

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:

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

Datum arhiviranja: 01-10-2015

University
of Ljubljana

Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



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

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

This is original version of final thesis.

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

Dežman, A., 2015. Sprijemnost med betonom in armaturo. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 34 pp.

Archiving Date: 01-10-2015

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

ANDRAŽ DEŽMAN

SPRIJEMNOST MED BETONOM IN ARMATURO

Diplomska naloga št.: 208/B-GR

**BOND BETWEEN CONCRETE AND REINFORCING
STEEL**

Graduation thesis No.: 208/B-GR

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 17. 09. 2015

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Andraž Dežman izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Sprijemnost med betonom in armaturo«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ljubljana, 9.9.2015

Andraž Dežman

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|---|
| UDK: | 624.012.45(497.4)(043.2) |
| Avtor: | Andraž Dežman |
| Mentor: | doc. dr. Drago Saje |
| Naslov: | Sprijemnost med betonom in armaturo |
| Tip dokumenta: | Diplomska naloga – univerzitetni študij |
| Obseg in oprema: | 34 str., 14 sl., 10 pregl., 7 gr. |
| Ključne besede: | sprjemna napetost, izvlečni test, beton visoke trdnosti, vlaknast beton, Evrokod, FIB Model Code 2010 |

IZVLEČEK

V diplomski nalogi obravnavam sprijemnost med jekleno armaturno palico premera 12 mm in različnimi vrstami betonov. Standard Evrokod 2 in modelni predpis FIB Model Code 2010 določata mejno sprijemno napetost, ki je modelirana kot strižna napetost po obodu palice. Standarda v povezavi s to tematiko ne obravnavata vlaknastih betonov. Skopo je tudi področje betonov visoke trdnosti. V ta namen smo izvedli raziskavo z izvlečnim oziroma »pull-out« testom. Pri delu smo se opirali na standard SIST EN 10080:2005, ki opredeljuje potek raziskave kot tudi obliko preizkušancev. Med izvlečnim testom se palico, ki je vgrajena v betonsko kocko, izvleče iz betonskega objema. V raziskavi smo preizkusili beton normalne trdnosti, beton visoke trdnosti in visoko trden vlaknast beton z 1 % jeklenih vlaken glede na prostornino betona. Za vsako vrsto betona smo izdelali tri preizkušance. Rezultati so pokazali, da se preizkušanci iz betona visoke trdnosti obnašajo podobno kot preizkušanci iz običajnega betona, vendar pri tem dosegajo trikrat boljšo sprijemnost.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

| | |
|-----------------------|---|
| UDK: | 624.012.45(497.4)(043.2) |
| Author: | Andraž Dežman |
| Supervisor: | assist. prof. Drago Saje, Ph.D |
| Title: | Bond between concrete and reinforcing steel |
| Document type: | Graduation Thesis – University studies |
| Notes: | 34 p., 14 fig., 10 tab., 7 gr. |
| Keywords: | bond stress, pull-out test, high strength concrete, fibre concrete, Eurocode, FIB Model Code 2010 |

ABSTRACT

This thesis researches bond characteristics between the 12mm steel reinforcing bar and various types of concrete. Standard Eurocode 2 and FIB Model Code 2010 define ultimate bond stress, which acts like shear stress around the reinforcing bar. In correlation with bond, high strength concrete is poorly represented, furthermore, research and information on fibre concrete are lacking. Therefore, a series of pull-out tests, based on standard SIST EN 10080:2005, have been conducted. In this study, behaviours of normal strength concrete, high-strength concrete and high-strength steel fibre-reinforced concrete with 1 % of steel fibres have been tested. Three pull-out tests were carried out for each type of concrete. The results show that high-strength concrete acts in similar way as normal strength concrete. However, its ultimate bond stress was three times larger.

ZAHVALA

Za pomoč, nasvete in namenjen čas pri nastajanju diplomske naloge in pri raziskavah se zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu. Za ideje in nasvete pri izdelavi kalupa in za pomoč pri izvajanju izvlečnega testa se zahvaljujem izr. prof. dr. Jožetu Lopatiču. Hvala tudi laborantu Igorju Valjavcu in študentoma Blažu Juvancu in Nejcju Legatu za pomoč pri delu v laboratoriju.

KAZALO VSEBINE

| | |
|---|-------------|
| IZJAVE | II |
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK..... | III |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT | IV |
| ZAHVALA..... | V |
| KAZALO SLIK..... | VIII |
| KAZALO PREGLEDNIC..... | IX |
| KAZALO GRAFIKONOV | X |
| | |
| 1 UVOD | 1 |
| | |
| 2 ARMIRAN BETON | 2 |
| 2.1 Sestavine betona in posebnosti betonov visoke trdnosti | 2 |
| 2.1.1 Agregat | 2 |
| 2.1.2 Cement | 3 |
| 2.1.3 Voda | 3 |
| 2.1.4 Mineralni dodatki..... | 3 |
| 2.1.5 Kemični dodatki..... | 4 |
| 2.2 Visoko trden vlaknast beton..... | 4 |
| 2.2.1 Mehanske lastnosti vlaknastih betonov | 5 |
| | |
| 3 SPRIJEMNOST MED ARMATURO IN BETONOM | 6 |
| 3.1 Sprijemna napetost..... | 8 |
| 3.1.1 Sprijemnosti po Evrokodu 2 | 8 |
| 3.1.2 Področje uporabe mejne sprijemne napetosti..... | 9 |
| 3.1.2.1 Osnovna sidrna dolžina | 9 |
| 3.1.2.2 Projektna sidra dolžina | 9 |
| 3.1.2.3 Stikovanje palic..... | 9 |
| 3.1.3 Sprijemnosti po FIB Model Code 2010 | 10 |
| 3.2 »Pull-out« oziroma izvlečni test | 11 |
| 3.2.1 Določila po standardu SIST EN 10080:2005 | 11 |
| 3.2.1.1 Splošno | 11 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.1.2 Oprema za testiranje | 11 |
| 3.2.1.3 Kalup | 12 |
| 3.2.1.4 Preizkušanece | 12 |
| 4 EKSPERIMENTALNI DEL | 14 |
| 4.1 Načrtovanje raziskav | 14 |
| 4.2 Uporabljeni materiali | 14 |
| 4.2.1 Agregat | 14 |
| 4.2.2 Cement | 15 |
| 4.2.3 Mineralni in kemijski dodatki | 15 |
| 4.2.4 Vlakna | 15 |
| 4.2.5 Armatura | 15 |
| 4.3 Sestava betonske mešanice | 16 |
| 4.4 Načrtovanje in izdelava kalupa | 17 |
| 4.5 Delo v laboratoriju | 18 |
| 4.5.1 Izdelava preizkušancev | 18 |
| 4.5.2 Lastnosti svežega betona | 20 |
| 4.5.3 Tlačna trdnost betona | 20 |
| 4.5.4 Izvlečni test | 21 |
| 4.6 Rezultati raziskave | 23 |
| 4.6.1 Beton normalne trdnosti | 24 |
| 4.6.2 Beton visoke trdnosti | 26 |
| 4.6.3 Visoko trden vlaknast beton | 28 |
| 4.6.4 Primerjava preizkušancev iz različnih vrst betona | 31 |
| 4.6.5 Primerjava s FIB Model Code 2010 | 32 |
| 5 ZAKLJUČEK | 33 |
| VIRI | 35 |

KAZALO SLIK

| | |
|---|----|
| Slika 1: Vlakna s kljukastima koncema..... | 5 |
| Slika 2: Prečni prerez, nastanek cepilnih razpok (2) zaradi radialnih napetosti (1) | 7 |
| Slika 3: Področje zdrobljenega betona (1), mikro razpoke (2), zdrs (3) | 7 |
| Slika 4: Zahtevane dimenzije kalupa in položaj palice | 12 |
| Slika 5: Shema preizkušanca | 13 |
| Slika 6: Relief uporabljene armaturne palice | 16 |
| Slika 7: Sveže betonske mešanice iz leve proti desni: običajen beton, beton visoke trdnosti, visoko trden vlaknasti beton | 17 |
| Slika 8: Vezana plošča..... | 18 |
| Slika 9: 3D model kalupa | 18 |
| Slika 10: Levo pripravljen kalup, desno položaj plastične cevke na armaturi | 19 |
| Slika 11: Negovanje preizkušancev | 19 |
| Slika 12: Na levi: porušitev vlaknastega betona; na desni: porušitev betona visoke trdnosti | 21 |
| Slika 13: Shema izvlečnega testa | 22 |
| Slika 14: Izvedba izvlečnega testa | 23 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--|----|
| Preglednica 1: Parametri, ki definirajo računski model sprijemnosti po FIB Model Code 2010 | 11 |
| Preglednica 2: Zrnavostna sestava agregata | 15 |
| Preglednica 3: Sestava betonskih mešanic..... | 16 |
| Preglednica 4: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona | 20 |
| Preglednica 5: Povprečna tlačna trdnost betonskih kock z robom 15 cm po 28 dneh, standardna deviacija in karakteristična tlačna trdnost | 21 |
| Preglednica 6: Maksimalne sprijemne napetosti, povprečje in standardna deviacija pri preizkušancih iz betona normalne trdnosti | 25 |
| Preglednica 7: Maksimalne sprijemne napetosti, povprečje in standardna deviacija pri preizkušancih iz betona visoke trdnosti..... | 27 |
| Preglednica 8: Maksimalne sprijemne napetosti, povprečje in standardna deviacija pri preizkušancih iz visoko trdnega vlaknastega betona..... | 29 |
| Preglednica 9: Primerjava vrednosti maksimalnih vrednosti sprijemnih napetosti za različne vrste betona..... | 32 |
| Preglednica 10: Primerjava karakteristične sprijemne napetosti pri preizkušancih iz običajnega betona in betona visoke trdnosti z vrednostim iz FIB Model Code 2010..... | 32 |

KAZALO GRAFIKONOV

| | |
|--|----|
| Grafikon 1: Računski model spreminjanja sprejemne napetosti v odvisnosti od zdrsra [FIB Model Code 2010]..... | 10 |
| Grafikon 2: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsra za preizkušance iz betona normalne trdnosti | 24 |
| Grafikon 3: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsra za preizkušance iz betona visoke trdnosti..... | 26 |
| Grafikon 4: Potek napetosti v odvisnosti od deformacije merjene z ekstenziometrom na armaturni palici pri preizkušancih iz betona visoke trdnosti | 28 |
| Grafikon 5: Potek sprejemnih napetosti v odvisnosti od zdrsra za preizkušance iz visoko trdnega vlaknastega betona | 29 |
| Grafikon 6: Potek napetosti v odvisnosti od deformacije merjene z ekstenziometrom na armaturni palici pri preizkušancih iz visoko trdnega vlaknastega betona | 30 |
| Grafikon 7: Primerjava poteka sprejemne napetosti v odvisnosti od zdrsra za različne betone | 31 |

1 UVOD

Armiran beton je s svojo ekonomičnostjo in tehnološkimi lastnostmi močno zaznamoval gradbeništvo in je neposredno vplival na napredek in preskok razvoja infrastrukture v zadnjem stoletju. Z vpeljavo kemijskih in mineralnih dodatkov je beton postopoma pridobil na mehanskih lastnostih ter je s tem omogočal vse bolj drzno gradnjo.

Uporabnost armiranega betona je v prvi vrsti pogojena s kompatibilnostjo med betonom in armaturo ter z medsebojnim sodelovanjem obeh materialov. Za beton sta značilni odlično obnašanje pod vplivom tlačne obremenitve in majhna natezna trdnost, ki jo pri dokazovanju nosilnosti kar zanemarimo. Zato natezno obremenitev namesto betona v armiranem betonu prevzame jeklena armatura v obliki jeklenih palic ali armaturnih mrež, pri čemer mora veljati ustrezna sprijemnost armature z betonom, v katerem je objeta. Pri analizi konstrukcij iz armiranega betona je ena izmed osnovnih predpostavk, da se pri obremenjevanju konstrukcijskega elementa aktivira popolna povezava med armaturo in betonom, zato med njima ne sme priti do zdrsa. Sile v palici se morajo preko sprijemnih napetosti, ki delujejo po plašču armaturne palice, prenesti v beton.

Računski model sprijemnih napetosti je opredeljen v standardu Evrokod 2. Definirana je mejna sprijemna napetost, ki je odvisna od trdnostnega razreda betona. Do razreda C55/67 mejna sprijemna napetost narašča, za trdnejše betone pa je vrednost poenotena. Zanimalo nas je, kako se v primerjavi z betonom normalne trdnosti takšni betoni obnašajo, pri čemer smo želeli odgovoriti na vprašanje, ali se sprijemnost kljub trditvam iz Evrokoda pri betonih višje trdnosti poveča.

Poleg preiskave na betonu visoke trdnosti nas je zanimalo, kaj se dogaja s sprijemnostjo, če betonu visoke trdnosti dodamo jeklena vlakna in s tem ustvarimo visoko trden vlaknast beton. Evrokod 2 obravnava le klasično armiran beton, izpušča pa področja vlaknastih betonov. Izhajali smo iz domneve, da bi se sprijemnost morala izboljšati, saj je znano, da vlakna v betonu izboljšajo mehanske lastnosti betona.

Diplomska naloga je razdeljena na dva dela, teoretičnega in eksperimentalnega. V teoretičnem delu opišem lastnosti betonov visoke trdnosti in visoko trdnih vlaknastih betonov, kjer se osredotočim na posamezne komponente obeh betonov. Nadaljujem z razlago principa delovanja sprijemnosti in opisom računskega modela po Evrokodu 2 in po FIB Model Code 2010. Na koncu teoretičnega dela opišem izvlečni test, metodo določanja sprijemnih napetosti, in prikažem zahteve za izvedbo po standardu SIST EN 10080:2005.

