

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:

Bratkovič, U., 2016. Vpliv oblike preskušanca in smeri vgrajevanja betona na velikost tlačne trdnosti vlaknastega betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D., somentor Lopatič, J.): 39 str.

Datum arhiviranja: 09-09-2016

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:

Bratkovič, U., 2016. Vpliv oblike preskušanca in smeri vgrajevanja betona na velikost tlačne trdnosti vlaknastega betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D., co-supervisor Lopatič, J.): 39 pp.

Archiving Date: 09-09-2016

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  
SMER OPERATIVNO  
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

**UROŠ BRATKOVIČ**

**VPLIV OBLIKE PRESKUŠANCA IN SMERI  
VGRAJEVANJA BETONA NA VELIKOST TLAČNE  
TRDNOSTI VLAKNASTEGA BETONA**

Diplomska naloga št.: 560/SOG

**EFFECT OF SHAPE OF THE SPECIMEN AND  
DIRECTION OF CASTING ON COMPRESSIVE  
STRENGTH OF FIBROUS CONCRETE**

Graduation thesis No.: 560/SOG

**Mentor:**

doc. dr. Drago Saje

**Somentor:**

izr. prof. dr. Jože Lopatič

Ljubljana, 05. 09. 2016

## **STRAN ZA POPRAVKE**

**Stran z napako**

**Vrstica z napako**

**Namesto**

**Naj bo**

## IZJAVE

Spodaj podpisani študent **Uroš Bratkovič**, vpisna številka 26105987, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: **Vpliv oblike preskušanca in smeri vgrajevanja betona na velikost tlačne trdnosti vlaknastega betona**

### 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 vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil 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: Ljubljani

Datum 27. avgust 2016

Podpis študenta:

Uroš Bratkovič

## **BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

- UDK:** 624.012.4(043.2)
- Avtor:** Uroš Bratkovič
- Mentor:** doc.dr. Drago Saje
- Somentor:** izr. prof. dr. Jože Lopatič
- Naslov:** Vpliv oblike preskušanca in smeri vgrajevanja betona na velikost tlačne trdnosti vlaknastega betona
- Tip dokumenta:** diplomsko delo
- Obseg in oprema:** 39 str., 41 slik., 17 preg.
- Ključne besede:** beton, vlakna, tlačna trdnost, vlaknast beton

### **Izvleček**

V diplomskem delu smo raziskovali lastnosti betonov, ojačanih z jeklenimi vlakni. Obravnavali smo vpliv orientiranosti vlaken na mehanske lastnosti. Opisali smo lastni postopek izdelave kalupov v mizarški delavnici in postopka izdelave preskušancev v betonarni. Eksperimentalno smo izmerili trdnost preskušancev različnih oblik, z vsebnostjo različnih jeklenih vlaken. Izvedli smo tudi upogibne preizkuse. Ugotovili smo, da oblika preskušanca in smer vgrajevanja betona v kalup vplivata na velikost tlačne trdnosti vlaknastega betona.

**BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND  
ABSTRACT****UDC:** 624.012.4(043.2)**Author:** Uroš Bratkovič**Supervisor:** Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D**Cosupervisor:** Assoc. Prof. Jože Lopatič, Ph.D**Title:** Effect of shape of the specimen and direction of casting on compressive strength of fibrous concrete**Document type:** Graduation Thesis – Higher Professional Studies**Notes:** 39 p., 41 fig., 17 tab.**Keywords:** concrete, fibers, compressive strength, fibrous concrete**Abstract**

In this thesis, we investigated the properties of concrete reinforced with steel fibers. We have considered the influence of the orientation of fibers on the mechanical properties. We describe their own process of making molds in workshop and manufacturing process of the specimens in the concrete plant. Experimentally we measured the strength of the test specimens of various shapes, with a variety of steel fibers. We also made bending tests. We have found that the shape of the test specimen and the direction of casting of concrete into the mold affects the size of the compressive strength of the fibrous concrete.

## **ZAHVALA**

Za pomoč in podporo pri nastajanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju doc.dr. Dragu Sajetu in somentorju izr.prof.dr. Jožetu Lopatiču ter laborantu Francu Čeponu dipl.ing.grad.

Posebna zahvala je namenjena kolegu Denisu Krncu, ki je pomagal pri pripravi kalupov, podjetju Irma, d.o.o., katerih vlakna smo uporabili pri preiskavah, in betonarni Vrščaj iz Novega mesta.

**KAZALO**

IZJAVE .....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	IV
ZAHVALA.....	V
KAZALO .....	VI
KAZALO SLIK.....	VIII
KAZALO PREGLEDNIC.....	X
1 Uvod.....	1
2 Splošno o betonu .....	2
2.1 Beton – nepogrešljiv gradbeni material.....	2
2.2 Mineralni agregat .....	2
2.2.1 Vrste agregata.....	2
2.2.2 Kvaliteta agregata.....	3
2.3 Cement .....	3
2.3.1 Proizvodnja cementa .....	3
2.3.2 Osnovne vrste cementov .....	4
2.3.3 Hidratacija cementa.....	5
2.4 Voda .....	5
2.5 Betoni .....	5
2.5.1 Sveža betonska mešanica .....	5
2.5.2 Kvaliteta betona.....	5
2.5.3 Vodocementni faktor in njegov vpliv na trdnost betona .....	5
3 Vlaknasti betoni.....	7
3.1 Vlaknasti betoni omogočajo izboljšavo betonskih karakteristik .....	7
3.2 Učinkovitost vlaken v mikroarmiranih betonih.....	7
4 Trdnost betona.....	9
4.1 Tlačna trdnost.....	9
4.2 Mehanizem porušitve betona.....	10
5 Vpliv vlaken na lastnosti materialov .....	12
5.1 Kompoziti.....	12
5.2 Enoosni tlačni preizkus .....	12
5.3 Princip utrditve betona z vlakni – povečana nateza trdnost kompozita.....	13
5.4 Področje plastičnosti.....	15



5.5	Vpliv vibracije na orientacijo vlaken .....	15
5.6	Hipoteza .....	15
5.6.1	Potrditev hipoteze.....	16
5.6.2	Ugotovitve orientacijske usmerjenosti .....	17
5.6.3	Vpliv vibracije na orientacijo vlaken – zaključne ugotovitve .....	18
6	Eksperimentalne raziskave.....	19
6.1	Praktični del.....	19
6.2	Preskušanci.....	19
6.3	Dimenzije preskušancev .....	20
6.4	Uporabljeni materiali.....	20
6.5	Jeklena vlakna .....	22
6.6	Sestava betonskih mešanic in priprava preskušancev .....	23
6.6.1	Izdelava kalupov – opis postopka.....	23
6.7	Betoniranje kalupov v betonarni Vrščaj.....	25
6.7.1	Betoniranje 1. serije.....	25
6.7.2	Betoniranje 2. serije.....	26
6.7.3	Betoniranje 3. serije.....	26
6.7.4	Betoniranje 4. serije.....	27
6.7.5	Betoniranje 5. serije.....	28
6.8	Nega betona.....	28
6.9	Preiskave v laboratoriju.....	29
6.10	Rez preskušancev in orientacija vlaken.....	31
7	Rezultati preiskav in diskusija.....	33
7.1	Izmerjene vrednosti .....	33
7.1.1	1. serija: beton C30/37, jeklena vlakna IRI-50/30.....	33
7.1.2	2. serija: beton C30/37, jeklena vlakna IRI-50/16.....	34
7.1.3	3. serija: beton C30/37, jeklena vlakna IRI-40/16.....	35
7.1.4	4. serija: Beton C30/37, jeklena vlakna IRI-FX 35 .....	36
7.1.5	5. serija: Beton C30/37, brez vlaken .....	37
7.2	Diskusija.....	37
8	Zaključki.....	38
	Literatura .....	39

**KAZALO SLIK**

Slika 1:	Primer uporabe betona v gradbeništvu .....	2
Slika 2:	Shematski prikaz proizvodnje cementa [1] .....	4
Slika 3:	Tlačna trdnost betona (28-dnevna) je močno odvisna od vodocementnega faktorja in se naraščanjem vodocementnega faktorja naglo zmanjšuje [1] .....	6
Slika 4:	Porušeni valji z vidno mikroarmaturo [5].....	7
Slika 5:	Medsebojno delovanje v okolici vlakna v nerazpokani matrici [2] Deformacijska kontura je prikazana za primer: a) brez obtežbe, b) natezna obremenitev, c) tlačno stiskanje .....	8
Slika 6:	Trdnost betona v odvisnosti os količine vgrajene vode [4] .....	9
Slika 7:	Odvisnost tlačne trdnosti betona od vodocementnega razmerja [4].....	10
Slika 8:	Obnašanje tlačno obremenjenih preskušancev [4] .....	10
Slika 9:	Pojav nateznih napetosti v osrednjem delu tlačno obremenjenega betonskega preskušanca [4].....	11
Slika 10:	Shematičen prikaz tlačnega preizkusa .....	12
Slika 11:	Prikaz napetosti v odvisnosti od raztezka za krhke ter žilave materiale, žilavost je enaka površini pod krivuljami [6].....	13
Slika 12:	Predpostavljen efekt vibracije na orientacijo vlaken [7] .....	16
Slika 13:	Kocka razcepljena v različnih smereh relativno na orientacijo vlaken [7].....	16
Slika 14:	Poravnava vlaken glede na smer upogibnih vzorcev [7] .....	17
Slika 15:	Diagram napetost raztezek .....	17
Slika 16:	Vzorec po kompresijskem stiskanju kaže vpliv poravnave vlaken na potek razpok .....	18
Slika 17:	Postavitve preskušancev s predvideno orientacijo vlaken pri merjenju tlačne trdnosti .....	19
Slika 18:	Zasnova upogibnega preiskusa.....	19
Slika 19:	Kamnolomski drobljeni agregat iz treh frakcij za betonsko mešanico 0/16 mm....	20
Slika 20:	Diagram zrnivosti za agregat 0/16 mm (Kamnolom Ježce).....	21
Slika 21:	Plastifikator: Cementol Delta Ekstra .....	22
Slika 22:	Uporabljena jeklena vlakna:JV 40/16, JV 50/16, JV 50/30, FX 35.....	22
Slika 23:	Jeklena vlakna, uporabljena v betonih za preizkuse, ki smo jih obravnavali v okviru diplomske naloge .....	22
Slika 24:	Izdelava kalupov v mizarski delavnici .....	24
Slika 25:	Kalupi pripravljene za transport do betonarne .....	24
Slika 26:	Tehtanje vlaken .....	25
Slika 27:	Jeklena vlakna JV 50/30 v planetarnem mešalcu .....	26
Slika 28:	Jeklena vlakna JV 40/16 v planetarnem mešalcu za 3. serijo.....	27
Slika 29:	Jeklena vlakna FX 35 v planetarnem mešalcu za 4. serijo .....	27
Slika 30:	Betoniranje ležečih prizem .....	28
Slika 31:	Položitev preskušancev v bazen .....	28

... se nadaljuje

Slika 32:	Preskušanci pod vodo .....	29
Slika 33:	Kocka v stiskalnici; vidne so vertikalne razpoke .....	29
Slika 34:	Hidravlična stiskalnica za preizkus tlačne trdnosti (zelena) ter stroj za preizkus upogibne trdnosti (obarvan modro) .....	29
Slika 35:	Vzorci je bilo potrebno pred preizkusom kontrolno stehtati in premeriti .....	30
Slika 36:	Slika laboratorijskega prostora med merjenjem .....	30
Slika 37:	Razpokana prizma pri tlačnem preizkusu; vidi se potek posameznih razpok .....	30
Slika 38:	Preizkus upogibne trdnosti 1 .....	31
Slika 39:	Preizkus upogibne trdnosti 2 .....	31
Slika 40:	Sliki prikazujeta rez 1. serije (JV 50/30); prizma betonirana v ležečem kalupu ....	31
Slika 41:	Zgoraj prerezi iz 3. serije z JV 40/16 a.) prizma betonirana pokončno b.) prizma betonirana leže Spodaj prerezi iz 4. serije z vlakni F35 c.) prizma betonirana pokončno d.) prizma betonirana leže.....	32

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1:	Zrnavost posameznih frakcij; deleži presejanega materiala čez odprtine pripadajoče velikosti v odstotkih.....	20
Preglednica 2:	Zrnavost in delež frakcij agregata. ....	21
Preglednica 3:	Serijski kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.....	25
Preglednica 4:	Serijski kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.....	26
Preglednica 5:	Serijski kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.....	26
Preglednica 6:	Serijski kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.....	27
Preglednica 7:	Serijski kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.....	28
Preglednica 8:	Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 1. serijo (vlakna JV 50/30) .....	33
Preglednica 9:	Izmerjene vrednosti za upogibni test (vlakna JV 50/30) .....	33
Preglednica 10:	Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 2. serijo (vlakna JV 50/16) .....	34
Preglednica 11:	Izmerjene vrednosti za upogibni test (vlakna JV 50/16).....	34
Preglednica 12:	Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 3. serijo (vlakna JV 40/16) .....	35
Preglednica 13:	Izmerjene vrednosti za upogibni test (vlakna JV 50/16) .....	35
Preglednica 14:	Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 4. serijo (vlakna JV FX 35) .....	36
Preglednica 15:	Izmerjene vrednosti za upogibni test (vlakna JV FX 35) .....	36
Preglednica 16:	Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 5. serijo (beton brez vlaken) .....	37
Preglednica 17:	Izmerjene vrednosti za upogibni test (beton brez vlaken).....	37

