

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:

Štesl, R., 2016. Vpliv vrste cementa na sprejemnost med betonom in armaturo. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Saje, D.): 34 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5829/>

Datum arhiviranja: 27-09-2016

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:

Štesl, R., 2016. Vpliv vrste cementa na sprejemnost med betonom in armaturo. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Saje, D.): 34 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5829/>

Archiving Date: 27-09-2016

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 STROKOVNI
ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE
STOPNJE OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

ROK ŠTESL

**VPLIV VRSTE CEMENTA NA SPRIJEMNOST MED
BETONOM IN ARMATURO**

Diplomska naloga št.: 135/OG-MO

**THE IMPACT OF CEMENT TYPE ON THE BOND
BETWEEN CONCRETE AND REINFORCING STEEL**

Graduation thesis No.: 135/OG-MO

Mentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 15. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Spodaj podpisani študent Rok Štesl, vpisna številka 26110604, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Vpliv vrste cementa na sprejemnost med betonom in armaturo.

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/-a soglasje etične komisije;

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

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

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

V: Ljubljani

Datum: 25.8.2016

Podpis študenta:
Rok Štesl

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	666.98:624(043.2)
Avtor:	Rok Štesl
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Naslov:	Vpliv vrste cementa na sprijemnost med betonom in armaturo
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	34 str., 19 sl., 15 pregl., 4 graf.
Ključne besede:	sprijemna napetost, izvlečni test, običajni beton, različne vrste cementa, SIST EN 10080:2005

Izvleček

V diplomski nalogi je obravnavan vpliv različnih vrst cementa na sprijemnost med betonom in armaturo. Eksperimentalni del diplomske naloge zavzema laboratorijske preiskave. V sklopu teh smo pripravili betonske mešanice za pripravo katerih smo uporabili tri različne vrste cementa. Iz vsake vrste betona smo izdelali po tri preizkušance. Ostale komponente betona so bile pri vseh mešanicah enake in dodane v enakem deležu. Izdelali smo preizkušance v obliki kock s stranico 20 cm. V kocke je bila vstavljena rebrasta armaturna palica premera 20 mm, ki je prebadala kocko v središču. Izvlečni test smo izvajali v skladu s standardom SIST EN 10080:2005. Armaturno palico smo natezno obremenjevali do porušitve stika med betonom in armaturo.

Uporabljene vrste cementa so se razlikovale v količini cementnega klinkerja v cementu in dodatkih. Na podlagi rezultatov raziskave smo ugotovili, da betoni z uporabo cementov z večjim deležem cementnega klinkerja dosegajo višje sprijemne napetosti med betonom in armaturo. Povečanje sprijemnih napetosti je skoraj sorazmerno s povečanjem cementnega klinkerja v cementu.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	666.98:624(043.2)
Author:	Rok Štesl
Supervisor:	Assist. Prof. Drago Saje, Ph.D
Title:	The impact of cement type on the bond between concrete and reinforcing steel
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Scope and tools:	34 p., 19 fig., 15 tab., 4 graph.
Keywords:	bond stress, pull-out test, normal concrete, different types of cement, SIST EN 10080:2005

Abstract

The thesis researches the impact of cement types on the bond between concrete and reinforcing steel. The experimental part of the thesis includes laboratory research. Within the lab research we prepared concrete mixtures for which we used three different types of cement. From each type of concrete we created three test pieces. All the other components of concrete were the same and added in the same proportion. We have produced specimens in the form of cubes with a side of 20 cm. The cube was inserted with a ribbed reinforcing bar with a diameter of 20 mm which was piercing the center of the cube. The pull-out test was conducted in accordance with standard SIST EN 10080:2005. We burdened the reinforcing bar with tensile until the contact between concrete and the reinforcing steel was broken.

Used types of cement differed in the amount of cement clinker and additives in the cement. Based on the research results we found that concretes using cement with a higher proportion of cement clinker achieve higher bond stresses between concrete and reinforcing steel. Increasing bond stresses are almost proportional to the increase of the cement clinker in cement.

ZAHVALA

Mentorju doc. dr. Dragu Sajetu se zahvaljujem za pomoč, koristne nasvete in prijaznost pri nastajanju diplome. Zahvala gre tudi izr. prof. dr. Jožetu Lopatiču in laborantu Igorju Valjavcu za nasvete in pomoč pri eksperimentalnih raziskavah. Prav tako se zahvaljujem ostalim študentom, ki so sodelovali pri pripravi in izvedbi eksperimentalnih raziskav.

Zahvaljujem se celotni družini, ki mi je tekom študija stala ob strani in me spodbujala.

Hvala Viti, ki me podpira in mi stoji ob strani.

» Ta stran je namenoma prazna. «

KAZALO VSEBINE

IZJAVA O AVTORSTVU.....	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA.....	V
1 UVOD.....	1
2 SPLOŠNO O BETONU	2
2.1 Agregat.....	2
2.2 Cement	3
2.2.1 Vrste cementa.....	5
2.2.2 Označevanje cementa.....	6
2.3 Voda.....	7
2.4 Dodatki.....	8
2.4.1 Kemijski dodatki	8
2.4.2 Mineralni dodatki	8
2.5 Opis kemijske reakcije – hidratacije cementa	9
2.6 Območje stika med agregatom in cementnim kamnom	10
3 SPRIJEMNOST MED BETONOM IN ARMATURO	12
3.1 Sprejemna napetost po Evrokodu 2	13
3.2 Določila standarda SIST EN 10080:2005	14
3.2.1 Načela preizkusa	14
3.2.2 Kalup za pripravo preizkušanca	14
3.2.3 Preizkušanec.....	15

4	EKSPERIMENTALNE PREISKAVE	16
4.1	Zasnova eksperimentalnih raziskav	16
4.2	Uporabljeni materiali	16
4.2.1	Agregat	16
4.2.2	Cement	16
4.2.3	Armatura	19
4.3	Sestava raziskovanih betonov	19
4.4	Preiskave sveže mešanice betona	20
4.5	Izdelava preizkušancev	21
4.6	Tlačna trdnost betona	22
4.7	“Pull-out” oziroma izvlečni test	23
4.8	Rezultati testa	25
4.8.1	Beton s osnovnim mešanim portlandskim cementom	26
4.8.2	Beton s specialnim mešanim portlandskim cementom	28
4.8.3	Beton s čistim portlandskim cementom	29
4.8.4	Primerjava preizkušancev in različnih vrst cementa	32
5	ZAKLJUČEK	34
VIRI	35

KAZALO SLIK

Slika 1: Prostorninski odstotek sestavin v svežem (a) in v otrdelem (b) stanju (Saje, 1997).....	2
Slika 2: Prikaz agregata v betonskem prerezu (Žarnić, 2003).	3
Slika 3: Minerali klinkerja pod optičnim mikroskopom (Salonit Anhovo).	4
Slika 4: Časovni razvoj trdnosti mineralov cementnega klinkerja (Žarnić, 2003).....	5
Slika 5: Označevanje cementa po standardu SIST EN 197-1:2001.	6
Slika 6: Časovni potek hidratacije čistega portlandskega cementa pri vodocementnem razmerju 0,5 (Salonit Anhovo).	10
Slika 7: Shematski prikaz stičnega območja (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).	11
Slika 8: Vzдолžni (a) in prečni (b) prerez območja ob armaturni palici (Murcia-Delso, Stavridis, Shing, 2011).	13
Slika 9: Kalup za pripravo preizkušanca (SIST EN 10080:2005).....	14
Slika 10: Shematski prikaz preizkušanca (SIST EN 10080:2005).....	15
Slika 11: Prikaz sveže betonske mešanice.	20
Slika 12: Priprava preizkušancev za preizkus tlačne trdnosti betona.....	21
Slika 13: Priprava preizkušancev za izvedbo izvlečnega testa.....	22
Slika 14: Enoosni tlačni test.	22
Slika 15: Pripravljen preizkušanec za izvedbo izvlečnega testa.	24
Slika 16: Merilne urce na kocki in ekstenziometer na armaturni palici.	25
Slika 17: Porušitev preizkušanca NC-1630-1_1 po diagonali.....	27
Slika 18: Porušitev preizkušanca NC-1630-3_2.	31
Slika 19: Porušitev preizkušanca NC-1630-3_3.	31

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Sestava klinkerja (Muravljov, 2000).	4
Preglednica 2: Imena in oznake dodatkov v cementu (Žarnić, 2003).	7
Preglednica 3: Razredi trdnosti cementov v MPa (Žarnić, 2003).	7
Preglednica 4: Zrnavostna sestava agregata.	16
Preglednica 5: Delež mineralov v cementnem klinkerju.	17
Preglednica 6: Lastnosti cementa CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N (Salonit Anhovo).	17
Preglednica 7: Lastnosti cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (Salonit Anhovo).	18
Preglednica 8: Lastnosti cementa CEM I 52,5 R (Salonit Anhovo).	18
Preglednica 9: Sestava betonskih mešanic.	19
Preglednica 10: Rezultati preiskav svežega betona.	20
Preglednica 11: Povprečne trdnosti betonov v tlaku pri starosti 28 dni.	23
Preglednica 12: Rezultati izvlečnega testa za beton NC-1630-1.	27
Preglednica 13: Rezultati izvlečnega testa za beton NC-1630-2.	29
Preglednica 14: Rezultati izvlečnega testa za beton NC-1630-3.	30
Preglednica 15: Primerjava povprečnih vrednosti sprejemnih napetosti za betone iz različnih vrst cementa.	33

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1630-1.....	26
Grafikon 2: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1930-2.....	28
Grafikon 3: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1630-3.....	30
Grafikon 4: Primerjava zvez sprijemna napetost - zdrs za betone iz različnih vrst cementa.	32

» Ta stran je namenoma prazna. «

1 UVOD

Beton poznamo že vrsto let in je zaradi svoje vsestranske uporabnosti eden izmed najbolj zaželenih gradbenih materialov. Uporaben je pri vseh vrstah gradenj, saj je razmeroma poceni in lahko z njim oblikujemo poljubne oblike konstrukcij. Odlikuje ga velika tlačna trdnost, vendar pa zaradi svoje majhne natezne nosilnosti slabo prenaša natezne obremenitve. Za prevzem nateznih obremenitev v betonu vanj vgrajujemo armaturo in tako dobimo armiran beton.

