

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



ALJAŽ FRANK

**PRIMERJAVA NATEZNE TRDNOSTI IN
SPRIJEMNOSTI Z BETONOM MED JEKLENO IN
BAZALTNO ARMATURO**

DIPLOMSKA NALOGA

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

Ljubljana, 2019

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Kandidat:

ALJAŽ FRANK

**PRIMERJAVA NATEZNE TRDNOSTI IN
SPRIJEMNOSTI Z BETONOM MED JEKLENO IN
BAZALNO ARMATURO**

**COMPARISON OF TENSILE STRENGTH AND
THE BOND WITH CONCRETE BETWEEN STEEL
AND BASALT REBARS**

Mentor/-ica:

doc. dr. Drago Saje

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

/

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.32(043.2)
Avtor:	Aljaž Frank
Mentor:	doc. dr. Drago Saje
Somentor:	/
Naslov:	Primerjava natezne trdnosti in sprijemnosti z betonom med jekleno in bazaltno armaturo
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski strokovni študij
Obseg in oprema:	44 str., 39 sl., 9 pregl., 8 graf. 44 p.,
Ključne besede:	beton običajne trdnosti, beton visoke trdnosti, bazaltna armatura, jeklena armatura, sprijemna trdnost, izvlečna trdnost, natezni test, izvlečni test

Izvleček

V diplomski nalogi obravnavamo sprijemnost med bazaltnimi armaturnimi palicami s premerom 12 mm in betonom. Veljavni evropski standardi za projektiranje konstrukcij bazaltne armature še ne obravnavajo. Izvedemo natezni in izvlečni preizkus armaturnih palic. Pri laboratorijskem delu sledimo smernicam iz standarda SIST EN 10080:2005. Zaradi specifičnosti bazaltne armature preizkušance posebej pripravimo in prilagodimo izvedbo preizkusa. Natezni test izvajamo tako, da v čeljusti vpeto armaturno palico natežno obremenjujemo do pretrga. Pri izvlečnem preizkusu pa iz betonske kocke izvlečemo armaturno palico. V okviru eksperimentalnega dela preverjamo dve vrsti betona – običajno in visoko trdno. Za natezni preizkus pripravimo 3 vzorce, za test sprijemne trdnosti pa 6, po 3 za vsako vrsto betona. Rezultate lastnih preiskav nateznega in izvlečnega testa za bazaltno armaturo primerjamo z rezultati za jekleno armaturo, ki so objavljeni v diplomskih delih predhodnikov. Ugotovimo, da bazaltne palice prenesejo veliko večjo natežno napetost od jeklenih, a so krhek material. Izvlečni test pokaže, da se bazaltna armatura obnaša podobno kot jeklena. V primeru betona običajne trdnosti in bazaltne armature dosežemo večjo sprijemno trdnost kot v primeru običajnega betona in jeklene armature, v primeru betona visoke trdnosti pa je vrednost sprijemne trdnosti za bazaltno armaturo manjša kot za jekleno.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	691.32(043.2)
Author	Aljaž Frank
Supervisor:	Assist. Prof. Drago Saje, Ph. D.
Co-advisor:	/
Title:	Comparison of tensile strength and the bond with concrete between steel and basalt rebars
Document type:	Graduation Thesis - Higher professional studies
Notes:	44 p., 39 fig., 9 tab., 8 graph.
Keywords:	Normal strength concrete, high strength concrete, basalt rebars, steel rebars, bond strength, tensile strength, tensile test, pull-out test

Abstract

The thesis addresses the bond strength between concrete and basalt rebars with a diameter of 12 mm in comparison with steel rebars. The existing European standards have not taken basalt rebars into consideration yet. Both the tensile test as well as the pull-out test were carried out in order to check the rebars. The laboratory activities were carried out following the SIST EN 10080:2005 standard. Since the used material has its own specifics, the test samples as well as the testing procedure were adjusted in advance. When it came to the tensile test, reinforcing bars were observed under the impact of the tensile load until they were torn. The reinforcing bars were pulled out of concrete cubes when it came to the pull-out test. Two different types of concrete were analysed – normal strength concrete and high strength concrete. There were three samples used in order to carry out the tensile test whereas the pull-out test was carried out using 6 samples – 3 samples per each type of concrete. The results of the tests that focused on analysing basalt rebars were compared to the results of the tests that focused on steel rebars. One can observe that the basalt reinforcement bars can bear a higher tensile stress. However, they represent a more fragile material. The pull-out test proves that the basalt rebars and steel rebars behave in a similar way. In the case of concrete of normal strength and basalt rebars, a higher bond strength is achieved than in the case of conventional concrete and steel rebars, and in the case of high strength concrete, the value of bond strength for basalt rebars is less than for steel.