Eksperimentalni del sestoji iz opisa izdelave kalupa ter prikaza uporabljenih materialov v betonski mešanici. Bistvo eksperimentalnega dela je proces izdelave preizkušancev in izvedba izvlečnega testa. Nalogo zaključim z opredeljevanjem dobljenih rezultatov in primerjavo s standardom Evrokod 2 in modelnim predpisom FIB Model Code 2010.

2 ARMIRAN BETON

Armiran beton je v gradbeništvu globoko zasidran kot eden najbolj razširjenih materialov za gradnjo objektov visoke gradnje. Njegova vsestranskost se kaže skozi možnost apliciranja na kopico različnih konstrukcijskih kot tudi nekonstrukcijskih elementov objektov. Na lastnosti armiranega betona v večji meri vpliva kakovost betona kot tudi jeklene armature. V splošnem je beton keramični kompozitni material, ki ga sestavljajo cement, agregat in voda. Lastnosti komponent in njihovo medsebojno razmerje neposredno vplivajo na lastnosti betona, v veliki meri tudi na tlačno in natezno trdnosti, ki spadata med bistvene lastnosti betona. Glede na karakteristično tlačno trdnost 28 dni starega betona se beton razvršča v trdnostne razrede. Evrokod 2 navaja 14 trdnostnih razredov, poleg tega pa še razlikuje med betoni normalne in visoke trdnosti. Meja med tema dvema skupinama je pri betonu C50/60. Razlika med njima je poleg v trdnosti tudi v ostalih mehanskih lastnostih, ki vplivajo na sprijemnost med betonom in armaturo.

Beton dosega zadovoljivo tlačno trdnost, medtem ko je razmeroma šibak v primeru natezne obremenitve, saj je natezna trdnost betona velikostnega reda le okoli 10 % tlačne trdnosti. Iz tega sledi, da je sam beton brez ojačitve, kjer se v konstrukcijskih elementih pričakujejo natezne napetosti, neprimeren za uporabo. Zato v takšnih primerih uporabljamo armiran beton. Gre za kompozit med betonom in jeklom za armiranje, v katerem jeklo prevzema natezne napetosti, ki se razvijejo v natezni coni betona in s tem znatno poveča natezno trdnost materiala in njegovo duktilnost. Za učinkovito sodelovanje obeh komponent armiranega betona je potrebno zagotoviti ustrezno sprijemnost med armaturo in betonom.

2.1 Sestavine betona in posebnosti betonov visoke trdnosti

Sestavine za izdelavo betonov visoke trdnosti so v osnovi enake sestavinam običajnega betona. Princip doseganja višje trdnosti je v zmanjšanju poroznosti, vodocementnega razmerja, nehomogenosti in mikro razpok v hidratiziranem cementu in na stiku agregata s cementom. Največ pozornosti gre k povečanju trdnosti cementnega kamna, ki lahko z izboljšanjem dosega boljše mehanske lastnosti kot običajno močnejši agregat.

2.1.1 Agregat

Agregat uporabljen v betonih visoke trdnosti mora ustrezati lastnostim, ki definirajo kvalitetne agregate. K tem lastnostim prištevamo predvsem majhno poroznost, pravilno oblikovanost zrn, veliko tlačno trdnost ter hrapavost površine. Majhna poroznost vpliva na povečanje trdote in trdnosti agregata. Večjo trdnost izkazuje agregat, ki je pridobljen z načinom drobljenja večjih kosov kamna na manjše lomljence, kot agregat gramoznega aluvialnega izvora. Hrapavost površine je pomembna, ko govorimo o sprijemnosti med agregatom in cementno pasto. Na sprijemnost vpliva tudi morebitna zaprašenosť agregata. Prah preprečuje dostop vode in cementa do zrna, hkrati pa zaradi velikega razmerja med površino in prostornino povečuje potrebo po vodi, zato mora biti agregat pred uporabo ali že v procesu

proizvodnje ustrezno očiščen. Za manjše frakcije agregata uporabimo mivko, ki pogosto vsebuje glinaste delce, ki prav tako kot prašni delci zmanjšujejo sprijemanje cementne paste z zrnom. (Žarnić, 2003)

Na trdnost betona vpliva tudi granulometrijska sestava, ki mora biti v območju mejnih krivulj po standardu SIST 1026:2008. Maksimalno zrno, ki je v uporabi pri betonih visoke trdnosti, je 16 mm. Zrna večja od 16 mm lahko negativno vplivajo na trdnost betona, vendar uporaba agregata z manjšim maksimalnim zrnom podraži beton. Manjša zrna imajo večje razmerje med površino in prostornino, zato potrebujejo več cementne paste, ki je najdražji element betona. (Žarnić, 2003)

2.1.2 Cement

Cement, ki je v uporabi pri izdelavi betonov visoke trdnosti, se ne razlikuje od cementa pri običajnih betonih. Večinoma se uporablja enak običajen portland cement, ki izhaja iz skupine silikatnih cementov. Proizvaja se iz mineralov, ki jih najdemo v laporju, apnencu in glinah. Iz osnovnih sestavin v procesu žganja nastane cementni klinker. V fin prah zmlet klinker z dodatkom sadre imenujemo portland cement. Sestavljajo ga minerali C_3S (trikalcijev silikat), C_2S (dikalcijev silikat), C_3A (trikalcijev aluminat) in C_4AF (tetraikalcijev silikat). C_3S , ki napram drugim komponentam predstavlja največji delež, in sicer med 40 % in 70 % celotne mase, v procesu hidratacije burno reagira in že v času strjevanja znatno prispeva k trdnosti. C_2S reagira počasi in k trdnosti betona bistveno prispeva šele v obdobju po pretečenih osemindvajsetih dneh. (Žarnić, 2003)

2.1.3 Voda

Navadno se uporablja pitna voda iz vodovoda. Bolj kot izvor vode je pomembna količina oziroma vodocementno razmerje, ki je definirano kot količnik med maso vode in maso cementa. Idealno razmerje, kjer je hidratiziran ves cement, je 0,38. Kar je več, pomeni, da je v betonski mešanici odvečna voda, ki bo ostala prosta tudi po končanem procesu hidratizacije in se bo namestila v kapilarnih porah. Razmerje manjše od 0,38 predstavlja stanje, ko bo premalo vode za popolno hidratizacijo. Nehidratiziran cement v praškastem stanju ni škodljiv za mehanske lastnosti vezanega betona, saj lahko opravlja podobno vlogo kot agregat. V praksi je razmerje 0,38 nedosegljivo, saj nekaj vode med procesom priprave betona izhlapi, hidratizacija pa bi se zavlekla v več let, zato se pri pripravi mešanice vračuna nekaj dodatne količine vode. (Žarnić, 2003)

2.1.4 Mineralni dodatki

Le z uporabo cementa težje dosežemo zahtevano trdnost betonov visoke trdnosti. Na trgu je moč kupiti cement z že vnaprej vmešanimi dodatki kot so žindra, pucolan in mikrosilika. Enak rezultat lahko dosežemo z običajnim cementom, ki mu med pripravo betonske

mešanice dodamo zelene dodatke. Mineralni dodatki predstavljajo med 5 in 20 % celotne mase cementa.

Žlindro sestavljajo kovinski oksidi in silicijev dioksid. Nastane kot stranski produkt v jeklarski industriji. Pozitivno vpliva na lastnosti sveže betonske mešanice, saj izboljšuje konsistenco mešanice in s tem dovljuje znižanje vodocementnega razmerja. Prav tako zmanjšuje hidratacijsko toploto in izcejanje vode, zakasni začetek vezanja in izboljša odpornost betonov v agresivnem okolju.

Mikrosilika je dodatek amorfne silicijevega dioksida (SiO_2), za katerega je značilno izredno fino mletje. Premer povprečnega delca meri 150 nm, kar je 50-100-krat manj kot delec običajnega cementa. Pridobiva se kot stranski produkt v obločnih električnih pečeh med proizvodnjo jeklenih litin. Zaradi svoje finosti in kemičnih lastnosti se delci mikrosilike porazdelijo med zlepljene cemente delce in jih loči ter s tem pripomore k izboljšanju homogenosti cementne paste. Delci vderejo tudi v kapilarne pore in jih zmanjšujejo. Oboje povečuje trdnost betona kakor tudi sprijemnost med betonom in armaturo. (Warwattikar, Malviya, 2015)

2.1.5 Kemični dodatki

Namen kemičnih dodatkov je zmanjšanje cene konstrukcije in doseganje lastnosti svežega kot tudi že vezanega betona, ki bi jih bilo brez teh dodatkov težko zagotoviti. Sem spadajo aeranti, plastifikatorji, superplastifikatorji, zmanjševalci in pospeševalci vezanja.

Od naštetih se pri izdelavi betonov visoke trdnosti poslužujemo predvsem superplastifikatorjev. Sveže mešanice betonov visoke trdnosti imajo nizko vodocementno razmerje in so zato izjemno viskozne, kar zmanjšuje vgradljivost. Ustrezno konsistenco dosežemo z dodajanjem superplastifikatorjev, ki zmanjšuje potrebo po vodi, hkrati pa podaljšujejo čas vezanja in preprečujejo segregacijo betona. V svežem betonu se delci cementa med seboj močno privlačijo in tvorijo skupke, ki globalno gledano povzročajo gosto konsistenco. Molekule superplastifikatorja, ki so približno 100-krat večje od molekule vode, obdajo zrna cementa, kar povzroči distanciranje zrn in s tem povzroči bolj homogeno porazdelitev zrn po celotni mešanici betona. Poleg tega pa film, ki se ustvari okoli zrn, poveča njihovo drsnost in s tem povzroči bolj plastično konsistenco betonske mešanice.

2.2 Visoko trden vlaknast beton

Visoko trden vlaknast beton je hibrid med betonom visoke trdnosti in vlaknastim betonom. Slednji vsebuje enake sestavine kot običajen, le da se v procesu priprave betonske mešanice dodajo še vlakna. Pri izbiri vrste agregata veljajo enake zakonitosti, medtem ko moramo biti pozorni na granulometrijsko sestavo, kjer je priporočljiva uporaba večjega deleža drobnih frakcij. To dejstvo ne sovпада z zahtevam betonov visoke trdnosti, kjer je zaželeno zmanjšanje drobnih frakcij in povečanje grobih. Kakšna zrnastostna sestava bi kar najbolj ustrezala visoko trdnem vlaknastem betonu, ni definirano v standardih. V našem

primeru smo pripravili mešanico, ki bazira na betonu visoke trdnosti, kateremu so dodana vlakna.

Za doseganje visoke trdnosti je potrebno znižati vodocementno razmerje, ki vodi v poslabšanje konsistenčnih lastnosti betona. Z dodajanjem vlaken se razmere še poslabšajo. Zaradi trenja med svežim betonom in vlakni ter velike dodatne površine, ki smo jo v beton vnesli z vlakni, se v primeru uporabe večjega deleža vlaken mešanica spremeni v trdoplastično maso, ki je neprimerna za vgrajevanje. S povečanjem deleža cementne paste in uporabo superplastifikatorjev lahko dosežemo takšno konsistenco svežega betona, da ga lahko vgrajujemo v kalupe. (Zajc, 1994)

Vlakna, ki so v uporabi, so lahko jeklena, polimerna, steklena ali iz naravnega organskega ali keramičnega izvora. Jeklena so različnih običajno patentiranih oblik, ki s svojo razgibanostjo zagotavljajo dobro sprejemnost z betonom. V praksi se najpogosteje uporabljajo ravna vlakna s kljukastima koncema in vlakna cikcakaste ukrivljenosti.



Slika 1: Vlakna s kljukastima koncema

2.2.1 Mehanske lastnosti vlaknastih betonov

Vlakna se uporabljajo predvsem iz razloga izboljšanja mehanskih lastnosti betona. Pri tem je pomembna količina, geometrija, vrsta, togost in smer poteka vlaken. Za beton je značilna majhna natezna trdnost, kar vodi v majhno nosilnost pri nateznem obremenjevanju. Pri betonih z visoko vsebnostjo vlaken, vlakna opravljajo pomembno vlogo pri prenosu nateznih napetosti. Beton pri prekoračitvi nateznih napetosti razpoka, takrat se aktivirajo vlakna, ki v smislu zmanjšanja širine razpok in njihovega širjenja ovirajo proces razpokanja. S povečevanjem obremenitve prihaja do izvleka vlaken, takrat je beton prepuščen samemu sebi, kar vodi v porušitev. (Zajc, 1994)

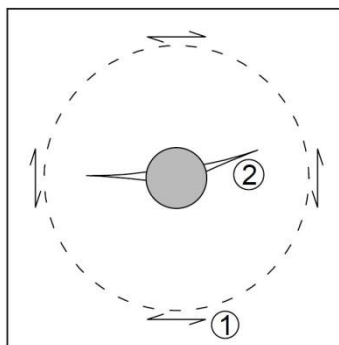
3 SPRIJEMNOST MED ARMATURO IN BETONOM

Na sprijemne lastnosti med armaturno palico in betonom vpliva množica faktorjev: oblika in premer palice, kvaliteta betona in njegova trdnost, sestava betona, smer betoniranja in stopnja korozije palice. Maksimalno sprijemno napetost med materialoma se določi s »pull-out« testom, kjer je zaradi vpliva številnih faktorjev značilen velik raztros rezultatov.