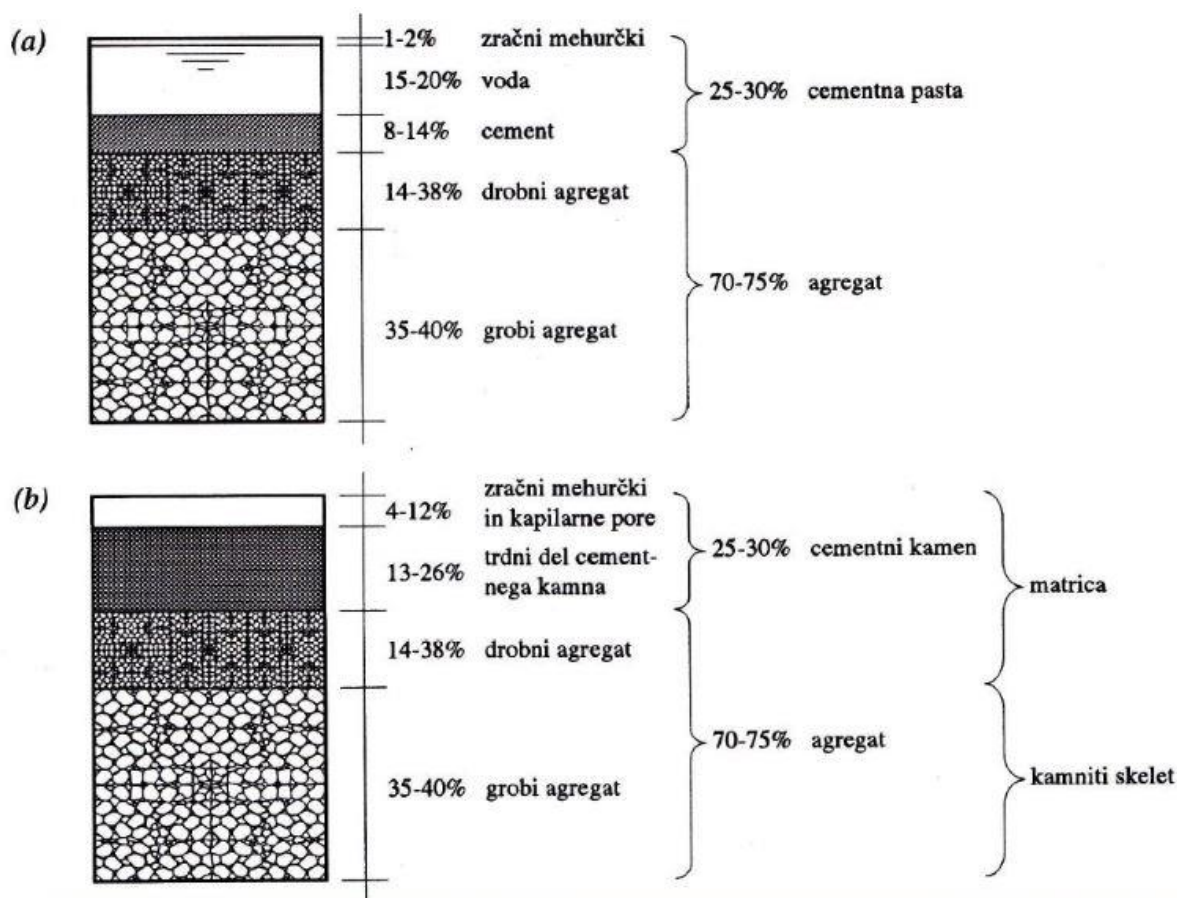
Beton je sestavljen iz več komponent zato spada med kompozitne materiale. Ključno komponento betona, ki mu daje vezivne lastnosti predstavlja cement. Cement je silikatni material, uvrščen med hidravlična veziva, ki v procesu hidratacije vežejo in se strjujejo. Njegov glavni gradnik je cementni klinker, ki je sestavljen iz štirih osnovnih mineralov. Ti so zasluženi, da se v betonu tvorijo produkti, ki mu dajejo značilne lastnosti. Prav tako predstavlja količina cementnega klinkerja v cementu osnovni kriterij delitve cementa v skupine.

V tem diplomskem delu smo raziskovali vpliv vrste cementa na sprijemnost med betonom in armaturo. Sprijemnost je ključnega pomena za učinkovit prenos nateznih obremenitev na armaturo, zato mora biti stično območje med betonom in armaturo čim bolj kompatibilno. V sklopu eksperimentalnih preiskav smo pripravili betonske preizkušance v obliki kock, ki so imeli v središču locirano armaturno palico. To smo s pomočjo izvlečne naprave natezno obremenjevali in spremljali odnos med betonom ter armaturo. Pri pripravi betonskih mešanic smo uporabili tri vrste cementa, ki se med seboj razlikujejo v deležu cementnega klinkerja v cementu, to so: CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N, CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R in CEM I 52,5 R. Po izvedbi izvlečnega testa smo v analizi izmerjenih podatkov zajeli vpliv vrste cementa na sprijemnost med betonom in armaturo.

Diplomska naloga vsebuje poleg uvoda še štiri poglavja. V poglavju *Splošno o betonu* so predstavljene osnovne komponente betona. Poudarek je na cementu, podrobno je opisan proces hidratacije cementa v betonu. Prikazano je tudi stično območje med cementnim kamnom in agregatom. Sledi poglavje *Sprijemnost med betonom in armaturo*. To poglavje predstavi odnos med betonom in armaturo pri nateznih obremenitvah. Prikazana so določila standarda SIST EN 10080:2005, ki govori o izvlečnem testu. Eksperimentalni del diplomske naloge je zajet v poglavju *Eksperimentalne preiskave*. Na začetku poglavja je podan pregled uporabljenih materialov in njihov delež v betonskih mešanicah. Sledi postopek izvajanja izvlečnega testa in predstavitev rezultatov na grafih in v preglednicah. V poglavju *Zaključek* so podane ključne ugotovitve eksperimentalnih preiskav.

2 SPLOŠNO O BETONU

V splošnem je beton kompozitni material, ki ga sestavljajo štiri osnovne komponente: mineralni agregat, cement, voda in dodatki. Navedene komponente je potrebno zmešati v homogeno celoto, v kateri tvori agregat polnilo v matrici iz cementnega kamna. Slednji nastane v procesu hidratacije cementa (Žarnić, 2003).

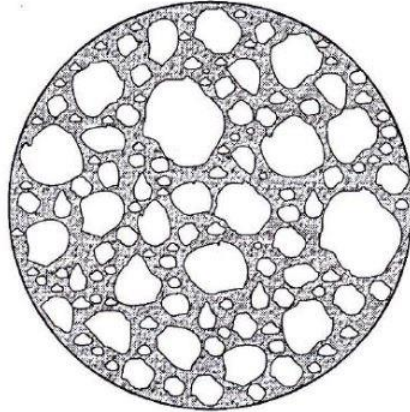


Slika 1: Prostorninski odstotek sestavin v svežem (a) in v otrdelem (b) stanju (Saje, 1997).

2.1 Agregat

V običajnih betonih zavzema mineralni agregat največji delež volumna. To je razlog, da je njegov izbor poglobitnega pomena za kakovost in lastnosti betona. Agregate ločimo glede na način pridobivanja na drobljence, ki imajo ostre robove in so nepravilnih oblik ter gramoze aluvialnega izvora za katere so značilna zaobljena zrna. Betonska mešanica je običajno sestavljena iz grobega in drobnega agregata. Mejo med drobnim in grobim agregatom predstavljajo zrna premera 4 mm. Običajne konstrukcije imajo

maksimalno zrno grobega agregata veliko med 16 mm in 32 mm. Z drobnim agregatom se zapolni prostor med večjimi zrni (Žarnič, 2003).



Slika 2: Prikaz agregata v betonskem prerezu (Žarnič, 2003).

2.2 Cement

Ime cement običajno označuje vezivno komponento v nekem kompozitnem materialu, pri čemer se običajno misli na beton. Danes je v uporabi veliko vrst cementa, v gradbeništvu pa se najpogosteje uporablja portland cement.

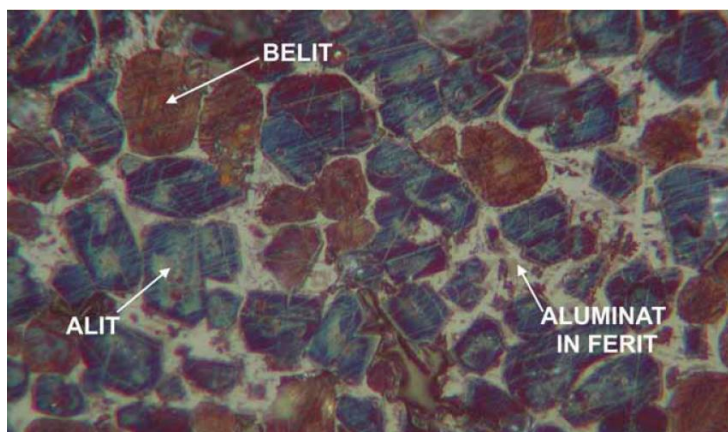
Po definiciji je cement hidravlično vezivo. Le-to po reagiranju z vodo v procesu hidratacije preide iz cementne paste v cementni kamen, ki je v glavnem sestavljen iz kalcijevih silikatnih hidratov (Žarnič, 2003).

Sestavne za proizvodnjo cementa oziroma cementnega klinkerja morajo vsebovati glavne kemijske sestavine cementa kot so kalcijev oksid, silicijev dioksid, aluminijev oksid in železov oksid. Te sestavine se v naravi nahajajo predvsem v glinah in apnenih materialih. Toplotna obdelava surovin za cementni klinker se imenuje žganje klinkerja in se izvaja v rotacijskih pečeh, ki dosežejo temperaturo 1300 do 1500 °C. V procesu žganja nastanejo granule cementnega klinkerja, ki se jih v zadnjem koraku proizvodnje zmelje na predpisano velikost. Kemijska sestava tipičnega klinkerja znaša 67% CaO, 22% SiO₂, 5% Al₂O₃, 3% Fe₂O₃, ter približno 3% ostalih komponent med katere sodijo alkalije in primesi. Navedene komponente so večinoma porazdeljene v štirih mineralih cementnega klinkerja (Preglednica 1). Med mletjem se klinkerju doda sadro (3-5%), ki je obvezna za regulacijo vezanja (Đureković, 1996).

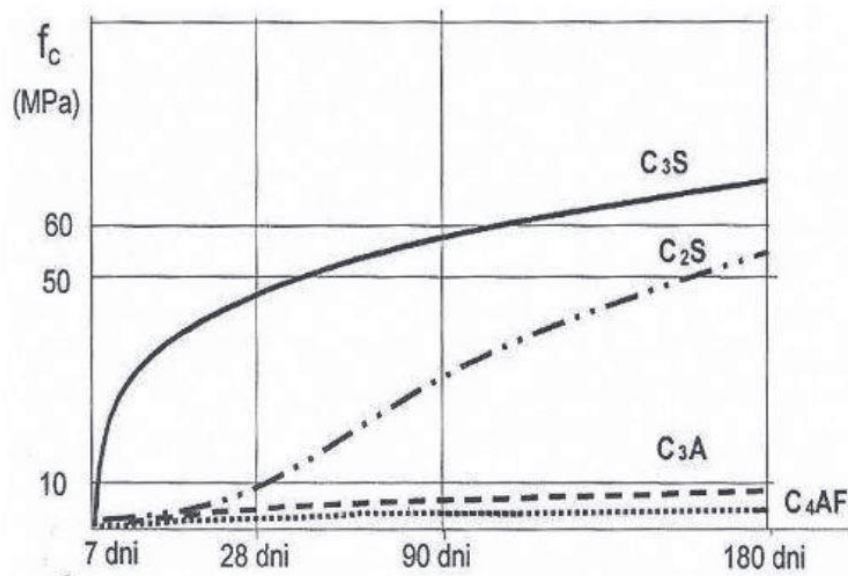
Preglednica 1: Sestava klinkerja (Muravljov, 2000).

Vrsta minerala	Kem. formula	Odstotek v klinkerju
Tri-kalcijev silikat - ALIT	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ oziroma C_3S	45-60%
Di-kalcijev silikat - BELIT	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ oziroma C_2S	20-30%
Tri-kalcijev aluminat	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ oziroma C_3A	4-12%
Tetra-kalcijev aluminat ferit	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ oziroma C_4AF	10-20%

Kot je razvidno in preglednice 1, minerali silikata predstavljajo okoli 75% mase v klinkerju. Njihove lastnosti pretežno opredeljujejo tehnične lastnosti portlandskega cementa. Mineral alit (v nadaljevanju C_3S) je glavni mineral običajnega portland-cementnega klinkerja, saj največ prispeva k visoki trdnosti betona. Belit (v nadaljevanju C_2S) je manj reaktiven, zato počasneje strjuje in razvije nižjo toploto pri hidrataciji. Tri-kalcijev aluminat (v nadaljevanju C_3A) zelo hitro reagira, razvije visoko toploto hidratacije in v fazi strjevanja doprinese k začetnim trdnostim. Je pogosto povzročitelj sulfatne korozije cementa, zato se količina tega minerala v cementih, ki morajo biti odporni na delovanje sulfata običajno omeji na 5%. C_4AF počasi strjuje in je odpornejši na sulfatno korozijo (Muravljov, 2000).

*Slika 3: Minerali klinkerja pod optičnim mikroskopom (Salonit Anhovo).*

Iz slike 4 je razvidno naraščanje trdnosti mineralov cementa. Opaziti je tudi, da trdnost najhitreje pridobiva C_3S , ki že v začetnih dnevih pridobi polovico svoje trdnosti. C_2S veže počasneje in k tlačni trdnosti večinoma prispeva šele po 28 dneh hidratacije. C_3A in C_4AF najmanj prispevata k trdnosti.