ZAHVALA

Zahvaljujem se doc. dr. Dragu Sajetu za mentorstvo, pomoč in nasvete pri izdelavi diplomske naloge ter pri izvedbi laboratorijskih preizkusov. Zahvaljujem se tudi doc. dr. Jožetu Lopatiču za strokovno pomoč pri izvedbi eksperimentalnih preiskav in laborantu Katedre za preizkušanje materialov in konstrukcij za pomoč pri eksperimentih. Za strokovni prevod v angleščino se zahvaljujem Tadeji Logar, univ. dipl. angl. in slov.

Za podporo in pomoč pri študiju se zahvaljujem družini, študijskim kolegom in prijateljem.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	II
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA.....	IV
KAZALO SLIK.....	VII
KAZALO PREGLEDNIC	IX
KAZALO GRAFIKONOV.....	X
1 UVOD.....	1
2 BETON, ARMIRAN Z BAZALTNO ARMATURO	2
2.1 Bazaltna armatura	2
2.2 Beton.....	3
2.3 Sprjemnost betona in armature	6
2.3.1 Mehanizmi sprjemnosti	7
3 STANDARDNI PREIZKUSI.....	10
3.1 Preiskave sveže betonske mešanice	10
3.1.1 Metoda poseda po SIST EN 12350-2.....	10
3.1.2 Metoda razleza po SIST EN 12350-5	11
3.2 Tlačni preizkus betonskih prizem	11
3.2.1 Standardizirani preizkušanci po SIST EN 12390-1.....	12
3.2.2 Izdelava in nega vzorcev po SIST EN 12390-2	12
3.2.3 Izvedba tlačnega preizkusa po SIST EN 12390-3	13
3.3 Natezni preizkus armature	14
3.4 Izvlečni preizkus	15
3.4.1 Izdelava vzorcev	15
3.4.2 Preizkuševalna oprema	16
3.4.3 Postavitev preizkušanca	16
4 LABORATORIJSKO DELO	17
4.1 Uporabljeni materiali.....	17
4.1.1 Agregat	17
4.1.2 Cement	18
4.1.3 Dodatki in voda	18
4.1.4 Priprava betona običajne trdnosti.....	19
4.1.5 Priprava betona visoke trdnosti.....	20

4.1.6	Preiskave sveže betonske mešanice	20
4.1.7	Palice bazaltne armature	21
4.2	Priprava preizkušancev na testiranje.....	22
4.2.1	Betonske kocke za izvlek armature	22
4.2.2	Betonske prizme	24
4.2.3	Armaturne palice	24
4.3	Izvedba preizkusov.....	26
4.3.1	Tlačni preizkus	26
4.3.2	Natezni preizkus	27
4.3.3	Izvlečni preizkus.....	28
4.4	Rezultati laboratorijskega dela.....	30
4.4.1	Tlačni preizkus betona običajne in visoke trdnosti.....	30
4.4.2	Natezni preizkus bazaltne armature	31
4.4.3	Izvlečni preizkus.....	32
4.4.3.1	Beton običajne trdnosti in bazalna armatura	33
4.4.3.2	Beton visoke trdnosti in bazalna armatura	34
4.5	Primerjava rezultatov med jekleno in bazaltno armaturo	35
4.5.1	Natezni preizkus	35
4.5.2	Izvlečni preizkus.....	36
4.5.2.1	Beton običajne trdnosti in armatura	36
4.5.2.1	Beton visoke trdnosti in armatura	38
4.5.3	Porušitve vzorcev nateznega in izvlečnega preizkusa	39
5	ZAKLJUČEK.....	42
VIRI.....		43