## 1 Uvod

Človek je naselil skoraj vse kotičke našega planeta. Povsod kamor je stopila človeška noga, najdemo ostanke človeških bivališč in svetišč. Skozi tisočletja so se v večini ohranile le kamnite stavbe, ki so zaradi odpornejše sestave kljubovale potresom, poplavam, neurjem, požarom, roparskim pohodom in vojnām. Enako velja tudi za beton, saj je trpežen gradbeni material, ki ga že tisočletja uporabljamo za gradnjo različnih stavb in infrastrukturnih objektov. Beton je nepogrešljiv gradbeni material, ki ga največ porabijo za temeljenje. Na splošno lahko o cementnem betonu govorimo kot o kompozitu, umetno, industrijsko proizvedenem iz mešanice naravnih in umetnih sestavin. Naravni komponenti sta voda in agregat – pesek, umetna pa hidravlična veziva in potencialno uporabljeni kemijski dodatki. Moje delo zajema kompozit. Kompoziti so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent. Lastnosti kompozitnega materiala se razlikujejo od lastnosti posameznih materialov, ki ga tvorijo. Komponenta A v našem primeru je beton – cementna matrica in komponenta B so jeklena vlakna. Cementna matrica ima vlogo veziva, ki povezuje vlakna in jih ščiti pred zunanjimi vplivi. Vlakna so osnovni nosilci obremenitev, vendar je njihov učinek odvisen predvsem od kakovosti povezave z matrico. Pri tankih vlaknih je mejna površina med vlaknom in matrico velika v primerjavi s površino prereza vlakna. Vlakna doprinesejo k ojačitvi matrice le v primeru, ko trdnost stika med matrico in vlaknom večja od trdnosti same matrice. Vlakna v matrici so kontinuirana in orientirana, kar velja predvsem za celulozna vlakna v lesu, steklena, ogljikova ali kovinska vlakna v polimernih matricah, ali fragmentirana in neorientirana steklena in mineralna vlakna v polimernih matricah, ter kovinska vlakna v cementnih matricah. Kompoziti s fragmentiranimi vlakni so cenejši, lahko se vlivajo in lažje obdelujejo, ker imajo izotropne lastnosti. Kompoziti z orientiranimi vlakni so tehnološko bolj zahtevni in dražji, vendar imajo večjo trdnost in večjo upogibno elastičnost. Ideja za izbiro diplomskega dela se je porodila na gradbišču, kjer vsakodnevno uporabljamo različne betone pri gradnji stanovanjskih objektov. Odločili smo se za preizkušanje tlačne trdnosti betona z dodatkom jeklenih vlaken v različne kalupe, poleg tega smo izvedli upogibne preizkuse prizem, betoniranih leže ali pokonci.

Diplomsko delo zajema nekaj splošnih dejstev o betonu, njegovi tlačni trdnosti in vlaknastem betonu, na koncu preidemo na predstavitev eksperimentalnih raziskav, ki so bistveni in hkrati zanimivejši del naloge. Raziskave so pokazale, da je teorija eno področje in praksa drugo. Kot je javno znano iz vsesplošne literature je doprinos jeklenih vlaken k tlačni trdnosti betonov običajne trdnosti majhen ali celo zanemarljiv, se pa bistveno povečajo ostale lastnosti kot obrabna trdnost, duktilnost, žilavost, udarna trdnost, odpornost proti utrujanju in upogibna trdnost. Vlaknasti betoni se v gradbeništvo vedno več uporabljajo – od industrijskih tlakov do prefabriciranih cementnih izdelkov.

## 2 Splošno o betonu

### 2.1 Beton – nepogrešljiv gradbeni material

Beton je najpomembnejši gradbeni material, brez njega ne bi bilo večine mostov, viaduktov, predorov in tudi ne najvišjih nebotačnikov. Prav tako je nepogrešljiv pri izdelavi temeljev za praktično vse vrste gradnje. Uporabnost sodobnih betonov s številnimi dodatki, ki mu temeljito spremenijo lastnosti in področja uporabe pa bo v prihodnosti le še rasla.

V splošnem o betonu govorimo kot o kompozitu, umetno proizvedenem iz mešanice naravnih in umetnih sestavin. Navadni beton je sestavljen iz voda ter agregata, umetni pa vsebuje hidravlična veziva ter potencialno kemijski dodatki.

Nepogrešljiv je na območjih, kjer je potrebna visoka stopnja zaščite pred potresi, poplavami in drugimi naravnimi nesrečami. Beton je relativno preprost material, čeprav je bilo temeljito poznavanje njegove podrobne mikrostrukture doseženo šele nekaj let nazaj. Novo znanje izhaja iz ugotovitev mehanizmov hidratacije cementa in vpliva organskih in mineralnih kemijskih dodatkov. Osnovne lastnosti je sedaj mogoče z visokim specializiranim znanjem prilagajati na vse geografske in podnebne lokacije, tudi pod vodo.



Slika 1: Primer uporabe betona v gradbeništvu

### 2.2 Mineralni agregat

Pri izdelavi betonov je med osnovnimi sestavinami (vezivo, voda, zrak in agregat) količinsko največ agregata. Za različne vrste ter kvalitete betonov uporabljamo različne agregate, odvisno od postopka vgradnje, uporabe ter kvalitete trdnega betona.

#### 2.2.1 Vrste agregata

V gradbeništvu uporabljamo tri vrste agregata. Najenostavnejše in najcenejše je pridobivanje naravne mešanice, vendar je uporaba omejena samo na izdelavo nearmiranega betona. Za izdelavo

kvalitetnejših betonov uporabljamo rečni agregat in drobljenec. Rečni agregat mora biti pred uporabo opran, drobljenec pa izprašen.

### **2.2.2 Kvaliteta agregata**

Kvaliteto določamo glede na odpornost proti zmrzovanju, vsebnost organskih snovi in obliko granulata. Pri agregatih z večjimi frakcijami (nad 8mm) vsebnost drobnih delcev ne sme presegati 1 %. Drobni delci so tisti, ki pri mokrem sejanju padejo skozi sito z odprtiniami velikosti 0,09 mm. Vsebnost delcev glin v agregatu ne sme biti večja od 0,5 % pri drobnih in 0,25 % pri večjih frakcijah. Vsebnost lahkih delcev (premog, ostanki rastlin, bitumen in podobno) v agregatu ne sme biti večja od 1 %, za vidne betone pa ne večja od 0,5 %. Agregat ne sme vsebovati sulfatov in sulfidov. Pri manjših frakcijah je meja 1 %, pri večjih pa 0,5 %.

## **2.3 Cement**

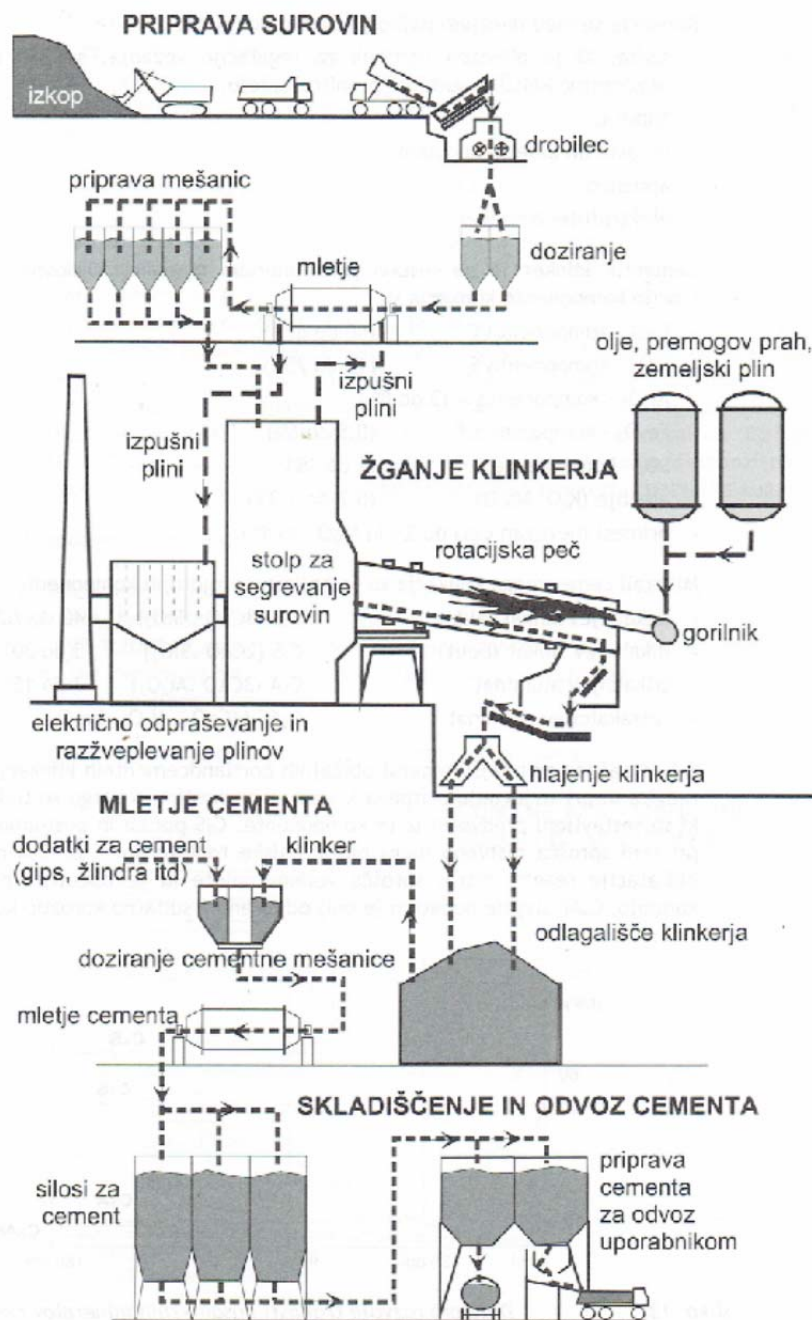
Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki po reakciji z vodo (hidratacija) veže in se strdi. Pri tem iz židke cementne paste nastane trd in trden cementni kamen, ki je sestavljen pretežno iz kalcijevih silikatnih hidratov, ki tudi v vodi ohrani stabilnost in trdnost.

### **2.3.1 Proizvodnja cementa**

Proizvodnja cementa poteka v štirih fazah:

- proizvodnja surovin,
- mletje surovinske moke,
- žganje klinkerja,
- mletje cementa.

Na sliki 2 lahko vidimo posamezne faze in pregled postopka cementne proizvodnje.



Slika 2: Shematski prikaz proizvodnje cementa [1]

### 2.3.2 Osnovne vrste cementov

Poznamo dve večji skupini cementov:

- silikatni (glavna sestavina so silikati kalcija,  $C_3S$ ),
- aluminatni (glavna sestavina so kalcij aluminati,  $C_3A$ ).

Med vrste silikatnih cementov spadajo Portland cement, Superfosfatni cementi, cementi z nizko toploto hidratacije in beli Portland cement. V diplomski nalogi je bil uporabljen portlanski cement CEM II/B-M(LL-V) 42,5 N iz Salonit Anhovega. [1]



### 2.3.3 Hidratacija cementa

Hidratacija cementa je eksotermni kemični proces pri reakciji cementa z vodo, katere posledica je strjevanje zmesi cementa, vode in agregata v beton. Proces hidratacije običajno opišemo s stopnjo hidratacije, to je tisti delež začetnega cementa, ki je po določenem času že v celoti prešel v cementne hidrate (spojine komponent cementa z vodo).

Za stopnjo hidratacije je v rabi izraz stopnja pretvorbe, lahko pa jo imenujemo tudi izkoristek cementa. Pri stopnji hidratacije 0,6 je 60 % delež cementa porabljen za nastanek hidratov, ostalih 40% pa je ostalo nedotaknjenih in se večinoma nahajajo v jedrih cementnih zrn in v notranjosti prvotnih kristalov cementnih mineralov. [2]

## 2.4 Voda

Na splošno velja, da je pitna voda primerna za pripravo betonskih mešanic z vezivi. Uporabljena je bila iz lokalnega vodovodnega sistema.

## 2.5 Betoni

V širšem pomenu so betoni vsi umetni kamni iz veziva in iz agregata, ki tvori nosilni skelet; v ožjem pomenu pa je beton umetni kamen iz mineralnega agregata in silikatnega veziva.