Slika 4: Časovni razvoj trdnosti mineralov cementnega klinkerja (Žarnić, 2003).

2.2.1 Vrste cementa

Muravljov (2000) navaja dve osnovni skupini cementov:

- cementi na osnovi klinkerja v portland cementu,
- ostale – specialne vrste cementa.

Med cemente na osnovi portlandskega cementnega klinkerja spadajo:

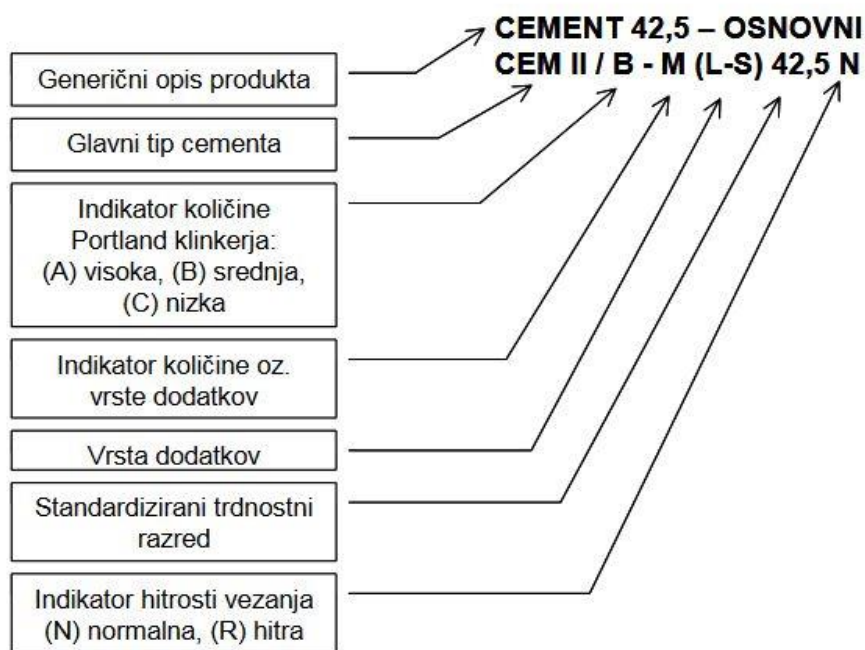
- *Portland cement*, katerega sestavljajo samo sestavine, ki se nahajajo v portland cementnem klinkerju, z izjemo sadre, katera je ne obhodna za regulacijo vezanja. To je najpomembnejša vrsta cementa, saj predstavlja osnovo za večino drugih vrst cementa. Portland cementu lahko dodamo do 30% poculana ali žindre.
- *Metalurški cement*, ki ga dobimo, če portland cementu dodamo od 30% do največ 85% žindre.
- *Poculanski cement*, ki ga dobimo, če portland cementu dodamo nad 30% poculana.
- *Cement z nizko toploto*, ki se tvori pri hidrataciji.
- *Beli portland cement*.

Ostale – specialne vrste cementa so:

- aluminatni cement,
- supersulfatni cement,
- ekspanzivni cement.

2.2.2 Označevanje cementa

Označevanje cementa je podrobneje predstavljeno v Slovenskem standardu SIST EN 179-1. Na spodnji sliki je prikazano standardizirano označevanje cementov (Žarnić, 2003).



Slika 5: Označevanje cementa po standardu SIST EN 197-1:2001.

Vseh 27 tipov cementa, ki jih pozna standard je razporejenih v pet različnih skupin:

- portland cement - CEM I,
- portland mešani cement - CEM II,
- metalurški cement - CEM III,
- poculanski cement - CEM IV,
- mešani cement - CEM V.

Oznaka CEM pomeni razvrstitev cementov glede na njihovo skupno sestavo, nadaljnje oznake pa podajo natančnejšo sestavo cementa. Z oznakami A, B in C je podana količina cementnega klinkerja. Črka M pove, da ima klinker dva ali več dodatkov. Oznake teh dodatkov so navedene v oklepaju. V nadaljevanju se nahaja še preglednica 2, kjer so prikazani ti dodatki. Standard cemente razdeli v 3 trdnostne razrede in vsak razred še glede na hitrost vezanja. Oznaka (N) označuje normalno hitrost vezanja, oznaka (R) pa označuje pospešeno vezanje (Žarnić, 2003).

Preglednica 2: Imena in oznake dodatkov v cementu (Žarnić, 2003).

Ime	Oznaka
Žlindra	S
Mikrosilika	D
Poculani	P
Kalcinirani poculani	Q
Elektrofilterski pepel (silikatni)	V
Elektrofilterski pepel (karbonski)	W
Skriljevec (žgani)	T
Apnenec	L
Apnenec	LL
Dva in/ali več predhodno navedenih	M

Preglednica 3: Razredi trdnosti cementov v MPa (Žarnić, 2003).

Razred trdnosti	Trdnost v zgodnji starosti		Trdnost po 28 dneh	
	2. dan	7. dan	Min.	Maks.
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≥52,5
32,5 R	≥10,0	-		
42,5 N	≥10,0	-	≥42,5	≥62,5
42,5 R	≥20,0	-		
52,5 N	≥20,0	-	≥52,5	-
52,5 R	≥30,0	-		

2.3 Voda

Voda je ne obhodna komponenta vseh betonskih mešanic, saj je samo v njeni prisotnosti možna hidratacija cementa. Prav tako je voda pomembna komponenta s katero se v svežem betonu ustvarja potrebna viskoznost mešanice betona, prispeva k učinkovitemu vgrajevanju in končni obdelavi betona. Pri pripravi betona, voda ne sme vsebovati snovi, ki bi negativno vplivale na hidratacijo, niti snovi katere bi lahko v armiranobetonskih konstrukcijah povzročile korozijo armature (Muravljov, 2000).

2.4 Dodatki

2.4.1 Kemijski dodatki

V betonski tehnologiji so se kemijski dodatki začeli pojavljati približno leta 1945. Dodaja se jih v deležu na maso cementa in ne predstavljajo nadomestila za cement. Kemijski dodatki spreminjajo lastnosti pri svežem in strjenem betonu. Obstaja več vrst teh dodatkov: plastifikatorji in super-plastifikatorji, aeranti, zavlačevalci in pospeševalci vezanja, utekočinjevalci in gostilci, pigmenti ter drugi. Med seboj se jih lahko kombinira, vendar morajo biti med seboj kompatibilni (Zajc, 2007).

2.4.2 Mineralni dodatki

Mineralni dodatki imajo poculanske lastnosti, zato so substitut za določeno količino cementa, ki je potreben za pripravo betona. Navadno se dodajajo v večjih količinah na maso cementa. V uporabi so naslednji mineralni dodatki: mikrosilika, elektrofilterski pepeli, apnena moka, žindra, tufi, poculani (Zajc, 2007).

Mikrosilika nastane pri proizvodnji ferosilicija in je znana kot fino zrnat amorfen silicijev dioksid (SiO_2). Mikrosilika ima zrna, ki so od zrna cementa manjša približno 50-krat. Pri pripravljanju sveže betonske mešanice se mikrosilika po njej enakomerno razporedi in v procesu strjevanja betona deluje s fizikalnim načinom zgoščevanja betonske strukture in s poculansko reakcijo. Pri fizikalnem načinu zgoščevanja mikrosilika v območju med zrnimi agregati in bolj oddaljeno gostejšo cementno pasto izriva vodo ter tako fizično zgosti strukturo betona. Med poculansko reakcijo pa mikrosilika reagira s kalcijevim hidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in tvori kalcijev silikat hidrat. Ta produkt zapolni prazna mesta v strukturi cementne paste, ki je že hidratizirala in med seboj zlepi konstituente betona na mestih, kjer se mikrosilika nahaja. Isti efekt se zgodi tudi na stiku z armaturo. Uporaba mikrosilike tako izboljšuje adhezijo med komponentami betona ter zapolnjuje pore v strukturi betona, zaradi česar se pri betonu povečujeta njegova trdnost in trajnost. **Elektrofilterski pepel (EF)** kot drugi dodatek nastane pri zgorevanju premoga v termoelektrarnah in se nabira v elektrofiltrih kot odpadni fin prah. Delci le-tega so bistveno večji kot mikrosilika in so veliki približno tako kot zrnca cementa. Posledično EF nima takih vplivov na betonske lastnosti kot mikrosilika. Strukturo betona gosti predvsem s poculansko reakcijo (Zajc, 2007).

Žindra je stranski produkt pri proizvodnji železa. Žindra ima veliko reaktivnost, saj ima sposobnost strjevanja tudi brez cementa. Žindra postane popolnoma hidravlično vezivo, če ji dodamo minimalno količino cementa. Količine zamenjave žindre s cementom lahko variirajo, vendar pa je prirast tlačne trdnosti pri večjih količinah majhen. Žindra zniža toploto hidratacije in izboljša obdelovanost svežega betona (Hočvar, 2013).

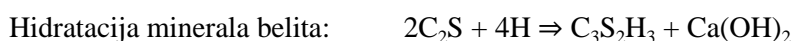
2.5 Opis kemijske reakcije – hidratacije cementa

Kemično reakcijo, ki poteče med cementom in vodo, pri kateri se sprosti toplota imenujemo hidratacija. Začne se na površini cementnih zrn obdanih z vodo. Na potek hidratacije in na stopnjo sproščene toplote, časovni potek krčenja ter na razvoj trdnosti cementne paste/kamna oziroma betona učinkujejo naslednji parametri (Saje, 2001):

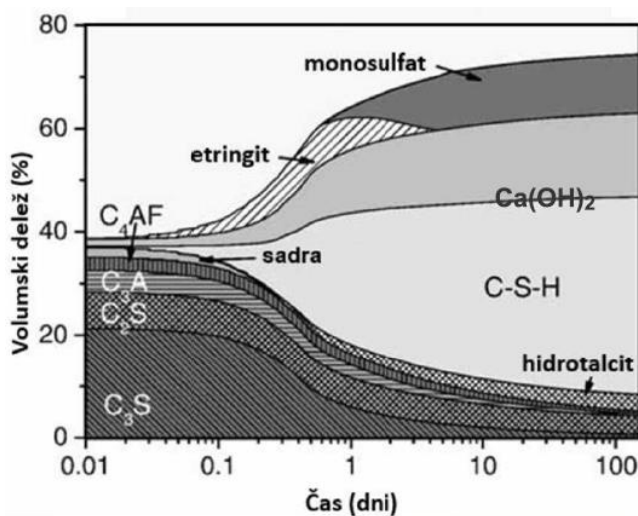
- medsebojno razmerje 4-ih osnovnih mineralov klinkerja,
- površina (specifična) cementa,
- dodatki (mineralni),
- temperatura betona v začetku,
- kameni agregat,
- vlažnost in temperatura v okolici med potekom reakcije cementa in vode,
- vodo-vezivni količnik mešanice betona,
- vsebovanje dodatka (kemičnega) v betonu.

Glede na to, da je cement heterogena mešanica številnih komponent, proces hidratacije sestavljajo reakcije brezvodnih klinkerjevih mineralov z vodo. Reakcije nikoli ne potekajo enako hitro. Tako je hidratacija aluminatnih faz vedno hitrejša v primerjavi s hidratacijo silikatnih faz. Značilnosti cementa (npr. začetek vezanja in izguba konsistence), so povezane s hidratacijskimi reakcijami aluminatov, pri čemer imajo slikati dominantno vlogo v obdobju pridobivanja trdnosti (Ipavec, Vuk, 2010).