KAZALO SLIK

Slika 1: Bazaltne armaturne palice z ovojem, izvedenim na strjenih palicah (levo) in na deformabilnih palicah s peščenim posipom (desno) (Opara, 2018)	1
Slika 2: Primerjava teže armaturnih palic premera 10 mm iz bazalta (levo) in jekla (desno) v kg/m ^T (Deutsche Basalt Faser GmbH, 2018)	3
Slika 3: Označevanje vrst cementa po standardu SIST EN 197-1:2001 (Žarnić, 2005).....	4
Slika 4: Pomen oznak dodatkov v cementu (Žarnić, 2005)	4
Slika 5: Odstotek dosežene največje tlačne trdnosti betona po dnevih od vgradnje (Homenbuild, 2018)	5
Slika 6: Trdnostni razredi betona po standardu SIST EN 1992-1-1 (Lopatič, 2018)	5
Slika 7: Tipična izvedba reber pri jeklenih armaturnih palicah (Spravljanje betona, 2013).....	6
Slika 8: Vzdolžni prerez armaturne palice v betonu in detajl stika reber in betona s področjem zdrobljenega betona (1), mikrorazpokami (2) in zdrsom (3) (Dežman, 2015).....	7
Slika 9: Razporeditev sil, ki jih obremenjena armatura prenaša na beton (Juvanec, 2015).....	7
Slika 10: Prečni prerez armaturne palice v betonu, ki prikazuje radialne napetosti (1), katere povzročajo cepilne razpoke (2) (Dežman, 2015)	8
Slika 11: Palice bazaltne armature s peščenim posipom in spiralno deformacijo (Deutsche Basalt Faser GmbH, 2018)	8
Slika 12: Pravilen in nepravilen način poseda sveže betonske mešanice (Žarnić in sod., 2015).....	10
Slika 13: Izvedba preiskave in odvzem meritev po metodi razleza (Žarnić in sod., 2015)	11
Slika 14: Standardizirani preizkušanci za tlačni (in natezni) preizkus betona (Žarnić in sod., 2015) ...	12
Slika 15: Postavitev preizkušancev in smer nanašanja tlačne obremenitve (Žarnić in sod., 2015)	13
Slika 16: Določitev razreda tlačne trdnosti betona (Žarnić in sod., 2015)	13
Slika 17: Mesto pojava lokalne kontrakcije jekla (Žarnić in sod., 2015).....	14
Slika 18: Priprava bazaltne armaturne palice na izvedbo nateznega preizkusa (Banibayat, 2011)	14
Slika 19: Kalup za izdelavo preizkušancev izvlečnega testa (SIST EN 10080:2005).....	15
Slika 20: Shematski prikaz postavitve preizkušanca za izvlečni preizkus (SIST EN 10080:2005)	16
Slika 21: Zahteve po SIST EN 197-1:2011 in vrednosti za CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (Salonit Anhovo d. d., 2017)	18
Slika 22: Pripravljene sestavine betona za mešanje v laboratorijskem mešalniku	19
Slika 23: Merjenje poseda (levo) in razleza (desno) sveže betonske mešanice običajne trdnosti	21
Slika 24: Merjenje razleza sveže betonske mešanice visoke trdnosti	21
Slika 25: Lesen kalup z nameščeno armaturo (levo) in pozicija plastičnih cevk (desno)	22
Slika 26: Napolnjeni kalupi z visoko trdnim in običajnim betonom.....	23
Slika 27: Negovanje vzorcev v vodi za izvlečni preizkus.....	23
Slika 28: Betonske prizme.....	24

Slika 29: Vlivanje epoksija v jeklen nastavek (levo) in pripravljeni nastavki za namestitev palic bazaltne armature vanje (desno)	25
Slika 30: Pripravljeni vzorci bazaltnih palic (levo) in detajl armature med nastavkoma (desno)	25
Slika 31: Sušenje epoksija na armaturi vzorcev za izvlečni test	26
Slika 32: Tlačna porušitev betonske prizme	27
Slika 33: Vpetje preizkušanca v preizkuševalni stroj	27
Slika 34: Shematski prikaz izvedbe preizkusa izvlečne trdnosti (Dežman, 2015)	29
Slika 35: Laboratorijska postavitve vzorca izvlečnega preizkusa v preizkuševalno napravo	30
Slika 36: Porušitev vzorca zaradi izvleka epoksi smole iz jeklenega nastavka	40
Slika 37: Zdrs bazaltne armature, ki je prekoračil maksimalno razdaljo zaznavanja merilnika	40
Slika 38: Porušitev z izvlekom na stiku med betonom in bazaltno palico za običajen (levo) in visoko trden beton (desno)	41
Slika 39: Izvlek jeklene armature iz vzorca (levo) in razcep (desno) (Štesl, 2016)	41