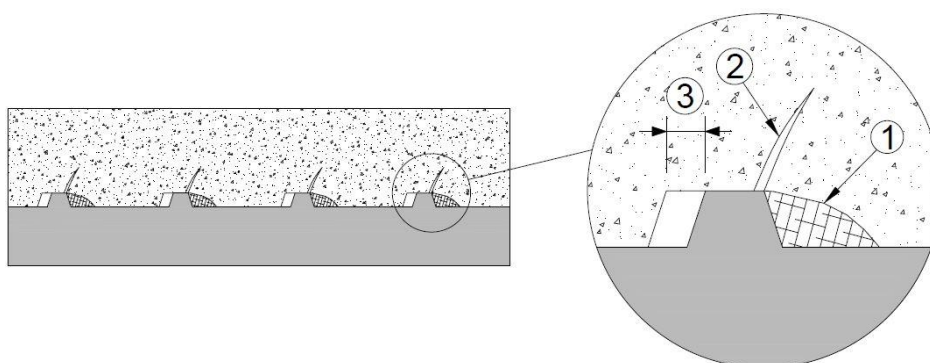
»Pull-out« ali izvlečni test je poizkus, pri katerem se iz betonske kocke s pomočjo trgalnega aparata izvleče armaturna palica in se s tem poskuša ponazoriti razmere v armirano betonskem konstrukcijskem elementu, ki je upogibno ali natezno obremenjen. Med procesom izvleka narebne palice iz betona se aktivirajo trije različni tipi sprijemnosti: adhezija oziroma zlepljenost, trenje in nosilnost preko reber palice, ki se opirajo na beton. Zlepljenost se pojavi na začetku, ko je raven obremenitve še nizka. Po prvem zdrsu palice je zlepljenost premagana. V tem trenutku se v obliki trenja pojavijo napetosti po zunanosti palice, ki so posledica hrapave površine betona in armaturne palice, poleg tega pa se rebra objeta v betonskih žepkih naslonijo na okoliški beton, kar predstavlja glavni način prenosa sile, na katerega odpade največji delež sprijemnosti.

Za gladke palice brez reber so značilni slabi pogoji sprijemnosti med palico in betonom, saj se sile prenašajo v beton le preko mehanizmov začetne zlepljenosti in trenja med površino palice ter betonom. Ta dva mehanizma imata razmeroma majhen odpor proti izvleku, zato se gladke palice pri konstrukcijskih elementih ne uporabljajo. Dovoljene so torej le narebne palice, kjer rebra skrbijo za dobro zasidranost v betonu.

Beton ima manjšo trdnost od jekla, zato pri izvleku palice popusti beton, pri tem se pojavi krušenje v coni ob rebrih in razpiranje betonskega preizkušanca. Po začetnem zdrsu se začnejo na betonu postopoma pojavljati poškodbe. Rebra armaturne palice se naslonijo na beton, pri čemer okoli konic reber povzročijo nastanek prečnih mikro razpok, s tem se pomiki palice povečujejo. Z nadaljnjim povečevanjem obremenitve se tlačna trdnost betona na stiku z rebri izčrpa. Prihaja do drobljenja betona in zaklinjanja palice v okoliški beton. Razmere v območju reber ponazarja slika 3. 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. Pri nizkih nivojih obremenitve so cepilne razpoke majhne in njihova globina ne sega daleč v beton, kar je možno videti na sliki 2.



Slika 2: Prečni prerez, nastanek cepilnih razpok (2) zaradi radialnih napetosti (1)



Slika 3: Področje zdrobljenega betona (1), mikro razpoke (2), zdrs (3)

Porušitev preizkušanca se lahko zgodi na dva načina. V odvisnosti od pogojev, ki se razvijejo v betonu okoli reber, lahko pride do izvleka palice ali do razcepa betona. Razcep se zgodi, ko cepilne razpoke začnejo prodirati globlje v beton. Beton ne more več prenesti nateznih napetosti, ki so sedaj zaradi cepilnih razpok skoncentrirane ob obodu preizkušanca. Betonska kocka se razpre, s tem ni več nikakršnega odpora proti sili, ki vleče palico. Za tak tip porušitve je značilna manjša sprijemnost. Drug način porušitve pa je tako imenovan izvlek palice. Z njim se dosega večje nivoje sprijemnosti. Cepilne razpoke se ne razvijejo do kritične meje, kjer bi ogrožale celovitost kocke, ampak prevlada drobljenje in striženje betona, ki se pojavi v področju ob rebrih. Palica se izvleče iz kocke, medtem ko se zunanost preizkušanca ne poškoduje. (Murcia-Delso, Stavridis, Shing, 2011)

3.1 Sprijemna napetost

3.1.1 Sprijemnosti po Evrokodu 2

Evrokod 2 sprijemne napetosti obravnava v zvezi s problemom sidranja vzdolžne armature pod poglavjem detajliranja armature in prednapetih kablov. S sidranjem armaturnih palic, mrež, žic in prednapetih kablov se zagotovi ustrezen prenos sil v beton, s čimer se prepreči poškodbe na betonu, kot so vzdolžno razpokanje in cepljenje.

Sprijemne napetosti so povezane tudi s procesom nastajanja razpok v nateznem območju betonskega elementa. Vpliv teh napetosti je v standardu Evrokod 2 posredno vključen v izraz za širino razpok s pomočjo koeficienta k_1 . Enačba za širino razpok se glasi:

$$s_{r,max} = 3,4c + 0,425k_1k_2\Phi/\rho_{p,eff}$$

Koeficient k_1 upošteva pogoje sidranja z betonom sprijete armature. Pri tem je $k_1=0,8$ za palice z dobro sprijemnostjo in $k_1=1,6$ za palice z gladko površino in slabo sprijemnostjo.

Sprijemnost ima pomembno vlogo pri detajliranju in sidranju armaturnih palic. Sprijemna napetost je definirana kot strižna napetost, ki deluje po plašču palice in povzroča v betonu nasprotno enake reakcije. Evrokod 2 podaja mejno sprijemno napetost f_{bd} po naslednjem izrazu:

$$f_{bd} = 2,25\eta_1\eta_2f_{ctd}$$

f_{ctd} ...predstavlja projektno vrednost natezne trdnosti betona. Določena je na podlagi karakteristične vrednosti natezne trdnosti $f_{ctk,0,05}$. Za betone visoke trdnosti je značilna povečana stopnja krhkosti, zato je po Evrokodu potrebno $f_{ctk,0,05}$ omejiti na vrednost za trdnostni razred C60/70.

η_1 ... je koeficient, ki zajema vpliv kvalitete sidranja in lege palice v času betoniranja.

- $\eta_1=1,0$ za dobre pogoje sidranja
- $\eta_1=0,7$ za vse ostale pogoje

η_2 ... vključuje vpliv premera palice: $\eta_2 = \begin{cases} 1,0 & \text{za } \phi \leq 32 \text{ mm} \\ \frac{(132-\phi)}{100} & \text{za } \phi > 32 \text{ mm} \end{cases}$

3.1.2 Področje uporabe mejne sprejemne napetosti

3.1.2.1 Osnovna sidrna dolžina

Napetosti v armaturni palici je potrebno ustrezno prenesti na okoliški beton. Porazdelitev napetosti se zgodi na osnovni sidrni dolžini $l_{b,rqd}$, ki je definirana z izrazom:

$$l_{b,rqd} = \frac{\phi \sigma_{sd}}{4 f_{bd}},$$

kjer je σ_{sd} projektna vrednost napetosti jekla, ϕ premer palice za armiranje in f_{bd} mejna sprejemna napetost.

3.1.2.2 Projektna sidra dolžina

Projektna sidra dolžina l_{bd} je definirana z izrazom:

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

α_1 ... vpliv oblike palice v področju sidranja

α_2 ... vpliv debeline krovne sloja

α_3 ... upoštevanje učinka prečne armature

α_4 ... vpliv v primeru zvarjenih palic

α_5 ... vpliv prečnih napetosti v območju sidranja

$l_{bd,min}$... minimalna potreba sidrna dolžina

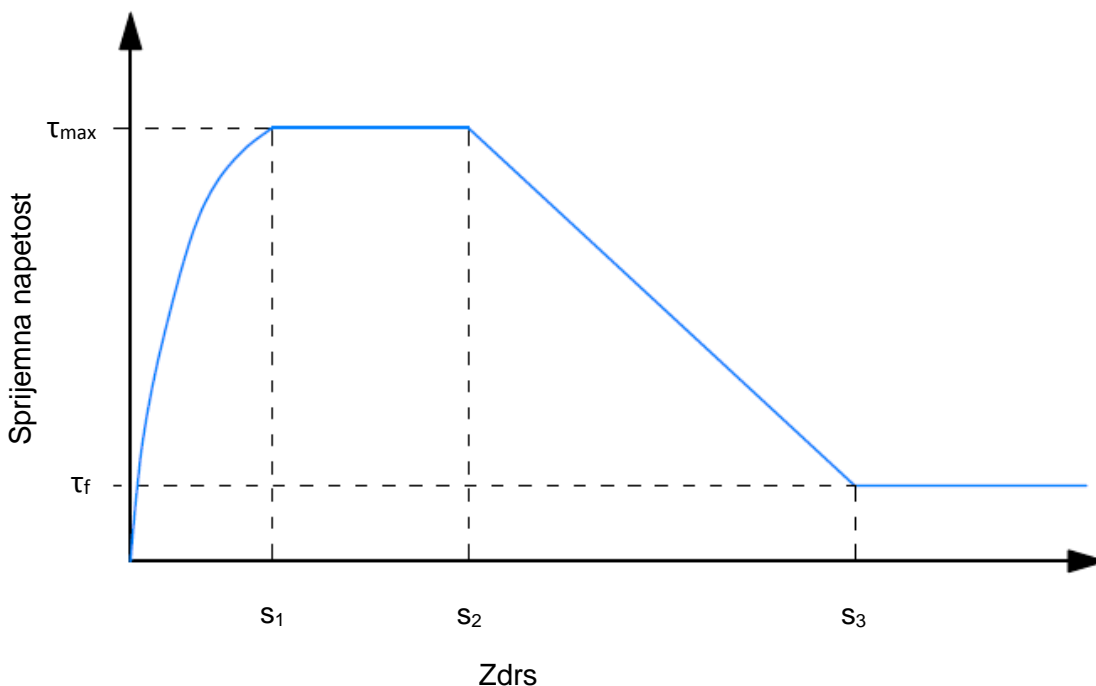
3.1.2.3 Stikovanje palic

V primerih, ko je potrebno armiranje izvesti na večjem območju, kot ga je možno pokrili s palico neke omejene dolžine, se izvede prekrivanje palic, pri čemer je z ustrezno dolžino preklopa zagotovljen varen prenos nateznih ali tlačnih sil iz ene palice na drugo. Osnova za določitev dolžine prekrivanja palic je osnovna sidrna dolžina $l_{b,rqd}$. Podobno kot pri projektni sidrni dolžini Evrokod tudi tukaj definira faktorje α , ki zajamejo merodajne vplive.

3.1.3 Sprijemnosti po FIB Model Code 2010

Rezultat izvlečnega testa je odnos med zdrsom palice in sprijemno napetostjo. Zdrs palice je definiran kot pomik prostega konca palice. Med preizkusom se na vpetem koncu palice meri sila, na podlagi katere se lahko določi sprijemna napetost. Med izvedbo testa sprijemna napetost v odvisnosti od zdrsa opiše značilen potek, kjer najprej napetost narašča, sledi konstantni plato ter linearen padec napetosti do porušitve. Odnos je po modelnem predpisu FIB Model Code 2010 določen v grafikonu 1. Diagram je razdeljen na štiri območja. Prvo območje je definirano z izrazom $\tau_{max}(s/s_1)^\alpha$. Koeficient α zavzema vrednosti med 0 in 1. Pri α je 1 je potek napetosti linearen, pri α je 0 pa je konstanten. Na koncu prvega območja dosežejo napetosti maksimalno vrednost τ_{max} , ki se nadaljuje v drugo območje. Kot posledica večjih poškodb betona okoli palice v tretjem območju napetosti iz maksimalne vrednosti linearno padejo na porušno vrednost τ_f . Takrat beton popusti, izvleku armaturne palice kljubuje le še trenje med palico in betonom.

Grafikon 1: Računski model spreminjanja sprijemne napetosti v odvisnosti od zdrsa [FIB Model Code 2010]



$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha, & 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau_{max}, & s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_{max}(\tau_{max} - \tau_f) \frac{(s - s_2)}{(s_3 - s_2)}, & s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau_f, & s_3 < s \end{cases}$$

Preglednica 1: Parametri, ki definirajo računski model sprejemnosti po FIB Model Code 2010

| | Dobri sprejemni pogoji | Slabi sprejemni pogoji |
|---------------|-------------------------------|-------------------------------|
| τ_{\max} | $2,5\sqrt{f_{ck}^*}$ | $1,25\sqrt{f_{ck}}$ |
| s_1 | 1,0 mm | 1,8 mm |
| s_2 | 2,0 mm | 3,6 mm |
| s_3 | C_{clear}^\dagger | C_{clear} |
| α | 0,4 | 0,4 |
| τ_f | $0,40\tau_{\max}$ | $0,40\tau_{\max}$ |

3.2 »Pull-out« oziroma izvlečni test

3.2.1 Določila po standardu SIST EN 10080:2005

3.2.1.1 Splošno

»Pull-out« oziroma izvlečni test je metoda določanja sprejemnih karakteristik med armaturo in okoliškim betonom. Osnovni princip testa temelji na nateznem obremenjevanju armaturne palice, ki je objeta v betonsko kocko. Med preizkusom želimo palico izvleči iz kocke. Pri tem se meri natezna sila ter pomik, ki se vrši med betonom in palico. Test se izvaja vse do porušitve.

Standard predpisuje obliko in tehnične lastnosti preizkušanca. Preizkušanec mora biti kocka, ki jo skozi središče prebada armaturna palica. Po SIST EN 10080:2005 je potrebno zagotoviti efektivno dolžino objetja z betonom v velikosti petkratnika premera palice. Zahtevano je, da palica na obeh straneh gleda ven iz preizkušanca. Na eni strani mora biti palica daljša, kar omogoča ustrezno vpetje v natezni aparat. Na daljšem koncu se meri sila, na krajšem pa zdrs armaturne palice.