Produkti hidratacije C_3S in C_2S v cementu so kalcijevi silikat hidrati in kalcijev hidroksid. Kalcijev silikat hidrat imenovan C-S-H gel, v popolnoma hidratizirani pasti cementa predstavlja od 50 do 60 % volumna. Gre za glavno komponento, ki da betonu vezivne lastnosti. Morfologija tega gela je nedefinirana. Večina modelov C-S-H gel pojasnjuje kot plastno strukturo, ki ima ogromno (specifično) površino (od 100 do 700 m²/g). Kalcijev hidroksid (v nadaljevanju $Ca(OH)_2$) najdemo v kristalih z značilno morfologijo heksagonalnih lamel. Ta predstavlja od 20 do 25 % vol. trdne faze, njegov prispevek k tlačni trdnosti pa je zaradi majhne (specifične) površine zanemarljiv. Pomemben doprinos $Ca(OH)_2$ je vzdrževanje alkalnosti v cementni matrici, kar je ključnega pomena pri zagotavljanju obstojnosti cementne matrice. Pocolanski dodatki (EF, žindra, mikrosilika) vsebujejo amorfne alumosilikate. Slednji reagirajo s $Ca(OH)_2$, pri tem pa nastaja vezivo C-S-H gel. Na ta način se izboljša mikrostruktura, s tem pa zmanjša propustnost v cementnem kamnu (Ipavec, Vuk, 2010).



Skupna obravnava C_3A in C_4AF je z vidika hidratacijskih reakcij v cementu smiselna, saj v večini primerov nastajajo po lastnostih in strukturi zelo podobni hidratizirani produkti. Prav zato je v nadaljevanju predstavljena hidratacija C_3A , pri čemer so zelo podobne reakcije značilne tudi za ferit C_4AF . Reakcije C_3A z vodo so tako burne, da pride v pasti do vezanja v trenutku. Kmalu po dodajanju vode k cementu pride do izgube plastičnosti, s tem pa se sprost velika količina toplote. Za uporabo cementa moramo doseči kontroliran razvoj veznih lastnosti. To je razlog, da se cementu dodaja sadra, ki deluje kot zaviralec hidratacije aluminatnih faz. Kot prvi stabilen produkt pri hidrataciji C_3A in C_4AF nastane entrignit, ki predstavlja zaščitno plat na površini zrn in s tem upočasni hidratacijo. Entrignit uvrščamo k družini AFt faz. Sestava AFt v betonu se v normalnih pogojih zelo približa idealni strukturi entrignita, za katerega je značilna morfologija paličastih struktur. S tem, ko se dodana sadra porabi postane entrignit nestabilen in nadaljnja hidratacija teče v smeri prehoda entrignita v monosulfat, ki sodi med t.i. AFm faze. AFm je okrajšava za družino hidratiziranih kalcijevih aluminatnih faz, ki se pojavljajo v cementni pasti. Nastajanje aluminatnih hidratov regulira pričetek vezanja, pri nadaljnjem razvoju vezivnih lastnosti pa te faze niso ključne (Ipavec, Vuk, 2010).

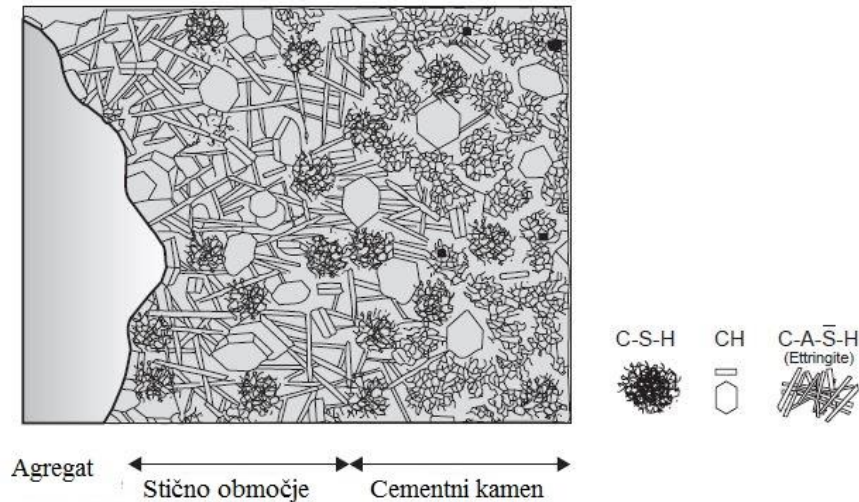


Slika 6: Časovni potek hidratacije čistega portlandskega cementa pri vodocementnem razmerju 0,5 (Salonit Anhovo).

2.6 Območje stika med agregatom in cementnim kamnom

V svežem kompaktnem betonu se najprej ustvari vodni film na površini večjih agregatnih zrn, kar predstavlja višjo vodocementno razmerje v stičnem območju. V nadaljevanju nastajata v tem območju v procesu hidratacije produkta entrignit in $Ca(OH)_2$. Zaradi visokega vodocementnega razmerja v bližini grobega agregata sta ta produkta iz relativno velikih kristalov in zato tvorita veliko bolj porozno območje. Z napredkom hidratacije C-S-H gel in druge generacije manjših kristalov entrignita in

Ca(OH)_2 začnejo zapolnjevati prazni prostor, na ta način pa povečujejo gostoto stičnega območja ter njegovo trdnost (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).



Slika 7: Shematski prikaz stičnega območja (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

Razlog za adhezijo med produkti hidratacije cementa in agregatom so Van der Waalove sile privlačnosti. Prav zato je trdnost stičnega območja v katerikoli točki odvisna od volumna in velikosti praznin. Tudi pri betonih, ki imajo nizko vodo-vezivno razmerje sta pri starosti betona v zgodnji fazi velikost por in volumen v stičnem območju večja kot pri cementnem kamnu. Kljub temu postane trdnost stičnega območja z naraščanjem starosti betona enaka, lahko pa tudi večja od trdnosti cementnega kamna. To se lahko zgodi zaradi kristalizacije novih produktov v porah stičnega območja, ki nastanejo po počasnih kemičnih reakcijah med sestavinami cementne paste in agregata. Oblikuje se C-S-H gel v primeru silikatnih agregatov ali tvorba karboaluminat hidratov v primeru apnenastega agregata. Takšne interakcije prispevajo k trdnosti stičnega območja, saj te zmanjšujejo koncentracijo Ca(OH)_2 , ki ima slabše adhezijske sposobnosti. Poleg velikega števila por in orientiranih kristalov Ca(OH)_2 je pomemben dejavnik, ki zmanjšuje trdnost stičnega območja v betonu prisotnost mikro razpok. Količina mikro razpok je odvisna od številnih parametrov, kot so: vodo-vezivno razmerje, zrnastostna sestava agregata, količina cementa, stopnja konsolidacije svežega betona in vlaga v okolici. Mikro razpoke nastanejo posledično zaradi nateznih sil v stiku. Natezne sile so posledica diferenčnih pomikov med cementnim kamnom in zrni agregata, pri čemer pomiki nastanejo zaradi sušenja ali ohlajanja betona. To pomeni, da se lahko mikro razpoke v območju stika pojavijo še preden beton obremenimo (Kumar Mehta, Monteiro, 2006).

3 SPRIJEMNOST MED BETONOM IN ARMATURO

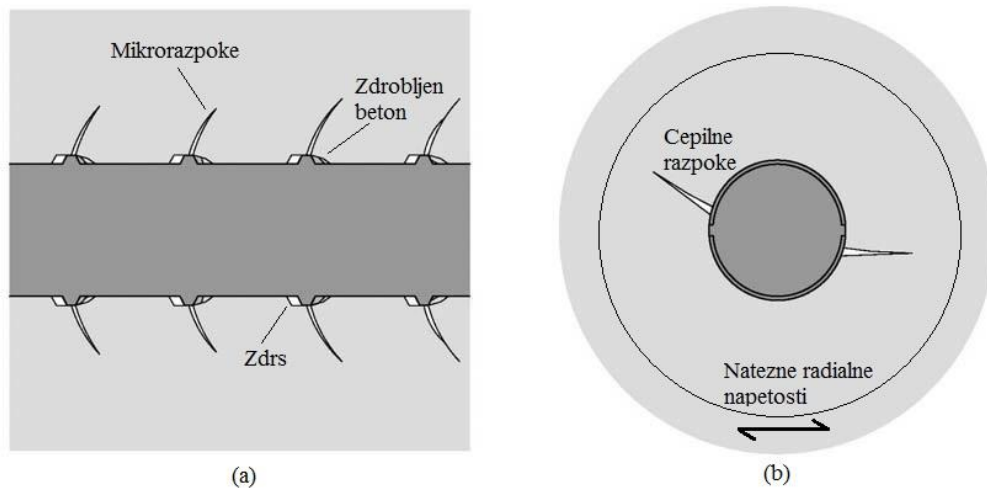
Sam beton ima veliko tlačno nosilnost in tudi nekaj slabosti kot so relativno nizka natezna trdnost, krhkost... To je razlog, da betonskim konstrukcijam v katerih pričakujemo poleg tlačnih tudi natezne obremenitve vgrajujemo armaturo, običajno v obliki armaturnih palic. Armaturne palice, ki so izdelane iz jekla zelo dobro prenašajo natezne obremenitve in se v nategu obnašajo duktilno. Tako dobimo kompozitni material, ki ga imenujemo armiran beton. Ta z združitvijo teh dveh materialov zelo dobro prenaša tlačne in natezne obremenitve, zato je v gradbeništvu zelo razširjen. Za doseganje teh lastnosti moramo veliko pozornost posvetiti prav stiku med betonom in armaturo.

Sprijemnim silam med armaturno palico in okoliškim betonom lahko pripišemo več virov, kot so: kemična adhezija med palico in betonom, sile trenja zaradi hrapavosti na stiku in nosilna rebra zaklinjena v okoliški beton. Pri zelo nizkih obremenitvah je sprijemnost v glavnem zagotovljena s kemično adhezijo. Pri večjih obremenitvah pride do začetnega zdrsa pri armaturni palici v betonu in takrat je vpliv kemične adhezije izgubljen. Aktivirajo se sile trenja na površini palice. Prav tako pride do prenosa obtežbe z naslanjanjem reber armaturne palice na beton, kar predstavlja glavni mehanizem prenosa obtežbe. Na območju konic reber začnejo nastajati mikro razpoke v betonu, kar omogoča večji zdrs palice. Ko obremenitev še povečujemo se veča tudi zdrs palice in mikro razpoke, kar povzroči, da se začne okoliški beton drobiti. Mikro razpoke in območje zdrobljenega betona je prikazano na sliki 8 (a). Prenos obremenitev iz armature na beton poteka pod kotom med 45° in 80° glede na os palice. Pojavijo se radialne natezne sile, ki povzročajo cepitvene radialne razpoke v betonu ob stiku s palico, razvidne iz slike 8 (b). V tej fazi je sprijemna odpornost zagotovljena z zaklinjanjem reber palice v okoliški nepoškodovani betonski obroč. Glede na pogoje, ki nastanejo okoli palice, pride do porušitve preizkušanca z izvlekom armaturne palice ali z razcepom betona. V primeru širjenja cepilnih razpok globlje v betonsko kritje, se zgodi razcep preizkušanca. Takrat beton ne prenaša več nateznih napetosti, kar povzroči nenadno delitev le-tega. Pri drugem načinu porušitve, se cepilne razpoke ne razširijo do kritične meje, zato tu dosegamo večje sprijemne napetosti. V tem primeru sprijemnost popusti zaradi drobljenja in striženja betona med rebri. Na koncu pride do izvleka armaturne palice, zunanost betona pa ostane nepoškodovana (Murcia-Delso, Stavridis, Shing, 2011).

Dejavniki, ki vplivajo na sprijemnost med armaturno palico in betonom so (Murcia-Delso, Stavridis, Shing, 2011):

- geometrija armaturne palice,
- tlačna in natezna trdnost betona,
- betonsko kritje,
- prečne ojačitve,
- smer betoniranja,

- stopnja korozije palice.



Slika 8: Vzdolžni (a) in prečni (b) prerez območja ob armaturni palici (Murcia-Delso, Stavridis, Shing, 2011).

Opisanim razmeram se najlažje približamo z izvlečnim testom ("Pull-out" test), kjer armaturno palico vstavljeno v betonsko kocko s pomočjo izvlečne naprave natezno obremenimo ter jo izvlečemo iz betona. Tako ponazorimo natezno obremenjene armiranobetonske konstrukcije. O izvlečnem testu govori standard SIST EN 10080:2005, ki je predstavljen v nadaljevanju.