### 2.5.1 Sveža betonska mešanica

Beton je sestavljen iz agregata, cementa in vode in je amorfná masa, ki se po vezanju cementa strdi in ima obliko opaža, v katerega smo vgradili svežo betonsko maso. Kvaliteto betona definiramo z trdnostnim razredom betona, to je tlačno trdnostjo preskušanca po 28dneh starosti betona.

Trdnostni razred betona nam ne daje eksaktne definicije za vrednost betona, ker označuje samo tlačno trdnost, ne pa ostalih lastnosti, kot so propustnost betona za vodo, odpornost proti agresivni vodi, odpornost proti mrazu in vročini, krčenje betona in toplotna izolativnost.

### 2.5.2 Kvaliteta betona

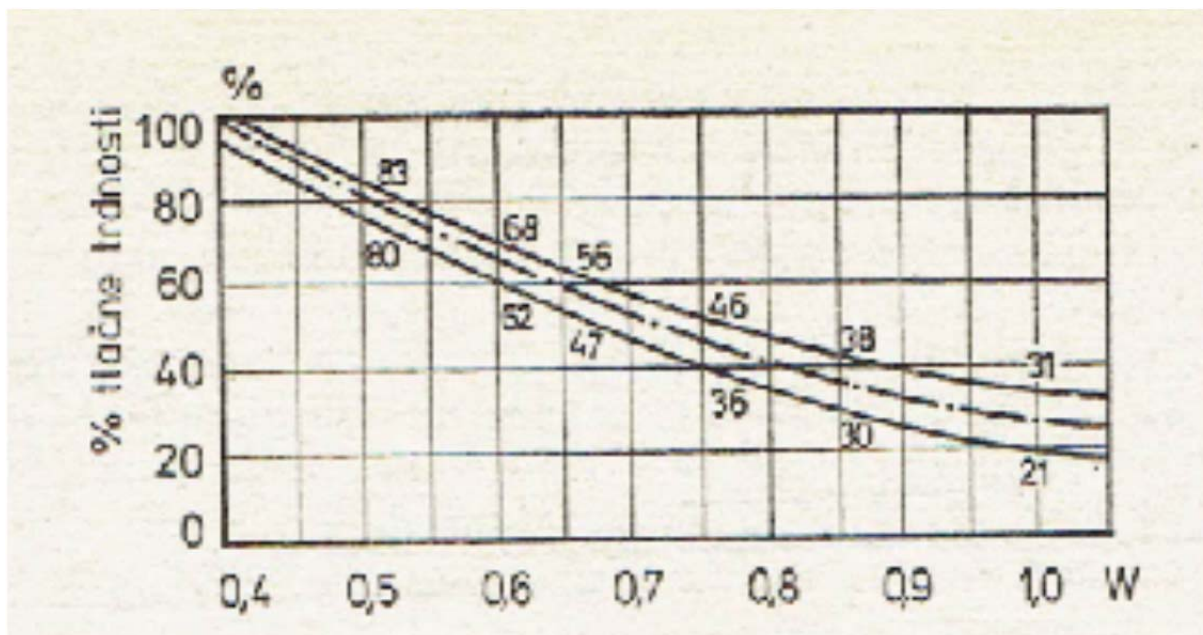
Na kvaliteto betona vpliva veliko dejavnikov, predvsem: vrsta in aktivnost cementa, količina cementa v  $\text{kg/m}^3$  betonske mase, vodocementni faktor, to je razmerje med vodo v  $\text{l/m}^3$  in cementom v  $\text{kg/m}^3$ , način vgrajevanja in zgoščevanja betona, kvaliteta agregata in razni kemični dodatki.

### 2.5.3 Vodocementni faktor in njegov vpliv na trdnost betona

Vodocementni faktor je razmerje med dodano količino vode in cementa na enoto betona in ga izražamo z  $W$  ali  $v_c = V/C$  (npr. 150 l vode, 300 kg cementa pomeni  $v_c = 0,5$ ).

Vodocementni faktor je eden ključnih dejavnikov, ki vpliva na trdnost betona, čeprav vemo da na kočno trdnost vplivajo tudi drugi dejavniki, kot je granulacija agregata. Vrednost vodocementnega faktorja se giblje med 0,3 in 1,4. Beton z vodocementnim faktorjem 0,3 je laboratorijski beton, ki ga na gradbišču ne moremo več vgrajevati, medtem ko je beton z vodocementnim faktorjem 1,4 že tako tekoč, da voda odnaša cementni film iz zrn agregata.

Vpliv vodocementnega faktorja na 28 dnevno trdnost prikazuje slika 3, pri čemer je privzeta 100 % trdnost pri vodocementnem faktorju 0,4.



Slika 3: Tlačna trdnost betona (28-dnevna) je močno odvisna od vodocementnega faktorja in se naraščanjem vodocementnega faktorja naglo zmanjšuje [1]

Nazorno se kaže na primeru; beton, ki ima pri  $v_c = 0,4$  tlačno trdnost 45 MPa ima pri  $v_c = 1,2$  tlačno trdnost med 14-22% od 45 MPa, kar znese 6,3-9,9 MPa. Podobno velja za beton z  $v_c = 0,5$  ima po 28 dneh tlačno trdnost 32 MPa., pri  $v_c = 0,9$ , pa ima isti beton tlačno trdnost  $\frac{30}{80}$  do  $\frac{38}{83}$  od 32 MPa, in kar je 12 do 14,6 MPa.

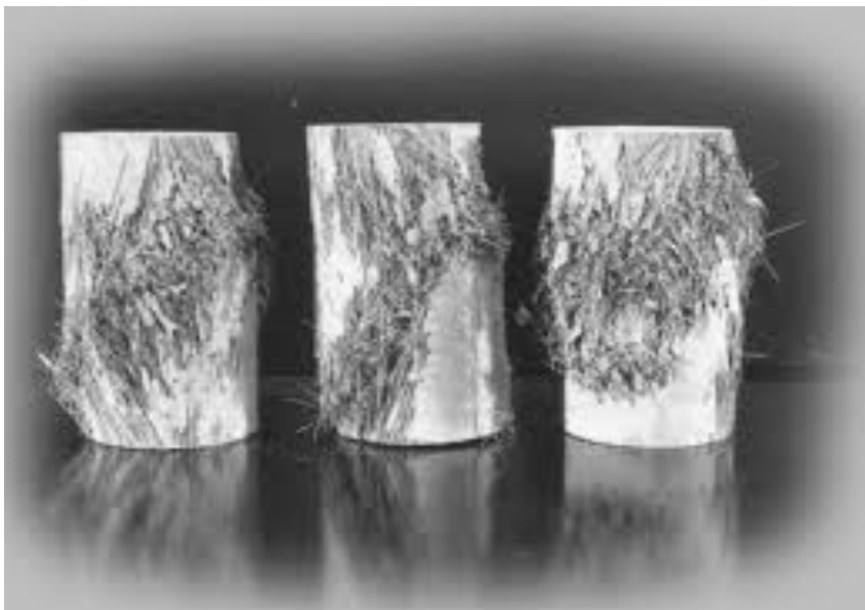
Iz zgoraj navedenih primerov sledi, da je beton z  $v_c = 0,4$  najboljši beton, vendar tak beton težko vgrajujemo. Zato običajno uporabimo višji vodocementni faktor. Velja nepisano pravilo, da je boljše imeti dobro vgrajen nekoliko slabši beton, kot slabo vgrajen najboljši beton.

Omeniti velja še, da mora vsak beton vedno vsebovati najmanj toliko vode, kolikor je potrebno za hidracijo cementsa. Betoni z veliko količino cementsa in malim vodocementnim faktorjem lahko zaradi nepopolne hidracije izgubijo na vrednosti tlačne trdnosti. [3]

### 3 Vlaknasti betoni

#### 3.1 Vlaknasti betoni omogočajo izboljšavo betonskih karakteristik

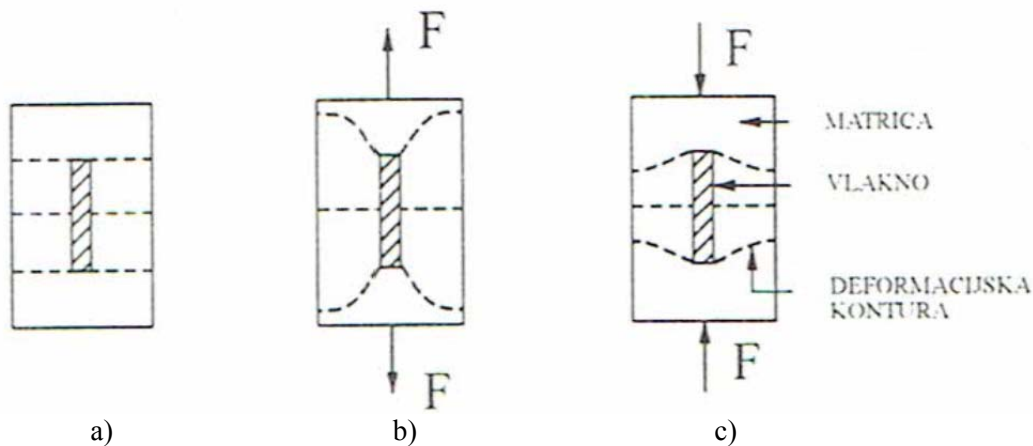
V današnjem svetu se čedalje več uporabljajo mikroarmirani betoni zaradi bistveno izboljšanih mehanskih lastnosti kot so žilavost, upogib, odpornost proti obrabi itd. Na slovenskih tleh se mikroarmirani betoni ali vlaknasti betoni z jeklenimi pa tudi z ostalimi vlakni uporabljajo v veliki meri pri gradnji podzemskih prostorov v rudnikih (obloge rovov in jaškov), pri sanaciji železniških predorov, pri gradnji ali preplastitvah servisnih površin na bencinskih črpalkah, pri gradnji cementnih estrihov, tlakov ter tankovskih pist.



Slika 4: Porušeni valji z vidno mikroarmaturo [5]

#### 3.2 Učinkovitost vlaken v mikroarmiranih betonih

Vlakna in cementna matrica, sta med seboj zelo povezani. Če na preskušanelec ne deluje nobena sila, potem tudi na matrico in vlakna ne deluje nobena sila. Ko nastopi natezna ali tlačna obremenitev na preskušanelec, se znotraj preskušanca pojavijo napetosti in deformacije. Pri obremenitvi se sila prenese iz matrice na vlakno vzdolž njene površine. Zaradi razlike v togosti med vlakni in matrico nastane strižna napetost vzdolž površine vlakna. Strižna napetost v preskušancu deluje tako, da se del obtežbe prenese na vlakno. Če je vlakno bolj togo od cementne matrice, potem bo deformacija v okolici vlakna manjša. Shematski prikaz lahko vidimo na sliki 5b in sliki 5c. Takšno stanje velja za jeklena in mineralna vlakna.



Slika 5: Medsebojno delovanje v okolici vlakna v nerazpokani matrici [2]  
Deformacijska kontura je prikazana za primer:  
a) brez obtežbe,  
b) natezna obremenitev,  
c) tlačno stiskanje

V splošnem so v mikroarmiranih betonih vlakna orientirana v vseh treh smereh v prostoru. Večina jeklenih vlaken, pa tudi nekaj polimernih vlaken imajo namensko deformirane površine ali konce vlaken. To še dodatno povečuje kompleksnost problema zato še danes ni razvitega matematičnega modela za praktično aplikacijo.

Pri obremenitvi določenega kompozita se pokaže ali vlakna doprinesejo k trdnosti in togosti kompozita. Slednje je odvisno predvsem od vrste in prostorninskega deleža vlaken ter od lastnosti cementne matrice. Za jeklena vlakna veljata v praksi nenapisani pravili:

- kompozit, ki vsebuje 10% jeklenih vlaken ima 5-kratno povečanje natezne trdnosti,
- kompozit, ki vsebuje manj od 2% jeklenih vlaken ima zanemarljivo povečanje natezne trdnosti.

## 4 Trdnost betona

### 4.1 Tlačna trdnost

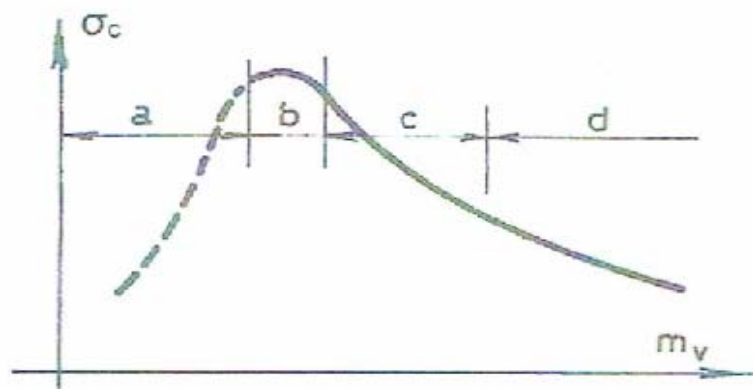
Trdnost določimo s karakteristično tlačno trdnostjo, za kar obstaja več načinov. Trdnostni razred betona je določen s tlačno trdnostjo betona po 28 dneh, izmerjeno na valju, s premerom 15cm in višino 30cm, in na kocki, z robom 15cm. Za armirane betone, kateri sestavljajo konstrukcije uporabljamo trdnostne razrede betonov od C20/25 dalje.