3.2.1.2 Oprema za testiranje

Določila standarda SIST EN 10080:2005 se nanašajo tudi na opremo, ki se jo uporablja pri izvedbi preizkusa. Vlečenje armaturne palice iz objete betonske kocke poteka s trgalnim aparatom, ki mora omogočati zvezno naraščanje sile oziroma obremenitve na palico, pri čemer je potrebno poskrbeti, da nanos sile poteka pravokotno na površino kocke.

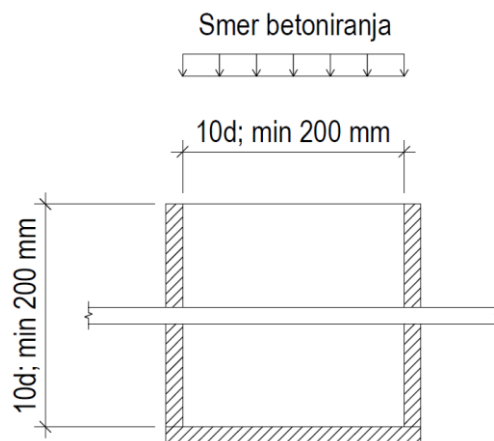
* f_{ck} je karakteristična tlačna trdnost betona v MPa

† C_{clear} je čista širina med palicami

Merilna naprava za merjenje sile naj ima možnost merjenja sile z natančnostjo vsaj 1 % maksimalne sile, ki se bo nanese na palico med testom. Merilec pomikov, ki je vpet na krajši konec palice, naj ima natančnost $\pm 0,01$ mm.

3.2.1.3 Kalup

Standard SIST EN 10080:2005 kalupu za izdelavo preizkušancev namenja člen, kjer navaja dve bistveni zahtevi. Kalup mora z dvema luknjama v kalupu omogočati armaturni palici prebadanje kocke ter mora omogočati betoniranje v smeri prečno na armaturno palico.

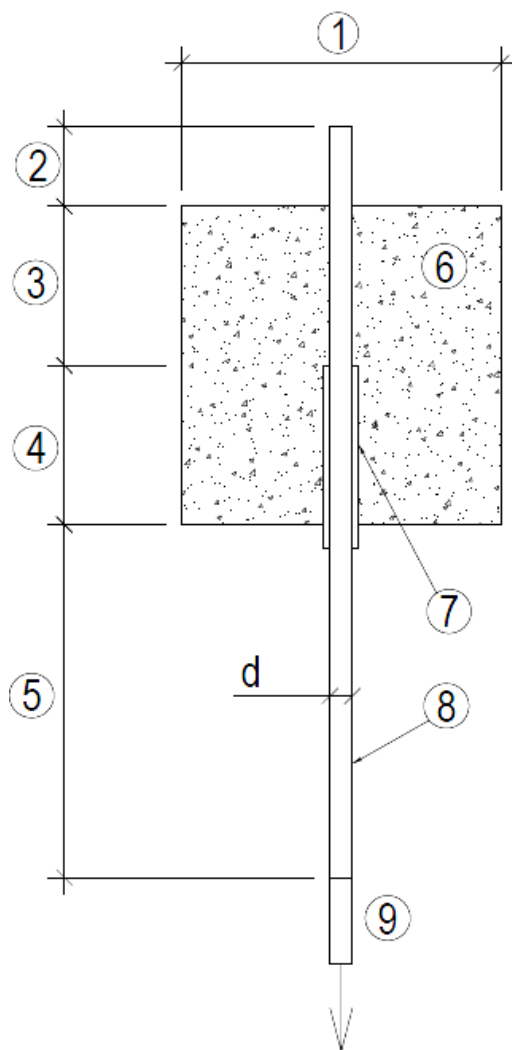


Slika 4: Zahtevane dimenzije kalupa in položaj palice

3.2.1.4 Preizkušane

SIST EN 10080:2005 standardizira dimenzije preizkušanca za izvlečni test. Dimenzije so odvisne od premera armaturne palice, pri čemer navede tudi minimalne dovoljene mere. Spodnje številčenje v povezavi s sliko 5 na naslednji strani opisuje določila iz standarda.

1. Širina preizkušanca.
 $10d$ oziroma minimalno 200 mm
2. Razdalja med zgornjim robom kocke in prostim koncem palice. Na prostem koncu palice se meri pomik.
 50 mm
3. Območje sprijemnosti med armaturo in betonom.
 $5d$
4. Območje preprečene sprijemnosti.
 $5d$ oziroma minimalno $200-5d$
5. Razdalja med spodnjim robom kocke in vpetjem v trgalni stroj .
 300 mm
6. Beton
7. Ovoj, ki preprečuje sprijemnost.
8. Armaturna palica Φd .
9. Vpetje v trgalni stroj.



Slika 5: Shema preizkušanca

4 EKSPERIMENTALNI DEL

4.1 Načrtovanje raziskav

Eksperimentalni del diplomske naloge je ključnega pomena za potrditev domneve o boljših sprejemnostnih karakteristikah med armaturno palico in betonom pri betonih visoke trdnosti in vlaknastih betonih. Recepture betonov, ki smo jih uporabili pri raziskavi, temeljijo na recepturah iz doktorske disertacije Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti dr. Draga Sajeta iz leta 2001.

Za namen raziskovalnega dela smo pripravili tri mešanice betona: mešanico običajnega betona, betona visoke trdnosti in visoko trdnega vlaknastega betona. Z betonom normalne trdnosti smo preverili navedbe v standardu Evrokod glede sprejemnih napetosti, hkrati je bil uporabljen za primerjavo z rezultati ostalih dveh betonov. Obe mešanici izhajata iz mešanice običajnega betona. Zrnovostno strukturo agregata smo pri vseh treh mešanicah ohranjali enako. Za doseganje višje trdnosti smo zmanjšali vodocementno razmerje, pri čemer so se lastnosti veziva izboljšale. Za izboljšanje konsistence svežega betona smo dodali superplastifikator. Poleg tega smo del cementa nadomestili z mikrosiliko, ki z ugodnim vplivom na proces hidratacije in z zmanjševanjem por še dodatno povečuje trdnost betona.

Receptura visoko trdnega vlaknastega betona je identična betonu visoke trdnosti, le da je obogaten z jeklenimi vlakni. Vlakna mikroarmirajo beton, kar je še posebej pomembno v okolici reber palice. Pred preizkusom smo predvidevali, da bi takšno izboljšanje betona moralo še dodatno prispevati k povečanju sprejemnosti, saj bi se napetosti po nastanku razpok v območju betonskih žepkov ob rebrih palice lahko prerazporedile preko vlaken v nerazpokan beton

4.2 Uporabljeni materiali

4.2.1 Agregat

Pri vseh treh betonskih mešanicah smo uporabili enako zrnovostno sestavo agregata. Sestavljen je iz drobljenih pranih frakcij 0/4, 4/8, 8/16, ki izhajajo iz kamnoloma Ušenišče, separirani pa je bil v separaciji Kresnice. Splošno gledano gre za svetlo siv apnenec, ki ga prepredajo deloma z glinenim materialom in deloma s prekristaliziranim kalcitom zapolnjene razpoke. Mikroskopsko gledano kamnino sestavlja mikrit z žilicami zapolnjenimi s prej naštetima materialoma.

Poleg frakcij iz separacije Kresnice smo uporabili tudi mivko Termit iz Moravč, ki predstavlja frakcijo 0/2. Mivko sestavljajo rjavkasto-sivka zrnca kremenčaste mineralne strukture s premerom nad 0,09 mm in nizkim deležem zrn velikosti nad 0,4 mm.

Vlažnost agregata znatno vpliva na vodocementno razmerje betona in s tem na trdnost betona, zato je potrebno uporabljenemu agregatu ustrezno znižati vlažnost. Ustrezno

vlažnost mivke s sušenjem med proizvodnjo in pakiranjem v zrakotesne vreče zagotavlja proizvajalec. Agregat iz separacije pa smo sušili sami, in sicer v toplem prostoru z nizko relativno vlažnostjo.

Preglednica 2: Zrnavostna sestava agregata

| Frakcija | Delež [%] |
|-------------|-----------|
| Mivka (0/2) | 15 |
| 0/4 | 45 |
| 4/8 | 15 |
| 8/16 | 25 |

4.2.2 Cement

Pri vseh mešanicah smo uporabili specialni cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R iz cementarne Salonit Anhovo. Gre za hitro vezoč cement s povprečno zgodnjo trdnostjo 29 MPa in povprečno standardno trdnostjo 57 MPa. Vsebuje najmanj 80 % portlandskega klinkerja, 12–20 % mešanega dodatka apnenca (LL) in žindre (S), maksimalno 5 % dodatkov v obliki polnil ter sadro za regulacijo vezanja.

4.2.3 Mineralni in kemijski dodatki

Visoke trdnostne karakteristike betona lažje dosežemo z uporabo ustreznih mineralnih dodatkov. V mešanicah HSC-1600 in HSC-1600-JV-1% smo uporabili Antikorodin proizvajalca TKK Srpenica . Vsebuje dva bistvena dodatka v suhi obliki, ki sta v uporabi pri izdelavi betonov visoke trdnosti, superplastifikator (sulfonirani naftalen – formaldehid kondenzat) in mikrosiliko (kompaktiran amorfni SiO₂).

4.2.4 Vlakna

Pri betonski mešanici HSC-1600-JV-1% smo uporabili jeklena vlakna JV[®] 50/30 dolžine 30 mm in premera 0,5 mm. Vlakna so značilne podolgovate oblike z zakrivljenima koncema, ki pripomoreta k boljši zasidranosti v cementni kamen.

4.2.5 Armatura

Pri vseh preizkušancih za izvlečni test smo uporabili enake armaturne palice kvalitete S500 dolžine 1 m in premera 12 mm. Palice imajo dve rebri, ki potekata vzporedno vzdolž palice. Prečna rebra so na eni strani vzporedna, na nasprotni strani palice pa nevzporedna.



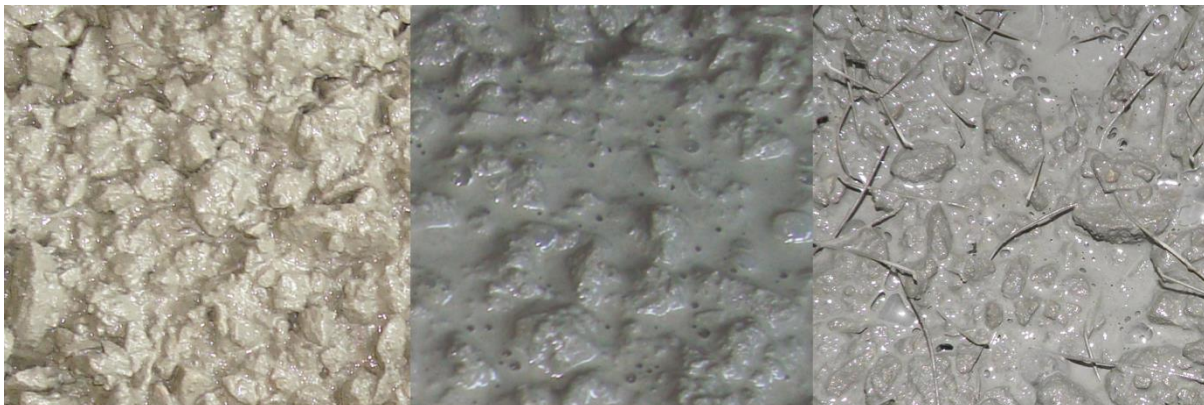
Slika 6: Relief uporabljene armaturne palice

4.3 Sestava betonske mešanice

Pripravili smo tri betonske mešanice, ki se med seboj razlikujejo le v bistvenih sestavinah. NC-1630 je beton normalne trdnosti, medtem ko sta HSC-1600 in HSC-1600-JV-1% betona visoke trdnosti. Pri obeh smo dodali 10 % mikrosilike in zmanjšali vodocementno razmerje, zadnji pa vsebuje še 1 % vlaken glede na prostornino betona.

Preglednica 3: Sestava betonskih mešanic

| | | NC-1630 | HSC-1600 | HSC-1600-JV-1% |
|---|--------------------------|---------|----------|----------------|
| Agregat [kg/m ³] | 0/2 (mivka) | 264 | 285 | 281 |
| | 0/4 | 790 | 853 | 841 |
| | 4/8 | 263 | 284 | 280 |
| | 8/16 | 439 | 474 | 467 |
| Cement [kg/m ³] | CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R | 400 | 360 | 360 |
| Dodatki | Mikrosilika [%] | 0 | 10 | 10 |
| | Jeklana vlakna [%] | 0 | 0 | 1 |
| Vodocementno razmerje | | 0,52 | 0,40 | 0,40 |
| Prostorninska masa [kg/m ³] | | 2364 | 2449 | 2500 |
| Vsebnost zraka [%] | | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| Posed [cm] | | 15-18 | 15-18 | 15-18 |



Slika 7: Sveže betonske mešanice iz leve proti desni: običajen beton, beton visoke trdnosti, visoko trden vlaknasti beton

4.4 Načrtovanje in izdelava kalupa

V laboratoriju na fakulteti se takšne raziskave še niso izvajale, zato je bilo potrebno najprej izdelati kalup, s katerim se je izvedlo betoniranje preizkušancev. Klasičnih kalupov za izdelavo betonskih kock ni bilo možno uporabiti, saj standard zahteva, da armaturna palica prebada kocko. Tega obstoječi kalupi niso omogočali.