3.1 Sprijemna napetost po Evrokodu 2

Evrokod 2 navaja, da mora sidranje armaturnih palic, žic ali varjenih mrež zagotoviti varen prenos njihovih sil na beton in preprečiti vzdolžno razpokanje ter cepljenje elementa. Zato moramo, kadar je potrebno, za preprečitev cepljenja betonskega elementa namestiti prečno armaturo. Mejno sprijemno napetost za rebraste palice Evrokod določa z izrazom:

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

pri tem je

f_{bd} mejna sprijemna napetost,

η_1 koeficient, ki je odvisen od pogojev sidranja in od lege palic med betoniranjem,

η_2 koeficient, ki je odvisen od premera palice,

f_{ctd} računsko vrednost natezne trdnosti betona.

3.2 Določila standarda SIST EN 10080:2005

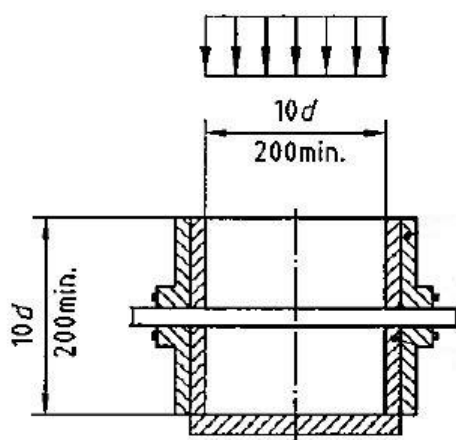
3.2.1 Načela preizkusa

Princip testa je obremenjevanje daljšega konca armaturne palice, ki je vstavljena v armaturno kocko z natezno silo. Drugi konec palice ostane prost, brez obremenitev. Odnos med natezno silo in zdrsom (premik med armaturno palico in betonom) merimo do odpovedi stika.

Preizkušanec je sestavljen iz betonske kocke, kjer je armaturna palica postavljena v središču kocke. Efektivna sprijemna dolžina palice je $5d$ (petkratnik premera palice), ki ustreza samo enemu delu kocke. V drugem delu palice je sprijemnost preprečena. Armaturna palica sega preko obeh strani vzorca; natezna napetost se nanaša na daljši konec palice, naprava za merjenje zdrsa pa je postavljena na krajši konec. Ta postopek je primeren za vzorce z armaturno palico premera ≤ 32 mm (SIST EN 10080:2005).

3.2.2 Kalup za pripravo preizkušanca

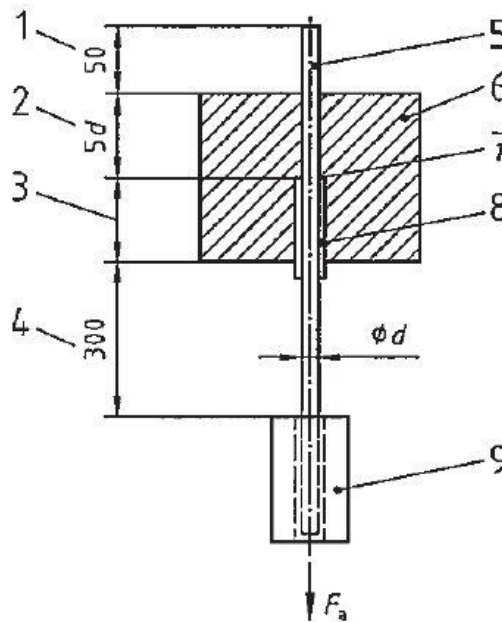
Standard podaja zahteve za kalup pri pripravi preizkušanca (slika 9). Podan je položaj armaturne palice, smer betoniranja in velikosti preizkušanca v odvisnosti od premera armaturne palice. Velikost preizkušanca omejuje še zahteva po minimalni dolžini stranice 200 mm (SIST EN 10080:2005).



Slika 9: Kalup za pripravo preizkušanca (SIST EN 10080:2005).

3.2.3 Preizkušane

Premer armaturne palice in minimalne zahteve vplivajo na velikost betonske kocke, ki objema armaturno palico. Prav tako je tudi sidrana dolžina odvisna od armaturne palice. Shema preizkušanca je prikazana na spodnji sliki, kjer so vse dimenzije v milimetrih (SIST EN 10080:2005).



Slika 10: Shematski prikaz preizkušanca (SIST EN 10080:2005).

1. Del palice pripravljen za uporabo naprave za merjenje zdrsa.
2. Sprijemna dolžina med armaturo in betonom.
3. Območje s preprečeno sprijemnostjo 5 d, min. 200 mm – 5 d.
4. Del palice od roba betonske kocke do točke prijetja natezne obremenitve.
5. Armaturna palica.
6. Beton.
7. Začetek sprijemnega območja.
8. Ovoj, ki onemogoča sprijemnost.
9. Območje vpetja v napravo za preizkušanje.

4 EKSPERIMENTALNE PREISKAVE

4.1 Zasnova eksperimentalnih raziskav

Pri eksperimentalnih raziskavah so bile uporabljene tri betonske mešanice. Te so se razlikovale v vrsti cementa, ki je imel različne količine portlandskega klinkerja in dodatkov. Zrnastostno sestavo agregata in vodo-vezivno razmerje smo ohranili pri vseh mešanicah enako. Betonske mešanice smo vkomponirali v ustrezne kalupe za preskus tlačne trdnosti in posebno zasnovane kalupe za izvlečni test. Mešanice smo v vodi negovali 28 dni, po tem obdobju pa se je izmerila tlačna trdnost preizkušancev in izvedel izvlečni test. Na podlagi rezultatov raziskav je bila nato opravljena analiza vpliva vrste cementa na tlačno trdnost betona in na prijemnost med betonom in armaturo.

4.2 Uporabljeni materiali

4.2.1 Agregat

Za vse tri betonske mešanice smo uporabili agregat enake zrnastostne sestave in mivko. Agregat sestavlja prani drobljeni apnenčev agregat frakcij 0/4, 4/8, 8/16, mivka pa predstavlja frakcijo 0/2. Agregat smo pred uporabo dodatno osušili v prostorih laboratorija Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Preglednica 4 prikazuje zrnastostno sestavo agregata.

Preglednica 4: Zrnastostna sestava agregata.

Frakcija	Delež [%]
0/2 (Mivka – Termit)	15
0/4 (Kresnice)	45
4/8 (Kresnice)	15
8/16 (Kresnice)	25

4.2.2 Cement

Za izdelavo betonskih mešanic so bile uporabljene tri vrste cementa iz cementarne Salonit Anhovo. Cement z oznako CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N je osnovni mešani portland cement z dvema mineralnima dodatkomoma (M), trdnostnega razreda 42,5 MPa in običajnih zgodnjih trdnosti (N). Dodana sta mu elektrofiltrski pepel (V) in apnenec (LL), vsebnosti do 35%. Druga vrsta cementa CEM II/A-M (LL-S)

42,5 R dosega visoke zgodnje trdnosti (R) in sodi v skupino specialnih mešanih portland cementov. Temu cementu sta dodana apnenec (LL) in žindra (S), vsebnosti 12 – 20 %. Tretja vrsta uporabljenega cementa je CEM I 52,5 R. To je čisti portland cement, najvišjega trdnostnega razreda 52,5 MPa in najvišjih zgodnjih trdnosti (R) po standardu za običajni cement. Vsi trije cementi ustrezajo zahtevam standarda SIST EN 197-1. Delež posameznih mineralov je prikazan v preglednici 5, v preglednicah 6, 7, 8 pa so podane kemijske in mehanske lastnosti cementov.

Preglednica 5: Delež mineralov v cementnem klinkerju..

Cement	Klinker	Minerali klinkerja			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N	običajni klinker	64 %	15%	9%	9%
CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R					
CEM I 52,5 R					

Preglednica 6: Lastnosti cementa CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N (Salonit Anhovo).

CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N	
Sestava	
Portland klinker	≥ 65%
Elektrofiltrski pepel (V), apnenec (LL)	≤ 35%
Dodatki (polnila)	≤ 5%
Kemijske zahteve	
Sulfati (SO ₃)	2,5%
Kloridi	0,06%
Mehanske in fizikalne zahteve	
Trdnost po 2 dneh	24 MPa
Trdnost po 28 dneh	48 MPa
Pričetek vezanja	180 min

Preglednica 7: Lastnosti cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (Salonit Anhovo).

CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	
Sestava	
Portland klinker	≥ 80%
Apnenec (LL), žindra (S)	12 - 20%
Dodatki (polnila)	≤ 5%
Kemijske zahteve	
Sulfati (SO ₃)	2,6%
Kloridi	0,05%
Mehanske in fizikalne zahteve	
Trdnost po 2 dneh	29 MPa
Trdnost po 28 dneh	57 MPa
Pričetek vezanja	190 min

Preglednica 8: Lastnosti cementa CEM I 52,5 R (Salonit Anhovo).

CEM I 52,5 R	
Sestava	
Portland klinker	≥ 95%
Dodatki (polnila)	≤ 5%
Kemijske zahteve	
Sulfati (SO ₃)	3,4%
Kloridi	0,06%
Mehanske in fizikalne zahteve	
Trdnost po 2 dneh	40 MPa
Trdnost po 28 dneh	64 MPa
Pričetek vezanja	160 min

4.2.3 Armatura

Pri preizkušancih za izvedbo izvlečnega testa smo uporabili rebraste armaturne palice premera 20 mm. Armaturne palice so iz jekla kvalitete S500 in imajo vzdolžna in prečna rebra. Prečna rebra so asimetrična glede na nasprotno stran palice. Na eni strani palice so rebra paralelna, na drugi strani pa so nevporedna. Vzdolž palice potekata dve rebri.

4.3 Sestava raziskovanih betonov

Pri pripravi vseh treh betonskih mešanic smo uporabili enake sestavine betona, spreminjali smo samo vrsto cementa. Tako smo v nadaljnjih preiskavah dobili rezultate odvisne le od vrste cementa. Beton z oznako NC-1630-1 vsebuje cement CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N, beton NC-1630-2 vsebuje cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R, beton NC-1630-3 pa cement CEM I 52,5 R. Vodocementni faktor je pri vseh mešanicah znašal 0,52. Preglednica 9 prikazuje sestavo betonskih mešanic.

Preglednica 9: Sestava betonskih mešanic.

Oznaka mešanice		NC-1630-1	NC-1630-2	NC-1630-3
Cement	Vrsta cementa	CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N	CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	CEM I 52,5 R
	Količina cementa [kg/m ³]	400	400	400
Agregat [kg/m ³]	0/2 (mivka)	264	264	264
	0/4	790	790	790
	4/8	263	263	263
	8/16	439	439	439
Vodovezivno razmerje		0,52	0,52	0,52
Prostorninska masa betona [kg]		2364	2364	2364
Predvidena vsebnost zraka [%]		1,3	1,3	1,3
Predviden posed [cm]		15-18	15-18	15-18



Slika 11: Prikaz sveže betonske mešanice.

4.4 Preiskave sveže mešanice betona

Na svežem betonu smo opravili tri vrste preiskav, ki se nanašajo na konsistenco svežega betona in vsebnost zraka v svežem betonu. Konsistenco svežega betona smo določili s postopkom, ki je potekal po predpisih standarda SIST EN 12350-2 in s postopkom razleza po predpisih standarda SIST EN 12350-5. Vsebnost zraka (por) smo določili skladno s standardom SIST EN 12350-7. Preglednica 10 prikazuje rezultate preiskav svežega betona.

Preglednica 10: Rezultati preiskav svežega betona.