En način ugotavljanja tlačne trdnosti betona je tlačni preizkus v stiskalnici na kocki z robom 15 cm, ki je bila predhodno shranjena v vodi ali pri relativni vlagi najmanj 95 %. Temperaturno območje je omejeno na  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Uporabijo se lahko tudi druge oblike, v tem primeru moramo rezultate preračunati zopet na trdnost standardne kocke z robom 15 cm ali na trdnost standardnega valja s premerom 15 cm in višino 30 cm.

Vplivi na tlačno trdnost:

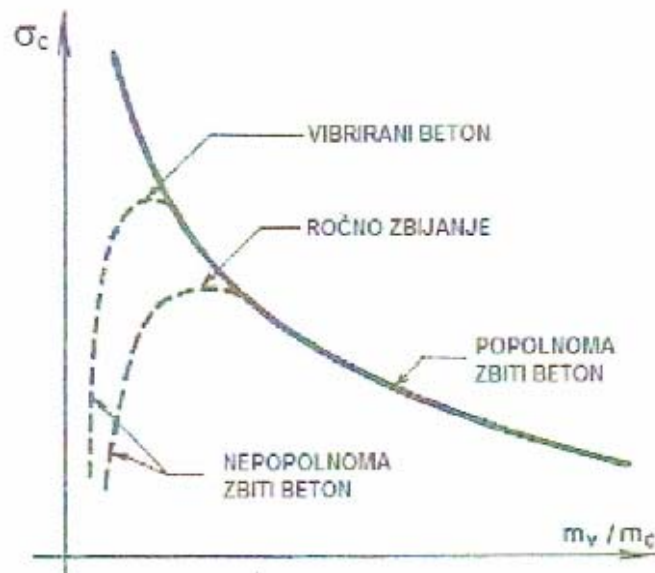
- količina vode (vodocementni faktor),
- količina cementsa,
- ustrezna sestava agregata; pesek mora biti ustreznih frakcij glede na namen,
- ustrezna porazdeljenost oziroma homogenost vgrajenega betona,
- nega betona v prvih dneh; zadostno vzdrževanje vlage.

Na sliki 6 je prikazana velikost tlačne trdnosti betona v odvisnosti od količine vode. Pri majhnih količinah vode je konsistenca betona trdoplastična (področje a). Takšen beton težko zgoščujemo in vgrajujemo. S povečevanjem količine vmešane vode dobimo beton srednjeplastične konsistence (področje b), ki ima višjo trdnost zaradi boljše vgradljivosti in več produktov hidratacije. Z nadaljnjim povečevanjem količine vode v betonu pridemo v področje mehkoplastične konsistence (področje c), pri kateri trdnost betona s povečevanjem vodocementnega razmerja pada zaradi večje poroznosti. Desni del krivulje predstavlja tekočo konsistenco (področje d), pri kateri se trdnost še zmanjšuje, saj se pojavi agregatna segregacija.



Slika 6: Trdnost betona v odvisnosti os količine vgrajene vode [4]

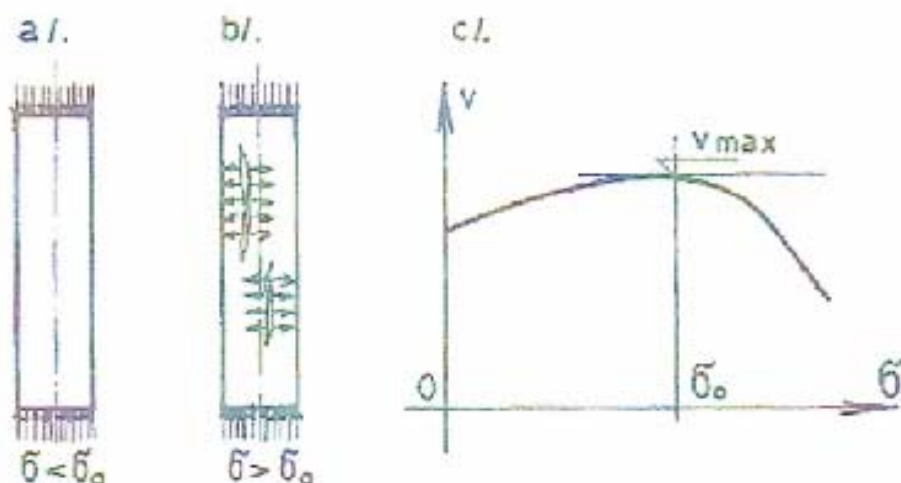
Obstaja optimalna količina vode, pri kateri ima beton ob primerni vgradljivosti najnižjo poroznost in hkrati veliko trdnost. Pri konstantni količini cementa v betonu je njegova trdnost odvisna od vodocementnega razmerja in kompaktnosti betona. *Slika 7* prikazuje soodvisnost med tlačno trdnostjo betona in vodocementnim razmerjem v odvisnosti od načina vgradnje betona.



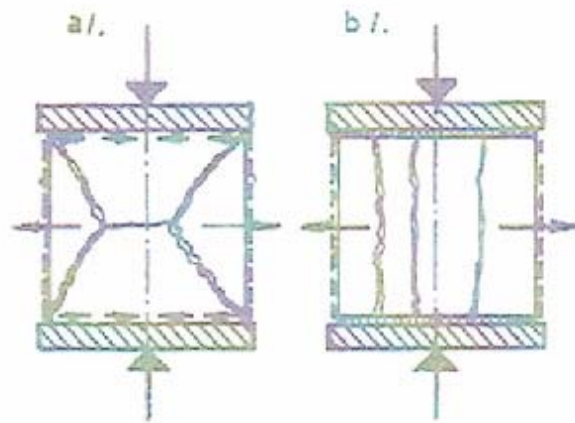
Slika 7: Odvisnost tlačne trdnosti betona od vodocementnega razmerja [4]

## 4.2 Mehanizem porušitve betona

Struktura betona je grobo nehomogena. Tako agregat kot cementni kamen sta polna nepravilnosti. Razlikujeta se tako po trdnosti kot po deformacijskih lastnostih. V agregatu so prisotne mikrorazpoke, ki so posledica naravnih vplivov ali tehnološkega postopka njegovega pridobivanja – postopka drobljenja. Prav tako nastajajo pri procesu hidratacije v cementnem kamnu pore, zaradi krčenja pa še številne mikrorazpoke. V njih so lahko prisotne še razne nečistoče ali soli. Eno izmed oslabitev prereza predstavljajo tudi zračni mehurčki, ki so posledica priprave betonske mešanice. [4]



Slika 8: Obnašanje tlačno obremenjenih preskušancev [4]



Slika 9: Pojav nateznih napetosti v osrednjem delu tlačno obremenjenega betonskega preskušanca [4]

## 5 Vpliv vlaken na lastnosti materialov

### 5.1 Kompoziti

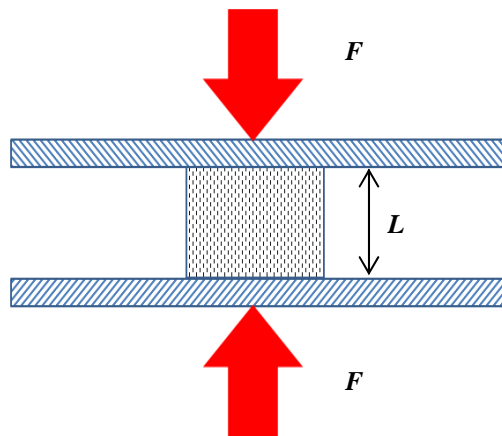
Kompoziti so materiali, ki so sestavljeni iz dveh ali več komponent. Lastnosti kompozitnega materiala se razlikujejo od lastnosti posameznih materialov, ki ga tvorijo. Njihove lastnosti v splošnem presegajo lastnosti osnovnih materialov zaradi njihovega medsebojnega vpliva. V praksi je večina kompozitov sestavljena iz osnovnega materiala - matrice in armature - utrditvenega materiala, ki poveča trdnost in togost. V nadaljevanju se bo beseda matrika nanašala konkretno na beton, armatura pa bo označevala jeklena vlakna.

V splošnem se je razvilo mnogo materialov, ki so vlaknasto ojačani in jih imenujemo kompoziti. Sprva so bili to klasično bazirani materiali kot so keramike, kovine in sintetične organske snovi.

Kompozite lahko v splošnem testiramo na različne načine; od pospešenega staranja - izpostavljanje kisiku, UV sevanju, raznim kemikalijam ter različnim temperaturam, do dinamičnih obremenitev. V naši diplomski nalogi bo govora le o določanju mehanskih lastnosti kompozitov.

### 5.2 Enosni tlačni preizkus

Preiskusanec dolžine  $L$  in preseka  $A$  pravokotno na os preizkušanca vpnejo v stiskalnico ali natezalnico ter nanašamo silo, kot je prikazano na sliki 10.



Slika 10: Shematičen prikaz tlačnega preizkusa

Predpostavljamo, da je sila porazdeljena enakomerno po površini. Napetost v materialu je podana z izrazom (5.1)

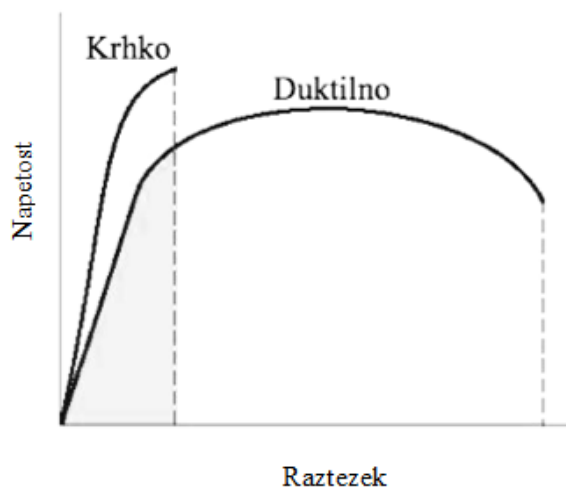
$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (5.1)$$

Relativni raztezek je definiran kot

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}. \quad (5.2)$$



Ostale obremenitve, kot so torzija, strig bomo v nadaljevanju zanemarili. Preizkušavec se med obremenitvijo tudi nekoliko razširi, kar bomo prav tako prezrli. Na tem mestu opišimo še tipični potek preizkusa. Slika 11 shematično prikazuje potek napetosti v odvisnosti od raztezka za krhek ter žilav material. Tako imenovano duktilno področje ali območje lezenja je značilno za žilave materiale, ki tudi po prvih razpokah še vedno dobro ohranjajo napetost, medtem ko napetost v krhkih materialih po prvi razpoki hitro popusti.



Slika 11: Prikaz napetosti v odvisnosti od raztezka za krhke ter žilave materiale, žilavost je enaka površini pod krivuljami [6]

### 5.3 Princip utrditve betona z vlakni – povečana nateza trdnost kompozita

Povečano trdnost je mogoče teoretično izračunati. Vpeljava vlaken v oceno njihovega ojačanja sloni na štirih lastnostih, natezne trdnosti materialov in Youngovega elastičnega modula,  $E$ . V nadaljevanju bo indeks,  $f$ , označeval komponento vlakna ter indeks,  $m$ , komponento matrice. Kompozit se bo označil z oznako  $c$ . Normalna napetost s silo pravokotno na površino naj bo označena s  $\sigma$ .

Na tem mestu privzamemo, da so vlakna in matrica tega povezana in s tem zanemarimo medsebojna relativna premikanja. Napetost, ki jo prenaša kompozit bo povečana le v primeru, da imajo vlakna večjo trdnost kot matrica. Privzeli bomo še, da se preizkušavec deformira le v vzdolžni smeri in ohranja konstantni prečni presek.