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vrste in količine sestavin betona običajne trdnosti (NSC).	19
Preglednica 2: Vrste in količine sestavin betona visoke trdnosti (HSC).	20
Preglednica 3: Rezultati tlačnih preizkusov betonskih prizem po vrstnem redu izvedbe.	30
Preglednica 4: Natezne trdnosti, deformacije in moduli elastičnosti vzorcev bazaltne armature.	32
Preglednica 5: Maksimalna dosežena sprijemna napetost za preizkušance iz običajnega betona.	33
Preglednica 6: Maksimalna dosežena sprijemna napetost za preizkušance iz visoko trdnega betona. ..	34
Preglednica 7: Primerjava natezne trdnosti, deformacije in modula elastičnosti med materialoma	36
Preglednica 8: Primerjava rezultatov izvlečnega testa med armaturama v običajnem betonu.	37
Preglednica 9: Primerjava rezultatov izvlečnega testa med armaturama v betonu visoke trdnosti.	39

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Zveza med natezno napetostjo in deformacijo za palice bazaltne armature.	31
Grafikon 2: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in običajen beton.	33
Grafikon 3: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in visoko trden beton. .	34
Grafikon 4: Zveza med napetostjo in deformacijo za bazaltno in jekleno armaturo.	35
Grafikon 5: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in običajen beton (brez preizkušanca z nižjo doseženo sprijemno trdnostjo).....	36
Grafikon 6: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za rebrasto jekleno armaturo in običajen beton (Dežman, 2015).....	36
Grafikon 7: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in beton visoke trdnosti (Dežman, 2015).....	38
Grafikon 8: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za rebrasto jekleno armaturo in običajen beton (Dežman, 2015).....	38

1 UVOD

Armiran beton je eden najbolj razširjenih in uporabljenih materialov za gradnjo. Zaradi nizkih stroškov vgradnje, preproste izvedbe in priprave ter vsestranskosti je najbolj priljubljen tudi v Sloveniji. Relativno uspešno kljubuje neizprosnim vremenskim pogojem in klimatskim razmeram. Dandanes lahko s pomočjo dodatkov nadzorujemo kemijske procese pred, med in po vgradnji betona, zato nizke ali visoke temperature niso ovira za gradnjo.

V diplomski nalogi obravnavamo eno najpomembnejših prvin armiranega betona – prijemnost med armaturno palico in strjenim betonom. Armatura in beton imata podoben toplotni razteznostni koeficient, kar omogoča izvedbo armiranobetonskih konstrukcij. Najpogosteje se uporablja jeklena armatura, opredeljena v standardu EN 1992-1-1. Veliko manj pa je, predvsem pri nas, poznana bazaltna armatura. Evropski standardi tovrstne armature še ne obravnavajo.

Diplomsko delo sestoji iz petih poglavij in se deli na teoretični in eksperimentalni del. V prvem delu so opisane osnovne značilnosti obravnavanih materialov – bazaltne armature in betona ter poskusi, katere obravnavamo v drugem delu naloge. Poleg izvedbe testov drugi del vsebuje tudi natančno definirane priprave materialov in preizkušancev. Dobljeni rezultati laboratorijskega dela in njihova primerjava med jekleno in bazaltno armaturo pa sklenejo celotno nalogo.

Srijemnost bazaltne armature z betonom je osrednja tema naloge. Namen naloge je bil ugotoviti razlike med srijemnostjo jeklene in bazaltne armature z betonom ter ugotoviti razlike v obnašanju v nategu med obema vrstama armatur. V okviru testiranja smo uporabili dve vrsti betona, in sicer beton visoke in običajne trdnosti ter bazaltno armaturo s premerom 12 mm.

2 BETON, ARMIRAN Z BAZALTNO ARMATURO

Glavna tema naloge je primerjava in analiza sprijemne trdnosti bazaltne armature z običajnim in visoko trdnim betonom ter primerjava obnašanja bazaltne in jeklene armature v nategu. V nadaljevanju podajamo glavne splošne lastnosti v preiskavah uporabljenih materialov, kar nam služi za lažje razumevanje rezultatov preiskav.

