh različnih cementov, ki smo jih uporabili že predhodno in jih preizkušali. Za mikro armaturo smo uporabili jeklena vlakna.

## 2. SPLOŠNO O BETONU

Beton je keramični kompozitni material, pri katerem je agregat polnilo v matrici iz cementnega kamna. Cementni kamen nastane v procesu strnjevanja in hidratacije cementne paste. Cementna pasta nastane z mešanjem vode cementa in dodatkov, s katerimi se uravnavajo lastnosti betona. Betonska struktura vsebuje določeno število odprtih in zaprtih por, ki jih zapolnjuje zrak.

Slika 2.0 Povprečna sestava betona (how-concrete-is-made)



## 2.1. AGREGAT

Agregat za uporabo v betonu pridobivamo iz rečnih nanosov in z drobljenjem večnih kosov kamna. Agregat rečnih nanosov so zrna bolj okroglaste oblike in so zato betoni lažje vgradljivi, pri drobljencu pa so zrna bolj kvadrataste oblike, zato je beton težje vgradljiv, vendar se z drobljenim agregatom običajno dosegajo višje trdnosti. Po mineralni sestavi jih ločimo glede na to, iz katerih kamenin jih pridobivamo. Agregate iz magmatskih kamenin odlikujeta visoka trdnost in obrabna sposobnost. Apnenčev agregat je v Sloveniji zelo razširjen, odlikuje ga nizka cena pridobivanja (rečni nanosi in dokaj enostavno drobljenje agregata).

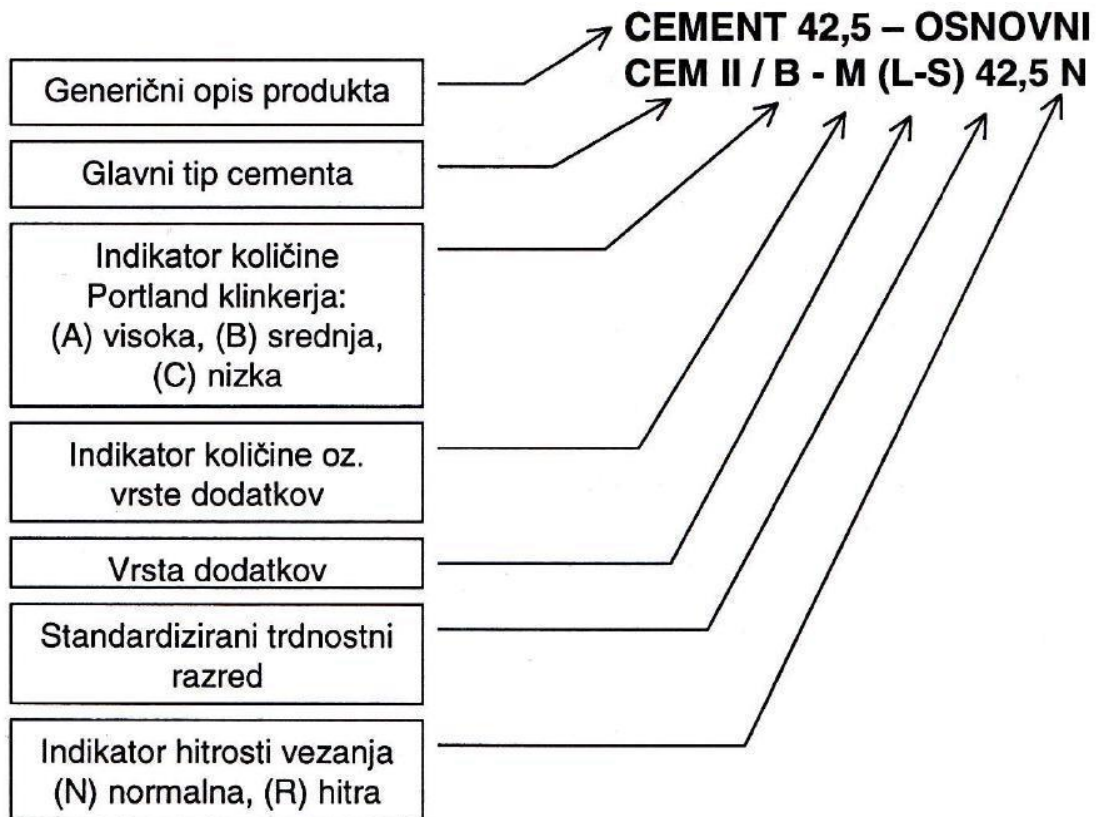
## 2.2. CEMENT

Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo veže in se strdi. Pri tem iz žindre cementne paste nastane trden cementni kamen, ki je sestavljen pretežno iz kalcijevih silikatnih hidratov, zato tudi v vodi ohrani stabilnost in trdnost. (Žarnić 2003)

V gradbeništvu se največ uporablja portlandski cement, ki ga dobimo z žganjem naravnega laporja, apnenca in gline. Osnovne surovine za pridobivanje cementa portland vsebujejo okside kalcija ( $\text{CaO}$ ), silicija ( $\text{SiO}_2$ ), aluminijskega ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in železa ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Z žganjem osnovnih surovin med  $1300$  in  $1500$  °C nastane klinker, ki ga sestavljajo štiri glavni minerali. (Saje, 2001)

### 2.2.1. OZNAKE CEMENTA

Cement se označuje po standardu SIST EN197-1:2001



Slika 2.21: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN197-1:2001

Vrste cementov in oznake dodatkov v cementu najdemo v knjigi Lastnosti gradiv Roka Žarniča na stani 88.

### 2.3. VODA

Voda je ena od osnovnih sestavin v betonu. Brez vode ne bi bilo hidratacije cementa. Voda omogoča potrebno viskoznost betonske mešanice za vgradnjo in obdelovanje betona. Betonsko mešanico lahko pripravimo iz pitne vode. Za prednapete konstrukcije in bolj občutljive konstrukcije moramo vodo dati na analizo zaradi občutljivosti visoko trdnih jekel za kable. Drobni delci gline organskih snovi in soli, ki jih vsebuje voda, naredijo prevleko na agregatu in tako onemogočijo, da bi se agregat in cementna pasta povezala. Vpliv vode na trdnost lahko primerjamo s preizkušanjem cementne paste znane in neznanne vode s preizkusi prizem.

Bolj kot izvor vode je pomembno vodocementno razmerje. Idealno je  $v/c=0,38$ . V praksi to vodocementno razmerje brez drugih dodatkov po navadi ne zadošča, saj del vode izhlapi, hidratacija pa bi potekala tudi več let.

Glede na velikost vodocementnega razmerja so možni trije primeri: (Žarnić 2003)

- $v/c < 0,38$  premalo vode za popolno hidratacijo cementa in zato del cementa ostane nevezan v praškastem stanju;
- $v/c = 0,38$  idealne razmere, ves cement hidratizira;
- $v/c > 0,38$  vsa odvečna voda se namesti v kapilarnih porah.

## 2.4. DODATKI BETONU

Dodatki v betonu so snovi, ki spremenijo lastnosti svežega in strjenega betona. Dodajajo se v zelo majhnih količinah glede na količino cementa. S kemičnim in fizikalnim delovanjem zelo učinkovito spreminjamo lastnosti betonske mešanice.

Namen dodajanja dodatkov je:

- povečati obdelanosti in vgrajevanje betona,
- zaščititi armature v betonu,
- barvati beton,
- izboljšati povezovanje med stiki betona,
- povečati trdnost,
- zmanjšati prepustnost betona,
- povečevati udarno in erozijsko odpornost,
- povečati trajnost betona,
- preprečiti zmrzovanje svežega betona,
- pospešiti ali zavlačevati začetek vezanja betona,
- zmanjševati segregacijo,
- izboljšati črpnost betona,
- zadrževati in zmanjšati toploto zaradi hidratacije in
- zmanjševati izgubo obdelanosti.

Dodatke razvrstimo v dve skupini:

- kemijske dodatke in
- mineralne dodatke.

### 2.4.1. MINERALNI DODATKI

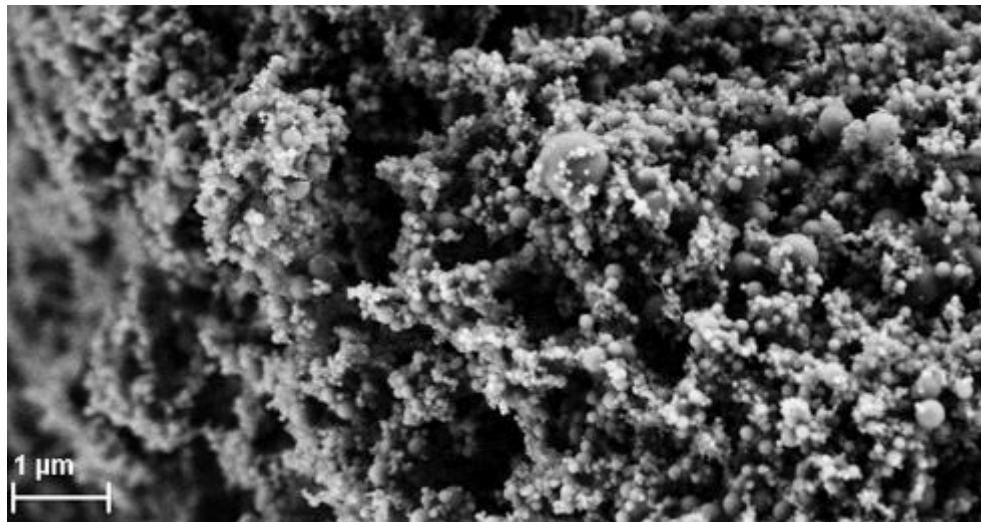
Mineralni dodatki se dodajajo betonu v večjih količinah. Sem lahko uvrščamo drobno mlete pucolane, granulirano žlindro visokih peči, elektrofiltrski pepel, odpadni prah pri proizvodnji ferosilicija in silicija ter apnenec. Pri nas se najpogosteje dodajajo v proizvodnji cementa, s čimer se zmanjša poraba energije. Poleg tega imajo ugoden vpliv na tehnične lastnosti betona, kot so termične lastnosti, kemična odpornost, pojav razpok, izboljšanje obdelavnosti svežega betona in tudi trdnost. (Saje 2015)



- Mikrosilika

Mikrosilika je stranski proizvod za proizvodnjo silicijevih kovin ali ferosilicija. Ena izmed najbolj koristnih uporab mikrosilike v praksi je uporaba le te v betonu. Beton, ki vsebuje mikrosiliko, doseže lahko zelo visoke trdnosti in je običajno zelo obstojen. Mikrosilika je sestavljena predvsem iz amorfnega silicijevega dioksida ( $\text{SiO}_2$ ). Posamezni delci so zelo majhni, približno 1/100 velikosti povprečnega cementnega delca.

Delci mikrosilike imajo večjo specifično površino kot cement in s tem vežejo nase več vode. S tem se zmanjša mobilnost vode v betonu, kar zmanjša možnost nastanka segregacije betona in izločanje vode. Zaradi tega je mikrosilika odličen stabilizator. Mikrosiliko se kot dodatek cementu uporablja za betone z visokimi zahtevami glede nepropustnosti. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002).



Slika 2.4.1: Mikroskopski posnetek mikrosilike (*Institut für Bauingenieurwesen*)

- Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel se ustvari v termo elektrarnah pri kurjenju premoga iz dimnih plinov. V matrici cementa ga je lahko od 5 % do 25 %. Treba je poudariti, da zamenjava z cementom zmanjša tlačno trdnost betona in je strjevanje betona počasnejše. Delci elektrofiltrskega pepela so skoraj v celoti okrogle oblike. Elektrofiltrski pepel močno izboljša trajnost betona, zapolnitev por v betonu, toplotno odpornost, črpanje betona in odpornost za kloride in sulfate. Izkoriščanje elektrofiltrskega pepela kot delne zamenjave cementa je pomembno z ekonomskega vidika, okoljskega vidika in tehničnih prednosti, kot so zmanjšanje količine odpadnih materialov za čistejšo okolje, zmanjšanje energijske porabe in boljša obstojnost betona med življenjsko dobo.

- Granulirana plavžna žindra

Žindra je industrijski stranski proizvod za proizvodnjo surovega železa iz železove rude v plavžih. Surovo železo se razgradi iz staljenega železa in staljene žindre, ko se tali pri

temperaturi 1500 °C skupaj z apnencem v plavžu. Staljeno žlindro ohladimo in sušimo z granulacijo, da jo lahko uporabimo kot vezivo in pretvorimo v amorfnu fazo. Ker ta amorfnu žlindra vključuje zadostno količino silicijevega dioksida in aluminijevega oksida, je razvidnih tudi nekaj hidravličnih lastnosti, zaradi česar dobimo drobnozrnato strukturo. Z žlindro lahko nadomestimo 70 % cementnega klinkerja. Granulirana plavžna žlindra ima ugodne lastnosti pri betonu, in sicer: (Bolu cemento)

#### **pri svežem betonu**

- poveča pretočnost;
- omogoča izvedljivost in poravnave;
- poveča neprepustnost;
- zmanjša potrebo po vodi;
- zmanjša krče, če jo sušimo;
- zmanjša toploto hidratacije;
- upočasnjuje razvoj toplote;
- poveča gostoto betona;
- omogoča uporabo grobega agregata večjih količin.

#### **pri strjenem betonu**

- poveča vzdržljivost;
- poveča končno odpornost;
- poveča življenjsko dobo betona (cca. 200 let);
- zmanjša alkalne reakcije kremenca pri agregatu;
- poveča odpornost na agresivno okolje (, sulfat, klorid);
- poveča odpornost na visoko temperaturo;
- zmanjšuje toplotne razpoke;
- preprečuje širjenje škodljivih tekočin in plinov;
- poveča odpornost proti zmrzovanju,

### **2.4.2. KEMIČNI DODATKI**

Kemijske dodatke razdelimo glede na vpliv na beton: (Kosmatka, 2002)

Kemični dodatki v betonu so opisani v učbeniku Tehnologija betona na strani 22-23 (Saje 2015)

## **3. MIKROARMIRANI BETONI**

Beton portland je krhek material in ima zelo nizko natezno trdnost, omejeno duktilnost in majhno odpornost na pokanje. Notranje mikro razpoke, prisotne v betonu, slabe trdnosti betona in združevanje mikro razpok vodijo do krhkega betona. Mikro razpoke v betonu nastanejo zaradi sušenja betona, krčenja betona in drugih vzrokov. Zaradi obremenitev, se notranje razpoke širijo. Razvoj teh razpok je vzrok neelastičnih deformacij v betonu.

Dodajanje vlaken v beton, ki so neenakomerno porazdeljena v betonu, deluje kot odvodnik razpok in izboljšuje njegove statične in dinamične lastnosti. vlakna povečajo tudi strukturno učinkovitost betona. vlakna v betonu preprečujejo nadaljnje razmnoževanje mikrorazpok,

povečajo trdnost ter zmanjšajo plastično krčenje in krčenje zaradi sušenja betona. Mikrovlakna ne morjo v celoti nadomestiti statično potrebne armature v betonu.

Vlakna , ki se uporabljajo za mikroarmiranje betona, so:

- naravna vlakna,
- kovinska vlakna,
- mineralna vlakna in
- sintetična vlakna.