Izhajali smo iz možnost izdelave več kock naenkrat, kar bi skrajšalo ter poenostavilo postopek betoniranja. Kalup mora biti tudi enostaven in trajen, kar bi omogočalo ponovno uporabo za raziskave v prihodnosti.

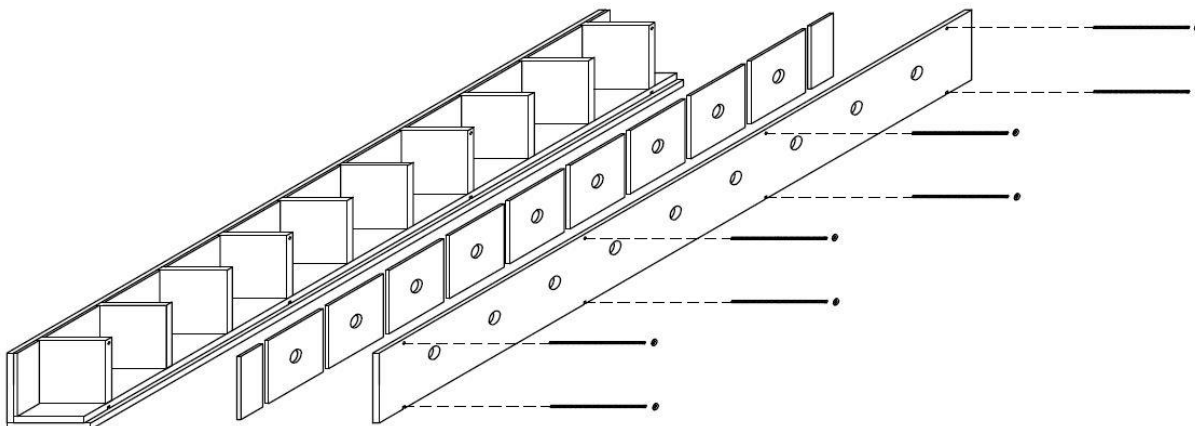
Osnovna ideja je bila izdelati kalup iz treh dolgih desk, s katerimi bi ustvarili podolgovat "žleb". V takšen žleb bi se vgradile prečne ploščice, ki bi omogočale izdelavo kock. Rešitev smo z mentorjem in profesorjem Jožetom Lopatičem razvijali naprej in prišli do naslednje rešitve. Celoten sistem sloni na dveh osnovnih deskah. Ena je temeljna, skozi drugo pa na štirih mestih potekajo navojne palice, ki skrbijo za povezanost obeh vzdolžnih sten. Navojne palice so nameščene tudi vzdolž zgornjega robu vzdolžnih sten. Na obeh stenah so pritrjene bočne ploščice, ki omogočajo boljše tesnjenje. Vsi bočni elementi so navrtani na mestih, kjer bodo nameščene armaturne palice. Premer lukenj meri 40 mm.

Uporabljen material za komponente kalupa je vezana plošča debeline 21 mm. Bočne naluknjane ploščice pa so iz 12-milimetrskih vezanih plošč. Izmed treh variant materialov OSB, opažna plošča ter vezana plošča, je bila izbrana slednja. Površina vezane plošče je zavarovana s plastjo umetne mase, ki varuje les pred negativnimi vplivi vode. Ta lastnost je pri kalupu odločilna, saj je s tem zagotovljena trajnost lesa in možnost večkratne uporabe. Nezaželeno je tudi vpiranje vode, ki vpliva na zmanjševanje vodocementnega razmerja betona, ki je neposredno povezano s trdnostnimi karakteristikami betona. Poleg naštetega pa material ne sme reagirati s cementom, kar bi lahko povzročilo motnje v procesu hidratacije.



Slika 8: Vezana plošča

Sama izdelava kalupa je potekala v več fazah. Vezane plošče so bile kupljene pri podjetju Moj hobi trgovina in proizvodnja d.o.o. Za natančen razrez je poskrbel profesor Jože Lopatič. V komponente kalupa je bilo potrebno še zvrtni luknje za armaturno palico in pritrdilne vijake. Vrtanje pa je bilo zaradi pomanjkanja orodja ustrezne natančnosti zaupano profesorju Antonu Hrastarju iz Srednje lesarske šole v Novem mestu. Sledila je še zaščita občutljivih površin vezane plošče z impregnacijskim premazom in zaščitno barvo. Kalup je bil s tem pripravljen za prve preizkušance.



Slika 9: 3D model kalupa

4.5 Delo v laboratoriju

4.5.1 Izdelava preizkušancev

Za vsak tip betona smo izdelali po tri preizkušance za izvlečni test in po tri kontrolne preizkušance za preizkus tlačne trdnosti. Za slednje smo uporabili obstoječe jeklene kalupe dimenzij 15x15x15 cm, ki smo jih pred vgradnjo betona premazali z oljem. Več pozornosti je potreboval kalup za preizkušance izvlečnega testa. Tukaj je bila pomembna pozicija armaturne palice v kalupu, ki je morala biti v skladu s standardom SIST EN 10080:2005. Natančen opis je na strani 12 pod poglavjem 3.2.1.4. Sprijemnost med armaturo in betonom je preprečena na dolžini 14 cm oziroma $20 \cdot 5 \cdot d$, kjer je d premer palice (SIST EN

10080:2005). Na tem mestu smo na armaturno palico namestili gumijasto cevko, pri čemer smo za tesnitev cevke uporabili steklarski kit. Notranjost kalupa smo premazali z oljem. Kalupi so bili s tem pripravljeni in lahko je sledilo mešanje betona.



Slika 10: Levo pripravljen kalup, desno položaj plastične cevke na armaturi

Na sveži betonski mešanici smo opravili preskuse po standardu SIST EN 12350, in sicer preskus konsistence po metodi z razlezom ter metodi s posedkom in določitev prostorninske mase svežega betona in vsebnost zraka. Na koncu smo beton s pomočjo vibracijske igle vgradili v pripravljene kalupe in prekrili s PE folijo. Preizkušance smo po enem dnevu razkalupili in jih 28 dni negovali v vodni kopeli pri sobni temperaturi, s čimer smo zagotovili 100 % vlažnost.



Slika 11: Negovanje preizkušancev

4.5.2 Lastnosti svežega betona

Preglednica 4: Projektirane in dobljene lastnosti svežega betona

| | | NC-1630/1 | HSC-1600/1 | HSC-1600-JV-1%/1 |
|---|--------------|-----------|------------|------------------|
| Posed [cm] | Projektirano | 15-18 | 15-18 | 15-18 |
| | Dobljeno | 15 | 21 | 1,5 |
| Razlez [cm] | Dobljeno | 47 | 60 | 39 |
| Vsebnost zraka [%] | Projektirano | 1,3 | 1,6 | 1,6 |
| | Dobljeno | 2,0 | 2,7 | 2,0 |
| Prostorninska masa [kg/m ³] | Projektirano | 2364 | 2449 | 2500 |
| | Dobljeno | 2342 | 2454 | 2517 |
| Temperatura [°C] | Betona | 24,2 | 25,2 | 27 |
| | Prostora | 26,0 | 25,7 | 25,6 |

Preglednica 4 prikazuje primerjavo med izmerjenimi in projektiranimi lastnostmi sveže betonske mešanice. Razvidno je, da nismo dosegli želene vsebnosti zraka. Le-ta je malenkost večja od projektirane. Od vseh podatkov najbolj odstopa posed vlaknastega betona, ki meri le 1,5 cm. Majhna vrednost poseda se odraža v gostem svežem betonu, ki vpliva na zmanjšanje obdelovalnosti in vgradljivosti. Razlog za takšno obnašanje tiči v vlaknih, saj te vežejo betonsko mešanico in kljubujejo silam, ki težijo k preoblikovanju. Vlakna so povzročila neodzivnost betona na vibriranje, zato smo imeli nemalo preglavic z vgrajevanjem v kalupe.

4.5.3 Tlačna trdnost betona

Tlačno trdnost betona smo določili na 28 dni starih kockah z robom 15 cm. Za vsako mešanico smo imeli pripravljene tri kocke. Preizkus je potekal v hidravlični tlačni preši s kapaciteto 5000 kN. Vrednosti tlačne sile pri porušitvi smo odčitali iz analognega merilca. Trdnost posameznega preizkušanca je definirana kot razmerje med tlačno silo in površino vodoravnega prereza preizkušanca, ki smo jo natančno izmerili pred tlačnim preizkusom. Za vsako vrsto betona smo dobili tri vrednosti tlačne trdnosti. Po sestavi enake betonske mešanice so bile preizkušene že v doktorski dizertaciji dr. Draga Sajeta, zato smo lahko nove in stare podatke med seboj primerjali. Ugotovili smo, da se vrednosti ujemajo. V preglednici 5 je prikazana karakteristična tlačna trdnost $f_{ck,cube}$, ki je določena na podlagi ocenjene povprečne trdnosti, standardne deviacije in Studentovega koeficienta porazdelitve pri 5 % fraktili.

Preglednica 5: Povprečna tlačna trdnost betonskih kock z robom 15 cm po 28 dneh, standardna deviacija in karakteristična tlačna trdnost

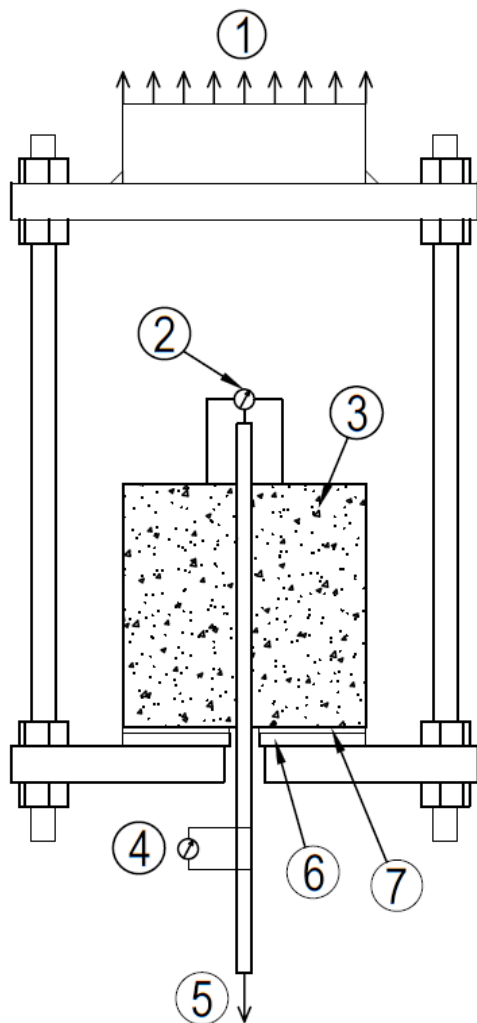
| | Povprečna tlačna trdnost po 28 dneh [MPa] | Standardna deviacija [MPa] | Število preizkušancev | Karakteristična tlačna trdnost $f_{ck,cube}$ [MPa] |
|-----------------------|---|----------------------------|-----------------------|--|
| NC-1630 | 48,6 | 2,1 | 15 | 44,8 |
| HSC-1600 | 81,2 | 3,0 | 11 | 75,9 |
| HSC-1600-JV-1% | 89,0 | 4,0 | 3 | 79,6 |



Slika 12: Na levi: porušitev vlaknastega betona; na desni: porušitev betona visoke trdnosti

4.5.4 Izvlečni test

Izvlečne preizkuse smo izvedli s hidravličnim strojem Instron, pri čemer smo se opirali na standard SIST EN 10080:2005. Slika 13 prikazuje shemo izvlečnega testa. Preizkušanec (3) stoji na gumijasti podlagi (6) in jekleni ploščici (7). Armatura palica je vpeta v spodnjo čeljust (5) nateznega aparata. V zgornjo čeljust (1) pa je vpeta nosilna konstrukcija preizkušanca. Spodnja in zgornja plošča sta povezani s štirimi navojnimi palicami. Na zgornjem koncu palice smo z merilno urico (2) merili zdrs palice glede na zgornjo ploskev preizkušanca. Na armaturno palico smo namestili ekstenziometer (4), ki je meril deformacijo palice. Trgalni aparat je bil pred pričetkom posameznega izvlečnega testa nastavljen tako, da je spodnji bat, v katerega je bila vpeta palica, imel hoda 13 mm. Poizkus se začel z enakomernim spuščanjem spodnjega bata, s čimer smo natezno obremenjevali palico. Test se je izvajal vse do porušitve.



Slika 13: Shema izvlečnega testa



Slika 14: Izvedba izvlečnega testa

4.6 Rezultati raziskave

Sledi prikaz in analiza podatkov dobljenih med izvlečnimi testi. S pomočjo trgalnega aparata smo dobili vrednosti sile na poteznem koncu vpete armaturne palice v povezavi z merilno urico in ekstenziometrom. Silo je bilo potrebno pri primerjavi z zdrsom pretvoriti v sprijemno napetost, medtem ko je pri primerjavi z deformacijo palice bolj primerna normalna napetost v palici. Izmerjena sila F je razpršena po sprijemni površini med palico in betonom, kar nakazuje enačba:

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi\phi \cdot 5\phi} = \frac{F}{5\pi\phi^2},$$

kjer je S sprijemna površina, ki je enaka zmnožku obsega palice ($\pi \cdot \phi$) in sidrni dolžini ($5 \cdot \phi$).

Napetost v palic pa je enaka:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{\pi\phi^2}{4}},$$

kjer A predstavlja prečni prerez palice.