2.1 Bazaltna armatura

Bazaltna armatura je material, ki ga pridobivajo s taljenjem bazaltne kamnine, katero s pomočjo hidrostatskega tlaka iztisnejo iz peči v obliki niti. Nato jih ohlajene navijajo na kolute in poleg armaturnih palic oblikujejo še številne ostale produkte iz bazaltne kamnine, kot so vlakna (najpogostejše ostanek vlaken, uporabljenih v armaturnih palicah, možna uporaba kot dodatek betonu), armaturne mreže ipd. (Opara, 2018)

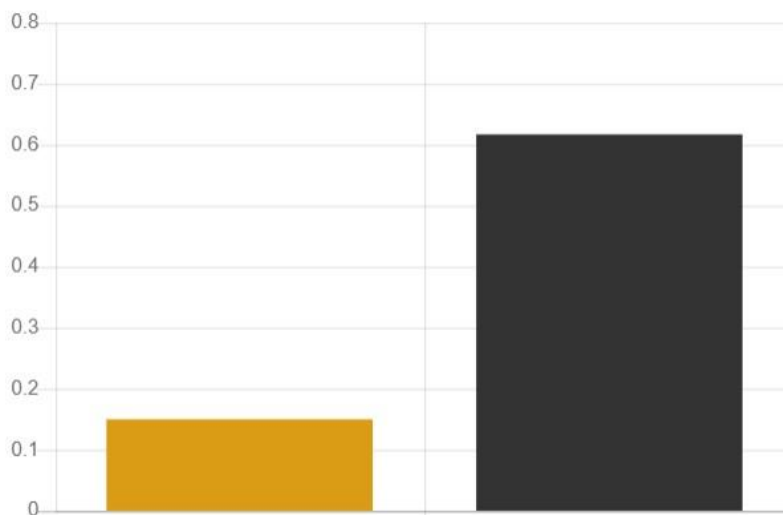
Bazalt je predornina, ki je znana po svoji odpornosti in trdnosti. Je najpogostejša kamnina v Zemljini skorji. Največja nahajališča surovine najdemo pod oceanskim dnom, ki pa je praktično nedostopen vir. Kamnino lahko v velikih količinah pridobivamo tudi na območjih ognjenikov, saj na površje prodre z vulkansko dejavnostjo. (Opara, 2018)

Načeloma poznamo dva načina izvedbe ovoja armature iz bazaltnih vlaken, ki služi za povezavo vlaken v enotno celoto. Na palice se lahko ovoj nanese v značilni spiralni obliki že v zgodnejši fazi proizvodnje, ko so palice še vedno deformabilne, zato ovoj povzroči deformacije in armaturi da značilno obliko. Navadno sledi še nanos končnega sloja in peščenega posipa, ki poveča sprijemno kapaciteto armature z betonom. Možna izvedba pa je tudi ovitje že strjenih palic; v tem primeru se palice ne deformirajo v spiralni obliki, ovoj pa pripomore k še boljši sprijemnosti z betonom. Tako ovoj na nek način deluje podobno kot rebra pri običajni jekleni armaturi. Pri eksperimentalnem delu smo uporabili bazaltne palice s posipom (slika 1). Vsekakor bodo preizkusi v nadaljevanju pokazali, ali se takšen način izdelave armature lahko primerja z uveljavljenimi rebrastimi jeklenimi armaturnimi palicami. (Opara, 2018)



Slika 1: Bazaltne armaturne palice z ovojem, izvedenim na strjenih palicah (levo) in na deformabilnih palicah s peščenim posipom (desno) (Opara, 2018)

V nasprotju z jeklom so armaturne palice iz bazalta približno trikrat lažje (slika 2) in prenesejo veliko večjo natezno napetost, kar omogoča lahke in predvsem konstrukcije z večjimi razpetinami. Imajo pa nižji modul elastičnosti, kar pomeni, da so manj duktilne od jekla. Gre za odporen gradbeni material, primeren za agresivna okolja (strukture v morskem okolju), saj ne korodira. Odlikuje ga tudi požarna varnost in trajnost, za organizme je popolnoma varen material. Podobno kot pri lesu imamo opravka z anizotropnim materialom; natezna trdnost je znatno večja od tlačne in strižne trdnosti, slednji sta odvisni predvsem od kvalitete lepil in smol, ki povezujejo vlakna v celoto. Lepila in smole za vlakna v armaturi predstavljajo okrog 20 %, ostalih 80 % so bazaltne vlakna. (Technobasalt, 2019)