### 3.1. NARAVNA VLAKNA

Beton, ojačen z naravnimi vlakni, je zelo star kompozit. Uporaba naravnih vlaken je v mikroarmiranih betonih malo uporabljena.

V zadnjih letih se zaradi večje skrbi za okolje izkoriščanje vlaken iz naravnih virov (tj. rastlinska vlakna) namesto drugih vlaken uporablja vedno pogosteje. Naravna vlakna, na primer lan, konoplja, juta, kokos in sisal, so stroškovno učinkoviti, imajo visoko specifično moč in posebno togost. Lanena vlakna nateznih lastnosti so med različnimi naravnimi vlakni primerljiva s tistimi iz steklenih vlaken.

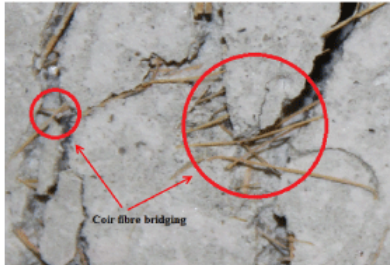
Lan ponuja najboljšo morebitno kombinacijo nizkih stroškov, majhno težo in visoko trdnost ter togost za gradbene namene. Študija o vlaknih armiranega betona je pokazala, da lahko kratka naravna vlakna spremenijo natezno in upogibno trdnost, žilavost, odpornost na udarce in energijo loma, kadar se uporabljajo v betonskih mešanica. Ugotovljeno je bilo, da rastlinska vlakna (npr. sisal, konoplja, kokos, banane in sladkorni trs sladkornega trsa itd.) lahko uporabimo kot okrepitev za betonske elemente. Kokosova vlakna so zaradi visoke žilavosti med naravnimi vlakni in izredno nizke cene ter dostopnosti dobro okrepitev za betonske konstrukcije.

Ugotovljeno je bilo, da kokosova vlakna povečajo upogibno žilavost cementnih kompozitov za več kot desetkrat

Učinkovitost kokosovih vlaken na lastnosti upogibnih (npr. upogibna žilavost) cementnih kompozitov je bila celo boljša od sintetičnih steklenih ali ogljikovih vlaken. Ugotovljeno je bilo, da dodajanje 0,5 % kokosovih vlaken poveča upogibno trdnost betona normalne trdnosti za 60%. Kokosova vlakna se uporabljajo za ojačitev lahkih konstrukcij. (Libo Yan 2013)

Študije so pokazale, da se polimerni kompoziti lahko uporabijo namesto običajnih jeklenih ojačitev betonskih konstrukcij iz naravnih vlaken. V cementni se lahko naravna vlakna obravnavajo kot armirani beton. Z uporabo betona in betonskih konstrukcij z naravnimi vlakni bo gradbena industrija bolj trajnostna.

Slika 3.1: Kokosova vlakna v betonu (Libo Yan, 2013 )



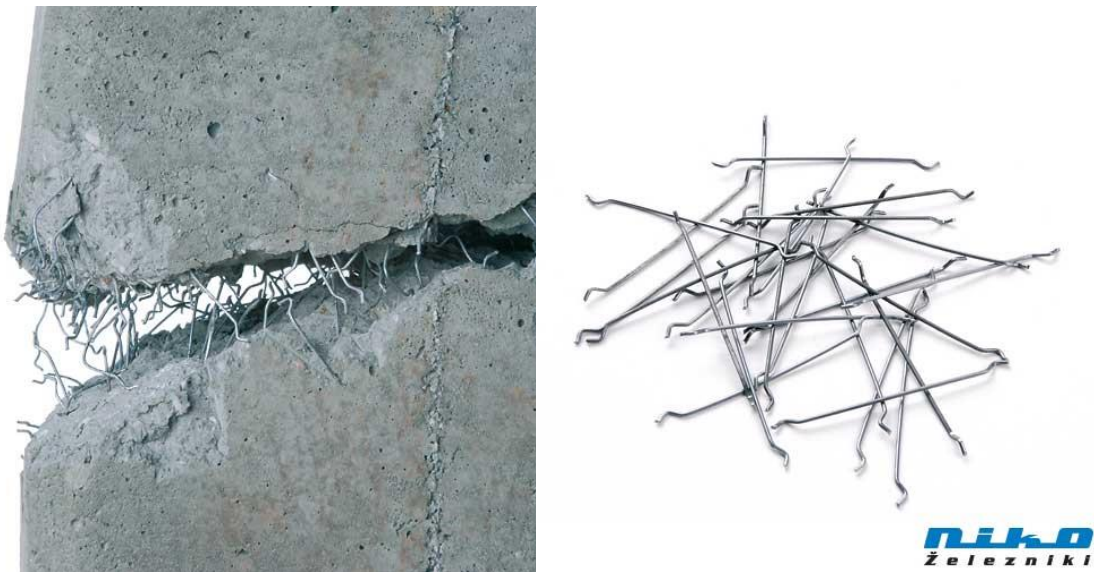
### 3.2. KOVINSKA VLAKNA

Jeklena vlakna vmešamo v beton, kjer se enakomerno porazdelijo tako, da so v vgrajenem betonu prisotna tridimenzionalno – po vsej masi. Vlakna so običajno iz žice premera od 0,6 do 1,0 mm in dolga od 30 do 60 mm. Tako dobimo v volumnu enega m<sup>3</sup> do 400.000 vlaken pri povprečnem doziranju 20 kg.

Jeklena vlakna so izdelana iz jeklene žice z natezno trdnostjo nad 1000N/mm<sup>2</sup>. Na obeh koncih sta posebno oblikovani sidri, ki onemogočata izpulitev vlaken iz betona. Ko jeklena vlakna vnesemo v beton, se le-ta razporedijo v celotno maso in tako tudi ostanejo v trdem betonu. Vemo, da v vsakem betonu nastanejo pri strjevanju razpoke in tu se začne vloga jeklenih vlaken. Ker so razporejena po celotni masi, celotno maso držijo skupaj, in to z minimalno manjšo silo, kot je prelom betona. Tako po izdelavi industrijskega tlaka ali estriha ne vidimo razpok, če pa zaradi obremenitev do teh pride, ni bojazni, da bi se nam tlak krušil.

Za določitev količine jeklenih vlaken obstaja izračun, ki pove, koliko določenega tipa vlaken vstavimo v beton. Za dober izračun moramo poznati, kako je izdelana podlaga, na katero betoniramo, tip betona, statične in dinamične obremenitve – prevozna sredstva, debelino plošče, temperaturne razlike in dilatacije.

Osnovna količina vlaken v kompozitu je 20 kg/m<sup>3</sup> betona. Od te količine pa odstopamo glede na zahtevnost objekta, ki ga želimo zgraditi. Velik vpliv ima debelina plošče. Pri tankih ploščah moramo biti previdni, saj se tam potreba po vlaknih precej poveča.



Slika 3.2: Jeklena mikrovlakna v betonu (Niko) Slika 3.21 Jeklena mikrovlakna (Niko)

Beton, ojačan z jeklenimi vlakni, se uporablja za primarne obloge predorov, stabilizacije skalnatih pobočij in rudniških rovov, talne plošče, industrijske tlake, estrihe, za tankoslojne preplastitve voziščnih konstrukcij, prefabricirane betonske elemente ter za ognjevzdržne omete, kjer prisotnost klasične armature ni pogoj za varnost in integriteto konstrukcijskih elementov.

### 3.3. MINERALNA VLAKNA

Pod pojmom mineralna vlakna razumemo steklena vlakna. Težava pri uporabi steklenih vlaknen za ojačitev betona je, da se steklo pokvari v alkalnem okolju. Steklo je predvsem silicijev dioksid. Steklena vlakna se uničijo v bazičnem okolju. Leta 1970 sta alkalno odporna (AR) steklena vlakna izpopolnila Owens-Corning in Nippon Electric Glass, kar je vodilo do hitrega povečanja uporabe.

Steklena vlakna so bila v zadnjih 30 letih uporabljena za proizvodnjo betonskih izdelkov, ne le za tanke arhitekturne pokrivne plošče, temveč tudi za okrasne betone, kot so kupole, kipi, plantaže in fontane. V zadnjem času so za okrasne betonske izdelke odkrili prednosti steklenih vlaken, in sicer za dekorativne panele (kot je kamin), betonske pulte in umetne skale.



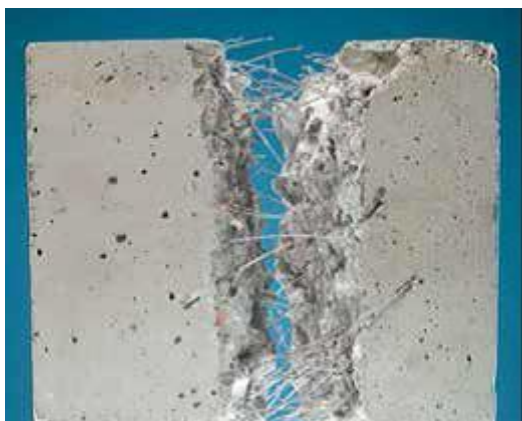
Slika 3.3: Steklena vlakna (Lorenčič)

### 3.4. SINTETIČNA VLAKNA

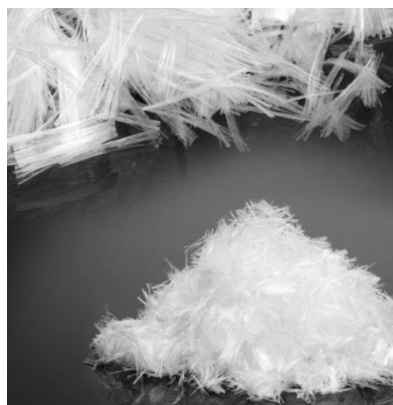
Sintetična vlakna imajo zelo visoko natezno trdnost in majhen modul elastičnosti. Gostota vlaken je približno  $0,90 \text{ g/cm}^3$ . Debelina vlaken je  $0,1 \text{ mm}$  dolžina vlaken pa je od  $12 \text{ mm}$ – $50 \text{ mm}$ . Mikrovlakna so izdelana iz čistih polimerov in so strukturna sintetična vlakna, in sicer kot alternativa jeklenim vlaknom. S posebno obdelavo so mikrovlakna strukturno modificirana in s tem je omogočen dober oprijem v betonskem agregatu. Z dodajanjem konstruktivnih armaturnih sintetičnih vlaken povečamo upogibno natezno trdnost betona, betonski izdelki tudi po nastanku prve razpoke zadržijo natezno trdnost, udarno žilavost, odpornost na utrujanje in požarno odpornost betona ter zmanjšano zgodnje krčenje betona. S tem praktično preprečimo pojav zgodnjih razpok betonskih elementov.

Prednosti sintetičnih mikrovlaken so:

- odlična prožnost,
- ni nevarnosti korozije,
- visoka trdnost,
- višja natezna trdnost,
- izboljšanje krhkosti betona,
- manjša nevarnost kot med betoniranjem in
- zmanjšanje števila razpok zaradi plastičnih skrčkov.



Slika 3.4: Sintetična vlakna v betonu (Tornadoplus)



Slika 3.41: Sintetična vlakna

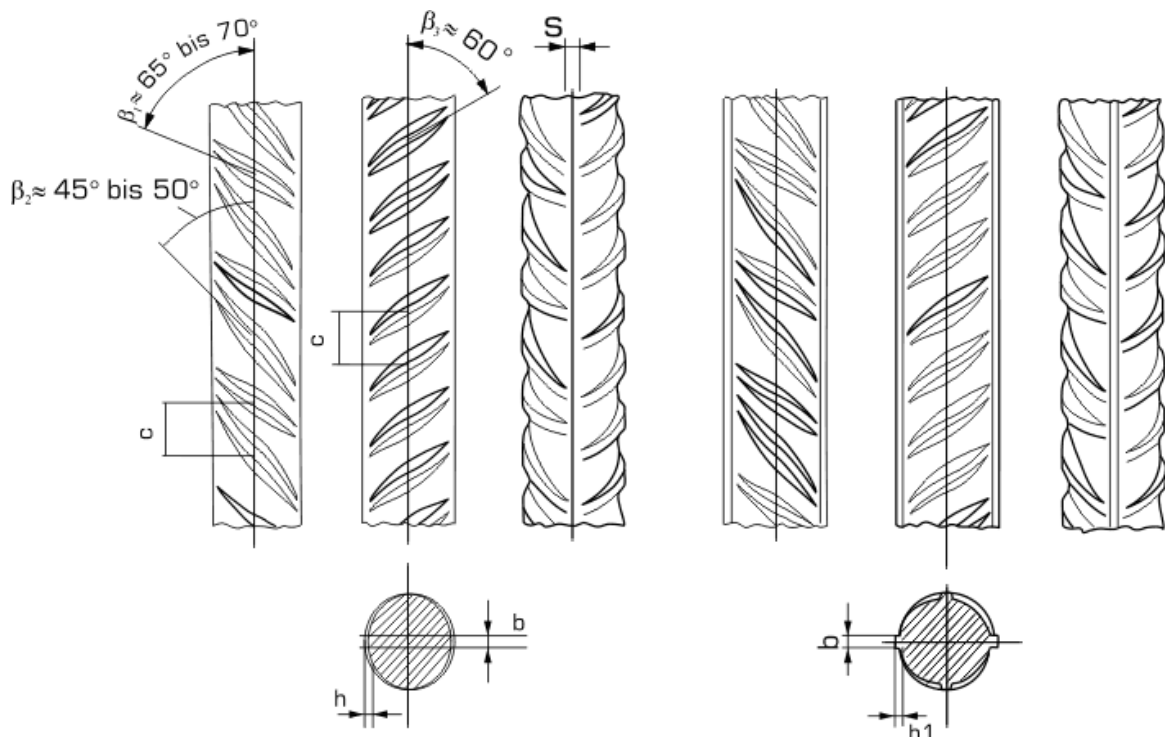
### 3.5. PROPILENSKA VLAKNA

V dobi vsesplošne poplave plastike in razvoja tehnologije je industrija ponudila tržišču še tako imenovana polipropilenska vlakna. To so najpogosteje drobni rezanci folije polietilen z nizko natezno trdnostjo od 300 do 400 N/mm<sup>2</sup>, dolžine od 5 do 30 mm. Imajo slabo oprijemljivost s cementom, večinoma niso odporna proti alkalnim spojinam, ki so prisotne v betonu. S časom vgrajeni v beton postanejo krhki, zato vgrajeni v beton ali betonske mešanice za estrihe ne prispevajo k povečanju upogibne trdnosti, žilavosti, niti ne ublažijo termičnih šokov v primerjavi z jeklenimi vlakni ali mrežami. Zato se ne uporabljajo za armiranje betonov in cementnih estrihov. Polipropilenska vlakna se uporabljajo kot dodatek za nego svežih betonov in estrihov, ki imajo v neugodnih vremenskih pogojih (visoke temperature) le funkcijo zadrževanja vlage in v tem času ublažijo nastajanje površinskih lastnih razpok. Nastajanje razpok zaradi krčenja pa lahko prevzame le kakovostna jeklena mikroarmatura ali armaturna mreža. (Splošno o mikro armaturah)

## 4. SPRIJEMNOST MED ARMATURO IN BETONOM

Beton ima to lastnost, da dobro prenaša tlačno obremenitev in slabo natezno obremenitev. Ker beton slabo prenaša natezno obremenitev, moramo natezne napetosti prenesti z armaturo saj le ta dobro prenaša natezne obremenitve. Pri armaturnih palicah moramo posebno pozornost posvetiti stiku med armaturo in betonom. Kakovost stika med armaturo in betonom je odvisna od: kakovosti palice, korozije palice, velikosti reber, števila reber, kota reber, kakovosti betona, uporabljenega materiala v betonu, smeri betoniranja, vgradnje betona in dinamičnih vplivov obtežbe.