Za vsako vrsto betona sem dobil odnos med sprijemno napetostjo in zdrsom. Potek krivulj in vrednosti sem primerjal s podatki iz modelnega predpisa Model Code 2010 in standarda Evrokod 2. Da bi bila primerjava z Evrokodom čim bolj smiselna, smo dobljene rezultate ustrezno uredili, za kar smo se poslužili orodij statistike. Evrokod navaja mejno sprijemno napetost. Gre za projektno vrednost, zato je potrebno naše vrednosti pretvoriti najprej v karakteristične in iz teh v projektne. Karakteristična je definirana s pomočjo standardne deviacije S_n in Studentovega porazdelitvenega koeficienta t_n , ki je določen za podlagi 5 % fraktile. Njun zmnožek se odšteje od ocene povprečja maksimalnih sprijemnih napetosti:

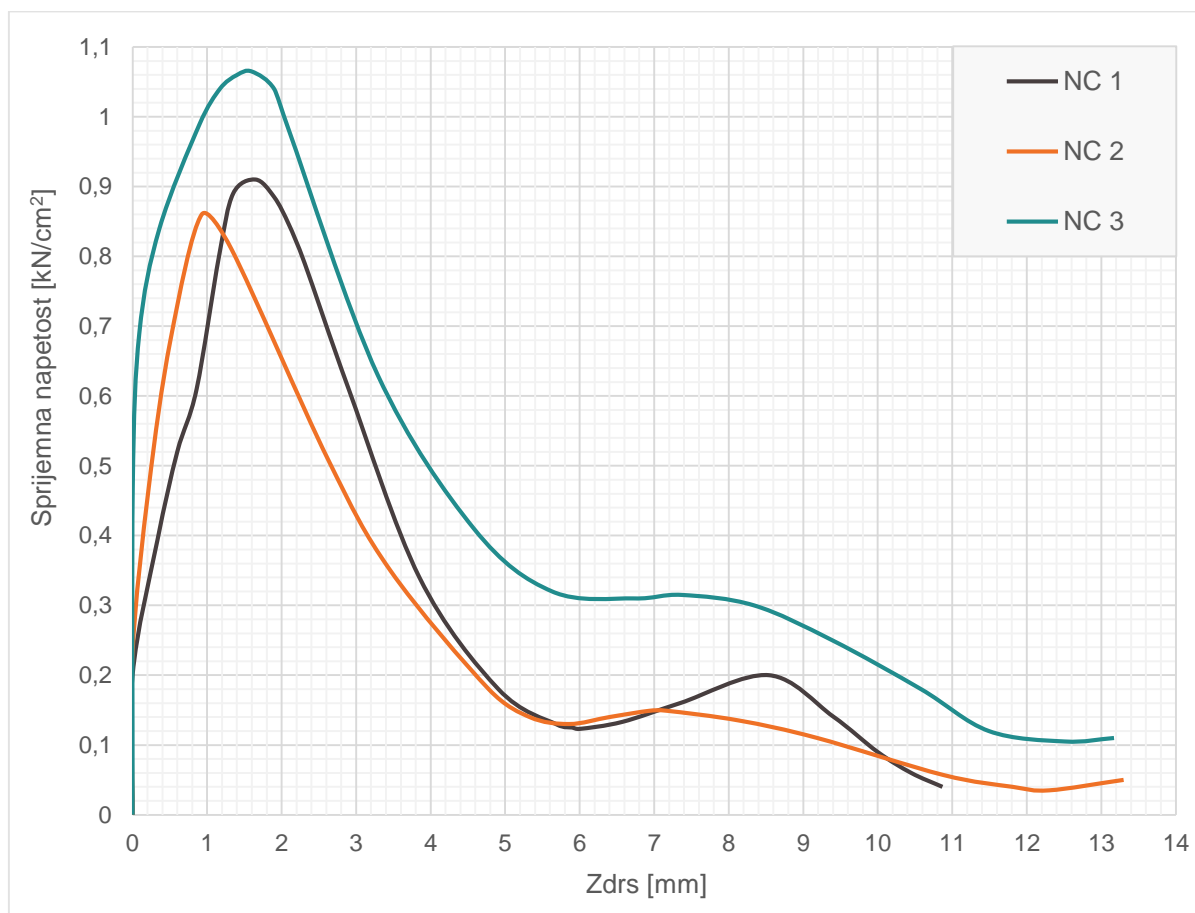
$$\tau_k = \tau_{\text{povprečje,ocena}} - t_n * S_n$$

Projektno sprijemno napetost smo določili s pomočjo materialnega varnostnega faktorja γ_m , ki je za beton enak 1,5:

$$\tau_d = \frac{\tau_k}{\gamma_m}$$

4.6.1 Beton normalne trdnosti

Grafikon 2: Potek sprijemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz betona normalne trdnosti



V grafikonu 2 so umeščeni rezultati preizkušancev iz betona normalne trdnosti. Krivulje napetosti v odvisnosti od zdrs opisujejo za izvlečni test značilen potek. Primerka 1 in 2 se do sprijemne napetosti $0,2 \text{ kN/cm}^2$ ne odzivata na izvlek, številka 3 pa vztraja do vrednosti $0,55 \text{ kN/cm}^2$. V tem obdobju zgornji konec palice miruje. Med betonom in palico vlada adhezija oziroma zlepljenost. Po prvem zdrs se v betonu pojavijo prve razpoke, rebra palice se začnejo zaklinjati v beton. Napetosti rastejo različno pri različnih preizkušancih. Številka 3 območje do maksimuma opiše s krivuljo, medtem ko 1 narašča dokaj linearno, 2 pa z zlomljeno premico. Sprijemne napetosti na maksimumu ne vztrajajo dolgo, saj se kmalu trend obrne navzdol. Beton ob rebrih se takrat prične drobiti. Padec napetosti se pri vseh treh primerkih ustavi pri zdrs 6 mm. Palica se spet ujame z betonom, kar je še posebej vidno pri številki 1. Napetosti za kratek čas rastejo, nakar sledi ponoven padec, ki se na koncu stabilizira v konstanten potek. Sili izvleka nasprotuje le še trenje med palico in betonom.

V preglednici 6 so razvrščeni podatki o največji sprijemni napetosti preizkušancev iz betona normalne trdnosti. Rezultati kažejo, da povprečje maksimalnih sprijemnih napetosti meri $0,95 \text{ kN/cm}^2$, medtem ko projektna vrednost zaradi velikega raztrosa in materialnega varnostnega faktorja za beton meri le še $0,46 \text{ kN/cm}^2$. V primerjavi z Evrokodom 2, kjer je vrednost mejne sprijemne napetosti za dobre sprijemne pogoje in našemu betonu primerljiv beton C35/45 postavljena pri $0,33 \text{ kN/cm}^2$, smo dosegli za 40 % večjo sprijemno napetost.

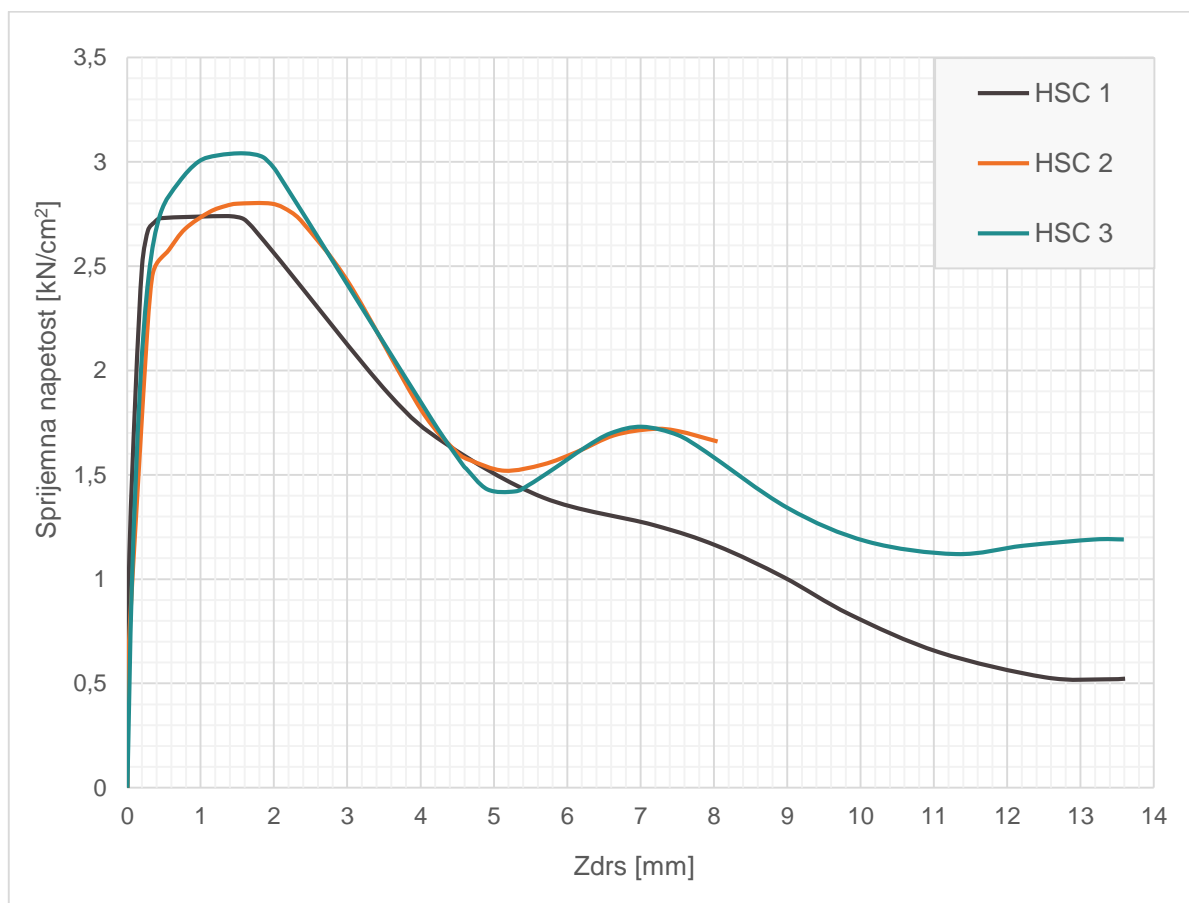
Preglednica 6: Maksimalne sprijemne napetosti, povprečje in standardna deviacija pri preizkušancih iz betona normalne trdnosti

| # | Maksimalna sprijemna napetost [kN/cm ²] | Povprečje [kN/cm ²] | Standardna deviacija [kN/cm ²] | Karakteristična sprijemna napetost [kN/cm ²] | Projektna sprijemna napetost [kN/cm ²] |
|---|---|---------------------------------|--|--|--|
| 1 | 0,91 | 0,95 | 0,11 | 0,69 | 0,46 |
| 2 | 0,86 | | | | |
| 3 | 1,07 | | | | |

4.6.2 Beton visoke trdnosti

Grafikon 3 prikazuje potek sprijemnih napetosti glede na zdrs med izvlečnim testom za preizkušance iz betona visoke trdnosti. Pri vseh treh na začetku vidimo naraščanje napetosti, medtem ko prosti konec palice miruje. Strmo naraščanje se nadaljuje tudi po prvih pomikih. Prehod iz vzpona do platoja pri maksimalni vrednosti je drugačen pri različnih preizkušancih. Pri številki ena diagram hitro preide iz strme premice v konstanten potek in tam vztraja, medtem ko se vrši zdrs. Številki 2 in 3 bolj postopno stečeta v vrh. Vsi trije primerki na maksimalni vrednosti vztrajajo dolgo, takšno duktilno obnašanje je neobičajno za betone visoke trdnosti. Razlog in pojasnitev takšnega rezultata je ob grafikonu 4 na straneh 27 in 28. Padeč napetosti primerkov 2 in 3 je linearen in se pri zdrs 5 mm zaustavi. Ponovno se aktivira mehanizem sprijemnosti med palico in betonom. Krivulji opišeta še drugi maksimum z vrhom pri zdrs 7 mm in vrednostjo približno $0,4\tau_{max}$. Pri preizkušancu številka 2 smo prevzeli premalo hoda trgalnega aparata, zato se krivulja konča že pri zdrs 8 mm. Številka 3 steče v konstanten potek. Pri primerku 1 se trend padanja napetosti vmes ne ustavi, ampak se nadaljuje do zdrs 13 mm, kjer se ustali pri napetosti $0,5 \text{ kN/cm}^2$.

Grafikon 3: Potek sprijemnih napetosti v odvisnosti od zdrs za preizkušance iz betona visoke trdnosti



Preglednica 7 prikazuje maksimalne sprejemne napetosti. Preizkušanci iz betona visoke trdnosti so v povprečju dosegli 2,86 kN/cm² sprejemne napetosti. V primerjavi z običajnim betonom je vrednost trikrat večja. Naš beton visoke trdnosti lahko primerjamo z betonom C60/75, za katerega Evrokod 2 postavlja vrednost mejne sprejemne napetosti pri 0,47 kN/cm², kar je v primerjavi z našo izračunano projektno sprejemno napetostjo 1,67 kN/cm² več kot trikrat manj.

Preglednica 7: Maksimalne sprejemne napetosti, povprečje in standardna deviacija pri preizkušancih iz betona visoke trdnosti

| # | Maksimalna sprejemna napetost [kN/cm ²] | Povprečje [kN/cm ²] | Standardna deviacija [kN/cm ²] | Karakteristična sprejemna napetost [kN/cm ²] | Projektna sprejemna napetost [kN/cm ²] |
|---|---|---------------------------------|--|--|--|
| 1 | 3,04 | 2,86 | 0,16 | 2,50 | 1,67 |
| 2 | 2,80 | | | | |
| 3 | 2,75 | | | | |

Kaj točno se je dogajalo s preizkušanci iz betona visoke trdnosti in zakaj so tako dolgo vztrajali na maksimalni vrednosti, dobro ponazori grafikon 4. Ko je sprejemna napetost dosegla okoli 2,50 kN/cm², so se začele pojavljati večje deformacije. Takrat je bila sila na poteznem koncu 56,5 kN.