Oznaka mešanice		NC-1630-1	NC-1630-2	NC-1630-3
Posed [cm]	projektirano	15-18	15-18	15-18
	dobljeno	14,5	9,0	12
Razlez [cm]	dobljeno	46,5	40	46,5
Vsebnost por [%]	projektirano	1,3	1,3	1,3
	dobljeno	1,9	1,5	2,5
Temperatura [°C]	betona	16,3	20	16,9
	prostora	15	19,4	15
Vlaga [%]	prostora	39	41	39

4.5 Izdelava preizkušancev

Za izvedbo preizkusov tlačne trdnosti betonov in določanja sprijemnosti med betonom in armaturo smo morali najprej izdelati preizkušance. Za vse vrste betona smo izdelali tri preizkušance za preizkus tlačne trdnosti in tri preizkušance za izvedbo izvlečnega testa. Preizkušance za izvedbo preizkusa tlačne trdnosti smo naredili s pomočjo standardnih kalupov dimenzij 15x15x15 cm. Naslednji korak je bil izdelava preizkušancev za izvlečni test. Tu smo uporabili posebej izdelane kalupe, saj klasičnih kalupov ni bilo možno uporabiti. Kalupe so v namen preiskav v prejšnjem študijskem letu izdelali doc. dr. Drago Saje, študent Andraž Dežman in izr. prof. dr. Jože Lopatič. Ti kalupi so izdelani iz materiala ki ne vpija vode in ne veže s cementom. Zahteve za te preizkušance določa standard SIST EN 10080:2005. Ta zahteva, da armaturna palica prebada kocko na sredini, zato je potrebno zagotoviti odprtine za vgradnjo armaturne palice. Zagotoviti smo morali sidrno dolžino oziroma sprijemno dolžino palice 5 d (SIST EN 10080:2005). Uporabili smo palico premera (d) 20 mm, zato je znašala sidrana dolžina 10 cm. Preostali del palice smo zaščitili z gumijasto cevko in tako preprečili sprijemnost. Notranje stranice vseh kalupov smo pred vgradnjo betona premazali z opažnim ločilnim sredstvom. Beton smo vgradili v kalupe v dveh slojih s pomočjo vibracijske igle. Po enem dnevu smo preizkušance razkalupili, jih označili in položili v vodno kopel sobne temperature, kjer smo jih negovali 28 dni. Po 28 dneh so bili preizkušanci pripravljeni za izvajanje preizkusov.



Slika 12: Priprava preizkušancev za preizkus tlačne trdnosti betona.



Slika 13: Priprava preizkušancev za izvedbo izvlečnega testa.

4.6 Tlačna trdnost betona

Enoosno tlačno trdnost betonov smo merili na pripravljenih standardiziranih betonskih kockah po 28 dneh negovanja v vodi. Tlačna trdnost je bila izmerjena z elektromehaničnim preizkuševalnim strojem za statične tlačne preiskave kapacitete 5000 kN. Pred preizkusom smo natančno izmerili velikost preizkušanca. Tlačno trdnost namreč predstavlja razmerje med tlačno silo in površino preizkušanca.



Slika 14: Enoosni tlačni test.

Preglednica 11 prikazuje povprečne trdnosti betonov v tlaku iz različnih tipov cementsa. Vidimo, da beton NC-1630-1, ki vsebuje osnovni mešani cement z najmanjšim deležem portlandskega klinkerja dosega najmanjšo tlačno trdnost. Beton NC-1630-2 s specialnim mešanim cementom pričakovano

dosega nekoliko višje tlačne trdnosti kot beton NC-1630-1. Razlika v tlačni trdnosti teh dveh betonov je presenetljivo majhna, glede na to, da specialni mešani cement vsebuje 15% več portlandskega klinkerja, kot osnovni mešani cement. Trdnost betona NC-1630-3 v tlaku, kateri vsebuje čisti portlandski cement je 21,6% večja od betona NC-1630-1 in 20,2% večja od betona NC-1630-2. Te vrednosti ne presenečajo, saj čisti portlandski cement vsebuje 95 % portlandskega klinkerja in s tem tudi največji delež mineralov klinkerja v cementu. Pomemben je predvsem mineral alit. Ta v procesu hidratacije cementa tvori produkt imenovan kalcijev silikat hidrat, ki je glavni nosilec trdnosti.

Preglednica 11: Povprečne trdnosti betonov v tlaku pri starosti 28 dni.

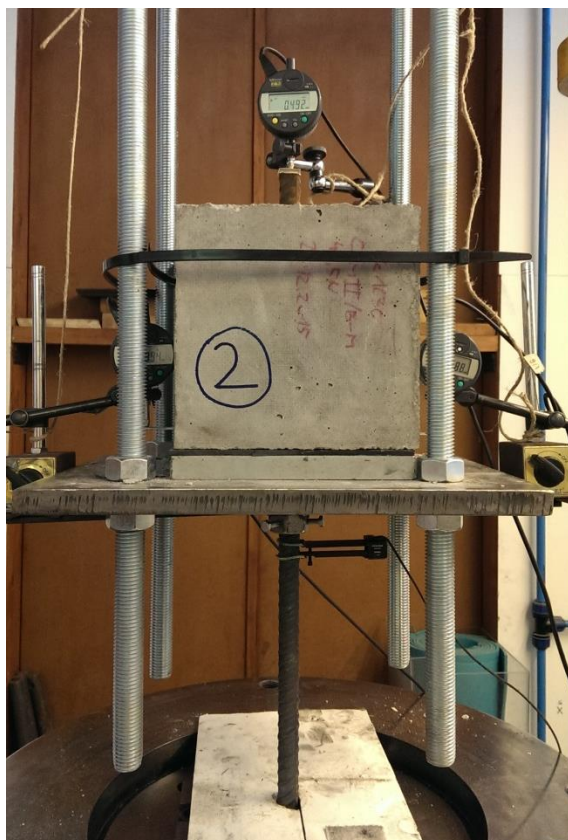
Mešanica	Število preizkušancev	Povprečna tlačna trdnost [kN/cm ²]	Standardna deviacija [kN/cm ²]
NC-1630-1	3	45,8	1,10
NC-1630-2	12	46,6	3,74
NC-1630-3	3	58,4	4,01

4.7 "Pull-out" oziroma izvlečni test

Izvlečni test smo izvedli po standardu, ki je opisan v poglavju 3.2. Test smo izvedli v prostorih laboratorija Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Uporabili smo preizkuševalno napravo Instron s kapaciteto obremenjevanja $\pm 1000\text{kN}$, prikazano na sliki 15 in 16. Preizkušavec smo položili na pripravljeno jekleno nosilno konstrukcijo, ki je vpeta v zgornji nepomični del naprave. Spodnji konec armaturne palice smo s pomočjo čeljusti vpeli v hidravlični bat, ki ima hoda 100 mm. Na preizkušavec smo namestili dodatne merilne urice za merjenje pomika armaturne palice, na palico pa je bil nameščen ekstenziometer za merjenje deformacije palice. Z vsemi naštetimi nastavitvami je bil preizkušavec pripravljen za preizkus. Preizkus se je začel s pomikanjem bata. Vanj je bila vpeta armaturna palica, ki smo jo na ta način natezno obremenjevali. Hitrost bata v_p [N/s] predpisuje standard SIST EN 10080:2005 z enačbo: $v_p = 0,56 d^2$, kjer je d premer armaturne palice v mm. Podatki o pomiku bata in sili v batu ter pomiku in deformaciji armaturne palice so se sproti beležili preko krmilne naprave na programski vmesnik za zajem rezultatov. Krmilna naprava beleži te podatke na vsake 0,05 sekunde. Test smo izvajali dokler se ni porušil stik med armaturno palico in betonom.



Slika 15: Pripravljen preizkušaneec za izvedbo izvlečnega testa.



Slika 16: Merilne urce na kocki in ekstenziometer na armaturni palici.

4.8 Rezultati testa

Po tehnični izvedbi testa sledi analiza izmerjenih rezultatov. Naprava nam zabeleži podatke o pomiku hidravličnega bata, silo v batu, pomik palice izmerjen z urico na prostem koncu palice in deformacije armaturne palice izmerjene z ekstenziometrom. Za primerjavo sprijemnih napetosti in zdrsa palice je potrebno izmerjeno silo (F) pretvoriti v sprijemno napetost (τ). Sprijemno napetost določimo tako, da silo delimo s sprijemno površino (S) med palico in betonom. Izračun sprijemne napetosti je prikazan z naslednjim izrazom:

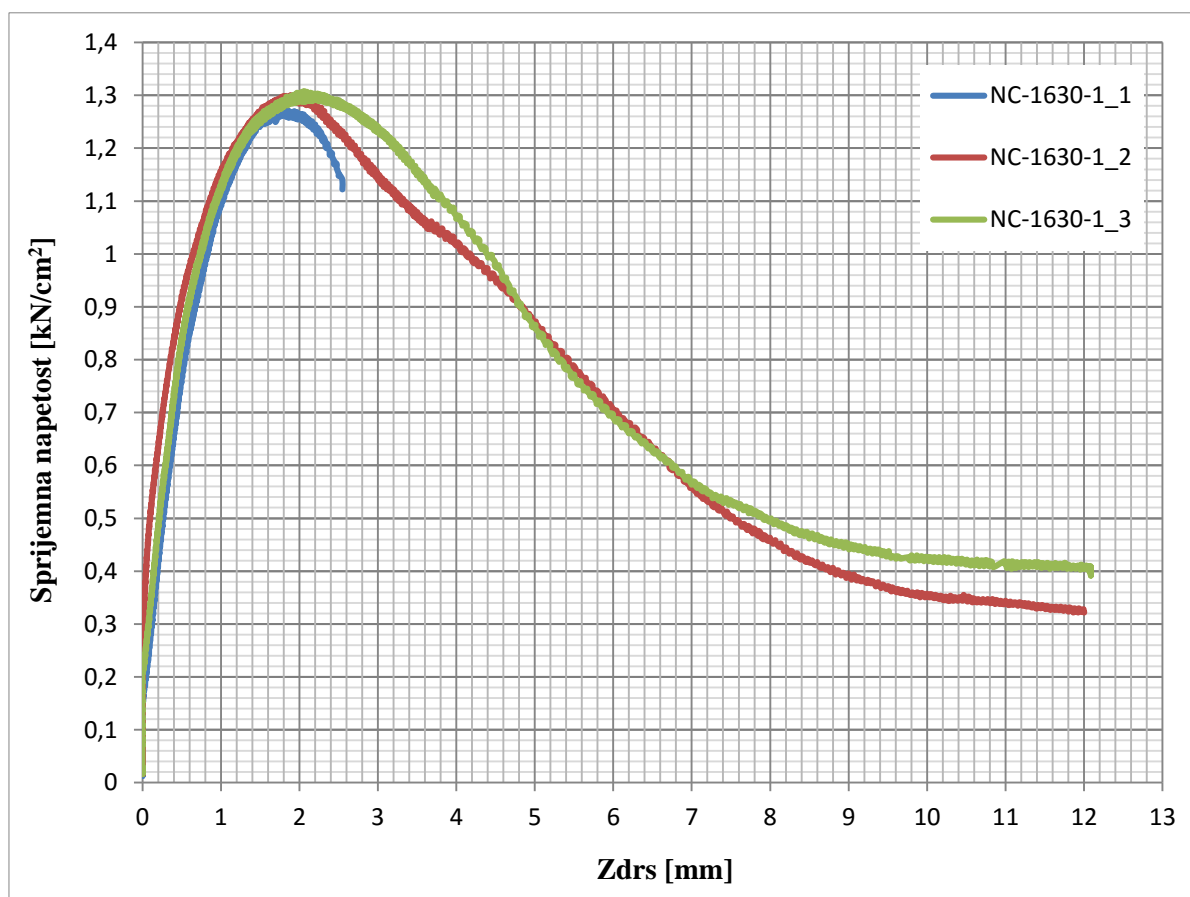
$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi d * 5d} = \frac{F}{5\pi d^2} \text{ [kN/cm}^2\text{]},$$

Na ta način smo za vse preizkušance izračunali sprijemne napetosti. V nadaljevanju diplomske naloge bom tako s pomočjo grafov predstavil zvezo med sprijemno napetostjo in zdrsom. Prav tako bom primerjal rezultate posameznih preizkušancev in analiziral vpliv različnih vrst cementa na sprijemne napetosti.