Slika 2: Primerjava teže armaturnih palic premera 10 mm iz bazalta (levo) in jekla (desno) v kg/m^T
(Deutsche Basalt Faser GmbH, 2018)

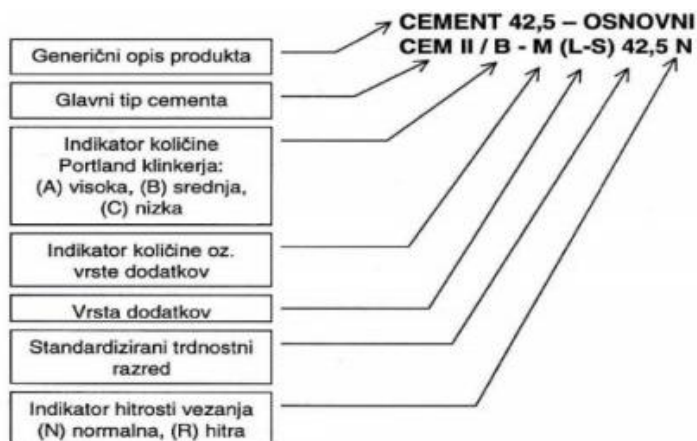
V splošnem se bazalna armatura odlično obnese v zahtevnih, agresivnih okoljih, kjer je običajno armiran beton močno izpostavljen koroziji armature in kratki življenjski dobi, potres oz. dinamične obremenitve pa niso merodajna obtežba. Kljub veliko večji natezni trdnosti, je armatura iz bazaltnih vlaken bolj občutljiva na dinamično obtežbo in ni sposobna vidnejšega duktilnega obnašanja. Zaradi majhne lastne teže pa omogoča gradnjo lahkih betonskih konstrukcij, saj znatno zmanjša lastno težo na ta način armiranega betona.

2.2 Beton

Beton je široko uporaben material za najrazličnejše konstrukcijske in nekonstrukcijske sklope. Na lastnosti materiala neposredno vplivajo komponente, njihova kvaliteta in razmerje v mešanici. Beton je kompozit, ki v glavnem sestoji iz agregata, cementa, vode in raznih dodatkov.

Agregat, ki daje betonu skelet, običajno predstavlja kar tri četrtine volumna betonske mešanice. Poznamo agregat aluvialnega izvora, katerega pridobivamo v gramoznicah, in drobljeni agregat, ki nastane z drobljenjem večjih kamnitih gmot. Zaradi ostrih robov drobljen agregat zagotavlja višjo kvaliteto betona, a je načeloma težje vgradljiv. Velikost zrn je prav tako pomemben način ločevanja med agregati; grob agregat vsebuje zrna s premerom nad 4 mm, droben pa od 0 do 4 mm. Sejalna analiza, ki je najbolj pogost način določanja zrnivosti, izvajamo s pomočjo sit raznih odprtín. Agregat, ki pade skozi zgornje sito in se ustavi na nižjem, imenujemo frakcija. Za določitev zrnivosti poznamo frakcije 0/0.125 mm, 0.125/0.25 mm, 0.25/0.5 mm, 0.5/1 mm, 1/2 mm, 2/4 mm, 4/8 mm, 8/16 mm, 16/32 mm, 32/63 mm in 63/125 mm. (Žarnić, 2005)

Glavna sestavina cementa so kalcijevi silikati C₃S. Gre za hidravlično vezivo, ki se strjuje ob reakciji z vodo; rezultat je cementni kamen, katerega naloga je povezava frakcij agregatov, kar betonu daje trdnost. Glede na standardno oznako za cement lahko prepoznamo količino klinkerja, količino in vrsto dodatkov, trdnostni razred ter hitrost vezanja (sliki 3 in 4). (Leban, 2018)



Slika 3: Označevanje vrst cementa po standardu SIST EN 197-1:2001 (Žarnić, 2005)