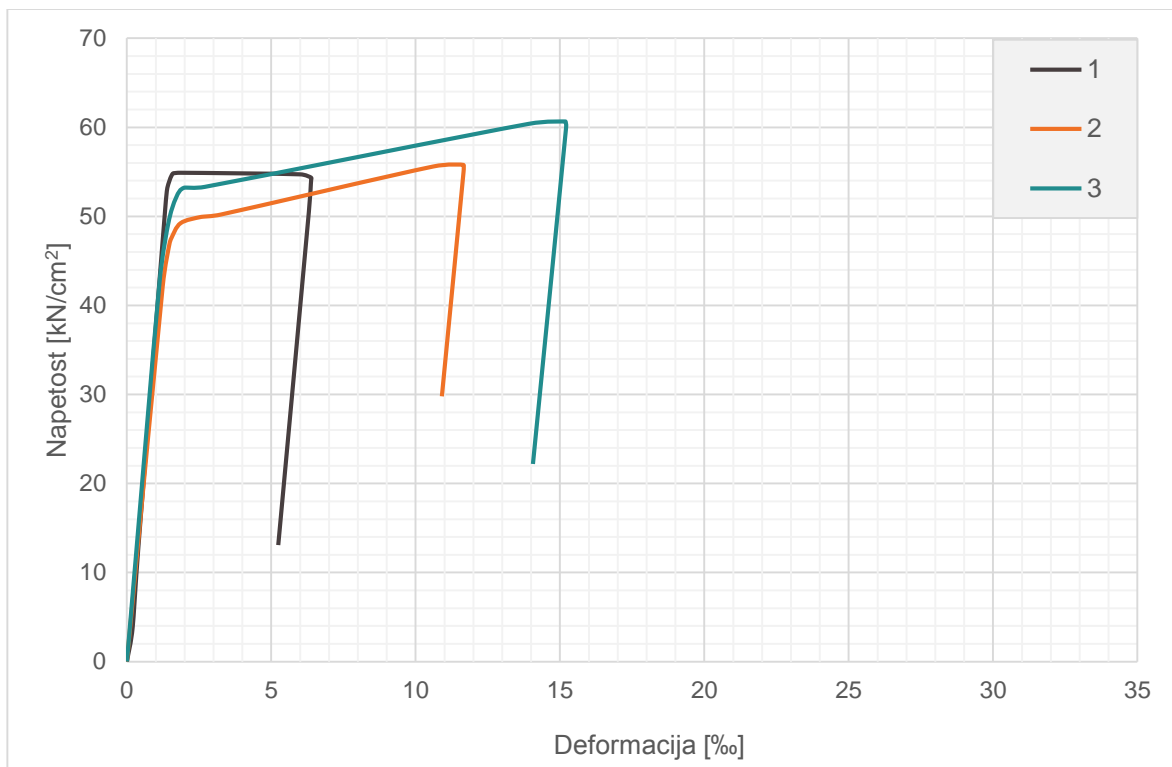
$$F = \tau * S = 2,50 \text{ kN/cm}^2 * 22,6 \text{ cm}^2 = 56,5 \text{ kN},$$

kjer je S površina plašča palice na kateri je zagotovljena sprejemnost. Pri sili 56,5 kN se v jekleni armaturni palici ravno pojavijo napetosti, ki povzročajo prehod iz elastičnega v plastično obnašanje jekla:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{56,5 \text{ kN}}{1,13 \text{ cm}^2} = 50,0 \text{ kN/cm}^2$$

Po prekoračenju sprejemne napetosti 2,50 kN/cm² se je jeklo pri preizkušancu 2 začelo plastificirati. Pri drugih dveh se je plastifikacija začela kasneje. Med načrtovanjem raziskav nismo predvideli tako velike odpornosti betona na izvlek. Sila se ni mogla več povečevati s hitrostjo, ki jo je pred tem zagotavljal trgalni aparat. Pomik glave aparata se je odražal v povečanju deformacij armaturne palice. Napetosti v jeklu so po doseženi meji tečenja počasneje naraščale in tako pri primerkih številka 2 in 3 opisale s pripadajočo deformacijo tipičen diagram σ - ϵ za jeklo. Sila v palici se je večala, tako je dosegla zadostno vrednost, da so se pojavile takšne razpoke v betonu, da je sprejemnost med palico in betonom popustila.

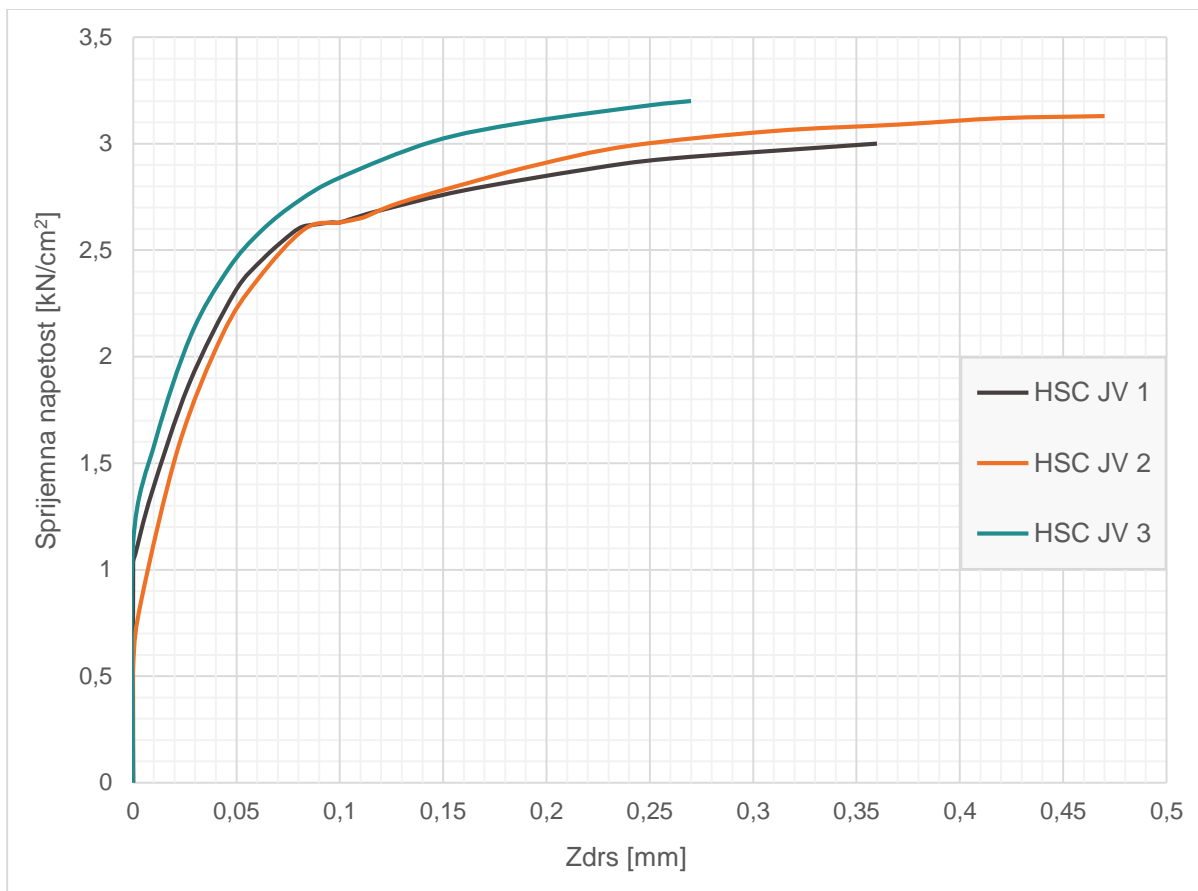
Grafikon 4: Potek napetosti v odvisnosti od deformacije merjene z ekstenziometrom na armaturni palici pri preizkušancih iz betona visoke trdnosti



4.6.3 Visoko trden vlaknast beton

Odziv preizkušancev iz visoko trdnega vlaknastega betona na izvlek palice je prikazan v grafikonu 5. Začetek preizkusa je podoben drugim dvema vrstama betona. Kljub naraščanju napetosti se zdrs na začetku ne pojavlja. Okoli sprijemne napetosti $1,0 \text{ kN/cm}^2$ se začnejo vršiti prvi zdrsi. Diagrami rastejo do vrednosti $2,5 \text{ kN/cm}^2$, kjer napetosti v palici dosežejo mejo elastičnosti. Z nadaljevanjem poizkusa se palica plastificira. Začetek plastifikacije se odraža v motnji poteka diagrama pri preizkušancih s številko 1 in 2, kjer se pri zdrsu $0,08 \text{ mm}$ naraščanje napetosti za hip ustavi, potem pa nadaljuje z manj strmim naraščanjem. Naklon diagramov se po plastifikaciji postopno zmanjšuje. Za izvlečni test značilen potek napetosti se ni razvil, saj se ves pomik bata trgalnega aparata odraža v deformaciji armaturne palice, medtem ko zgornji del palice v povprečju zdrsne le za $0,35 \text{ mm}$. Vlakna so vplivala na sprijemnost. Koliko smo pridobili napram betonu brez vlaken je težko trditi, saj preizkušanci iz visoko trdnega vlaknastega betona niso dosegli dejanske maksimalne sprijemnosti. Lahko pa trdimo, da so vlakna poskrbela za bolj togo obnašanje preizkušancev.

Grafikon 5: Potek sprijemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za preizkušance iz visoko trdnega vlaknastega betona

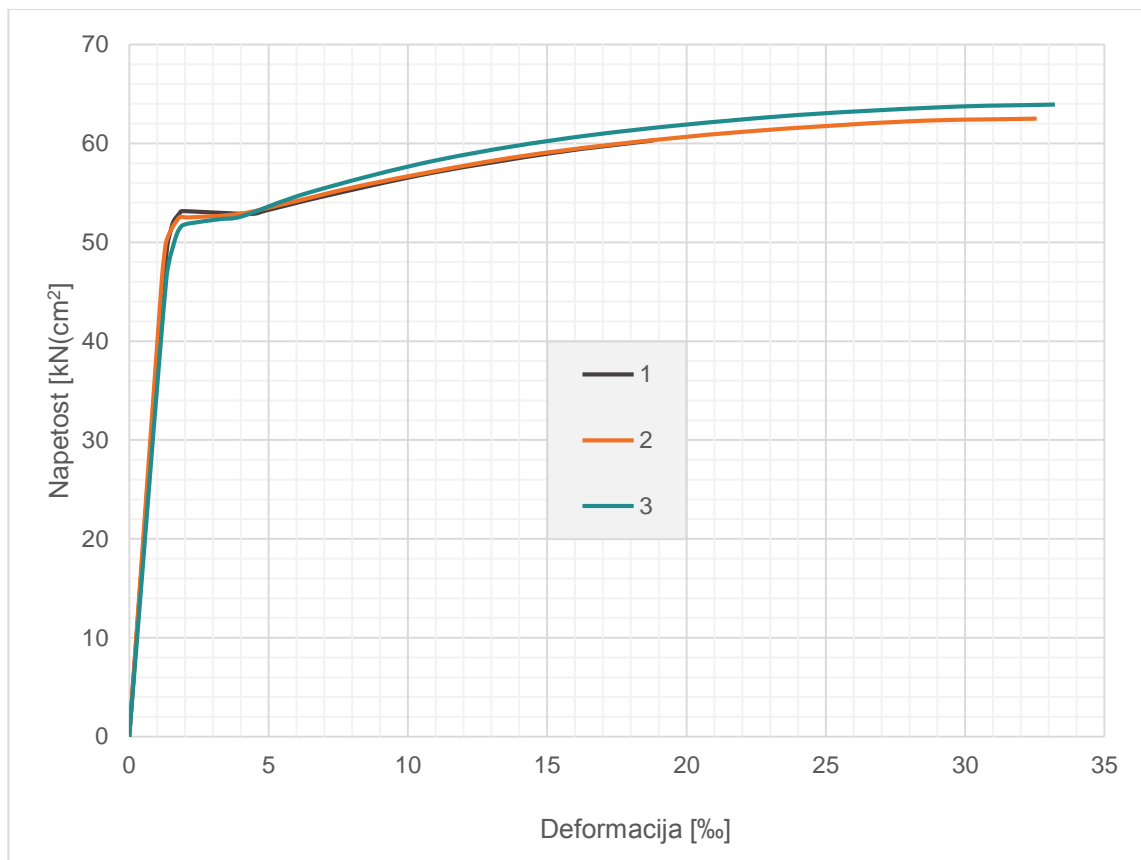


V preglednici 8 so prikazane maksimalne sprijemne napetosti, ki so jih dosegli preizkušanci iz visoko trdnega vlaknastega betona. Zaradi plastifikacije armature in dobrih sprijemnih pogojev preizkušanci niso razvili vsega svojega potenciala.