Slika4.: Rebrasta armaturna palica (DIN488-2, 1984)

Velikost sprejemnih napetosti med površino armature in betonom je posledica treh komponent:

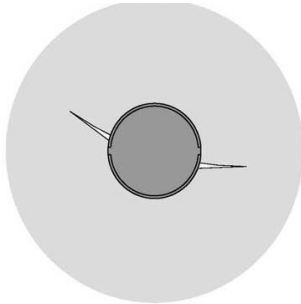
- Adhezije oziroma zlepljenosti,
- trenja in
- nosilnosti preko reber palic.

Pri nizkih obremenitvah je sprejemna napetost med betonom in armaturo posledica zlepljenosti. Ko je zlepljenost med betonom in armaturo premagana, začne armaturna palica drseti, takrat se mobilizirajo sile trenja med armaturno palico in betonom. Trenje se ustvari zato, ker armaturna palica ni povsem gladka in je hrapava. Trenje in zlepljenost preneseta zelo majhno napetost, zato se beton zagozdi na rebra palic, ki pa prenesejo veliko obremenitev. Med rebri armature in betonom nastajajo tlačne obremenitve. Na konicah reber nastajajo mikro razpoke, ki se širijo prečno stran od reber, kot je prikazano na sliki 4.01 in 4.02. Nastanek teh mikro razpok omogoča nadaljnje drsenje armaturne palice iz betona, pri čemer se izčrpa tlačna trdnost betona. Beton se med armaturno palico drobi in zaklinja. Armaturna palica se s časom potegne iz betona in v tem primeru se mikro razpoke ne širijo v notranjost betona. (Juan Murcia-Delso, 2013 )

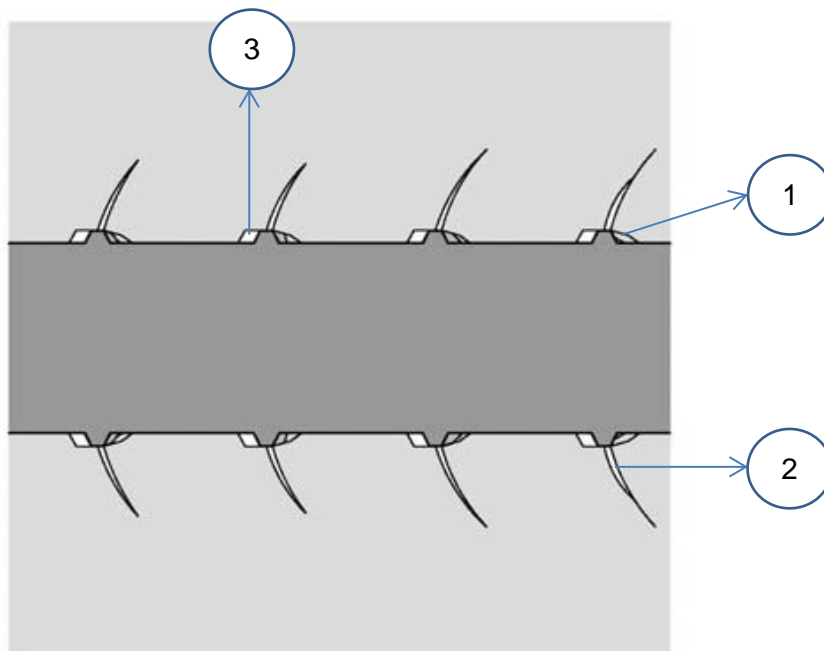
Armatura povzroča v betonu reakcije pod kotom od 45° do 80° glede na os palice. Komponente takšnih reakcij, ki so pravokotne na palico, povzročajo radialne napetosti v betonu in nastanek cepilnih razpok v radialni smeri glede na površino palice. (Dežman 2015)



Drugi način izvleka je, da se cepilne razpoke širijo globlje v beton in beton ne more več prenesti nateznih napetosti, ki so sedaj zaradi cepilnih razpok osredotočene ob obodu preizkušanca, zato pride do razcepa betonske kocke.



Slika 4.01: Prečni prerez, nastanek cepilnih razpok (Juan Murcia-Delso, 2011)



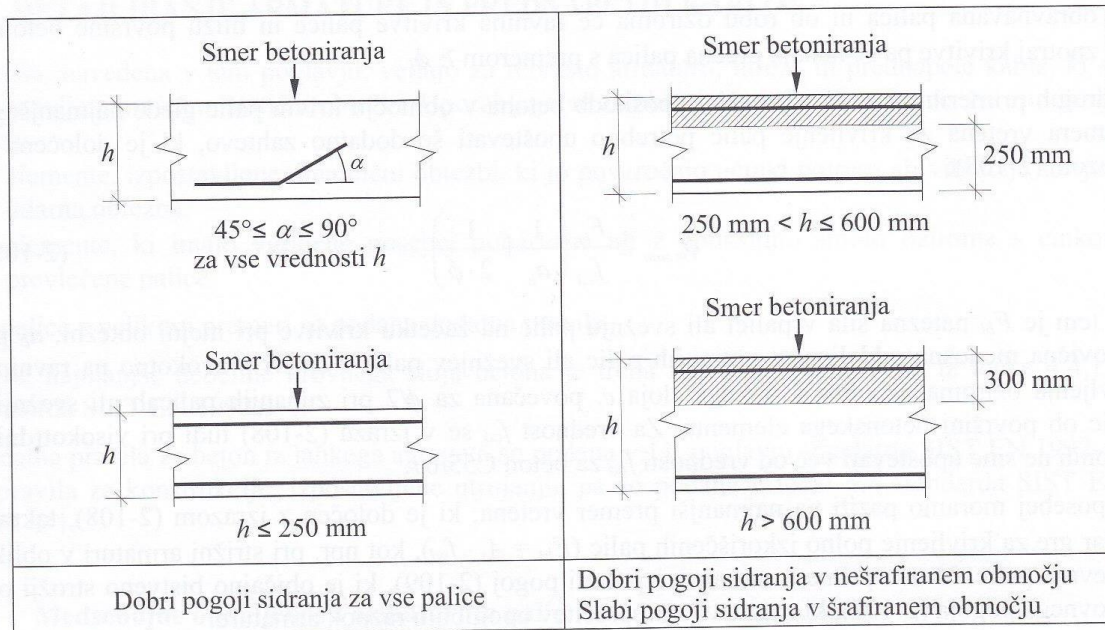
Slika 4.02: Področje zdrobljenega betona (1), mikro razpoke (2), zdrs (3) (Juan Murcia-Delso, 2011)

#### 4.1. MEJNA SPRIJEMNA NAPETOST

Evrokod definira sprijemno napetost kot strižno napetost, ki deluje po plašču palice in povzroča v betonu sile, ki so nasprotno enake reakciji. Evrokod 2 podaja mejno sprijemno napetost  $f_{bd}$  po naslednjem izrazu:

$$f_{bd} = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} \quad (4.1)$$

$\eta_1=1,0$  za dobre pogoje sidranja  
 $\eta_1=0,7$  za slabe pogoje sidranja



Slika 4.1: Pogoji sidranja po EC2

$\eta_2=1,0$  za  $\phi \leq 32 \text{ mm}$   
 $\eta_2=(132-\phi)/100$  za  $\phi > 32$

## 4.2. OSNOVNA SIDRNA DOLŽINA

Osnovna sidrna dolžina ravne palice  $l_{b,rqd}$  je določena z izrazom

$$l_{b,rqd} = (\phi \sigma_{sd}) / (4f_{bd}) \quad (4.2)$$

$\sigma_{sd}$  ... dejanska napetost v armaturi

$\phi$  ... premer palice

$f_{bd}$  ... mejna sprejemna napetost

## 5. EKSPERIMENTALNI DEL

### 5.1. ZASNOVA EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE

V okviru diplomske naloge smo preiskovali vpliv različnih vrst cementa z vlakni in brez vlaken na tlačno trdnost betona in izvlek armature iz betona. Primerjali smo tri različne vrste cementa in kakšen vpliv imajo jeklena vlakna pri različnih cementih na tlačno trdnost in izvlek

armature iz betona. Pri betonih brez vlaken smo preverili navedbe v standardu Evrokod glede sprejemnih napetosti. Zrnovostno sestavo betona smo uporabili pri vseh mešanicah enako. Recepture, ki smo jih uporabili pri raziskavi, temeljijo na recepturah iz doktorske disertacije z naslovom Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti dr. Draga Sajeta iz leta 2001. Na svežem betonu smo naredili osnovne standardne teste. Standardne betonske preizkušance smo hranili v vodi 28 dni. Po preteku tega časa smo opravili tlačne preizkuse ter izvlečni test.

## 5.2. UPORABLJENI MATERIALI

Materiale, ki smo jih uporabljali, smo dobili na slovenskem tržišču. Uporabili smo cemente Salonita Anhovo ter agregat iz separacije Kresnice in mivko Termit iz Moravč. Uporabljena jeklena vlakna proizvaja podjetje IRI.

### 5.2.1. AGREGAT

Kremenov pesek ali mivko smo imeli iz Termita iz Moravč. Podroben opis kremenovega peska iz termita iz Moravč najdemo v doktorski disertaciji Draga Sajeta 2001: Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti na strani 26.

Preglednica 5.2.1: Lastnosti kremenčeve mivke (Termit iz Moravč.)

Kemijska sestava	Min. 98 % SiO <sub>2</sub>
Srednja velikost zrn	0,23 mm
Granulacija	009–0,5
Odstotek vlage	cca. 6 %
Točka sintranja	min. 1500 stopinj Celzija
ph	6,70

Agregat, ki smo ga uporabili iz separacije Kresnice, je imel frakcije 0/4, 4/8 in 8/16. Agregat pridobivajo v kamnolomu Ušenišče. V separaciji Kresnice iz kamnoloma Ušenišče drobljenec sejejo v frakcije. Frakcije operejo z vodo, da odstranijo fine umazane delce, ki se držijo kamena. Frakcije agregata so bile v vrečah, ki so bile zaprte, zato je pesek v njih bil še vlažen. Pesek smo po frakcijah sušili v prostoru, ki je imel nizko vlažnost. Vlažen pesek bi povečal vodocementno razmerje in s tem bi dobili manjšo trdnost betona.

Podroben opis agregata, ki smo ga uporabljali najdemo v doktorski disertaciji Draga Sajeta 2001: Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti na strani 27.

### 5.2.2. CEMENT

Uporabili smo tri različne cemente iz cementarne Anhovo. Uporabljeni cementi so: CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R, CEM II/B-M (LL-V) 42,5 in CEM I- 52,5R.

- CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R

Cement 42,5 je specialni cement portland, mešan z dvema mineralnima dodatkom (M), trdnostnega razreda 44,5 MPa z visoko zgodnjo trdnostjo (R). Uporablja se za zahtevne gradnje, pri katerih se zahtevajo visoke začetne in končne trdnosti.

#### Sestava:

- minimalno 80 % portlandskega klinkerja,
- 12–20 % mešanega dodatka – apnenec (LL), žindra (S),
- maksimalno 5 % dodatkov – polnil,
- regulator vezanja – sadra.

Preglednica 5.2.20: Kemijske in mehanske zahteve za cement 42,5 specialni (Salonit Anhovo)

	Zahteve standarda	Povprečne vrednosti
<b>Kemijske zahteve</b>		
Vrednosti sulfata	≤ 4.0 %	2.6 %
Vrednosti klorida	≤ 0.1 %	0.05 %
<b>Mehanske in fizikalne zahteve</b>		
Začetna trdnost, 2 dni	≥ 20.0 MPa	29 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5–62,5MPa	57 MPa
začetek vezanja	≥ 60 min	190 min

- CEM II/B-M (LL-V) 42,5N

Cement 42,5N – Osnovni je portlandski mešani cement z dvema mineralnima dodatkom (M), trdnostnega razreda 42,5 in običajnih zgodnjih trdnosti (N). Cement 42,5 – Osnovni je namenjen široki uporabi v gradbeništvu.

#### Sestava:

- minimalno 65 % portlandskega klinkerja,
- maksimalno 35 % mešanega dodatka – elektrofiltrski pepel (V) in apnenec (LL),
- maksimalno 5 % dodatkov – polnil,
- regulator vezanja – sadra.

Selak, G. 2016. Vpliv jeklenih vlaken na sprejemnost med armaturo in betonom ...  
Dipl. nal. – VSS. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Preglednica 5.2.21: Kemijske in mehanske zahteve za cement 42,5osnovni (Salonit Anhovo)

	Zahteve standarda	Povprečne vrednosti
<b>Kemijske zahteve</b>		
Vrednosti sulfata (kot SO <sub>3</sub> )	≤ 3,5 %	2,5 %
Vrednosti klorida	≤ 0,1 %	0,06 %
<b>Mehanske in fizikalne zahteve</b>		
začetna trdnost, 2 dni	≥ 10,0 MPa	24 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5–62,5MPa	48 MPa
začetek vezanja	≥ 60 min	180 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 mm	< 1 mm

- CEM I-52R

Cement 52,5 je čisti portlandski cement, najvišjega trdnostnega razreda 52,5 MPa in najvišjih zgodnjih trdnosti (R) po standardu za običajni cement.

Cement 52,5R je namenjen za gradnje, pri katerih se zahtevajo najvišje začetne in končne trdnosti.

Sestava:

- minimalno 95 % portlandskega klinkerja,
- maksimalno 5 % dodatkov – polnil,
- regulator vezanja – sadra.

Preglednica 5.2.22: Kemijske in mehanske zahteve za CEM I\_52\_5R (Salonit Anhovo)

	Zahteve standarda	Povprečne vrednosti
<b>Kemijske zahteve</b>		
Vrednosti sulfata (kot SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0 %	3,4 %
Vrednosti klorida	≤ 0,1 %	0,06 %
Žarilna izguba	≤ 5,0 %	3 %
Netopni ostanek	≤ 5,0 %	< 0,5 %
<b>Mehanske in fizikalne zahteve</b>		
Začetna trdnost, 2 dni	≥ 30,0 MPa	40 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	≥ 52,5 MPa	64 MPa
začetek vezanja	≥ 45 min	160 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 mm	< 1 mm

### 5.2.3. JEKLENA VLAKNA

Pri betonskih mešanica so uporabili jeklena vlakna JV® 50/30 dolžine 30 mm in premera 0,5 mm. Jeklena vlakna so na koncih enojno zakrivljena. Zakrivljena konca jeklenih vlaken pripomoreta k boljši zasidranosti jeklenih vlaken v beton.

#### 5.2.4. REBRASTA PALICA

Rebraste palice, ki smo jih uporabili pri izvlečnih testih, so bile dolžine 08 m in debeline 20 mm. Palice so bile kakovosti jekla S500. Jeklo kakovosti S500 ima elastično območje nekje do 0,2 %specifične deformacije. Specifične deformacije rebraste palice, večje od 0,2 %, pa so plastične deformacije. Spodnja slika prikazuje, da so rebra na eni strani vzporedna, na drugi strani pa so rebra v dveh naklonih.