4.8.1 Beton s osnovnim mešanim portlandskim cementom

Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom je za vse tri preizkušance prikazana na grafikonu 1. Vidimo, da na začetku napetosti naraščajo, palica pa še ne začne drseti. To je območje, kjer je sprijemnost zagotovljena s kemično adhezijo. Pri napetosti $0,2 \text{ kN/cm}^2$ kemična adhezija popusti, začnejo nastajati cepilne razpoke in začne se povečevati zdrs palice. Sprijemnost je tu zagotovljena z zaklinjanjem reber palice v okoliški betonski obroč. Krivulje prikazujejo, da je odnos med sprijemnostjo in zdrsom do maksimalne sprijemne napetosti pri vseh preizkušancih podoben. Krivulje naraščajo skoraj linerano in pri zdrs palice 2 mm dosežemo maksimalne sprijemne napetosti. Po doseženem maksimumu se okoliški beton začne drobiti, zdrs se še hitreje povečuje, napetosti pa padajo. Vidimo, da se krivulja 1 kmalu po doseženem maksimumu zaključi. To je posledica porušitve preizkušanca (slika 17). Cepilne razpoke so se začele širiti globlje v betonsko kritje, beton ni mogel več prenašati nateznih napetosti, zato se je zgodila nenadna delitev preizkušanca. Krivulji 2 in 3 enakomerno padata do zdrsa palice približno 10 mm, kjer napetosti prenehajo padati in preidejo v konstanten potek. To se zgodi, ko sili izvleka nasprotuje le še trenje med palico in okoliškim betonom. Pri tema preizkušancema se zgodi porušitev po stiku, kar pomeni, da se armaturna palica izvleče, zunanost betona pa ostane nepoškodovana.

Grafikon 1: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1630-1.



Preglednica 12 prikazuje največje dosežene sprijemne napetosti preizkušancev, povprečno sprijemno napetost in standardno deviacijo sprijemnih napetosti. Standardna deviacije prikazuje, da je raztros dobljenih vrednosti majhen. Povprečna sprijemna napetost za betonske preizkušance iz cementa CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N znaša $1,29 \text{ kN/cm}^2$.

Preglednica 12: Rezultati izvlečnega testa za beton NC-1630-1.

NC-1630-1	Največja sprijemna napetost [kN/cm^2]	Povprečna sprijemna napetost [kN/cm^2]	Standardna deviacija [kN/cm^2]
1	1,27	1,29	0,02
2	1,29		
3	1,31		



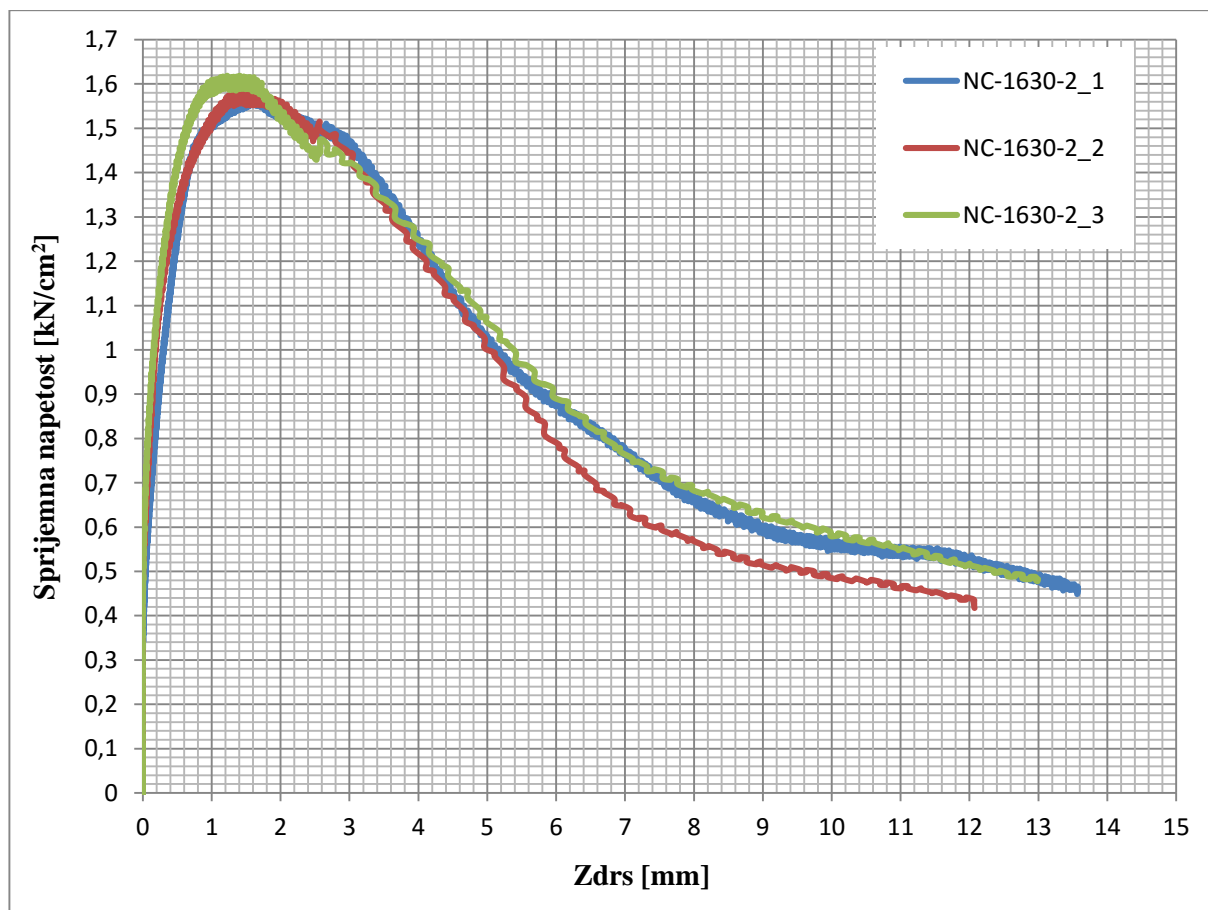
Slika 17: Porušitev preizkušanca NC-1630-1_1 po diagonali.

4.8.2 Beton s specialnim mešanim portlandskim cementom

Na grafikonu 2 je prikazana zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1630-2, ki vsebuje cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R. Razlika med tem in osnovnim cementom je, da ta vsebuje večji delež portlandskega klinkerja in manj dodatkov. Opazimo, da imajo vse tri krivulje na grafu podoben potek. Maksimalne sprijemne napetosti dosežemo pri zdrs med 1 in 2 mm, sledi padec napetosti in povečevanje zdrs. Proti koncu se pojavi zmanjšanje padanja sprijemne napetosti, krivulje prehajajo v konstanten potek, zdrs pa se povečuje do izvleka palice. Pri vseh preizkušancih je prišlo do porušitve po stiku beton – armaturna palica.

Preglednica 13 prikazuje največje sprijemne napetosti, povprečno vrednost in standardno deviacijo. Povprečje sprijemne napetosti pri teh preizkušancih je $1,59 \text{ kN/cm}^2$. Ta je v primerjavi s preizkušanci iz osnovnega mešanega cementa za 19% večja.

Grafikon 2: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1930-2.



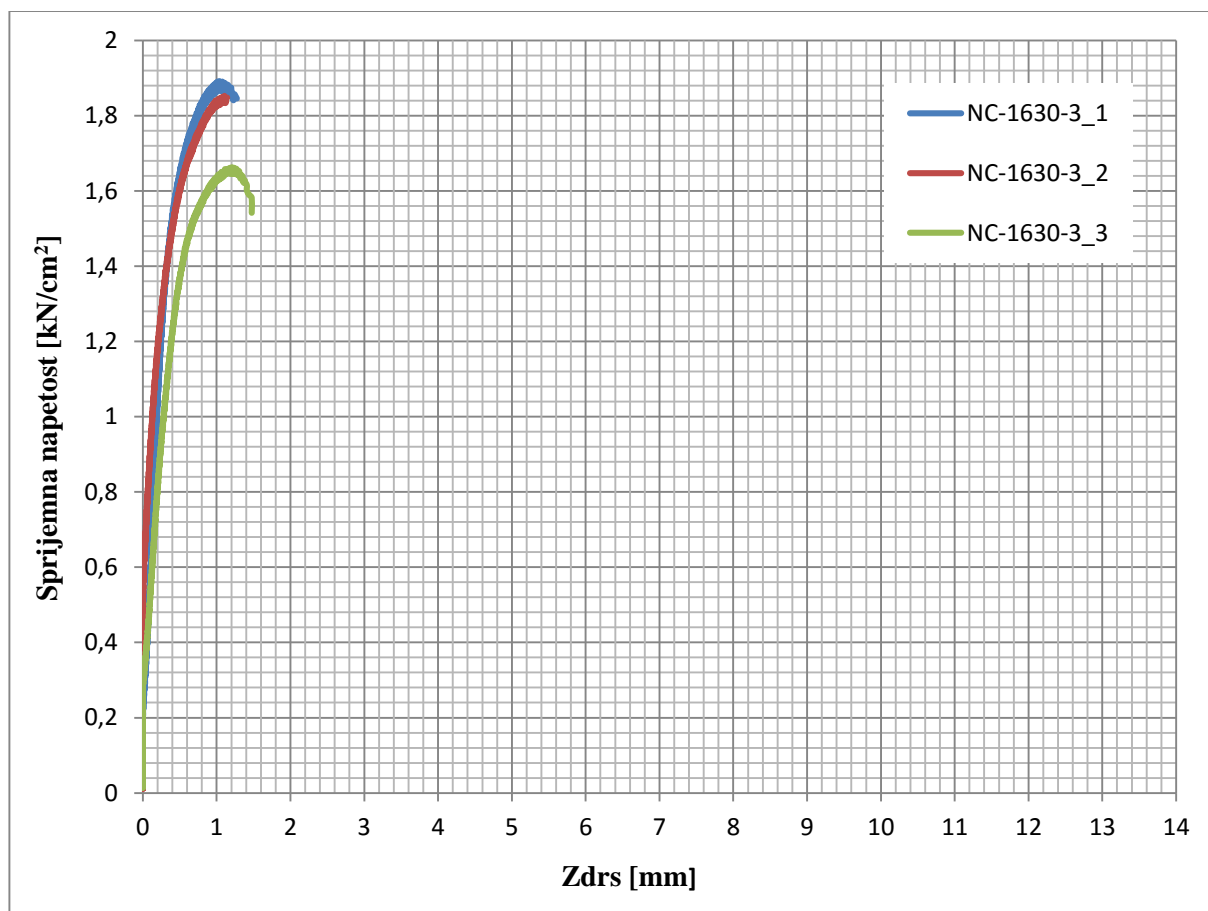
Preglednica 13: Rezultati izvlečnega testa za beton NC-1630-2.

NC-1630-2	Največja sprijemna napetost [kN/cm ²]	Povprečna sprijemna napetost [kN/cm ²]	Standardna deviacija [kN/cm ²]
1	1,58	1,59	0,02
2	1,58		
3	1,62		

4.8.3 Beton s čistim portlandskim cementom

Zvezo med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1630-3 prikazuje grafikon 3. Ta beton vsebuje čisti portlandski cement CEM I 52,5 R. V začetnem delu potekajo krivulje podobno kot pri preizkušancih iz betona NC-1630-1 in NC-1630-2. Zdrs armaturne palice se začne povečevati pri napetosti okoli 0,5 kN/cm² in skoraj linearno narašča do maksimalne sprijemne napetosti. Maksimalne sprijemne napetosti dosežemo pri zdrs 1 mm, kjer začnejo krivulje spreminjati potek in beležimo začetek padanja napetosti. Opazimo, da se krivulji 1 in 3 zaključita takoj, ko se pojavi padec napetosti, krivulja 2 pa se zaključi v trenutku, ko dosežemo maksimalno sprijemno napetost. To je posledica porušitve preizkušancev, ki se je zgodila v obliki razcepitve preizkušancev. Slika 18 prikazuje razcep preizkušanca NC-1630-3_2 ob straneh, slika 19 pa razcep preizkušanca NC-1630-3_3 po diagonali. Vzrok za cepitev preizkušancev predstavlja tlačna trdnost tega betona. Ker ta beton vsebuje čisti portlandski cement v katerem je 95% portlandskega klinkerja, dosega visoke tlačne trdnosti. Betonski obroč ob armaturni palici je dovolj trden, zato se ob povečevanju napetosti ne drobi. Mikro razpoke se pri večjih napetostih širijo globlje v betonsko jedro. Beton ne more prenesti nateznih napetosti, zato se razcepi.