Če označimo napetost v kompozitu z  $f$ , potem velja

$$f_m = \varepsilon \cdot E_m \quad (5.3)$$

$$f_f = \varepsilon \cdot E_f \quad (5.4)$$

kjer  $f_m$  in  $f_f$  označujeta napetost v matrici in vlaknih,  $E_m$  in  $E_f$  pa sta pripadajoča Youngova modula. Z deljenjem dobimo relacijo med razmerji  $f_f / f_m = E_m / E_f$ . Sila obremenitve je vsota obremenitve v vlaknih in v matrici; od katerih sta obe produkt ustrezne napetosti in površine,

$$sila = A_f \cdot f_f + A_m \cdot f_m \quad (5.5)$$

Povprečna napetost v kompozitu je posledično

$$f_c = \frac{\text{silna}}{A_c} = \frac{A_f}{A_c} \cdot f_f + \frac{A_m}{A_c} \cdot f_m. \quad (5.6)$$

V primeru homogeno porazdeljenih vlaken lahko uvedemo njihov *volumski delež*,  $V_f$ , kot

$$\frac{A_f}{A_c} = V_f. \quad (5.7)$$

Podobno velja za matrico

$$\frac{A_m}{A_c} = 1 - V_f. \quad (5.8)$$

Tako lahko zapišemo enačbo v splošnem kot

$$f_c = V_f \cdot f_f + (1 - V_f) \cdot f_m. \quad (5.9)$$

V krhkih materialih kot je beton, se običajno najprej vda matrica in je trdnost v vlaknih,  $\sigma_f$ , mnogo večja od tiste v matrici, zato velja  $f_m = \sigma_m$ . Ob prvi razpoki je napetost matrice enaka trdnosti,  $\sigma_m$ , zato velja

$$f_c = V_f \cdot f_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m. \quad (5.10)$$

Ker velja  $f_f = \frac{E_f}{E_m} \cdot \sigma_m$ , lahko zapišemo enačbo za napetost v kompozitu v trenutku, ko se pojavi prva razpoka kot

$$f_c = V_f \cdot \frac{E_f}{E_m} \cdot \sigma_m + (1 - V_f) \cdot \sigma_m \quad (5.11)$$

in

$$f_c = \sigma_m \cdot \left[ 1 + V_f \cdot \left( \frac{E_f}{E_m} - 1 \right) \right]. \quad (5.12)$$

V primeru, da hočemo povečati napetost ob prvi razpoki, moramo maksimizirati  $V_f$  in  $E_f$ . Izračun nam z drugimi besedami pove, za koliko smo podaljšali področje elastičnosti. Za jeklena vlakna tako velja

$$\sigma_m = 3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \dots \text{ natezna trdnost betona,}$$

$$E_m = 30 \text{ kN/mm}^2 \quad \dots \text{ predpostavljena vrednost za beton,}$$

$E_f=210 \text{ kN/mm}^2$  ..... predpostavljena vrednost za jeklena vlakna,

$V_f=0,02$  ..... ocena vrednosti pri konvencionalnem mešanju.

$$f_c = 3,36 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (5.13)$$

Natezno trdnost betona smo povečali iz  $3 \text{ N/mm}^2$  na  $3,36 \text{ N/mm}^2$ , kar je 12 % izboljšava. Upoštevati moramo še, da smerna razporeditev poslabša vrednosti.

## 5.4 Področje plastičnosti

Vlaknasto ojačani kompoziti se odzivajo skorajda linearno do točke razpoke, velja Hookov zakon, relativni raztezek pa je sorazmeren napetosti. Če zmanjšamo napetost, se zmanjša tudi raztezek in zavzame začetno obliko ob njeni odstranitvi. Dodatek vlaken učinkovito izboljša elastični modul kompozita, kot tudi trdnost, odvisno od materiala.

Po prvi razpoki v navadnem betonu se kapaciteta maksimalne obremenitve hitro zmanjša, v praksi je celo predpostavka, da navadni beton po razpoki sploh ne prenaša napetosti. Za področje plastičnosti velja, da po odstranitvi napetosti preizkušanelec ne zavzame več začetne dolžine in ostane trajno deformiran. V krhkih materialih so dislokacije (razpoke) zelo toge in se ne gibljejo. Žilavi materiali (slika 11) imajo za razliko bolj fleksibilne dislokacije, razpoke pod dodatno obremenitvijo rastejo, se gibljejo in zvijajo. Prav tak potek je značilen za vlaknasto ojačane betone. Glavni prispevek vlaken k izboljšavi matrice je zato ravno v območju plastičnosti. [5]

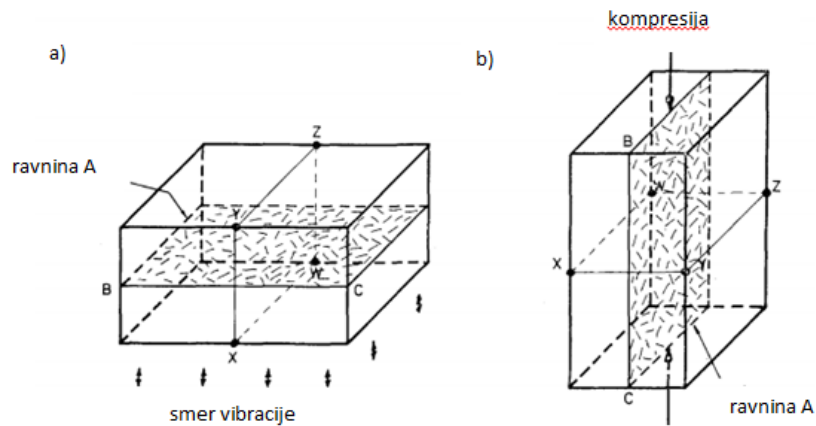
## 5.5 Vpliv vibracije na orientacijo vlaken

Vpliv vlaken na beton je zagotovo odvisen od orientacije, relativne na smer obremenitve. Potrebno je doseči zadovoljivo orientacijo v strjenih materialih v kolikor naj bodo specifične lastnosti konsistentne v ojačanem cementnem produktu. V študijah vlaknasto ojačanih betonov je bilo pogosto predpostavljeno, da so vlakna naključno orientirana. Izkaže se, da je to malo verjetno, če vzorce pred sušenjem izpostavimo vibraciji.

Orientacija kratkih jeklenih vlaken v betonu je lahko naključna v 3D po mešanju, vendar to ne bo nujno enako po vlitju v kalup. Vpliv sten kalupa in prosta površina povzroči paralelno poravnavo vlaken s stenami ali površino, hkrati pa lahko sama vibracija povzroči rotacijo in poravnavo vlaken v preferenčno smer. Tu se osredotočamo le na drugi efekt. Ugotovitve v razdelku 5.6 so iz študije.

## 5.6 Hipoteza

Predpostavimo, da je svež beton kompakten na vibracijski mizi, ki se premika vertikalno. Hkrati predpostavimo še, da so vlakna orientirana naključno v ravninah pravokotno na smer vibriranja ali gravitacijo. V strjenim kompozitu bodo torej vlakna imela preferenčno smer paralelno na neko tako izbrano ravnino, A (slika 12 a). Tako bo razrešena dolžina žice večja paralelno na daljici BC in YZ kot pa paralelno na XY.

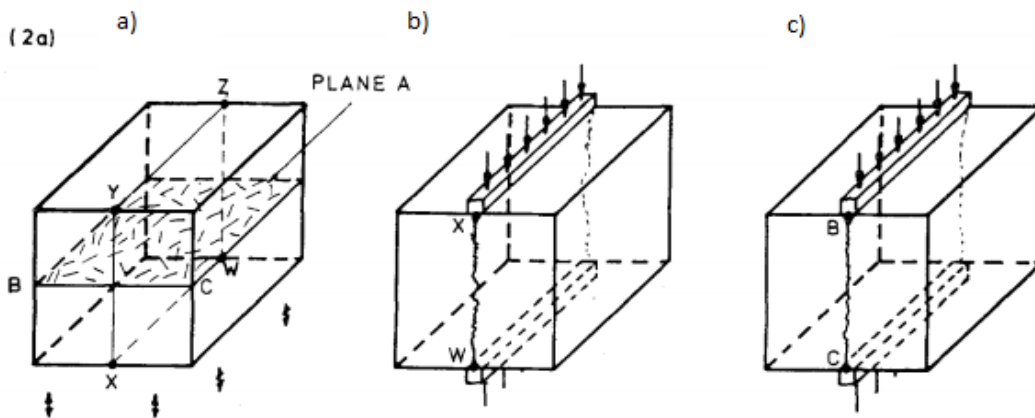


Slika 12: Predpostavljen efekt vibracije na orientacijo vlaken [7]

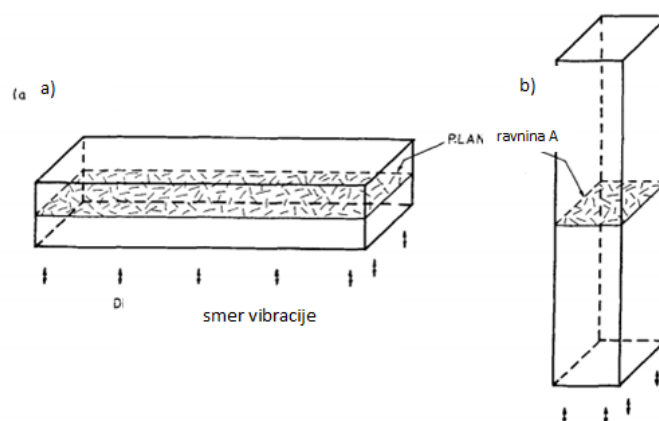
### 5.6.1 Potrditev hipoteze

Hipotezo lahko preizkusimo na več načinov:

- z apliciranjem kompresije na strjeni vzorec (slika 12 b) v katerem je pričakovan anizotropen odziv materiala z večjimi napetostmi v smeri paralelno na XY kot paralelno na YZ.
- z vlito kocko (slika 13a) na kateri izvedemo razpolovitveni test v smereh na sliki 13 b in sliki 13 c.
- z vlivanjem upogibnih vzorcev vertikalno in horizontalno (slika 14 a in slika 14 b) ter primerjanjem vrednosti modulov pretrganja z metodo, opisano v BS 1881 [1].



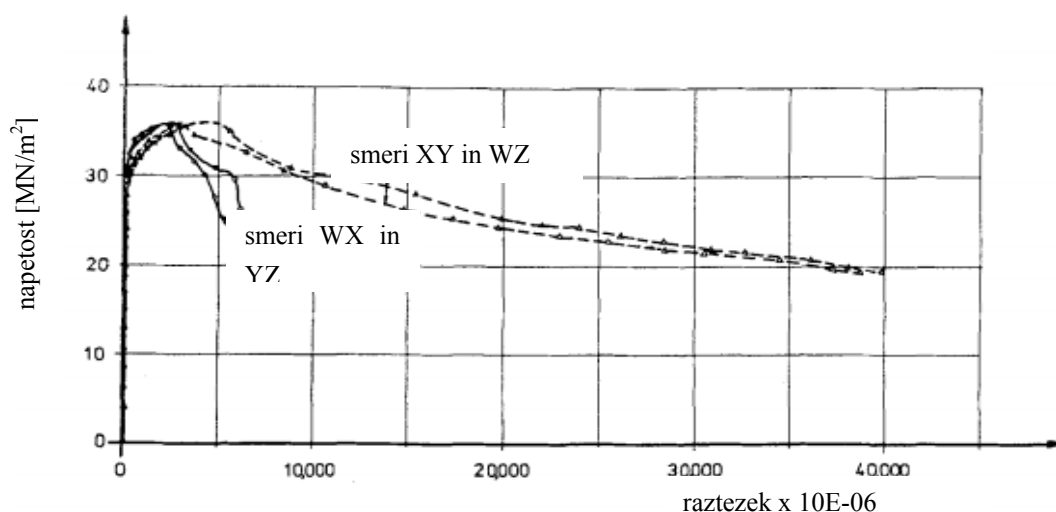
Slika 13: Kocka razcepljena v različnih smereh relativno na orientacijo vlaken [7]



Slika 14: Poravnava vlaken glede na smer upogibnih vzorcev [7]

### 5.6.2 Ugotovitve orientacijske usmerjenosti

Horizontalni raztezki so bili merjeni na navadnih in betonsko ojačanih prizmah ( $152\text{ mm} \times 152\text{ mm} \times 305\text{ mm}$ ) vzdolž linij WX, XY, YZ in ZW (slika 12a). Družina krivulj za vlaknasto ojačane vzorce je prikazana na sliki 15. Napetostno deformacijski grafi za navadne in vlaknasto ojačane vzorce so bili podobni do približno 85% maksimalne napetosti, nato so se pojavile razpoke in so vlakna postala učinkovita v zmanjšanju hitrosti naraščanja nadaljnjih razpok. zato so bile napetosti v smereh WX in YZ v vlaknasto ojačanih vzorcih mnogo manjše kot v smereh XY in WZ.



Slika 15: Diagram napetost raztezek

Tako obnašanje je skladno z idejo, da je orientacija vlaken odvisna od smeri vibracije ali gravitacije, čeprav je z intenzivnim obračanjem vlaken, ki se zgodi med mešanjem usmerjena skupna orientacija manj verjetna. Slika 16 prikazuje vzorec, ki je močno razpokal v smereh pravokotno na XY (slika 12b) vendar je relativno ohranjen v smereh pravokotnih na YZ. Pozitivni vpliv vlaken se kaže v splošnem stanju vzorca.

Razlika odpornosti v razcepljenih kockah v dveh smereh, prikazanih na sliki 13 b in sliki 13 c je bila merjena z dvema različnima vrstama vlaken v kockah, dimenzije 102 mm. V obeh primerih so bile sile, izmerjene pri tipu testov, prikazanih na sliki 13 b, več kot 40% večje od sil, izmerjenih pri tipu testov, prikazanih na sliki 13 c.