Slika 5.2.4: Rebra z ene in druge strani



#### 5.3. SESTAVA PREISKANEGA BETONA

Betonske mešanice smo naredili tako, da smo uporabili tri različne vrste cementov: CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R, CEM II/B-M (LL-V) 42,5 in CEM I- 52,5R. Količina cementa je bila pri vseh mešanicah enaka in je znašala 400 kg/m<sup>3</sup> betona. Vodocementno razmerje je bilo pri vseh betonih enako in je znašalo 0,52. Frakcije agregata, ki so bile suhe, smo pri vseh vrstah betona uporabili v enakem razmerju in teži med različnimi frakcijami. Količina jeklenih vlaken v preiskovanih betonih je znašala 1 % glede na prostornino betona.. Količina betona, ki smo ga zmešaliv mešalcu v laboratoriju FGG je bila 0,036m<sup>3</sup>, kar je zadostovalo za tri kocke 15 cm\*15 cm\*15\*cm za tlačni preizkus in tri kocke za izvlečni test, ki so imele dimenzije stranic 20 cm\*20 cm\*20 cm.

Preglednica 5.3.0: Sestava preiskovane mešanice za BETON-C

Vhodne surovine	Odstotki (%)	Teža v kg	Specifična gostota v kg/dm <sup>3</sup>	Volumen v litrih/m <sup>3</sup> betona	Sestava za 0,036 m <sup>3</sup>
Cement CEM I_52_5R	100	400	3,100	129	14,40 kg
Količina vode		208	1,000	208	7,49l
Odstotek por	1,3			13	
Agregat		1756		650	63,21 kg
Mivka termit	15	264	2,710	97,5	9,51 kg
0/4 kresnice	45	790	2,700	292,5	28,43 kg
4/8 kresnice	15	263	2,700	97,5	9,48 kg
8/16 kresnice	25	439	2,700	162	15,79 kg
Seštevek		2364		1000	

Preglednica 5.3.01: Sestava preiskovane mešanice za BETON -C–JV 1 %

Vhodne surovine	Odstotki (%)	Teža v kg	Specifična gostota v kg/dm <sup>3</sup>	Volumen v litrih/m <sup>3</sup> betona	Sestava za 0,036 m <sup>3</sup>
CEM I_52_5R	100	400	3,100	129	14,40 kg
Količina vode		208	1,000	208	7,49 l
Vlakna –JV (IRI 3 cm)	1,00	78	7,800	10	2,81 kg
Odstotek por	1,3			13	0,360 l
Agregat		1729		640	63,2 1kg
Mivka termit	15	260	2,710	96	9,37 kg
0/4 kresnice	45	778	2,710	288	28,1 kg
4/8 kresnice	15	259	2,700	96	9,33 kg
8/16 kresnice	25	432	2,700	160	15,55 kg
Seštevek		2415		1000	

Za drugi dve vrsti sta preglednici enaki, spremeni se le vrsta uporabljenega cementa.

#### 5.4. TESTIRANJA UPORABLJENEGA BETONA

- METODA S POSEDOM

Na mizo smo postavili konus, ki ga v treh plasteh napolnimo z betonom. Vsako plast betona smo nabili s po 25 udarci s palico. Pri nabijanju naslednje plasti mora palica seči do spodnje plasti. Po končanem nabijanju zadnje plasti smo zgornjo plast poravnali in konus počasi izvlekli. Konus smo potem obrnili in nanj postavili palico ter z merilnim trakom odčitali posed betona. Posed betona je bila dolžina med palico in zgornjim delom betona. Preizkus smo opravljali po standardu SIST EN12350-2, kje je tudi točen opis postopka.





Slika 5.40: Prikaz merjenja poseda svežega betona.

- METODA Z RAZREZOM PO STANDARDU SIST EN12350-5

Pri tej metodi smo uporabili skrajšan konus, ki smo ga postavili na stresalno mizo. Skrajšani konus smo napolnili v dveh plasteh. Vsako plast betona smo nabili z leseno palico dimenzij 4 cm\*4 cm s po desetimi udarci. Beton na vrhu konusa poravnamo in konus počasi odstranimo. Stresalno mizo dvignemo za 4 cm in prosto spustimo, to ponovimo petnajstkrat. Beton se je razlezel v vseh smereh. Mero za konsistenco smo dobili po povprečju dveh medsebojnih pravokotnih premerov razlezene betonske mase. Preizkus smo opravili po standardu SIST EN12350-5, kjer je tudi točen opis postopka.



Slika 5.41: Merjenje razleza sveže betonske mešanice

- DOLOČANJE Odstotek zraka v svežem betonu

Posodo smo napolnili v treh plasteh. Vsak sloj smo z baterijskim vibratorjem z vibrirali. Zadnjo plast smo na vrhu zravnali. Robove posode smo skrbno očistili, da je pokrov posode lepo nalegal na posodo in zatesnil. Pokrov posode ima dva ventila. Skozi ventil smo v posodo vlili vodo, da je šel ven ves zrak, ki je bil med posodo in pokrovom. Ko ni bilo več zraka med pokrovom in posodo, smo oba ventila zaprli in z ročno črpalko vnesli toliko zraka v pokrov, da je kazalec na manometru pokazal ničlo. Nekaj sekund po izravnavanju tlaka smo odprli ventil in na manometru smo odčitali vsebnost zraka v svežem betonu. Preizkus smo opravili po standardu SIST EN 12350-7. Točen opis postopka podaja omenjeni standard.

Slika5.42: Porozimeter



### 5.5. REZULTATI TESTIRANIH SVEŽIH BETONOV

- Beton, ki je vseboval cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R

Preglednica 5.51: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona, ki je vseboval cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R –BETON-A

PREIZKUS	BETON -A		BETON -A-JV 1 %	
	projektirano	dobljeno	projektirano	dobljeno
Gostota (kg/m <sup>3</sup> )	2364	2370	2442	2456
Posed (cm)	15-18	9	15-18	6,5
Razlez (cm)		40		29,5
Vsebnost zraka (%)	1,3	1,5	1,3	2,9

Iz preglednice je razvidno, da ima beton z vlakni veliko manjši razlez in posed, zato je tak beton malo težje vgraditi. Pri betonu z vlakni in brez vlaken nismo dosegli projektirane vsebnosti zraka v betonu.

- Beton, ki je vseboval cement CEM II/B-M (LL-V) 42,5N

Preglednica 5.52: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona, ki je vseboval cement CEM II/B-M (LL-V) 42,5N

PREISKAVA	BETON -B		BETON -B-JV 1 %	
	projektirano	dobljeno	projektirano	dobljeno
Gostota (kg/m <sup>3</sup> )	2364	2368	2442	2469
Posed (cm)	15-18	14,5	15-18	9
Razlez (cm)		46,5		35
Vsebnost zraka (%)	1,3	1,9	1,3	1,1

Iz preglednice je razvidno, da ima beton z vlakni veliko manjši razlez in posed, zato je tak beton malo težje vgraditi. Pri betonu z vlakni in brez vlaken smo dosegli projektirane

vsebnosti zraka v betonu. Zanimivo pa je, da so pri tem betonu vlakna zmanjšala odstotek zraka v betonu.

- Beton, ki je vseboval cement CEM I-52R BETON-C

Preglednica 5.50: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona, ki je vseboval cement CEM I-52R

PREIZKUS	BETON -C		BETON -C-JV 1 %	
	projektirano	dobljeno	projektirano	dobljeno
Gostota (kg/m <sup>3</sup> )	2364	2364	2442	2433
Posed (cm)	15-18	12	15-18	9
Razlez (cm)		46,5		39,5
Vsebnost zraka (%)	1,3	2,5	1,3	4,5

Iz preglednice je razvidno, da ima beton z vlakni veliko manjši razlez in posed, zato je tak beton malo težje vgraditi. Pri betonu z vlakni in brez vlaken nismo dosegli projektirane vsebnosti zraka v betonu. Vsebnost zraka v betonu se je še povečala pri betonu z vlakni. Videti je bilo, kot da bi se beton penil.

## 5.6. TLAČNA TRDNOST BETONOV

Betonsko mešanico smo v mešalcu mešali 5 minut. Pri betonih z vlakni smo vlakna dodajali postopoma, da ne bi prišlo do kep vlaken v betonu. Beton za preizkus tlačne trdnosti smo vlili v železne kalupe 15 cm \* 15 cm \* 15 cm. Naslednji dan smo preizkušance razopažili in jih dali za 28 dni v vodo. Po 28 dneh smo naredili tlačni preizkus. Preizkus je potekal v hidravlični preši, ki nam poda silo, s katero se je kocka porušila. Tlačno trdnost betona je kvocient med porušno silo in ploskvijo, na katero deluje sila.

Slika 5.6: Sveži beton, vgrajen v kalupe za preizkus tlačne trdnosti.



## 5.7. EZULTATI TLAČNEGA PREIZKUSA BETONOV

Preglednica 5.70: Rezultati tlačne trdnosti betona

Mešanica	Število preizkušancev	Povprečna tlačna trdnost [kN/cm <sup>2</sup> ]	Standardna deviacija [kN/cm <sup>2</sup> ]
BETON -A	12	46.6	3.74
BETON-B	3	45.8	1.10
BETON-C	3	58.4	4.01

Preglednica 5.71: Rezultati tlačne trdnosti vlaknastega betona

Oznaka vzorca	Št.	Datum odvzema	a (mm)	b (mm)	h (mm)	$P_{max}$ (kN)	$f_{cc,28}$	povprečni $f_{cc,28}$
BETON-A JV 1 % (l=30mm)	1	27. 1. 2016	150	150	151	1236	54,6	<b>54,8</b>
	2	27. 1. 2016	150	150	150	1269	56,4	
	3	27. 1. 2016	150	150	151	1208	53,3	
BETON-B JV 1 % (l=30mm)	1	27. 1. 2016	150	150	151	1136	50,2	<b>49,5</b>
	2	27. 1. 2016	150	150	150,5	1106	49,0	
	3	27. 1. 2016	150	150	150,5	1112	49,3	
BETON-C JV 1 % (l=30mm)	1	27. 1. 2016	150	150	150,5	1188	52,6	<b>56,9</b>
	2	27. 1. 2016	150	150	149,5	1331	59,4	
	3	27. 1. 2016	150	150	149,0	1313	58,7	

Iz zgornjih preglednic 5.70 in 5.71 je razvidno, da pri betonih BETON-A JV 1 % (l=30mm) in BETON-B JV 1 % (l=30mm) mikrovlakna pripomorejo k višji tlačni trdnosti betona, pri betonu iz BETON-C JV 1 % (l=30mm) pa mikrovlakna niso imela nobenega vpliva na višjo tlačno trdnost betona. Previdevam, da bi pri tem betonu morali uporabiti višji odstotek vlaken, da bi bila tlačna trdnost višja.

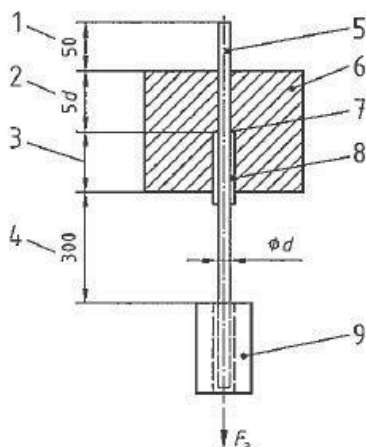
Slika 5.70: Porušitev betona pri enosnem tlačnem preizkusu



### 5.8. IZVLEČNI TEST PO STANDARDU SIST EN 10080: DODATEK D

Izvlačni test smo delali v skladu s standardom SIST EN 10080, dodatek D. Standard obravnava metodo testiranja sprejemnih napetosti za rebrasto armaturo in žice, ki jih uporabljamo kot armaturo. Standard predpisuje, testiranje sprejemnih napetost med betonom in armaturnimi palicami premera do 32 mm. Armaturna palica je vgrajena v betonsko kocko in na obeh straneh gleda ven. Betonska kocka je dimenzij 10 premerov palice\*10 premerov palice. Na zgornji strani gleda iz kocke armaturna palica 50 mm za merjenje pomikov, na spodnji pa vsaj 300 mm za vpetje v čeljust. Sidrna dolžina palice je predpisana s 5d, pri čemer je d premer palice. Na preostalo dolžino palice, ki je v betonu, smo nataknili gumijasto cev, da ni bilo trenja med armaturo in betonom. Gumijasto cev smo z obeh strani zatesnili s steklarskim kitom, da v cev ne bi prišlo cementno mleko. Za merjenje pomikov smo uporabili elektronske merilne, ki so natančne na  $\pm 0,001$  mm.

Slika 5.80: Prikaz izvlečnega testa po standardu SIST EN 10080



- 1 armaturna palica, ki gleda iz preikušanca za merjenje pomikov
- 2 dolžina sidranja
- 3 izolirani del armaturne palice, min. 200 mm – 5d
- 4 del palice med kalupom in testnim strojem
- 5 armaturna palica,
- 6 beton
- 7 zatesnitev
- 8 plastična cev, ki deluje kot izolator
- 9 čeljusti za prijem armaturne palice

Sprejemno napetost izračunamo z izrazom:

$$\tau = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi \phi l} = \frac{P}{\pi \phi * 5 \phi} \quad (5.8)$$

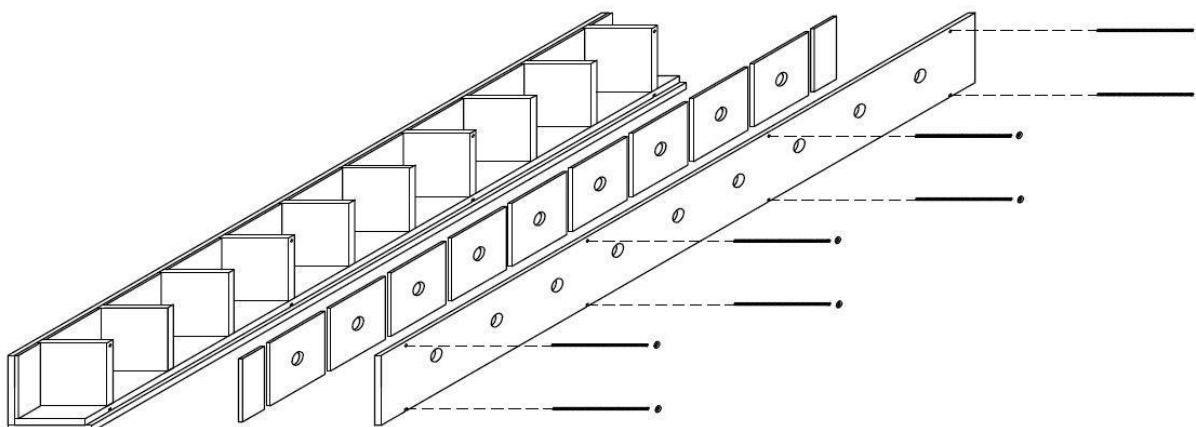
P.....sila, s katero obremenjujemo palico

S.....sprejemna površina, ki je enaka zmnožku obsega palice in sidrni dolžini

## 5.9. VGRAJEVANJE SVEŽIH BETONSKIH MEŠANIC

Betonske mešanice smo vgrajevali v kalup, ki je imel devet prekatov. Za vsako vrsto betonske mešanice smo naredili po tri preizkušance-kocke. Kalup je bil zasnovan že predhodno pri prejšnjem raziskovalnem delu. Material, iz katerega je izdelan kalup, so vezane plošče debeline 12 mm. Površina vezane plošče je zavarovana s plastjo umetne mase, ki ohranja les ter ne vpija vode in s tem ne znižuje vodocementnega faktorja. Kalup je sestavljen iz treh podolgovatih plošč, ki sestavljajo žleb. V sredi so plošče 20 cm\*20 cm debeline 12 mm, ki ločujejo preizkušance. Stranske plošče so na sredini prevrtane, da lahko palica na obeh straneh gleda ven, kot predpisuje standard SIST EN 10080. Stranske plošče smo nato povezali skupaj z navojnimi palicami. Sestavljeni kalup smo premazali z opažnim oljem, da smo lažje razopažili.