Grafikon 3: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za beton NC-1630-3.



V preglednici 14 so podane največje sprijemne napetosti in njihovo povprečje za preizkušance. Povprečna sprijemna napetost za preizkušance iz betona NC-1630-3 znaša $1,80 \text{ kN/cm}^2$. Opazimo, da je povprečna sprijemnost teh preizkušancev 11,7% višja od povprečne sprijemnosti preizkušancev iz betona NC-1630-2 in 28,3% višja od povprečne sprijemnosti betona NC-1630-1.

Preglednica 14: Rezultati izvlečnega testa za beton NC-1630-3.

NC-1630-3	Največja sprijemna napetost [kN/cm^2]	Povprečna sprijemna napetost [kN/cm^2]	Standardna deviacija [kN/cm^2]
1	1,89	1,80	0,10
2	1,85		
3	1,66		



Slika 18: Porušitev preizkušanca NC-1630-3_2.

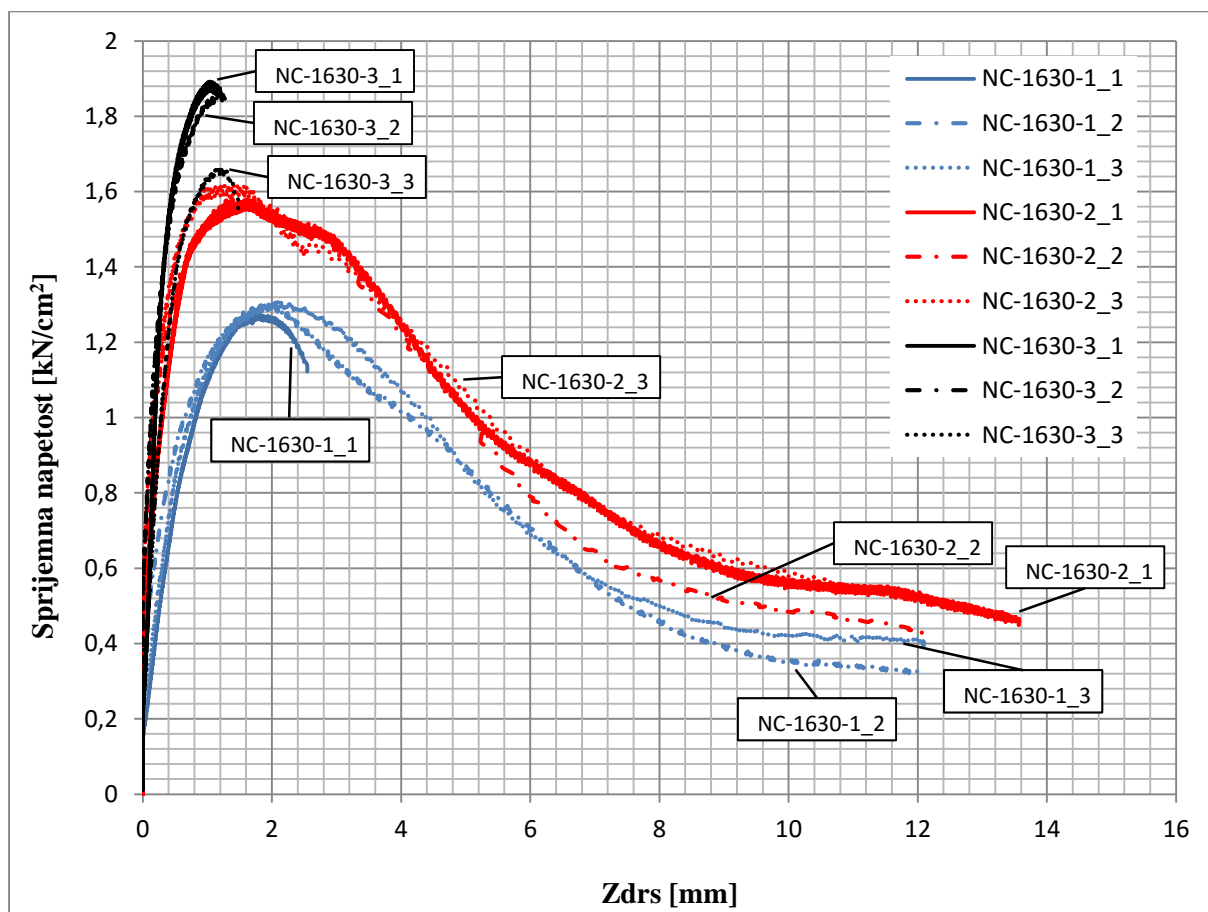


Slika 19: Porušitev preizkušanca NC-1630-3_3.

4.8.4 Primerjava preizkušancev in različnih vrst cementa

Na grafikonu 4 so združene krivulje, ki opisujejo zveze med sprijemno napetostjo in zdrsom, za vse obravnavane preizkušance iz različnih vrst cementa. Viden je vpliv različnih vrst cementa na sprijemnosti med betonom in armaturo. Opazimo, da imata preizkušanca iz betona NC-1630-2 in NC-1630-3 v območju naraščanja napetosti zelo podoben potek, medtem ko se pri preizkušancu NC-1630-1 začetni zdrs palice pojavi pri nižji napetosti in se hitreje povečuje. Preizkušanci NC-1630-3 in NC-1630-2 dosežejo maksimalne sprijemne napetosti pri zdrs približno 1 mm, preizkušanci NC-1630-1 pa dosežejo maksimum pri zdrs 2 mm.

Grafikon 4: Primerjava zvez sprijemna napetost - zdrs za betone iz različnih vrst cementa.



Preglednica 15 prikazuje primerjavo povprečnih vrednosti sprijemnih napetosti za betone iz različnih vrst cementa. Podrobnejši pregled uporabljenih vrst cementov je podan v poglavju 4.2.2. Vidimo, da dosega betoni NC-1630-2 za 18,9 % večje sprijemne napetosti ob betonov NC-1630-1. Betoni NC-1630-3 pa za 11,7 % večje sprijemne napetosti od betonov NC-1630-2. Iz primerjave sprijemnih

napetosti betonov vidimo, da je sprijemnost betona, ki vsebuje cement z največjim deležem cementnega klinkerja največja. Razlog je v tem, da z večanjem deleža cementnega klinkerja večamo tudi delež mineralov cementnega klinkerja v cementu. Ti minerali dajejo cementu glavne vezivne lastnosti in imajo največji vpliv na trdnost betona (več o mineralih in o njihovem vplivu na cementni kamen je predstavljeno v poglavju 2.2 in 2.5). Opazimo, da je povečevanje sprijemnih napetosti skoraj sorazmerno s povečevanjem deleža cementnega klinkerja v cementu. Torej, če povečamo delež cementnega klinkerja v cementu za 15 % lahko opazimo povečanje sprijemnih napetosti za približno 15 %.

Preglednica 15: Primerjava povprečnih vrednosti sprijemnih napetosti za betone iz različnih vrst cementa.

Oznaka betona	Vrsta cementa	Povprečna sprijemna napetost [kN/cm²]
NC-1630-1	CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N	1,29
NC-1630-2	CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R	1,59
NC-1630-3	CEM I 52,5 R	1,80

5 ZAKLJUČEK

Osnovna komponenta v betonu, ki v procesu hidratacije cementa preide iz paste v trdno stanje, je cement. Ta je sestavljen iz cementnega klinkerja in dodatkov. S spreminjanjem deleža cementnega klinkerja in dodatkov cementu dobimo različne vrste cementa. Diplomaska naloga zajema rezultate vpliva različnih vrst cementa na sprijemnost med betonom in armaturo. V eksperimentalnih preiskavah smo na preizkušancih iz različnih vrst cementa izvajali izvlečni test in spremljali obnašanje stika med betonom ter armaturo.

Preiskovali smo tri vrste betonskih mešanic. Iz vsake mešanice smo izdelali po tri preizkušance. Mešanice so se razlikovale le v vrsti uporabljenega cementa, ostale sestavine betonov pa so ohranile enak delež. Uporabili smo osnovni mešani portlandski cement, specialni mešani portlandski cement in čisti portlandski cement. Preizkušanci so imeli obliko kocke v katero je bila vstavljena armaturna palica. S pomočjo izvlečne naprave smo palico natezno obremenjevali. Pri vseh preizkušancih smo merili zdrs na prostem koncu armaturne palice in izvlečno silo. Izdelali smo diagrame odvisnosti sprijemnih napetosti od zdrsa in analizirali rezultate. Ugotovili smo, da ima cement pomemben vpliv pri zagotavljanju sprijemnosti med betonom in armaturo. Največjo sprijemnost smo dosegli v primeru betona, ki je vseboval čisti portlandski cement. Le-ta vsebuje 95 % cementnega klinkerja. Sledili so mu preizkušanci iz specialnega mešanega portlandskega cementa, ki vsebuje 80 % cementnega klinkerja. Najslabšo sprijemnost smo dosegli pri preizkušancih iz mešanega portlandskega cementa s 65 % deležem cementnega klinkerja. Iz rezultatov preiskav lahko razberemo, da je povečanje sprijemne napetosti skoraj sorazmerno povečanju cementnega klinkerja v cementu.

Zdrs armaturne palice se je pri preizkušancih, ki so vsebovali čisti portlandski cement in pri preizkušancih, ki so vsebovali specialni mešani cement začel pojavljati pri enaki sili, medtem ko se je zdrs pri preizkušancih, ki so vsebovali osnovni mešani cement pojavil pri manjši izvlečni sili. Maksimalne sprijemne napetosti smo pri vseh preizkušancih dosegli pri zdrsu armaturne palice med 1 in 2 mm.

Pri izvajanju izvlečnega testa na preizkušancih, ki so vsebovali čisti portlandski cement, je prišlo pri vseh preizkušancih, po dosegu maksimalne sprijemne napetosti, do nenadne porušitve v obliki razcepitve preizkušancev. To pomeni, da so se mikro razpoke širile iz stičnega območja globlje v betonski obroč. Beton ni več prenesel nateznih napetosti, zato se je razcepil. V tem primeru bi bilo smiselno betonu dodati ojačilna vlakna.

VIRI

Dureković, A. 1996. Cement, cementni kompozit i dodaci za beton. Zagreb, Institut građevinarstva Hrvatske, Školska knjiga: 358 str.

Hočevar, A. 2013. Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 159 str.

Ipavec, V., Vuk, T. 2010. Vpliv veziva na fazno sestavo strjenega betona. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F (ur.). Beton 21. stoletja: 6. redna letna konferenca ZBS, Lipica, 25. – 26. marec, 2010. Ljubljana, Svet strokovnjakov Združenja za beton Slovenije: str. 68-77.

Izjava o lastnostih cementa CEM II/B-M (LL-V) 42,5 N. 2016. Anhovo, Salanit Anhovo: loč. pag.

Izjava o lastnostih cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R. 2015. Anhovo, Salanit Anhovo: loč. pag.

Izjava o lastnostih cementa CEM I 52,5 R. 2016. Anhovo, Salanit Anhovo: loč. pag.

Kumar Mehta, P., Monteiro, J.P.M. 2006. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. University of California at Berkeley, Department of Civil and Environmental Engineering: 660 str.

Muravljov, M. 2000. Osnovi teorije in tehnologije betona. Beograd, Građevinska knjiga: 451 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 2001. La Jolla, University of California San Diego, Department of Structural Engineering: 14 str.

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

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

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

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

Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. V: Zajc, A (ur.). Zbornik 14. Slovenskega kolokvija o betonih – Posebne lastnosti betonov z dodatki, Ljubljana, 29. maj 2007. Ljubljana, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1-7.

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