Preglednica 8: Maksimalne sprijemne napetosti, povprečje in standardna deviacija pri preizkušancih iz visoko trdnega vlaknastega betona

| # | Maksimalna sprijemna napetost [kN/cm ²] | Povprečje [kN/cm ²] | Standardna deviacija [kN/cm ²] | Karakteristična sprijemna napetost [kN/cm ²] | Projektna sprijemna napetost [kN/cm ²] |
|---|---|---------------------------------|--|--|--|
| 1 | 3,00 | 3,11 | 0,10 | 2,87 | 1,91 |
| 2 | 3,13 | | | | |
| 3 | 3,20 | | | | |

Grafikon 6: Potek napetosti v odvisnosti od deformacije merjene z ekstenziometrom na armaturni palici pri preizkušancih iz visoko trdnega vlaknastega betona

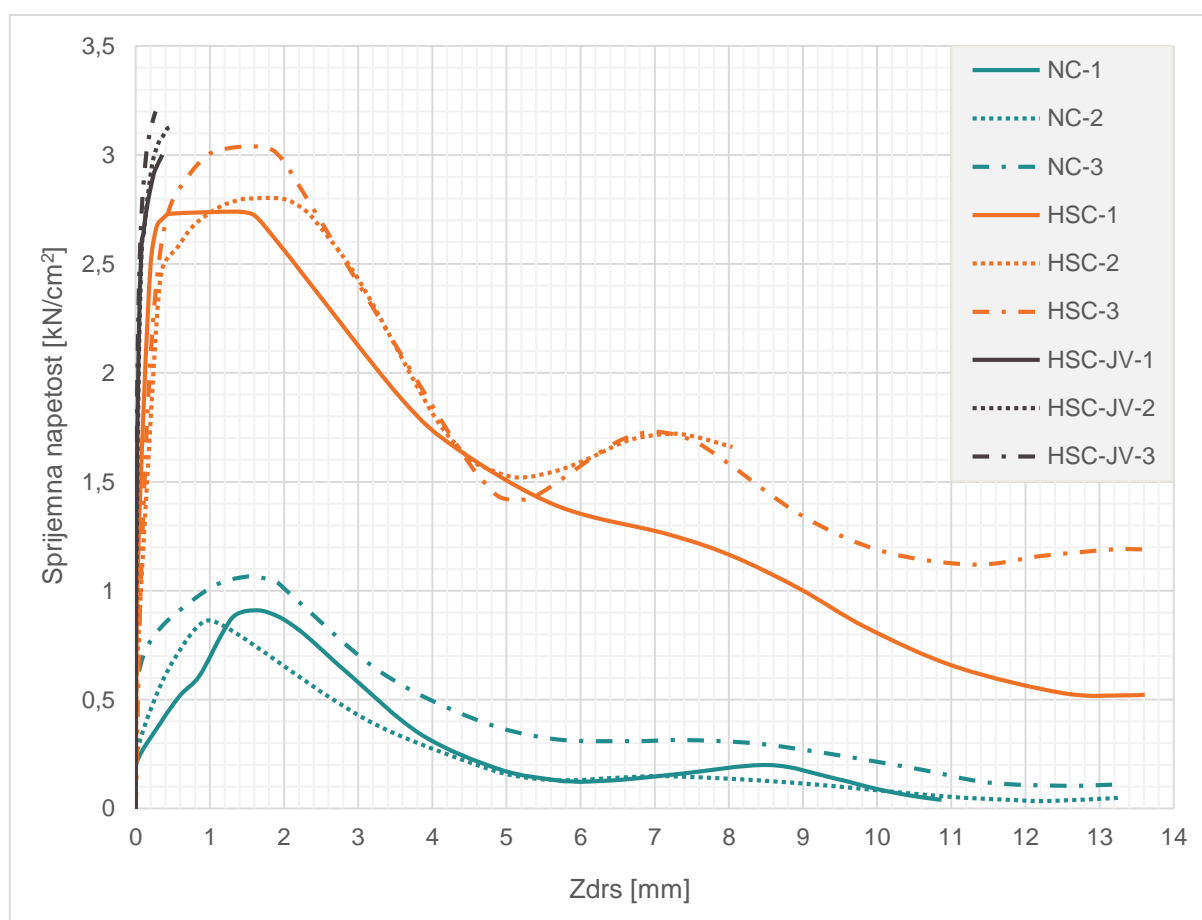


Grafikon 6 prikazuje, kaj se je med preizkusom dogajalo s palicami. Palice opišejo značilen natezni diagram σ - ϵ za jeklo. Ko so napetosti dosegle 50 kN/cm², se je material začel obnašati nelinearno. Po prekoračitvi 53 kN/cm² se pojavijo večje deformacije. Ker beton med poizkusom ni popuščal, se je skoraj celoten pomik spodnjega bata trgalnega aparata odražal v raztezanju armaturne palice. Po podatkih iz grafikona 6 so deformacije pred koncem preizkusa dosegle preko 30 %.

4.6.4 Primerjava preizkušancev iz različnih vrst betona

V grafikonu 7 so združeni diagrami vseh preizkušancev. Dobro je vidno kako velik vpliv ima vrsta betona na odziv preizkušanca med izvlekom palice. Za beton visoke trdnosti je značilno bolj togo obnašanje, kar se kaže tudi v povezavi s sprijemnostjo. Na začetku preizkusa diagrami strmo naraščajo in dosežejo velike napetosti pri majhnem zdrsu. Po začetku plastifikacije jekla se rast umiri. Preizkušanci iz betona visoke trdnosti in običajnega betona dosežejo maksimalne vrednosti sprijemne napetosti pri podobnem zdrsu, in sicer se zdrs giblje med 1 in 2 mm. Obe vrsti betona se potem, ko dosežeta vrh diagrama, obnašata podobno.

Grafikon 7: Primerjava poteka sprijemne napetosti v odvisnosti od zdrsa za različne betone



Primerjavo doseženih sprijemnih napetosti prikazuje preglednica 9. Sprijemnost pri preizkušanci iz betona visoke trdnosti, ki je imel karakteristično tlačno trdnost na kocki $f_{ck,cube}$ za faktor 1,7 večjo kot uporabljen beton normalne trdnosti, je med izvlečnim testom dosegel za faktor 3,6 večjo povprečno maksimalno sprijemno napetosti. Medtem ko sodeč po rezultatih, razlika v sprijemnosti med vlaknastim in betonom visoke trdnosti ni bila tako drastična. Ozirajoč se na dejstvo, da bi se trend naraščanja pri vlaknastih betonih kmalu končal, saj se je diagram že začel obračati, lahko ocenimo, da bi dosegel povprečno maksimalno sprijemno napetost okoli 3,30 kN/cm².

Preglednica 9: Primerjava vrednosti maksimalnih vrednosti sprijemnih napetosti za različne vrste betona

| Vrsta betona | Oznaka | $f_{ck,cube}$ [MPa] | Sprijemna napetost [kN/cm ²] | |
|-----------------------|--------|------------------------|--|-----------------|
| | | | Povprečje maksimumov | Karakteristična |
| Običajen | NC | 44,8 | 0,95 | 0,69 |
| Visoko trden | HSC | 75,9 | 2,86 | 2,50 |
| Visoko trden vlaknast | HSC-JV | 79,6 | 3,11/3,30 [‡] | 2,87 |

4.6.5 Primerjava s FIB Model Code 2010

V preglednici 10 so prikazane karakteristične vrednosti maksimalne sprijemne napetosti pri preizkušancih iz običajnega betona in betona visoke trdnosti in vrednosti, ki so za dobre sprijemne pogoje izračunane po FIB Model Code 2010. FIB pri računu sprijemnih napetosti uporablja karakteristično tlačno trdnost f_{ck} , ki je določena na valju. V naših raziskavah pa smo uporabljali preizkušance v obliki kocke, s katerimi smo lahko določili karakteristično tlačno trdnost kocke $f_{ck,cube}$, zato smo f_{ck} izračunali na podlagi ocene $f_{ck} \approx 0,8 \cdot f_{ck,cube}$. Pri običajnem betonu so vrednosti po FIB manjše, pri betonu visoke trdnosti pa večje, kot so jih izkazali naši preizkušanci. Glede na računski model sprijemnosti po FIB, ki sem ga opisal na strani 10, se ujema značilna oblika diagramov in zdrs pri maksimumu, ki ga je številka 2 dosegla pri zdrs 1 mm, 1 in 3 pa pri zdrs 1,6 mm.

Preglednica 10: Primerjava karakteristične sprijemne napetosti pri preizkušancih iz običajnega betona in betona visoke trdnosti z vrednostim iz FIB Model Code 2010

| Beton | Karakteristična sprijemna napetost [kN/cm ²] | Maksimalna sprijemna napetost po FIB [kN/cm ²] |
|--------------|--|--|
| Običajen | 0,69 | 1,50 |
| Visoko trden | 2,50 | 1,95 |

[‡] Ocena v primeru dokončno izvedenega izvlečnega testa

5 ZAKLJUČEK

Sprijemne napetosti so v standardih za betone dobro definirane, vendar so vrednosti za betone visoke trdnosti glede na običajne betone razmeroma nizke. Še slabše je s področjem vlaknastih betonov, ki je zaradi njihove manj pogoste uporabe dokaj neraziskano. Z lastnimi raziskavami smo poskušali ugotoviti, kako vrsta betona vpliva na izvlek jeklene armaturne palice premera 12 mm. Pred samimi raziskavami je bilo potrebno izdelati kalup in prilagoditi trgalni aparat na preizkušance, kar nam je vzelo glede na same raziskave neprimerno veliko časa. Sledila je izdelava preizkušancev iz treh različnih betonskih mešanic, in sicer smo izdelali običajen beton, beton visoke trdnosti in visoko trden vlaknast beton z enim procentom vlaken glede na prostornino betona. Po 28-dnevem negovanju se je beton razvil do svoje polne trdnosti. S tlačnim preizkusom smo določili tlačno trdnost pripravljenih betonov. Standardiziran izvlečni test preizkušancev z vgrajeno jekleno armaturo nam je postregel z zanimivimi rezultati:

1. Beton visoke trdnosti (HSC) s tlačno trdnostjo $f_{ck,cube}=76$ MPa je dosegel 3,5-krat večjo mejno sprijemno napetost kot običajen beton (NC) s tlačno trdnostjo $f_{ck,cube}=45$ MPa. Diagrami preizkušancev obeh vrst betonov so opisali podoben potek napetosti v odvisnosti od zdrsa.
2. Beton normalne trdnosti je v primerjavi z navedbami iz Evrokoda 2 izkazal 40 % večjo vrednost projektne sprijemne napetosti.
3. Projektna vrednost mejne sprijemne napetosti, ki je bila določena na treh preizkušancih iz betona visoke trdnosti, je bila napram vrednostim primerljivega betona po Evrokodu trikrat večja. Evrokod 2 betonom visoke trdnosti predpisuje konservativne vrednosti za mejno sprijemno napetost. Hkrati navaja, da so betoni te vrste manj duktilni in izredno krhki ter posledično bolj podvrženi hitri porušitvi. Vendar v našem primeru, pri izvlečnih testih, ni bilo tako. Rezultati naših izvlečnih testov so pokazali dober odziv betona visoke trdnosti in podobno obnašanje kot običajen beton. Potrebno pa je tudi upoštevati, da so pogoji v konstrukcijskih elementih, kjer so armaturne palice prekrite le z nekaj centimetrskim krovnim slojem, popolnoma drugačne. V takšnih primerih je merodajen drugačen porušni model, pri katerem se mikro razpoke v okolici reber razširijo do površja betona. V tem primeru je sprijemnosti manjša od porušitve, ki smo jo dosegli z našimi preizkusi.
4. Pri tako dobrih sprijemnih pogojih, kot smo jih dosegli z betonom visoke trdnosti in visoko trdnim vlaknastim betonom, je bila merodajna porušitev palice, saj je 6 cm dolga sidrna dolžina nudila večjo nosilnost kot armaturna palica. Pri visoko trdnem vlaknastem betonu se zaradi omejenega hoda preizkuševalnega bata ni razvil celoten potek diagrama $\tau(s)$ in zaradi tega nismo dosegli največje sprijemne napetosti.

5. Preizkušanci iz betona visoke trdnosti in preizkušanci iz vlaknastega betona visoke trdnosti so imeli enako sestavo, le da je bil slednjim dodan 1 % jeklenih vlaken glede na prostornino betona. S tem so se izboljšale mehanske lastnosti betona. Vlaknast beton se je bolje obnesel tudi med izvlečnim testom, kjer je izkazal veliko togost.
6. Preizkušanci iz običajnega betona so dosegli manjše, preizkušanci iz visoko trdnega betona pa večje sprijemne napetosti, kot jih navaja modelni predpis FIB Model Code 2010.

VIRI

Abrams, D. A. 1913. Tests of Bond between Concrete and Steel. Urbana, University of Illinois, Engineering Experiment Station: 238 str.

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

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

Gomes Barbosa, M. T., Sánchez Filho, S. 2013. Investigation of Bond Stress in Pull out Specimens with High Strength Concrete. Global Journal of Researches in Engineering. Issue 3, Version1.0: str. 55-64.

Hong, S.-N., Park, J.-M., Kim, T.-W., Han, K.-B., Park, S.-K., Ko, W.-J. 2008. Bond stress-slip relationship in reinforced concrete: new relationship and comparative study; proceedings of the 33rd Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 25 – 27 August 2008. Singapore, Singapore Concrete Institute: 7 str.

Kosmatka, H. S., Kerkhoff, B., Panarese, C. W. 1988. Design and Control of Concrete Mixtures. Illinois, Portland Cement Association: 212 str.

Legat, N. 2012. Vpliv notranjih rezervoarjev vode na tlačno trdnost betona visoke trdnosti. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba N. Legat): 31 str.

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. La Jolla, University of California San Diego, Department of Structural Engineering: 14 str.

Poročilo o preiskavi kamnine iz kamnoloma Ušenišče. 17.04.1997. Ljubljana, izdajatelj: IGMAT: loč. pag.

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

TKK. Cementol Antikorodin – Lastnosti. <http://www.tkk.si/si/izdelki/izdelki-glede-na-lastnosti/gradimo-in-saniramo/cementol/dodatki-za-izboljsanje-odpornosti-na-agresivne-medije/cementol-antikorodin> (Pridobljeno 8.9.2014.)

Warwattikar, A. S., Malviya, L. N. 2015. Study of Concrete with Micro-Silica. International Journal for Scientific Research & Development. Volume 3, Issue 01: str. 567-569.

Zajc, A. 1994. Mikroarmirani betoni. V: Zajc, A. (ur.). Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, 26. maj 1994. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: 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.

STANDARDI

FIB Model Code for Concrete Structures 2010

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

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