Slika 5.90: 3D-model kalupa (Dežman 2015)



V kalup smo nato vstavili rebrasto palico  $\phi 20$ , ki je na eni strani gledala ven 50 mm, na drugi pa 300 mm. Rebrasta palica je bila sidrana v betonu s sidrno dolžino  $5\phi$ . Drugi del smo zaščitili s plastično cevjo, ki smo jo z obeh strani zakitali s steklarskim kitom, da med palico in cevjo ne bi prišlo cementno mleko. Dimenzije kalupa in sidrne dolžine so bile izdelane v skladu s standardom SIST EN 10080. Betonske mešanice smo mešali v laboratoriju. Opis le teh je v poglavju 5.3. Na svežem betonu smo naredili ustrezne teste, ki so opisani v poglavju 5.4 in so bili izvedeni v skladu s standardom SIST EN 12350. Sveži beton smo v kalupe vgrajevali v dveh slojih, po prvem sloju smo betonsko mešanico vibrirali in še enkrat, ko je bil beton nasut do vrha. Na vrhu smo beton poravnali z zidarsko žlico in ga ovili v folijo, da se ne



bi izsušil. Naslednji dan smo betonske kocke z vgrajeno armaturo razopažili in jih za 28 dni dali v vodo pri sobni temperaturi.

Slika 5.91: Prikaz kalupa z že vgrajenimi tremi preizkušanci



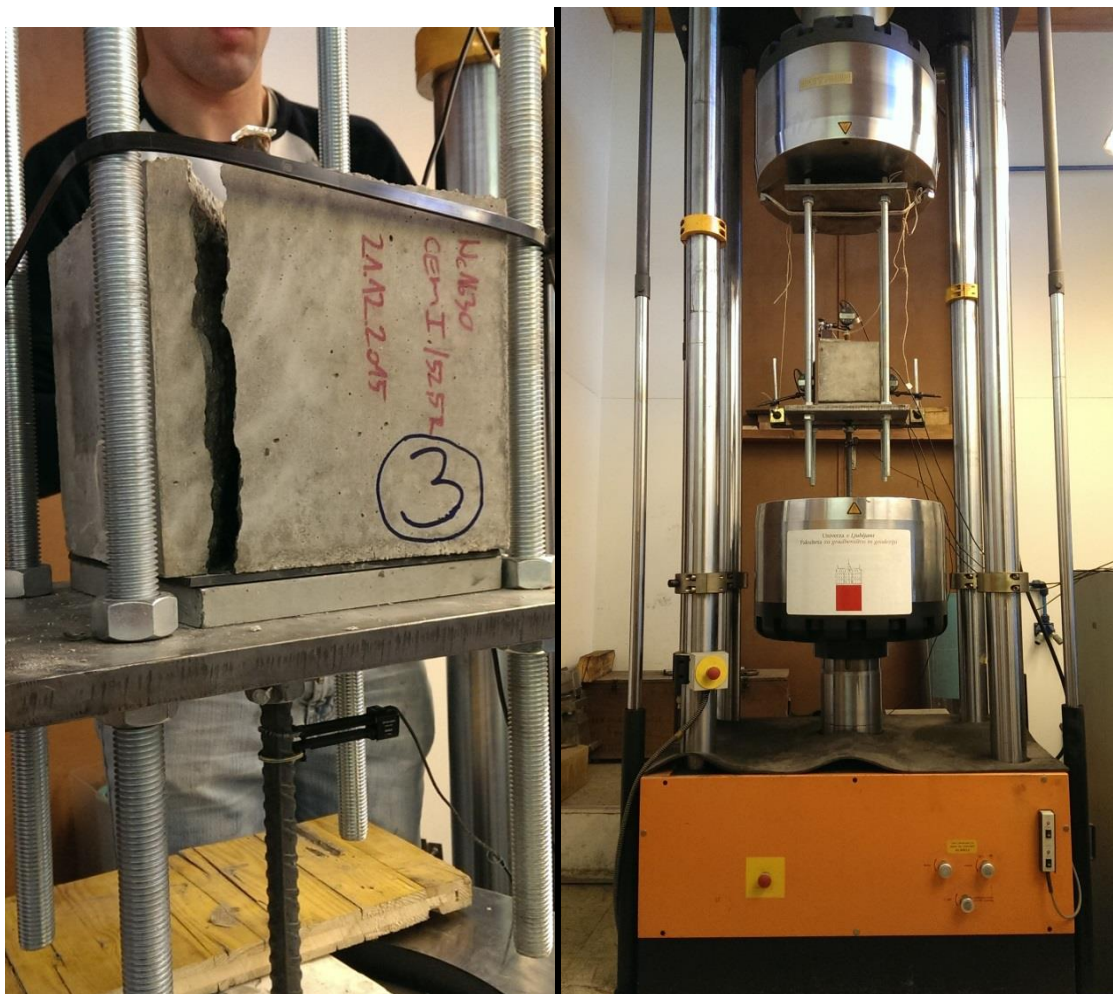
### 5.10. IZVLEČNI TEST IZVEDEN V LABORATORIJU

Izvlačni test v laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo smo opravili v skladu s standardom SIST EN10080:2005. Opis le tega je v poglavju 5.8. Test smo izvedli s pomočjo elektro-hidravlične preizkuševalne naprave INSTRON kapacitete  $\pm 1000$  kN..

Na vrhu je bila jeklena plošča v obliki črke T, ki smo jo vpeli v zgornjo čeljust. Jeklena plošča je imela pri straneh štiri luknje, skozi katere smo namestili navojne palice in jih zategnili z vijačnimi maticami. Navojne palice so bile dolge približno 1 m in so spodaj nosile jekleno ploščo, ki je bila pritrjena z osmimi maticami. Spodnja jeklena plošča je imela na sredi luknjo, skozi katero smo vstavili rebrasto palico preizkušanca, ki je bila sidrana v beton. Med betonom in jekleno ploščo smo namestili še gumo, da se je beton lepše prilegal površini. Rebrasto palico smo nato spodaj s pomočjo čeljustjo vpeli v vpenjalno glavo na preizkuševalni napravi. Preizkušance smo natezno obremenjevali s pomočjo pomikanja glave preizkuševalnega stroja.

Preizkuševalna naprava omogoča hod bata  $\pm 50$  mm. Hitrost pomika bata je določena v standardu SIST EN10080:2005. Pomik bata in silo v palici je merila merilna oprema v hidravličnem batu. Na kocko preizkušanca smo postavili še tri merilne urice za merjenje pomikov rebraste palice. Rezultate pomikov smo beležili elektronsko preko računalniške enote. Postopek preiskave je zajemal pripravljalna dela, porušni test in zajem podatkov.

Slika 5.10: Prikaz izvlečnega testa v laboratoriju



### 5.11. REZULTATI PREISKAV

Rezultat preizkusa je bila silo, s katero smo obremenjevali armaturno rebrasto palico, zdrs rebraste palice, ki smo ga merili z urico na vrhu – na prostem koncupalice in deformacijo palice, ki smo jo merili z ekstenziometrom. S temi podatki smo nato lahko izračunali napetost v palici in sprijemno napetost.

Sprijemno napetost izračunamo z izrazom:

$$\tau = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi \phi l} = \frac{P}{\pi \phi * 5 \phi} \quad (5.11)$$

P.....sila, s katero obremenjujemo palico

S.....sprijemna površina, ki je enaka zmnožku obsega palice in sidni dolžini

Natezno napetost v palici smo izračunali z izrazom:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5.111)$$

P.....sila, s katero obremenjujemo palico

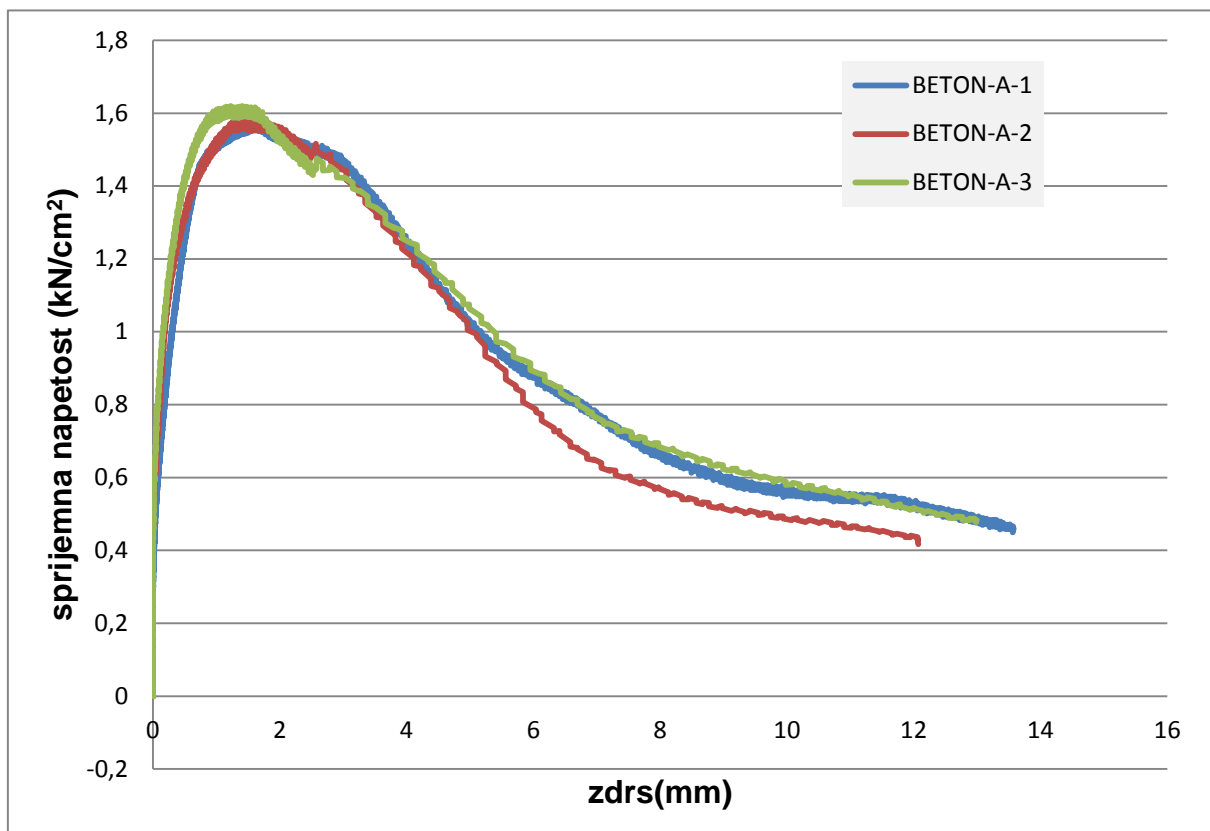
A                                   površina palice

Za primerjavo in analizo rezultatov smo zrisali diagrame sprejemna napetosti – zdrs in diagrame napetost v palici – deformacija palice. Nato smo analizirali rezultate in ugotavljali vpliv jeklenih vlaken na sprejemno trdnost med betonom in armaturo.

## 5.12. PREIZKUŠANCI IZ BETONA BETON-A

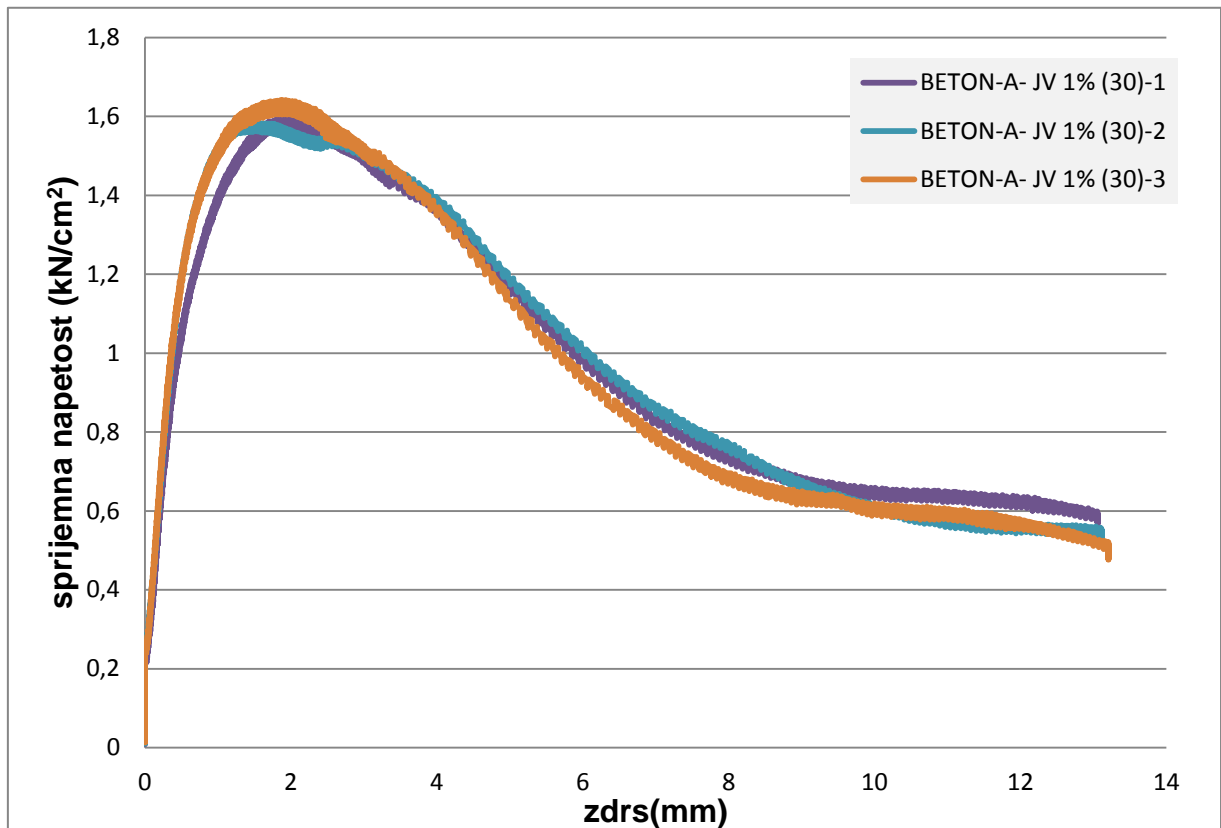
Spodnji grafikon 5.121 prikazuje sprejemno napetost odvisno od zdrsa rebraste armature. Na začetku sprejemna napetost hitro narašča, ker se rebra armaturnih palic naslonijo na okoliški beton. S časom sena betonu, ki je naslonjen na rebra, začnejo pojavljati mikro razpoke in s tem se začnejo pomiki palice na prostem koncu počasi večati, to je približno do zdrsa 1.6 mm. Pri večji obremenitvi se tlačna trdnost betona, med rebri izčrpa in beton se med rebri začne drobiti. To se je zgodilo pri pomiku palice na prostem robu me 1.6 mm– in 1.8 mm. Pri zdrs okoli 2 mm se krivulja sprejemna napetost – zdrs obrne in sprejemna napetost se manjša. Beton se med rebri drobi. Rebraste palice bi se iz betona izvlekle, če bi meli na razpolago zadosten hod spodnjega bata