Slika 16: Vzorec po kompresijskem stiskanju kaže vpliv poravnave vlaken na potek razpok

Upogibne sile so bile merjene na 102 mm×102 mm×506 mm vlaknasto ojačanem stebru s tehniko opisano na slikah 14 a in 14 b. Vzorci, ki so bili vlti horizontalno, so pokazali ojačanje za več kot 50% v enem primeru ter več kot 100% v primerjavi z vlaknato ojačanimi vzorci enake mešanice, vlitimi vertikalno. Pri vertikalnem vlitju smo bili posebej pozorni, da ne bi prišlo do ravnin brez vlaken. [7]

### 5.6.3 Vpliv vibracije na orientacijo vlaken – zaključne ugotovitve

Zgoraj zapisano lahko sedaj strnemo v tri ugotovitve.

1. Vlaknasto ojačani betoni, ki so nominalno naključno ojačani v 3D lahko kažejo anizotropno vedenje zaradi orientiranja vlaken med strjevanjem.
2. Lastnosti kompozitov z jeklenimi vlakni bi morale biti podane v smeri relativno na preferenčno smer vlaken.
3. Iz praktičnega vidika proizvodnje vlaknasto ojačanih cementnih produktov je smotrno izkoristiti tak tip anizotropnega vedenja z ustreznim postopkom izdelave, tako da so vlakna poravnana v najbolj koristni smeri.

Po drugi strani pa vpliv vibracije na orientacijo vlaken ne nastopa v polni meri in se lahko ojačanje zelo zniža v primerjavi s predvideno vrednostjo, ki bazira na laboratorijskih testih z uporabo drugih postopkov.

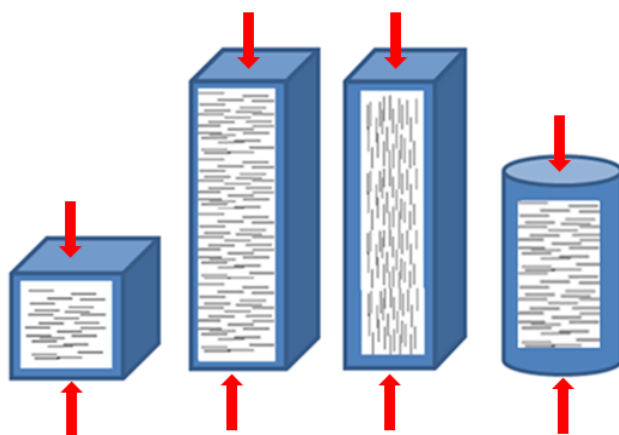
## 6 Eksperimentalne raziskave

### 6.1 Praktični del

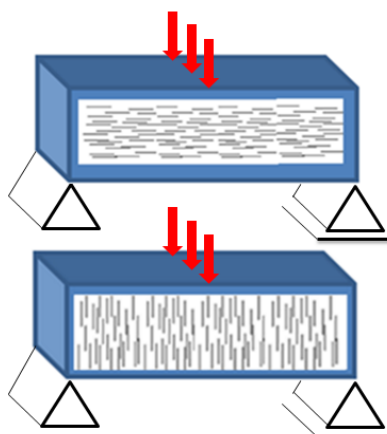
V praktičnem delu so bila preizkušena različna telesa z enako sestavo betona. Preskušali bomo najti vpliv različnih oblik na potek tlačnih preizkusov ter ovrednotiti njihovo medsebojno razliko. Prikazali smo tudi vpliv štirih različnih vrst jeklenih vlaken. Tlačna obremenitev je bila narejena za različne predpostavljene usmerjenosti vlaken, določene s postopkom mešanja betona (orientacija kalupov pri vgrajevanju). Upogibni test pa je bil narejen na pokončnih in ležeče betoniranih prizmah.

### 6.2 Preskušanci

Nabor preskušancev razdelimo na pet skupin, v vsaki so preskušanci enakih oblik. V peti skupini so vsi preizkušanci brez dodanih vlaken, v prvih štirih pa ima vsaka skupina preizkušancev dodano posamezno vrsto vlaken. Na podlagi dognanj iz razdelka 5.6 predpostavljamo, da so se po vibraciji vlakna poravnala pretežno v horizontalni smeri, kar je tudi označeno na skicah (slika 17). Oblike teles so bile kocka, prizma ter valj.



Slika 17: Postavitve preskušancev s predvideno orientacijo vlaken pri merjenju tlačne trdnosti



Slika 18: Zasnova upogibnega preiskusa

Pri merjenju tlačne trdnosti kompresijsko obremenimo preizkušance v vertikalni smeri. Njihova orientacija in relativna orientacija vlaken poteka tako, kot je prikazano na spodnji skici. Vlakna so v nekaterih primerih obrnjena horizontalno in v enem primeru vertikalno. Prizmo je potrebno vlivati enkrat v vertikalno postavljen kalup, drugič pa v horizontalno ležečega.

Upogibni preizkus je zasnovan s podporo na skrajnih koncih ter točkovno obremenitvijo na sredini. Rezultat se izmeri v obliki porušne sile. Za preskušance v tem primeru uporabimo prizmi, ki sta bili vgrajevani, enkrat pokonci in enkrat leže (slika 18).

### 6.3 Dimenzije preskušancev

Betonske mešanice smo vlivali v različne kalupe v kombinaciji z različnimi jeklenimi vlakni. Za kalupe sem uporabil kocko 15 cm×15 cm×15 cm, valj višine 30 cm in premera 15 cm ter prizmo 10 cm×10 cm×40 cm. Prizme smo betonirali leže in pokončno. Tako lahko primerjamo med seboj oba primera ali vpliva način betoniranja na pozicijo oziroma razporeditev vlaken v preskušancu in posledično tudi na različno vrednost tlačne trdnosti. Prizme z dodanimi različnimi vlakni sem preskusil tudi na upogibni test za opazovanje vpliva postopka betoniranja v kalupe, v tem primeru leže ali pokončno.

### 6.4 Uporabljeni materiali

Za raziskavo smo uporabili certificirane materiale in sicer beton trdnostnega razreda C30/37 iz betonarne Vrščaj in jeklena vlakna IRI od IRME. Agregat, ki smo ga uporabili v betonskih mešanicah, je iz kamnoloma Ježce. Sestava mineralne mase, iz katerega izhaja agregat se imenuje kamnolomski drobljeni agregat, ki je v našem primeru sestavljen iz treh frakcij, in sicer 0/4, 4/8 in 8/16. Zrnastost agregata je podana v preglednici 6.1, zrnastost mešanice ter delež frakcij pa v preglednici 6.2. Za agregat 0/16 je podan je tudi diagram zrnastosti na sliki 20.



Slika 19: Kamnolomski drobljeni agregat iz treh frakcij za betonsko mešanico 0/16 mm

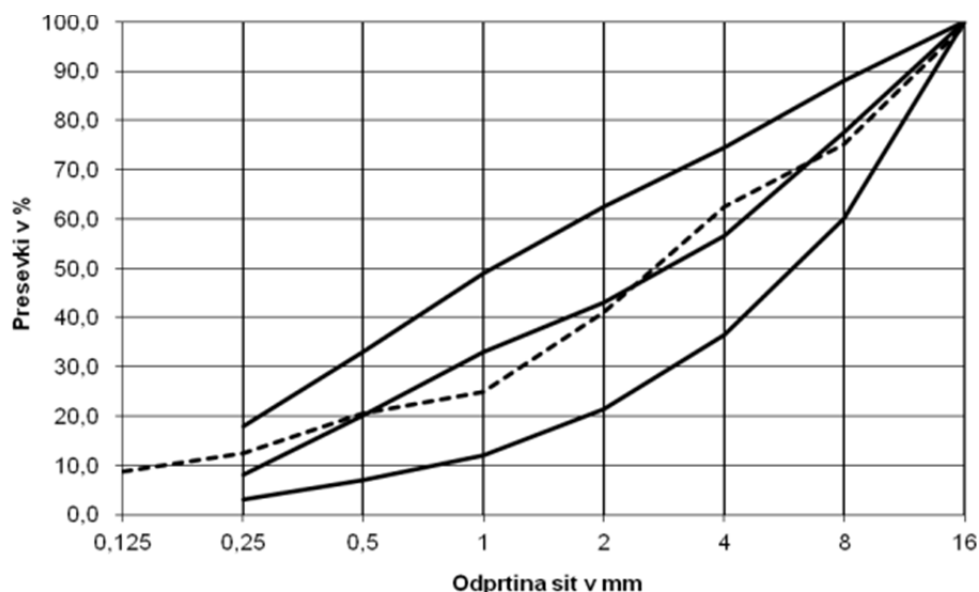
Preglednica 1: Zrnastost posameznih frakcij; deleži presejanega materiala čez odprtine pripadajoče velikosti v odstotkih.

vrsta agregata	odprtina sit [mm]								
	0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
Mivka	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0/4 Ježce	14,0	20,0	33,0	40,0	66,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4/8 Ježce				0,5	1,0	3,0	100,0	100,0	100,0
8/16 Ježce				0,3	0,5	0,8	1,0	97,0	100,0



Preglednica 2: Zrnavost in delež frakcij agregata.

vrsta agregata	delež v mešanici [%]	odprtina sit [mm]								
		0,125	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	16,0	31,5
Mivka	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0/4 Ježce	62,0	8,7	12,4	20,5	24,8	40,9	62,0	62,0	62,0	62,0
4/8 Ježce	13,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	13,0	13,0	13,0
8/16 Ježce	25,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	24,3	25,0
SEŠTEVEK	100	8,7	12,4	20,5	24,9	41,2	62,6	75,3	99,3	100,0



Slika 20: Diagram zrnivosti za agregat 0/16 mm (Kamnlom Ježce)

Kot vezivo v betonski mešanici, je bil uporabljen portlandski cement CEM II/B-M(LL-V) 42,5 N iz cementarne Salonit v Anhovem. Sestavo zagotavlja dobavitelj in je v tem primeru podana kot:

- ≥ 65 % portlandski klinker,
- ≤ 35 % elektrofiltrski pepel (V) in apnenec (LL),
- < 5 % dodatkov polnil.

Regulator vezanja je sadra, voda je bila uporabljena iz lokalnega vodovodnega omrežja. Za izboljšanje trdnosti betona smo uporabili plastifikator Cementol Delta Ekstra od TKK Srpenica. Osnovnemu betonu povečamo trdnost, če istočasno z dodajanjem plastifikatorja znižamo vodocementni faktor.

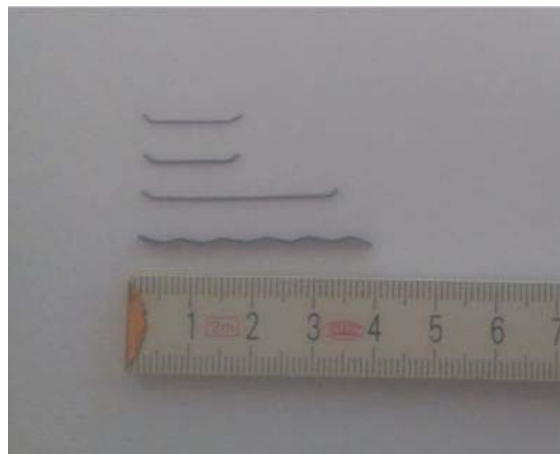
Zmanjšanje vsebnosti zamesne vode znaša 5 - 10%, odvisno od količine cementa, vrste cementa in dozacije Cementola Delta EKSTRA (slika 21).



Slika 21: Plastifikator: Cementol Delta Ekstra

## 6.5 Jeklena vlakna

Pri betonski mešanici betona recepture C30/37 smo uporabili različna jeklena vlakna, v količini 20 kg/m<sup>3</sup> betona, proizvajalca IRI,d.d. iz Ljubljane. Na sliki 22 vidimo obliko in velikost posamezne vrste vlaken, medtem ko slika 23 prikazuje skupke vlaken posameznih vrst. Vrste vlaken so poimenovane JV 40/16, JV 50/16, JV 50/30 in FX 35.



Slika 22: Uporabljena jeklena vlakna: JV 40/16, JV 50/16, JV 50/30, FX 35



Slika 23: Jeklena vlakna, uporabljena v betonih za preizkuse, ki smo jih obravnavali v okviru diplomske naloge

## 6.6 Sestava betonskih mešanic in priprava preskušancev

Osnovna formula za določitev prostorninskih deležev v  $1\text{ m}^3$  betonske mešanice prikazuje enačba prostorninskega deleža sestavin v betonski mešanici,

$$1\text{ m}^3 \text{ betonske mešanice} = \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_a}{\rho_a} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{vl}}{\rho_{vl}} + \text{volumen por.} \quad (6.1)$$

Količine v enačbi predstavljajo:

$m_v$  - maso vode,  $\rho_v$  - gostoto vode,

$m_a$  - maso agregata,  $\rho_a$  - gostoto agregata,

$m_c$  - maso cementa,  $\rho_c$  - gostoto cementa,

$m_{vl}$  - maso vlaken,  $\rho_{vl}$  - gostoto vlaken.