Grafikon 5.121: Diagram sprejemnih napetosti -zdrs za preizkušance iz betona BETON-A

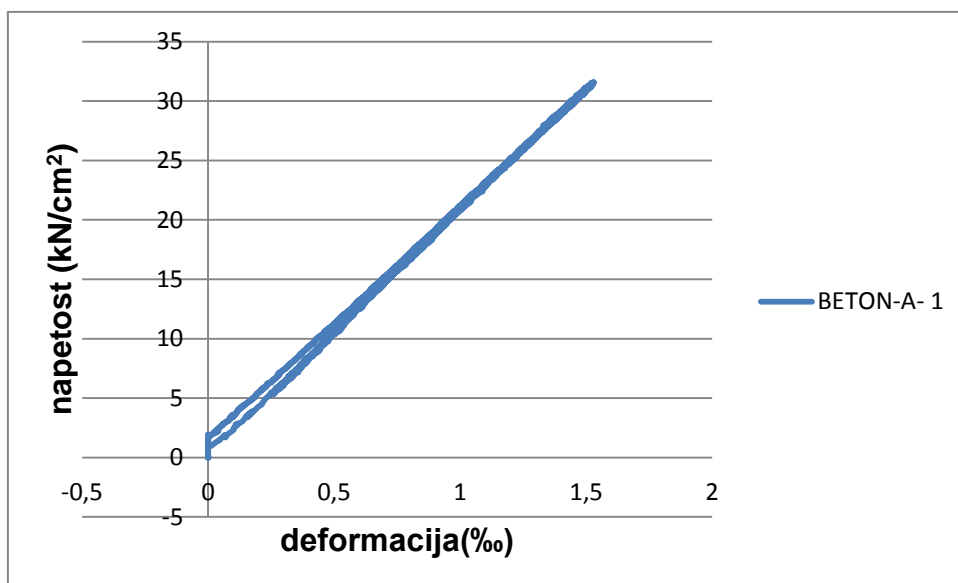


Spodnji grafikon 5.122 prikazuje sprejemno napetost  $v$ , odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona BETON-A JV 1 % ( $l=30\text{mm}$ ). Če primerjamo z zgornjim grafikonom, kjer so preizkušanci brez vlaken, ugotovimo, da sta grafikona skoraj identična. Vlakna imajo, pri tem zanemarljiv vpliv na sprejemno napetost.

Grafikon 5.122 Diagram sprijemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-A-  
JV 1 % (l=30mm)



Grafikon 5.123: Potek napetosti v odvisnosti od deformacije armature



Zgornji grafikon 5.123 prikazuje napetost v palici, odvisno od deformacije. Napetost v palici je bila v elastičnem območju, zato se je deformacija palice po izvleku iz kocke vrnila nazaj na začetno stanje. Elastično območje sega približno do 2 ‰. Vsi drugi preizkušanci z vlakni in brez vlaken so imeli podobno premico na grafikonu.

Preglednica 5.12: Primerjava sprijemne trdnosti in napetosti v palici pri betonu z vlakni in brez njih.

preizkušanec	Max. sprijemna napetost (kN/cm <sup>2</sup> )	Povprečna sprijemna napetost (kN/cm <sup>2</sup> )	Napetost v palici (kN/cm <sup>2</sup> )	Povprečna napetost v palici (kN/cm <sup>2</sup> )
BETON-A-1	1,58	1,59	31,6	31,9
BETON-A-2	1,58		31,7	
BETON-A-3	1,61		32,4	
BETON-A JV 1 % (l=30mm)-(1)	1,59	1,60	31,9	32,2
BETON-A JV 1 % (l=30mm)-(2)	1,58		31,8	
BETON-A JV 1 % (l=30mm)-(3)	1,64		32,8	

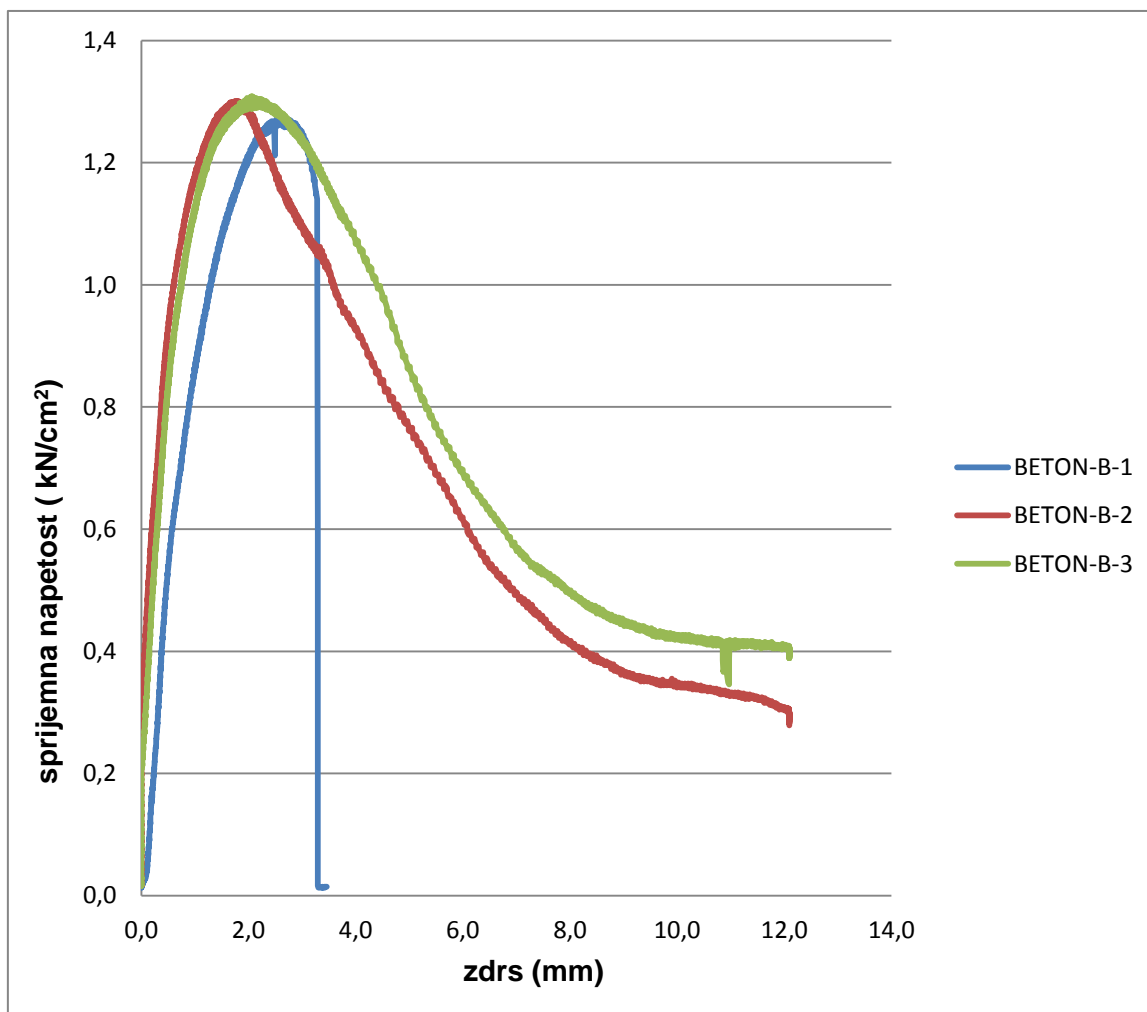
Iz zgornje preglednice je razvidno, da vlakna pri tej vrsti cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R praktično niso imela vpliva na sprijemno trdnost.

### 5.13. PREIZKUŠANCI IZ BETONA BETON-B

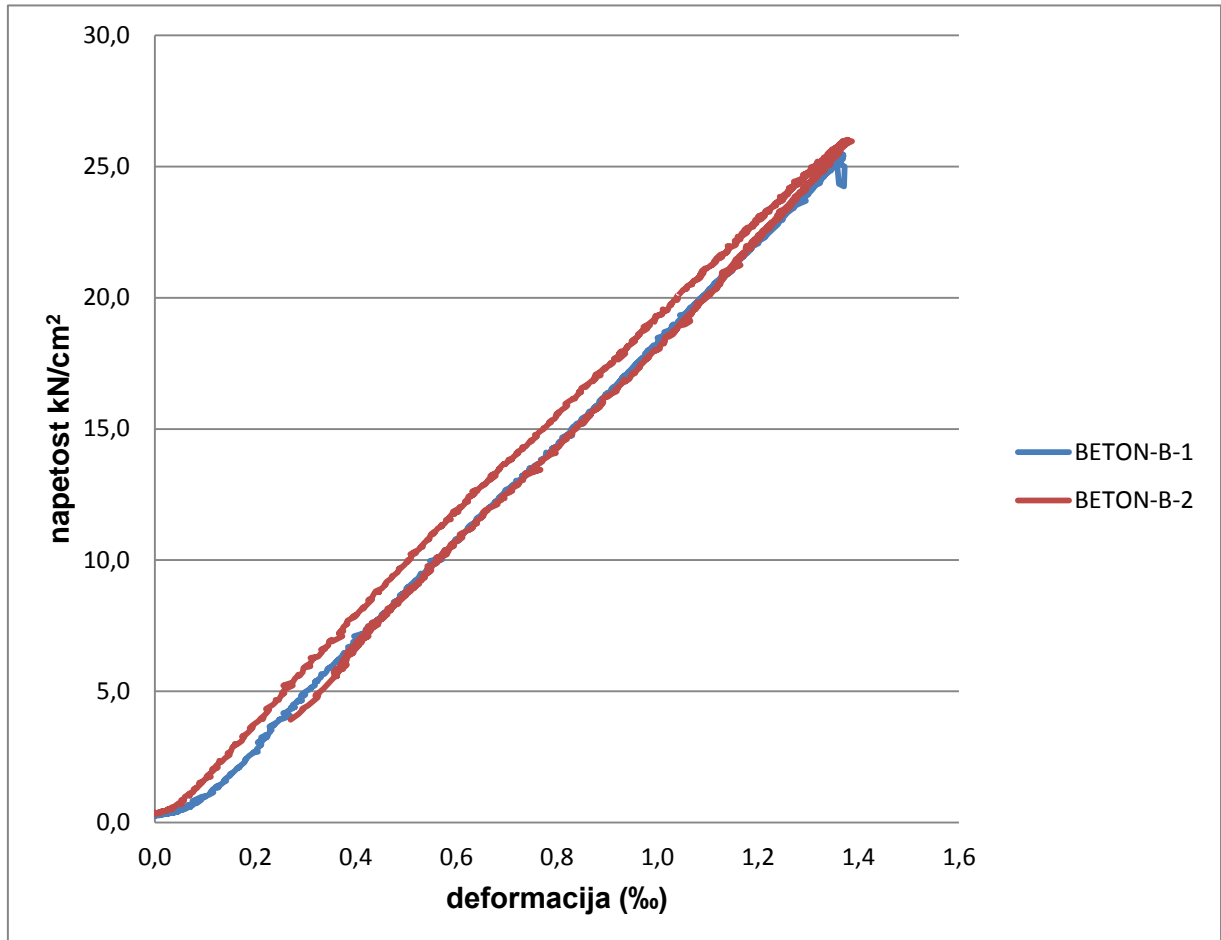
Spodnji grafikon 5.13 prikazuje sprijemno napetost odvisno od zdrsa rebraste armature. Na začetku sprijemna napetost hitro narašča, ker rebra armaturnih palic naslonijo na okoliški beton. Nato se betonu, ki je naslonjen na rebra, se začnejo pojavljati mikro razpoke in s tem se začnejo pomiki palice počasi večati, to je do zdrsa približno 1.5 mm. Pri večji obremenitvi se tlačna trdnost betona, ki je med rebri, izčrpa in beton med rebri se začne drobiti. To se je zgodilo pri zdrsu 1.5 mm– in 2 mm. Pri zdrsu med 2 mm–in 2.5 mm se krivulja obrne navzdol in sprijemna napetost se manjša. Beton se med rebri začne drobiti. Rebrasti palici 2 in 3 bi se iz betona izvlekli, če bi lahko test izvajali dovolj dolgo. Zdrs, ki smo ga lahko še beležili, je odvisen od merilnega območja elektronske merilne urice, ki znaša približno 12

mm. Sprejemna napetost bi tako šla počasi proti ničli. Pri preizkušancu 1 je iz grafa razvidno, da je počil in sprejemna napetost je v trenutku padla na nič. Razcep se zgodi, ker cepilne razpoke začnejo prodirati globlje v beton. Tako beton ni več mogel prenesti nateznih napetosti. Betonska kocka se razpre, in tako ni več nikakršnega odpora proti sili, ki vleče palico. Iz tega sledi, da je smiselno dodati vlakna običajnemu betonu, da cepilne razpoke ne prodirajo globoko v beton.