Priprava betona je potekala v betonarni Vrščaj v Novem mestu, iz katere večinoma vozimo beton za domačo obrt.

Za pripravo preskušancev smo uporabili tri različne kalupe in sicer kocko, z dimenzijami  $15\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ , valj,  $15\text{ cm}$  premera in  $30\text{ cm}$  višine, ter prizmo, z dimenzijami  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ . Kalupe smo pripravili v mizarski delavnici. Vsi kalupi so narejeni iz iverne plošče, debeline  $16\text{ mm}$ , rezani v CNC stroju. Valj je bil narejen iz PVC kanalizacijske cevi  $\varnothing 150\text{ mm}$ . Opravili smo pet serij betoniranja, od katerih so bile prve štiri z dodatkom jeklenih vlaken, zadnja, peta pa je bila brez dodatka vlaken.

### 6.6.1 Izdelava kalupov – opis postopka

Vse kalupe smo naredili v mizarski delavnici. Za izdelavo lesenih kalupov smo se odločili, ker smo jih lahko naredili za vseh pet serij naenkrat in si tako poenostavili betoniranje. Betonažo vseh vzorcev smo lahko opravili v enem dnevu, kar je skrajšalo tudi čas preskušanja tlačne trdnosti na en dan.

V vsaki seriji so bila vlakna iste vrste. Preizkušali smo tri vzorce iste mešanice, razen pri prvih treh serijah, ko smo preskusili po šest kock. Poleg teh smo pripravili še dodaten vzorec vsake geometrije za razrez in pregled razporeditve vlaken. V seriji smo uporabili:

- 6 kalupov za kocke v prvih treh serijah in štiri kalupe v četrti in peti seriji,
- 4 kalupe za valje – 3 za stiskanje in eden za razrez, da smo pregledali orientiranost vlaken,
- 4 kalupe za vertikalne prizme – 3 za stiskanje in eden za razrez, da smo pregledali orientiranost vlaken,

- 4 kalupe za horizontalne prizme – 3 za stiskanje in eden za razrez, da smo pregledali orientiranost vlaken.

Za upogibni preizkus smo dodatno potrebovali še po eno horizontalno in eno vertikalno prizmo. Izdelali smo preko 120 kalupov, da smo lahko primerjali različne vplive vlaken na različne tipe kalupov. Sliki 24 in 25 prikazujeta kalupe, izdelane v mizarski delavnici.



Slika 24: Izdelava kalupov v mizarski delavnici



Slika 25: Kalupi pripravljene za transport do betonarne

## 6.7 Betoniranje kalupov v betonarni Vrščaj

Betoniranje je potekalo 18.5.2016 v betonarni Vrščaj v Novem mestu. Betoniranje smo razdelili na pet serij. Prve štiri so bile z vlakni, zadnja peta pa je bila brez dodatka vlaken. V vseh primer je bil uporabljen beton recepture C30/37. Kalupe sem vibriral približno 7 do 8 sekund na vibracijski mizi.

### 6.7.1 Betoniranje 1. serije

V prvi seriji sem uporabil zgoraj omenjeni beton z dodatkom jeklenih vlaken JV 50/30 katerih proizvajalec je IRI d.d. iz Ljubljane. Vlakna smo dozirali po priporočilu, in sicer  $20 \text{ kg/m}^3$  betonske mešanice, ki smo jih sorazmerno razdelili v volumen 1. serije betoniranja. Preskušanci so navedeni v preglednici 3, kjer je izračunan volumen teles. Vzorci iz pokončne prizme so poimenovani s PRIZMA ||, vzorci za ležeče prizme pa s PRIZMA =.

Preglednica 3: Serija kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.

preskušanec	dimenzije	število preskušancev N	$V [\text{m}^3]$
KOCKA	$15 \times 15 \times 15$	6	0,02025
VALJ	$\phi 15/30$	4	0,02120
PRIZMA	$10 \times 10 \times 40$	4	0,01600
PRIZMA =	$10 \times 10 \times 40$	4	0,01600
PRIZMA	$10 \times 10 \times 40$	1	0,00400
PRIZMA =	$10 \times 10 \times 40$	1	0,00400

Izračun mase jeklenih vlaken na serijo bazira na predpostavki, da v  $1 \text{ m}^3$  betona vmešamo  $20 \text{ kg}$  vlaken. Skupni volumen za serijo je znašal  $0,076 \text{ m}^3$ . Jeklo mase  $20 \text{ kg}$  z gostoto  $7800 \text{ kg/m}^3$  zavzame prostornino  $2,564 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ . Volumski delež jekla je tako  $0,26 \%$ . S križnim računom dobimo maso vlaken, ki znaša  $1,52 \text{ kg}$  za  $0,076 \text{ m}^3$  betonske mešanice.



Slika 26: Tehtanje vlaken

### 6.7.2 Betoniranje 2. serije

Druga serija je bila podobna prvi le, da smo tu uporabili vlakna 50/16. Vlakna smo dozirali po priporočilu, in sicer 20 kg/m<sup>3</sup> betonske mešanice, ki smo jih sorazmerno razdelili v volumen 2. serije betoniranja.

Preglednica 4: Serija kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.

preskušane	dimenzije	število preskušancev N	V [m <sup>3</sup> ]
KOCKA	15×15×15	6	0,02025
VALJ	φ15/30	4	0,02120
PRIZMA	10×10×40	4	0,016
PRIZMA =	10×10×40	4	0,016
PRIZMA	10×10×40	1	0,004
PRIZMA =	10×10×40	1	0,004



Slika 27: Jeklana vlakna JV 50/30 v planetarnem mešalcu

### 6.7.3 Betoniranje 3. serije

V tretji seriji smo uporabili najtanjša vlakna po preseku in sicer jeklana vlakna IRI 40/16. Vlakna smo dozirali po priporočilu, in sicer 20 kg/m<sup>3</sup> betonske mešanice, ki smo jih sorazmerno razdelili v volumen 3. serije betoniranja.

Preglednica 5: Serija kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.

preskušane	dimenzije	število preskušancev N	V [m <sup>3</sup> ]
KOCKA	15×15×15	6	0,02025
VALJ	φ15/30	4	0,02120
PRIZMA	10×10×40	4	0,016
PRIZMA =	10×10×40	4	0,016
PRIZMA	10×10×40	1	0,004
PRIZMA =	10×10×40	1	0,004



Slika 28: Jeklana vlakna JV 40/16 v planetarnem mešalcu za 3. serijo

#### 6.7.4 Betoniranje 4. serije

V četrti seriji smo uporabili še zadnjo vrsto vlaken od podjetja IRI, in sicer FX 35. Vlakna smo dozirali po priporočilu, in sicer  $20 \text{ kg/m}^3$  betonske mešanice, ki smo jih sorazmerno razdelili v volumen 4. serije betoniranja.

Preglednica 6: Serija kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.

preskušane	dimenzije	število preskušancev N	$V [\text{m}^3]$
KOCKA	$15 \times 15 \times 15$	6	0,02025
VALJ	$\phi 15/30$	4	0,02120
PRIZMA	$10 \times 10 \times 40$	4	0,016
PRIZMA =	$10 \times 10 \times 40$	4	0,016
PRIZMA	$10 \times 10 \times 40$	1	0,004
PRIZMA =	$10 \times 10 \times 40$	1	0,004



Slika 29: Jeklana vlakna FX 35 v planetarnem mešalcu za 4. serijo



Slika 30: Betoniranje ležečih prizem

### 6.7.5 Betoniranje 5. serije

Na koncu smo betonirali kalupe, brez dodatka vlaken, za določanje tlačne trdnosti betona. Postopek je bil enak kot pri prvih štirih serijah le, da tokrat nismo dodali vlaken.

Preglednica 7: Serija kalupov, dimenzije teles ter ustrezni volumni.

preskušavec	dimenzije	število preskušancev N	$V [m^3]$
KOCKA	15×15×15	6	0,02025
VALJ	φ15/30	4	0,02120
PRIZMA	10×10×40	4	0,016
PRIZMA =	10×10×40	4	0,016
PRIZMA	10×10×40	1	0,004
PRIZMA =	10×10×40	1	0,004

### 6.8 Nega betona

Drugi dan po betoniranju kalupov, smo vse preskušance odpeljal iz betonarne domov, kjer smo jih razkalupili in postavili v bazen z vodo (sliki 31, 32), kjer so ostali 28 dni – do dneva preskušanja tlačne trdnosti.



Slika 31: Položitev preskušancev v bazen





Slika 32: Preskušanci pod vodo

### 6.9 Preiskave v laboratoriju

Poteklo je 27 dni od betoniranju, ko smo preskušance vzeli iz vode, jih naložili na prikolico in odpeljali v laboratorij Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljano. Vse preskušance smo stehtali in preverili dimenzije. Po opravljenih začetnih meritvah smo začeli z meritvijo tlačne trdnosti v hidravlični stiskalnici v laboratoriju na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo. Slike od 33 do 37 prikazujejo preizkuse trdnosti.



Slika 33: Kocka v stiskalnici; vidne so vertikalne razpoke



Slika 34: Hidravlična stiskalnica za preizkus tlačne trdnosti (zelena) ter stroj za preizkus upogibne trdnosti (obarvan modro)



Slika 35: Vzorce je bilo potrebno pred preizkusom kontrolno stehtati in premeriti



Slika 36: Slika laboratorijskega prostora med merjenjem



Slika 37: Razpokana prizma pri tlačnem preizkusu; vidi se potek posameznih razpok



Slika 38: Preizkus upogibne trdnosti 1



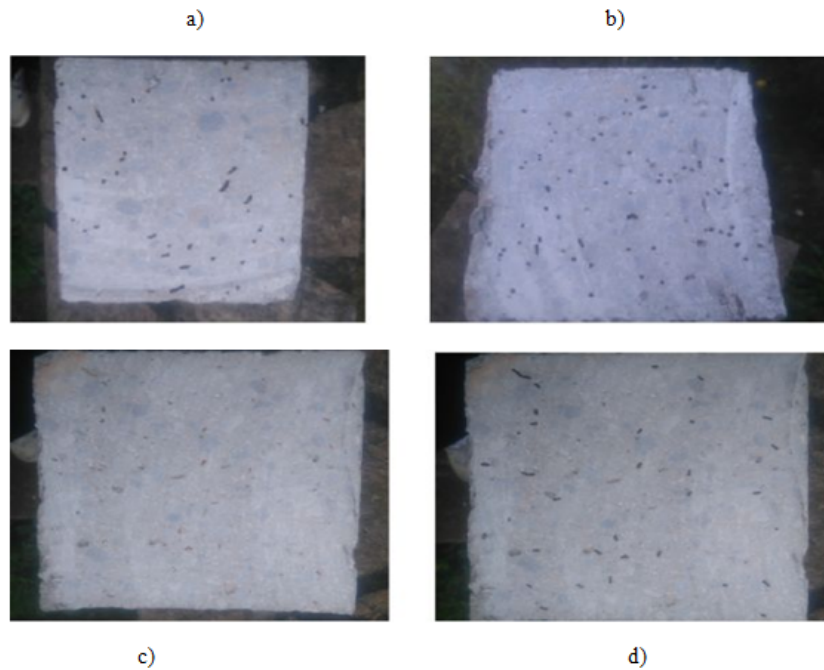
Slika 39: Preizkus upogibne trdnosti 2

### 6.10 Rez preskušancev in orientacija vlaken

Hipotetično smo na začetku predpostavili, da naj bi se vlakna pretežno razporedila vodoravno ob vibriranju. Konkretno v našem primeru, pa temu ni čisto tako, kajti vlakna so lahko razporejena različno. Kot rečeno smo vsak preskušanec iz prve serije prerezali, da dobimo vpogled v geometrijo posameznih vlaken. Na slikah 38 in 39 so primeri prerezanih preskušancev.



Slika 40: Sliki prikazujeta rez 1. serije (JV 50/30); prizma betonirana v ležečem kalupu



Slika 41: Zgoraj prerezi iz 3. serije z JV 40/16  
a.) prizma betonirana pokončno  
b.) prizma betonirana leže  
Spodaj prerezi iz 4. serije z vlakni F35  
c.) prizma betonirana pokončno  
d.) prizma betonirana leže

Iz samih prerezov zelo težko natančno določimo orientacijo vlaken. Nekaj jih odpade že pri rezanju, nekaj se jih skriva tik za steno. Ta metoda je premalo natančna za zanesljive ugotovitve orientacije. Na orientacijo vlaken bomo lahko sklepali iz rezultatov testiranih preizkušancev.