Grafikon 5.13: Diagram sprejemnih napetosti -zdrs za preizkušance iz betona BETON-B



Grafikon 5.131: Potek napetosti armature v odvisnosti od njene deformacije

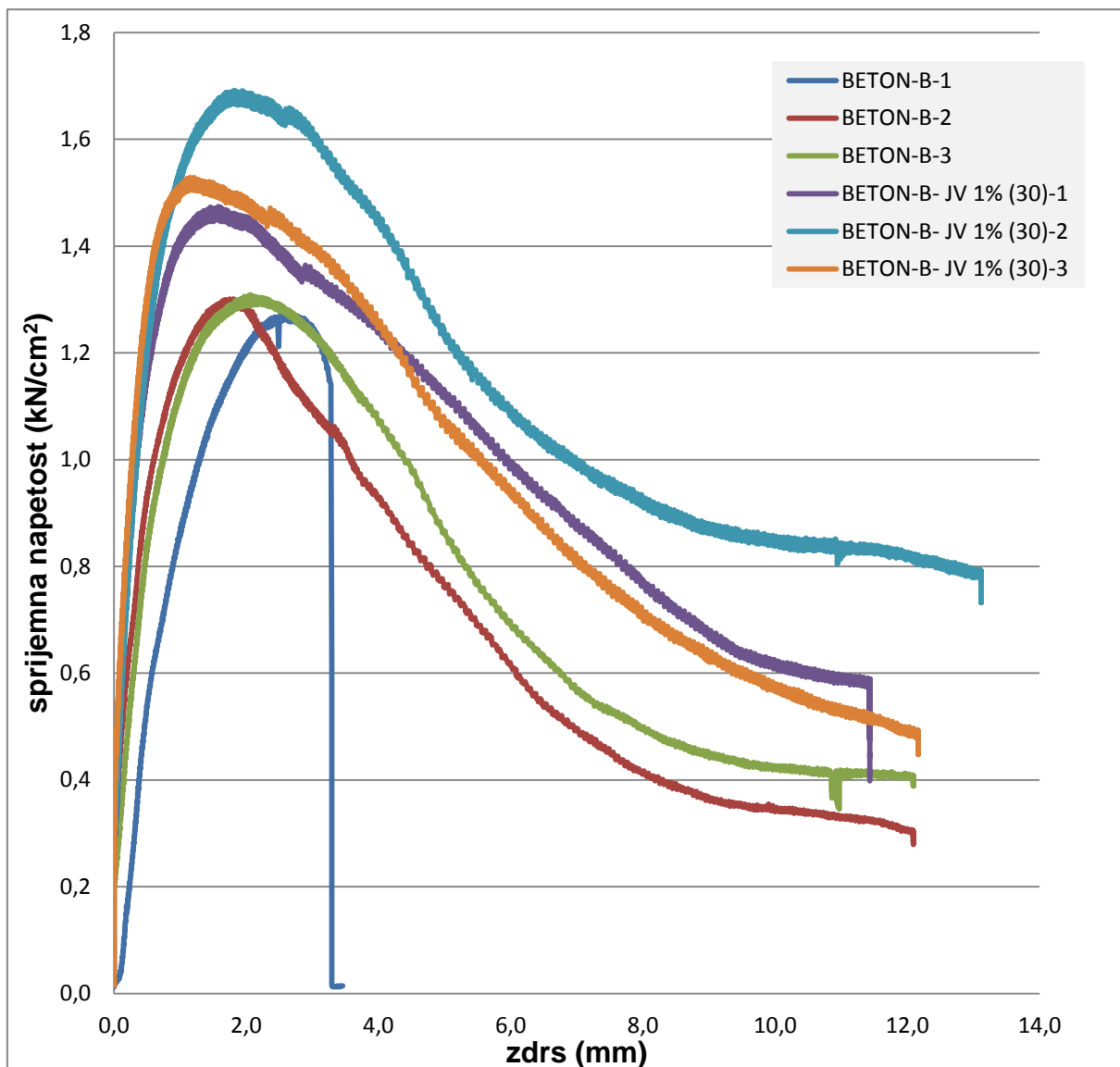


Iz zgornjega grafikona je razvidno, da je bila napetost dokaj nizka, da je bila armaturna palica pod mejo elastičnosti. Najvišja deformacija je bila 1.4‰, meja elastičnosti pa je približno 2‰. Deformacija palice se je, ko je napetost v palici padla, povrnila v prvotno stanje.



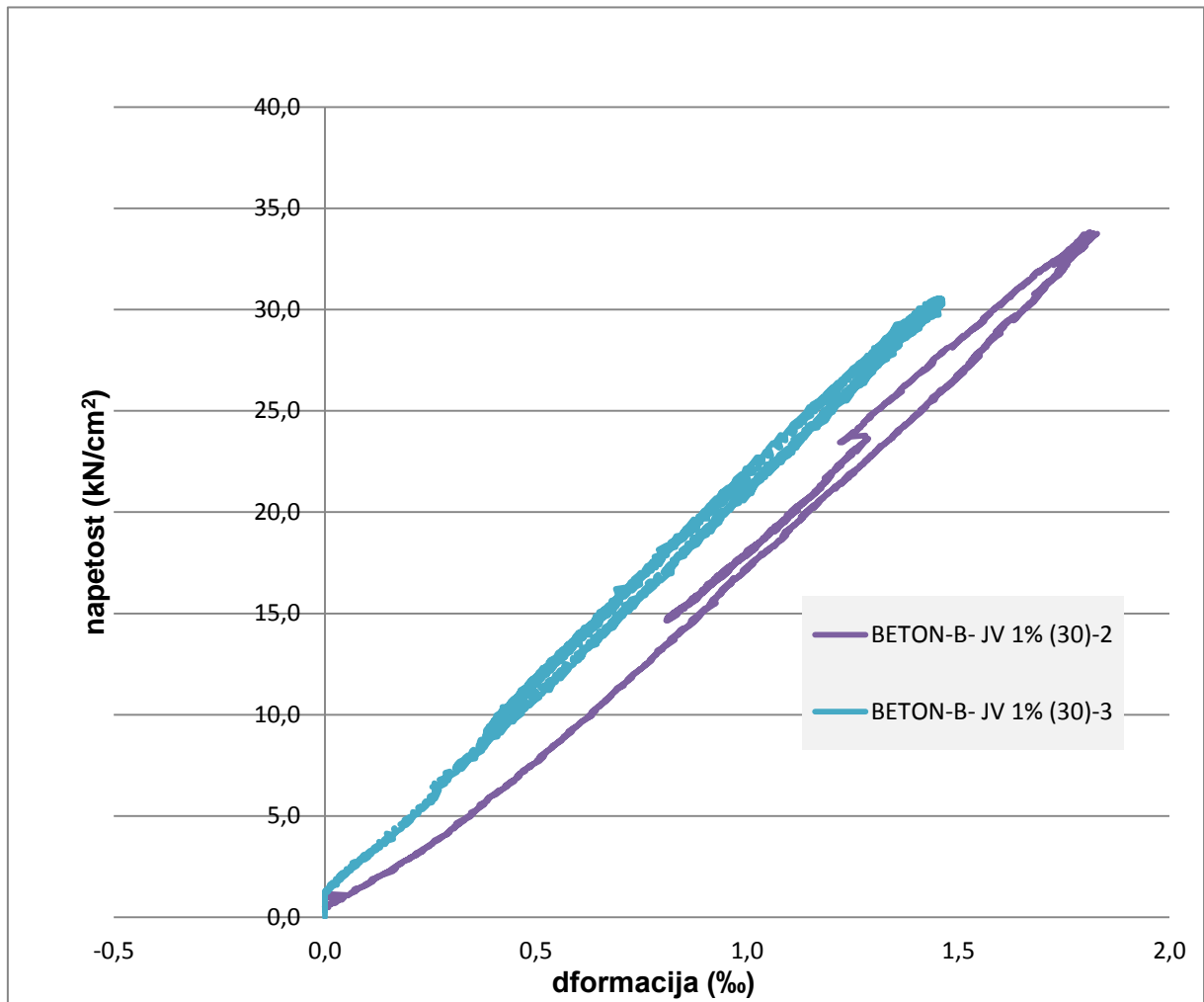
- BETON-B JV 1 % ( $l=30\text{mm}$ )

Grafikon 5.132: Diagram sprijemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-B in betona BETON-B JV 1 % ( $l=30\text{mm}$ )



Na zgornjem grafikonu 5.132 so diagrami sprijemna napetost – zdrs za preizkušance iz betona BETON-B z mikrovlakni in preizkušance betona BETON-B brez mikrovlagen. Iz zgornjega grafikona je razvidno, da palica ne zdrsne do sprijemne napetosti okoli 0,3 kN/cm<sup>2</sup>. Sprijemne napetosti za betone z 1 % mikrovlagen naraščajo hitreje in dosežejo višjo vrednost kot primerljivi beton brez vlaken. Pri zdrs 10 mm vidimo, da imajo preizkušanci z mikrovlakni večjo sprijemno napetost od preizkušancev brez mikrovlagen. Tudi, ko je zdrs že relativno velik, mikrovlakna otežujejo drobljenje betona okoli reber palic.

Grafikon 5.133: Potek napetosti armature v odvisnosti od njene deformacije



Iz zgornjega grafikona je razvidno, da je bila napetost dokaj nizka in je bila armaturna palica v elastičnem področju. Preizkušanci z mikrovlakni so imeli napetost v palici višjo za 5  $\text{kN/cm}^2$ . Najvišja deformacija je bila 1.5 ‰, meja elastičnosti pa je približno 2 ‰. Deformacija palice se je, ko je napetost v palici padla, povrnila v prvotno stanje.

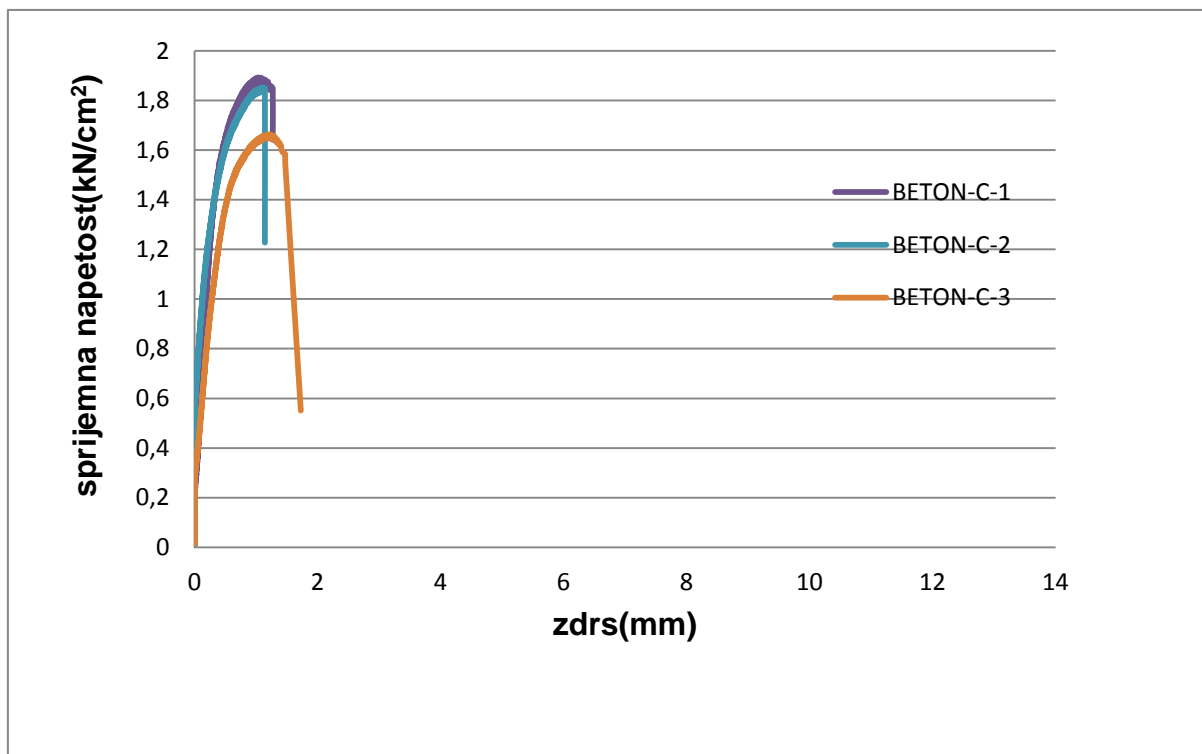
Preglednica 5.13: Primerjava sprijemnih trdnosti in napetosti palicah pri preizkušancih z vlakni in brez njih

preizkušaneec	Max. sprijemna napetost (kN/cm <sup>2</sup> )	Povprečna sprijemna napetost (kN/cm <sup>2</sup> )	Napetost v palici (kN/cm <sup>2</sup> )	Povprečna napetost v palici (kN/cm <sup>2</sup> )
BETON-B-1	1,27	1,29	25,4	25,9
BETON-B-2	1,30		26,02	
BETON-B-3	1,31		26,18	
BETON-B-JV 1 % (30)-1	1,47	1,56	29,49	31,3
BETON-B-JV 1 % (30)-2	1,69		33,8	
BETON-B-JV 1 % (30)-3	1,53		30,6	

Iz zgornje preglednice je razvidno, da je sprijemna napetost pri preizkušanci z vlakni višja za približno 20 %. Poslednično je za 20 % višja tudi napetost v palici.

#### 5.14. PREIZKUŠANCI IZ BETONA BETON-C

Grafikon 5.141: Diagram sprejemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-C



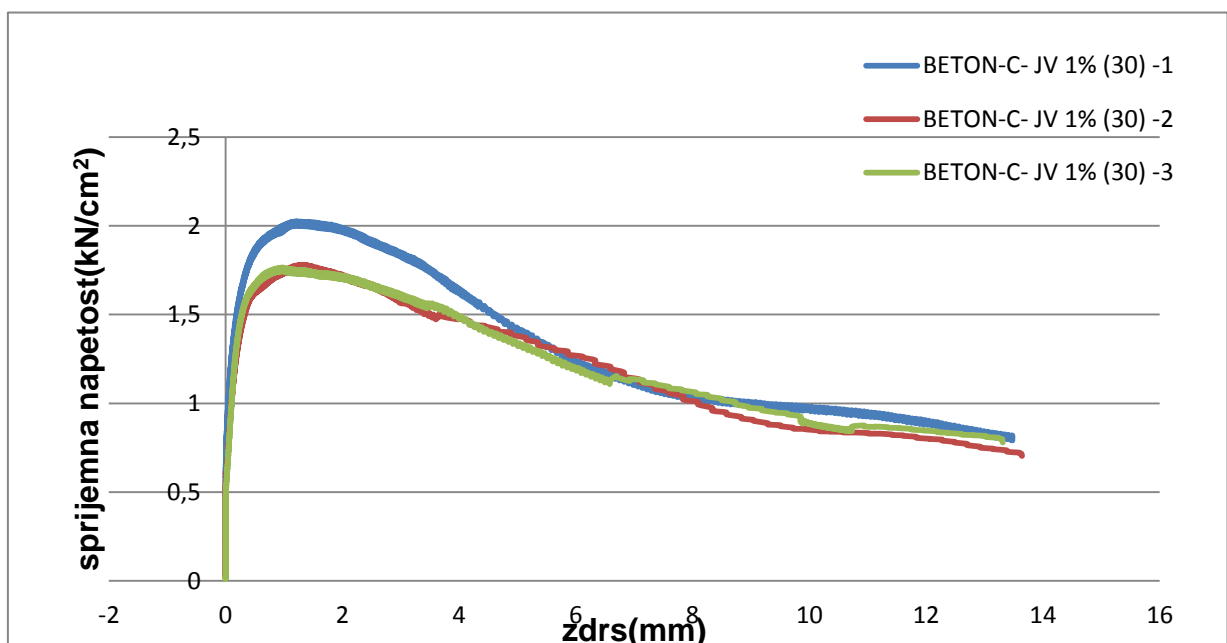
Sprejemna napetost hitro narašča do približno 1,5 kN/cm<sup>2</sup>. Do te napetosti je zdrs armaturne palice majhen. Potem sprejemna napetost začne počasneje naraščati, zdrs palice pa je vse večji. Beton se med rebri drobi, zato so opazni majhni skoki. Pri zdrsih rebraste palice med 1,2 mm–in 1,6 mm sprejemne napetosti ne naraščajo več. Pri preizkušancih pa je iz grafa 5.141 razvidno, da so počili in se je sprejemna napetost v trenutku zmanjšala na vrednost nič. Cepilne razpoke so začele prodirati globlje v beton in beton ne more več prenesti nateznih napetosti. Betonska kocka se silovito razpre, s tem ni več nikakršnega odpora proti sili, ki vleče palico. Iz tega sledi, da je smiselno dodati vlakna običajnemu betonu, da cepilne razpoke ne prodirajo globoko v beton.

Slika 5.142: Prikaz razcepa betona pri izvleku armaturne palice



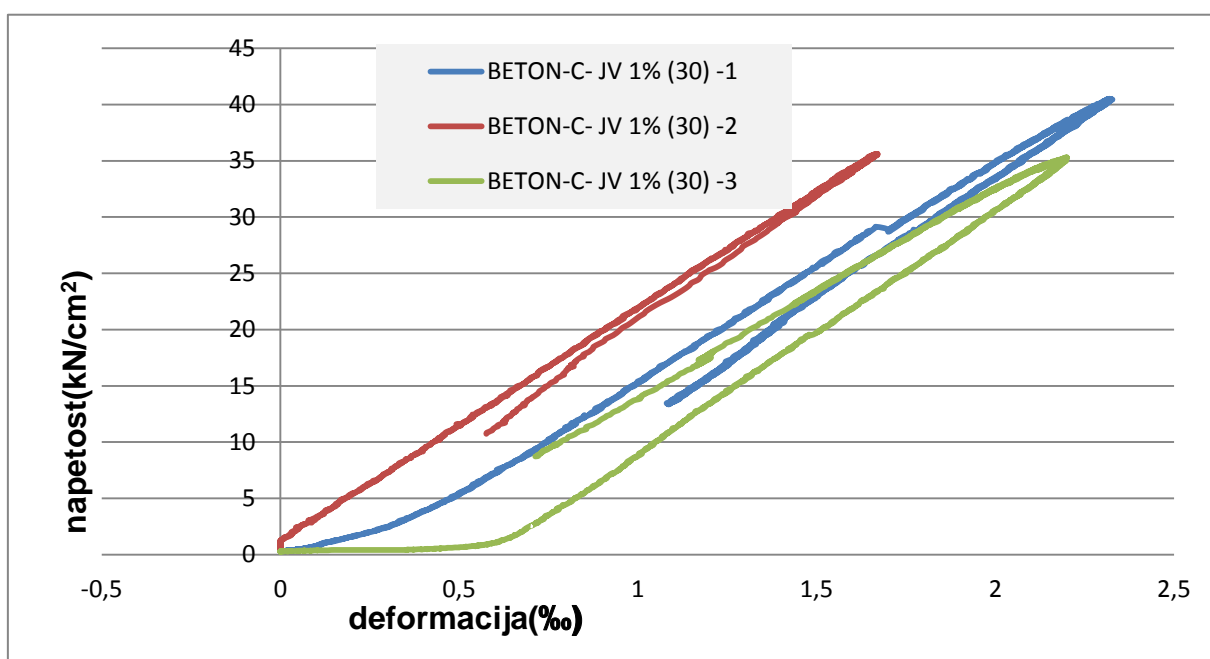
- BETON-C JV 1 % (l=30mm).

Grafikon 5.142: Diagram sprijemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETON-C-JV 1 % (l=30mm).



Sprijemna napetost hitro narašča do približno  $1,5 \text{ kN/cm}^2$ . Do te napetosti je zdrs armaturne palice majhen. Potem sprejemna napetost prične počasneje naraščati, zdrs palice pa je vse večji. Beton se med rebri prične drobiti. Pri zdrslih rebraste palice med  $1,5 \text{ mm}$ –in  $2 \text{ mm}$  sprijemne napetosti ne naraščajo več. Sprijemne napetosti počasi padajo, zdrs armaturne palice pa je vse večji do izvleka armature. Vlakna so preprečila, da cepilne razpoke niso prodirale globlje v armaturo in beton zato ni počil. Natezne napetosti, ki so nastale ob obodu reber, v tem primeru pomagajo prenašati tudi vlakna.

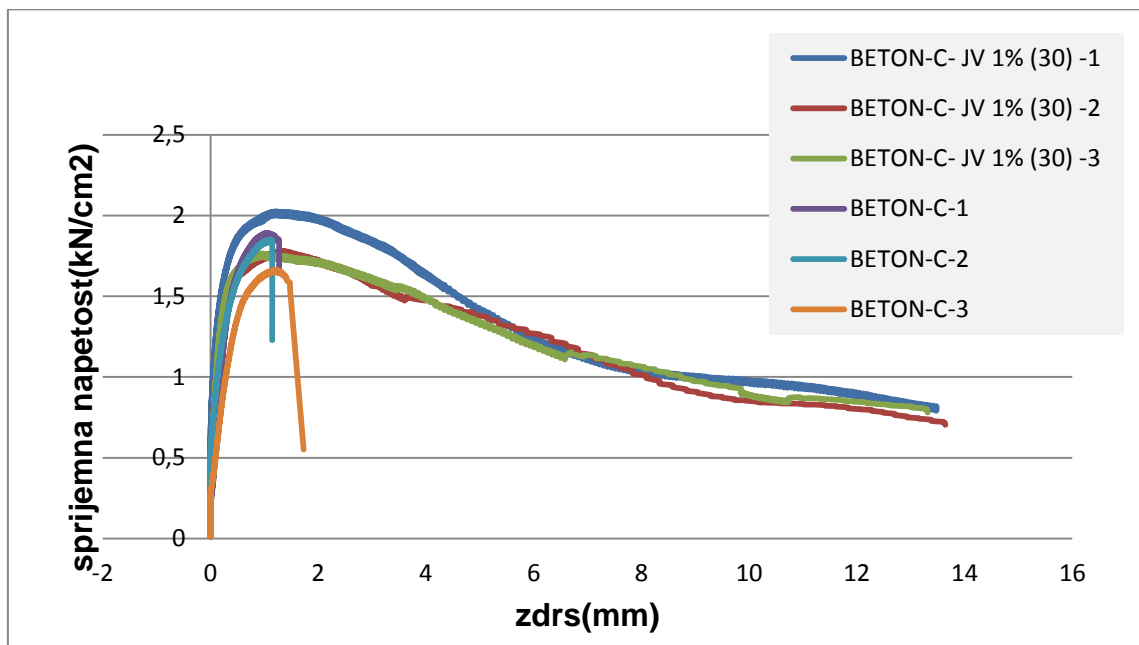
Grafikon 5.144: Potek napetosti armature v odvisnosti od njene deformacije



Tudi za te preizkušance je bila armatura še v elastičnem območju in se je deformacija armature skoraj izničila, ko se je palica izvlekla iz betona.

- Primerjava betona BETON-C JV 1 % ( $l=30\text{mm}$ ) in betona BETON-C

Grafikon 5.145: Diagram sprejemnih napetosti-zdrs za preizkušance iz betona BETONA-C JV 1 % ( $l=30\text{mm}$ ) in betona BETONA-C



Iz zgornjega grafikona 5.144 je razvidno, da zaradi vlaken maksimalne sprejemne napetosti niso veliko večje in da se je beton med rebri podobno drobil. Vlakena so preprečila, da se razpoke niso širile globlje v notranjost betona. Natezne napetosti, ki so nastale ob obodu reber, v tem primeru pomagajo prenašati vlakna. Preizkušanci z mikro armaturo zato niso počili. Rebrasta palica se je izvlekla iz betona.

Preglednica 5.14: Primerjava sprijemnih napetosti in napetostih v palicah pri preizkušancih z vlakni in brez njih

preizkušanec	Max. sprijemna napetost (kN/cm <sup>2</sup> )	Povprečna sprijemna napetost (kN/cm <sup>2</sup> )	Napetost v palici (kN/cm <sup>2</sup> )	Povprečna napetost v palici (kN/cm <sup>2</sup> )
BETON-C-1	1,89	1,8	37,87	36,4
BETON-C-2	1,85		37,07	
BETON-C-3	1,66		33,28	
BETON-C-JV -1 % (l=30mm)-1	2,03	1,86	40,5	37,1
BETON-C-JV 1 % (l=30mm)-2	1,78		35,6	
BETON-C-JV 1 % (l=30mm)-3	1,77		35,3	

Iz zgornje preglednice 5.14 je razvidno, da imajo vlakna pri betonu BETON-C na sprijemno napetost relativno majhen vpliv. Beton se je med rebri drobil podobno, kot da ne bi imel vlaken.

## 6. ANALIZA REZULTATOV EKSPERIMENTALNIH PREISKAV

V diplomski nalogi smo preiskovali, kakšen vpliv imajo jeklena vlakna dolžine 30mm vgrajena v beton. Na izvlek armature iz betona. Pri določenih vrstah betona

- BETON-A in BETON-A-JV 1 % (l=30mm)

Tlačna trdnost betona ki je vseboval cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R z 1% jeklenih vlaken dolžine 30mmse je v primerjavi s primerljivim betonom brez vlaken, povečala za približno 18 %. Pri tem betonu so vlakna imela velik vpliv na tlačno trdnost betona. Rezultati preizkusov tlačne trdnosti so v preglednicah 5.70 in 5.71. Jeklena vlakna pa niso bistveno vpliva na sprijemno napetost. Grafa 5.121 in 5.122 sprijemne napetosti - zdrsa sta bila skoraj identična.



- BETON – B in BETON-B-JV1  $l=30\text{mm}$

Tlačna trdnost betona ki je vseboval cement CEM II/B-M (LL-V) 42,5N z 1 % jeklenih vlaken dolžine 30mm se je povečala za približno 9 %. Pri tem betonu so imela vlakna vpliv na tlačno trdnost betona in večji na sprijemno trdnost, kot pri betonu BETON-A. Rezultati preizkusov tlačne trdnosti so v preglednicah 5.70 in 5.71. Pri tem betonu brez vlaken (BETON – B) je ena kocka počila, ker so cepilne razpoke prodirale globlje v beton. Vlakna pri betonu BETON-B- JV1  $l=30\text{mm}$  so tako preprečila, da bi se cepilne razpoke širile v notranjost kocke. Vlakna so zagotovila višjo natezno trdnost, kompozita v primerjavi z betonom brez vlaken in preprečila razcep preizkušanca. Vlakna so imela tudi velik vpliv na mejno sprijemno napetost. Sprijemna ntrdnost v betonu BETONU-B-JV 1  $l=30\text{mm}$  je bila višja za približno 19 %. Rezultati preizkusov so podani v grafikonih 5.13 in 5.132 ter preglednici 5.13.

- BETON-C in BETON-C-JV 1  $l=30\text{mm}$

Čisti portlandski cement CEM I 52,5 R v betonu BETON-C je močnejši in ima višjo tlačno trdnost, v primerjavi z osnovnim cementom, zato vlakna pri betonu s tem cementom niso prišla do izraza in na tlačno trdnost praktično niso imela vpliva. BETON-C-JV 1  $l=30\text{mm}$  je imel še celo malo manjšo tlačno trdnost. Vlakna so za malenkost celo onemogočila cementu povezavo agregata med sabo. Istočasno, ko se je porušila povezava med agregatom v betonu, so spustila tudi vlakna. Rezultati preizkusov tlačne trdnosti so v preglednicah 5.70 in 5.71. Pri betonu brez vlaken so preizkušanci-kocke počile, ker so cepilne razpoke prodirale globlje v beton. Vlakna pri betonu BETONU-C-JV 1  $l=30\text{mm}$  so tako preprečila, da bi se cepilne razpoke širile v notranjost kocke. Vlakna so pomagala pri premagovanju nateznih trdnosti napetosti kompozita in tako preprečila nenaden razcep betona ter posledično omogočala, da sprijemnost med betonom in armaturo, kljub povečevanju zdrsa, še ni popolnoma popustila. Vlakna so imela relativno majhen vpliv na maksimalno sprijemno napetost. Rezultati preizkusov so podani v grafikonih 5.141 in 5.142,5.144 ter v preglednici 5.14.

## 7. ZAKLJUČEK

Jeklena vlakna dolžine 30mm z volumskim deležem 1% imajo največji vpliv na sprijemnost med armaturo in betonom pri betonih, ki vsebujejo cement nižjega trdnostnega razreda. Pri betonih, ki so vsebovali cement najvišjega trdnostnega razreda, CEM I 52,5 R, praktično ni bilo zaznati vpliva vlaken ne na maksimalno doseženo sprijemno napetost in ne na velikost tlačne trdnosti betona. Vplivala so le na tip porušitve preizkušanca. Noben preizkušanec z vlakni se ni porušil z razcepom. Pri dovolj veliki sili se je armaturna palica iz kompozita le izvlekla.

Selak, G. 2016. Vpliv jeklenih vlaken na sprijemnost med armaturo in betonom ...  
Dipl. nal. – VSS. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

## VIRI

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

Juvanec, B. 2015. Sprijemnost med vlaknastim betonom in armaturo. Dipl. nal. – VSS. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

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

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.

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bosiljkov, V. B. 2011. Gradiva vaje 2011/2012. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.

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

Saje, D. 2015 Tehnologija betona. Predavanja Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 56 str.

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.

Jelušič, M. 2009. Tlačna trdnost vlaknastih betonov. 11 Dipl. nal. – UNI. Ljubljana, UL, FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

Niko Železnik

<http://www.niko.si/si/izdeki-za-gradbenistvo/jeklena-vlakna-2.html> pridobljeno (25.7.2016)

Murcia-Delso, J., Stavridis, A., Shing, B. 2011. Modeling the bond-slip behavior of confined large-diameter reinforcing bars: proceedings of the III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Corfu, Greece, 25–28 May 2011

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 str.

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

Izjava o lastnostih cementa CEM I\_52\_5R. 2013. Anhovo, Salanit Anhovo: loč. pag.

Izjava o lastnostih cementa CEM II/B-S42,5 R. 2013. Anhovo, Salanit Anhovo: loč. pag.

Selak, G. 2016. Vpliv jeklenih vlaken na sprijemnost med armaturo in betonom ...  
Dipl. nal. – VSS. Ljubljana, UL FGG, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

---

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.

Fly ash concrete : a technical analysis for compressive strength Dr S ati1, J N Kale, S Suman 2012

Juan Murcia-Delso 2013. Bond-Slip Behavior and Development of Bridge Column Longitudinal Reinforcing Bars in Enlarged Pile Shafts

Yan LB, Chou N. Sustainable Concrete and Structures with Natural Fibre Reinforcement. Infrastructure Corrosion and Durability – A Sustainability Study. Editor: Yang Lu, OMICS Group Incorporation, 2013,

Bolu cemento

[http://www.oyakcemento.com/uploads/brosur/en-ogutulmus\\_yuksef\\_firin\\_curufu](http://www.oyakcemento.com/uploads/brosur/en-ogutulmus_yuksef_firin_curufu). (pridobljeno 23.7.2016)

DIN488 teil2 september 1984 (Betonstahl) Masse und Gewichte :6 str.

How-concrete-is-made

<http://www.cement.org/cement-concrete-basics/how-concrete-is-made> (pridobljeno 20.7.2016)

Institut für Bauingenieurwesen

<http://wwwhttps://www.baustoffe.tu-berlin.de/menue/forschung> (pridobljeno 21.7 2016)

Lorenčić

[http://www.lorencic.si/vlakna-dodatki-estrihu-spojnik-izravna-na-masa-pospesevalec-susenja\\_09-8\\_3.htm](http://www.lorencic.si/vlakna-dodatki-estrihu-spojnik-izravna-na-masa-pospesevalec-susenja_09-8_3.htm) (pridobljeno 30.7.2016)

Tornadoplus

<http://tornadoplus.eu/fibrils-polipropilenska-vlakna-za-armiranje-betona> (pridobljeno 1.8.2016)

Splošno o mikro armaturah

<http://www.spk.si/mikroarmature.html> (pridobljeno 2.9.2016)

Wikipedia

<https://en.wikipedia.org/wiki/Concrete> (pridobljeno 20.7.2016)