## 7 Rezultati preiskav in diskusija

### 7.1 Izmerjene vrednosti

V preglednicah 7.1 do 7.10 so prikazani laboratorijski rezultati meritev. Zaporedno so podane izmerjene mase, dimenzije in porušne sile za vsak preskušaneec. Tlačna sila je bila izračunana kot kvocient porušne sile in površine preskušanca. Za vsako serijo smo izračunali povprečja za enake oblike preskušancev in standardne deviacije.

V vsaki seriji je bil narejen upogibni test za ležeče in pokončno betonirane prizme. Rezultat je porušna sila.

#### 7.1.1 1.serija: beton C30/37, jeklena vlakna IRI-50/30

Preglednica 8: Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 1. serijo (vlakna JV 50/30)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]	tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	povprečna tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	standardna deviacija tlačnih trdnosti [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]
KOCKA 1	7978	147	147	148	500,7	23,17	24,77	3,95
KOCKA 2	8004	148	147	147	451,2	20,74		
KOCKA 3	8020	148	147	148	486,5	22,36		
KOCKA 4	8020	147	150	147	549,8	24,93		
KOCKA 5	8180	148	150	150	711,8	32,06		
KOCKA 6	7994	147	150	147	558,6	25,33		
PRIZMA 1	9782	98	98	400	344,1	35,83	34,36	1,72
PRIZMA 2	9682	96	97	398	302,4	32,47		
PRIZMA 3	9752	97	98	401	330,6	34,78		
PRIZMA 1 =	9482	98	98	400	294,6	30,67	30,80	0,11
PRIZMA 2 =	9604	98	97	400	293,3	30,85		
PRIZMA 3 =	9558	97	98	400	293,6	30,89		
VALJ 1	12940	149	296		501,7	28,79	29,61	0,76
VALJ 2	13160	149	297		518,9	29,77		
VALJ 3	12860	149	297		527,6	30,27		

Preglednica 9: Izmerjene vrednosti za upogibni test (vlakna JV 50/30)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]
PRIZMA	9616	97	97	399	12,7
PRIZMA =	9522	96	97	400	13,1

**7.1.2 2. serija: beton C30/37, jeklena vlakna IRI-50/16**

Preglednica 10: Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 2. serijo (vlakna JV 50/16)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]	tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	povprečna tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	standardna deviacija tlačnih trdnosti [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]
KOCKA 1	8002	149	148	150	581,5	26,37	30,33	3,08
KOCKA 2	8030	150	150	148	696,3	30,95		
KOCKA 3	8084	148	147	148	727,3	33,43		
KOCKA 4	7978	150	149	149	614,8	27,51		
KOCKA 5	8170	149	150	149	664,2	29,72		
KOCKA 6	8080	150	150	149	765,3	34,01		
PRIZMA 1	9660	99	99	395	339,4	34,63	35,36	1,24
PRIZMA 2	9692	99	100	396	364,3	36,80		
PRIZMA 3	9552	98	99	397	336,3	34,66		
PRIZMA 1 =	9578	99	100	400	323,6	32,69	33,71	0,96
PRIZMA 2 =	9518	99	98	400	328,3	33,84		
PRIZMA 3 =	9568	98	98	400	332,3	34,60		
VALJ 1	13160	149	298		409,1	23,47	31,21	6,77
VALJ 2	13120	149	296		594,6	34,12		
VALJ 3	13100	149	299		628,3	36,05		

Preglednica 11: Izmerjene vrednosti za upogibnostni test (vlakna JV 50/16)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]
PRIZMA	9882	9,7	9,8	400	14,33
PRIZMA =	9514	9,8	9,7	400	14,47

### 7.1.3 3. serija: beton C30/37, jeklena vlakna IRI-40/16

Preglednica 12: Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 3. serijo (vlakna JV 40/16)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]	tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	povprečna tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	standardna deviacija tlačnih trdnosti [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]
KOCKA 1	8204	146	147	148	838,4	39,06	32,25	4,27
KOCKA 2	8168	148	147	149	686,9	31,57		
KOCKA 3	8132	147	148	148	641,7	29,50		
KOCKA 4	8032	146	147	148	764	35,60		
KOCKA 5	8172	148	148	148	605,4	27,64		
KOCKA 6	8078	147	146	148	647,1	30,15		
PRIZMA 1	9662	98	98	400	382,2	39,80	38,70	2,84
PRIZMA 2	9676	97	98	400	388,2	40,84		
PRIZMA 3	9682	98	98	400	340,7	35,47		
PRIZMA 1 =	9612	98	97	400	334,1	35,15	34,23	1,53
PRIZMA 2 =	9562	97	97	400	305,4	32,46		
PRIZMA 3 =	9508	95	96	400	319,9	35,08		
VALJ 1	13020	148	296		577,8	33,60	33,92	1,94
VALJ 2	13080	149	97		560,3	32,15		
VALJ 3	13120	148	295		618,9	35,99		

Preglednica 13: Izmerjene vrednosti za upogibni test (vlakna JV 50/16)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]
PRIZMA	9678	98	98	400	13,59
PRIZMA =	9628	97	98	400	14,47

#### 7.1.4 4.serija: Beton C30/37, jeklena vlakna IRI-FX 35

Preglednica 14: Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 4. serijo (vlakna JV FX 35)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]	tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	povprečna tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	standardna deviacija tlačnih trdnosti [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]
KOCKA 1	8020	147	148	148	785,2	36,09	31,60	3,90
KOCKA 2	8198	147	147	147	638	29,52		
KOCKA 3	8144	147	148	148	634,7	29,17		
PRIZMA 1	9706	98	98	400	362,6	37,76	35,30	3,43
PRIZMA 2	9638	98	97	400	349,5	36,77		
PRIZMA 3	9760	99	98	400	304,4	31,37		
PRIZMA 1 =	9608	98	97	400	323,6	34,04	34,37	0,76
PRIZMA 2 =	9520	97	98	400	321,5	33,82		
PRIZMA 3 =	9768	98	97	400	335	35,24		
VALJ 1	13100	148	297		605	35,19	33,62	1,43
VALJ 2	13200	149	299		564,3	32,38		
VALJ 3	13340	150	298		587,9	33,29		

Preglednica 15: Izmerjene vrednosti za upogibni test (vlakna JV FX 35)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]
PRIZMA	9706	97	98	400	16,81
PRIZMA =	9666	97	97	400	13,88



### 7.1.5 5. serija: Beton C30/37, brez vlaken

Preglednica 16: Izmerjene vrednosti, dimenzije, sile ter ustrezne trdnosti s povprečji za 5. serijo (beton brez vlaken)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]	tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	povprečna tlačna trdnost [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]	standardna deviacija tlačnih trdnosti [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]
KOCKA 1	8130	147	146	149	898,0	41,84	40,65	1,42
KOCKA 2	8112	147	147	148	844,4	39,08		
KOCKA 3	8072	148	146	148	886,9	41,04		
PRIZMA 1	9628	97	97	400	310,1	32,96	35,46	2,81
PRIZMA 2	9622	97	97	400	328,6	34,92		
PRIZMA 3	9680	97	98	400	366,0	38,50		
PRIZMA 1 =	9556	96	97	400	380,8	40,89	41,28	0,99
PRIZMA 2 =	9634	97	96	400	394,9	42,41		
PRIZMA 3 =	9610	98	97	400	385,5	40,55		
VALJ 1	12980	148	297		678,1	39,44	38,84	1,87
VALJ 2	13100	149	296		640,4	36,75		
VALJ 3	13120	148	298		693,6	40,34		

Preglednica 17: Izmerjene vrednosti za upogibni test (beton brez vlaken)

tip preizkušanca	masa [g]	$b$ [mm]	$h$ [mm]	$v$ [mm]	sila porušitve [kN]
PRIZMA	9640	99	99	399	14,81
PRIZMA =	9644	98	98	399	15,86

## 7.2 Diskusija

Iz rezultatov opravljenih laboratorijskih preiskav je razvidno, da uporaba jeklenih vlaken v betonu tlačne trdnosti ne poveča. Razrez preskušancev je pokazal več praznin v betonu z jeklenimi vlakni. Predvidevamo, da so vlakna onemogočila hiter izhod zraka iz betona med vibriranjem, ki je trajalo le približno 7 sekund. Prazna mesta v kompozitu zmanjšajo prečni prerez preskušanca in posledično je zaradi tega tlačna trdnost manjša.

Upogibna trdnost vlaknastih betonov, vgrajenih v ležeče prizme je bila, raze pri betonih s kompaktnimi jeklenimi vlakni FX 35, večja v primerjavi z upogibno trdnostjo vlaknastih betonov, vgrajenih v pokončne prizme. Iz tega sklepamo, da se je pretežni del vlaken med vibriranjem usmeril pravokotno na smer vgrajevanja betona. Vodoravno orientirana vlakna v ležeče betoniranih prizmah omogočajo večjo upogibno trdnost kompozita.

## 8 Zaključki

Oblika preizkušanca vpliva na velikost mehanskih lastnosti betona. Med zgoščevanjem svežega betona se podolgovati delci v njem usmerjajo pravokotno na smer vgrajevanja. Raziskovali smo, kako oblika preizkušanca in smer vgrajevanja betona vplivata na tlačno in upogibno trdnost betona. Betonske preizkušance smo vgradil v kalupe različnih oblik in dimenzij. Vsebovali so različna jeklena vlakna ali so bili brez njih.

Na podlagi eksperimentalnih preiskav in analize dobljenih rezultatov povzemamo naslednje ugotovitve in podajamo zaključke.

Pri betonih brez jeklenih vlaken je tlačna trdnost preizkušancev, pri katerih je ena stranica znatno večja od drugih dveh, manjša v primerjavi s tlačno trdnostjo preizkušancev v obliki kocke. Izjema so le preizkušanci, ki so bili vgrajeni v ležeče prizme.

Pri vseh preiskovanih betonih z jeklenimi vlakni je tlačna trdnost preizkušancev, pri katerih je ena stranica znatno večja od drugih dveh, večja v primerjavi s tlačno trdnostjo preizkušancev v obliki kocke.

Tlačna trdnost standardnih preizkušancev brez jeklenih vlaken, ki imajo obliko valja ali kocke, je večja v primerjavi s tlačno trdnostjo primerljivih preizkušancev, ki vsebujejo jeklena vlakna. Opazili smo, da je v strukturi vlaknastega betona več zračnih mehurčkov kot pri betonu brez vlaken, ki so se pri zgoščevanju ujeli med vlakna in niso mogli iz betona.

Tlačna trdnost betonskih prizem, ki smo jih vgrajevali v smeri daljše stranice - pokončno, je pri vseh vlaknastih betonih večja v primerjavi s tlačno trdnostjo prizem, ki smo jih vgrajevali pravokotno na smer daljše stranice - leže. Ugotovili smo, da so razlike med omenjenimi tlačnimi trdnostmi večje pri drobnejših in krajših vlaknih. Pri betonih brez vlaken je razmerje tlačnih trdnosti obratno.

Upogibna trdnost betonskih prizem, ki smo jih vgrajevali v smeri daljše stranice, je pri skoraj vseh vlaknastih betonih in betonih brez vlaken manjša v primerjavi z upogibno trdnostjo prizem, ki smo jih vgrajevali pravokotno na smer daljše stranice. Obratno je smer vgrajevanja vplivala na velikost upogibne trdnosti pri betonih s kompaktnimi jeklenimi vlakni IRI-FX-35, ki med kratkotrajnim zgoščevanjem niso imela možnosti, da bi se usmerila pravokotno na smer vgrajevanja.

V obravnavanih primerih smer vgrajevanja vpliva na velikosti tlačnih trdnosti do 14%, na upogibne do 21%. Zaradi znatnega vpliva smeri vgrajevanja na mehanske lastnosti betonov bi bilo smiselno razširiti obseg raziskave in izsledke le-te upoštevati v praksi.

## Literatura

- [1] Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.
- [2] Šušteršič, J. 1999. Učinkovitost vlaken v mikroarmiranih betonih. V: Kavčič, L. (ur.). Nova spoznanja pri proizvodnji in uporabi betonskih mešanic : objekti na cestah in visoke gradnje : zbornik referatov. Ljubljana: DRC, Družba za raziskave v cestni in prometni stroki Slovenije, str. 37-46.
- [3] Premrl, F. 1983. Gradiva v gradbeništvu, Tehniška založba Slovenije, Ljubljana: 319 str.
- [4] Muravljov, M. 1989. Građevinski materiali, Naučna knjiga, Građevinski fakultet, Beograd: 486 str.
- [5] Mehta, P.K. Monteiro, P.J.M. 2014. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Fourth Edition, McGraw-Hill Education, New York, 653 str.
- [6] Taylor, G.D. 1991. Construction materials, Longman Scientific & Technical, Longman Group. UK Limited, 532 str.
- [7] Edginton, J. Hannant, D.J. 1972. Steel fibre reinforced concrete, The effect on fibre orientation of compaction of vibration, Matériaux et constructions, let. 5, št. 25, str. 41 – 44.