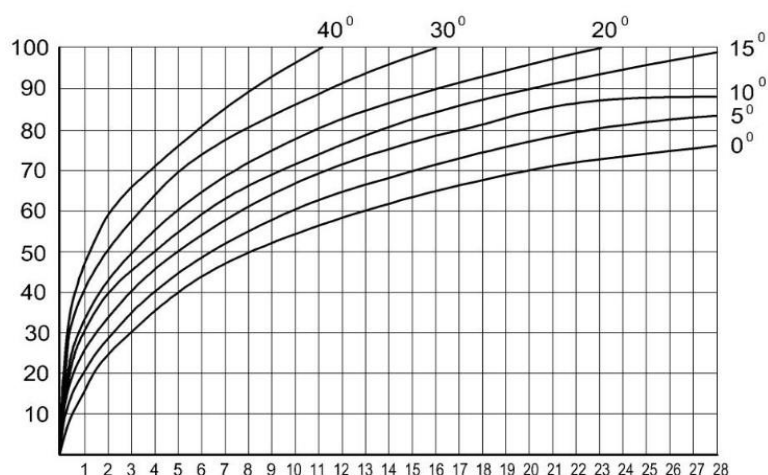
Oznaka dodatka	Ime dodatka
S	Granulirana žindra
D	Mikrosilika
P	Naravni pucolani
Q	Naravni kalcinirani pucolani
V	Silikatni elektrofilterski pepel
W	Karbonski elektrofilterski pepel
T	Žgani skriljavec
L	Apnenec
LL	Apnenec
M	Dva ali več od zgoraj naštetih dodatkov

Slika 4: Pomen oznak dodatkov v cementu (Žarnić, 2005)

Osnovna sestavina betonske zmesi je vsekakor voda, ki cement in agregat poveže v homogeno zmes ustrezne konsistence in po 28 dneh v cementni kamen. Voda za pripravo betonske mešanice ne sme vsebovati snovi, ki bi lahko negativno vplivale na končno kvaliteto strjenega betona ali na korozijo armature (patogene snovi). Običajno se uporablja kar pitna voda iz vodovodnega omrežja, ki je najkvalitetnejša in najdostopnejša.

Vodocementno razmerje, ki je razmerje med količino vode in cementa, ima največji vpliv na lastnosti in kvaliteto tako svežega kot strjenega betona. Pri betonu višje trdnosti, ki smo ga tudi vključili v preizkuse, je količina vode, predvsem zaradi dodatkov, manjša. Za idealno vodocementno razmerje se smatra vrednost 0,38, saj se tako hidratizira vsa količina cementa. V praksi je številka nedosegljiva zaradi hlapenja vode med pripravo, morebitnim transportom in samo vgradnjo mešanice, proces hidratizacije pa bi bil občutno predolg, zato vedno upoštevamo dodatno količino vode. (Žarnić, 2005)

Svež beton prične s procesom strjevanja takoj po sami vgradnji, kar se sicer lahko nadzira z različnimi dodatki (pospeševalci, zaviralci vezanja ipd.). Mehanske lastnosti strjenega betona izvajamo po 28 dneh (štirih tednih) od vgradnje. V tem času se v mešanici zaključi proces strjevanja in razvije projektirana nosilnost. Sčasoma beton še pridobi na trdnosti, kar pa je, glede na projektirano vrednost, zanemarljiv podatek. Slika 5 prikazuje doseganje projektirane tlačne trdnosti betona, v odvisnosti od časa neposredno po vgradnji in od temperaturnih razmer med betoniranjem. Med občutljivim procesom vezanja je potrebno beton negovati – laboratorijski vzorci v vodi, na delovišču pa je treba sveže vgrajeno mešanico ustrezno zaščititi pred neposredno sončno svetlobo (betoniranje poleti) in zagotoviti vlažnost, da se beton ne izsuši. (Žarnić in sod., 2015)



Slika 5: Odstotek dosežene največje tlačne trdnosti betona po dnevih od vgradnje (Homenbuild, 2018)

Trg ponuja široko izbiro cementnih pripravkov, ki že vsebujejo razne dodatke. Navadno pa jih mešanici dodamo med samo pripravo. Pogosto želimo bodisi zaradi posebnih pogojev betoniranja bodisi zaradi zahtev po višji trdnosti spremeniti lastnosti svežega ali otrdelega betona. Seveda lahko želene lastnosti betonske mešanice dobimo že s prilagoditvijo običajnega načina priprave, vendar bomo, predvsem zahtevam po visokih trdnostih, težko zadostili. Poznamo več vrst dodatkov. (Saje, 2015)

- Mineralni dodatki: žindra, mikrosilika, elektrofitrski pepel.
- Kemijski dodatki: aeranti, plastifikatorji, superplastifikatorji, zaviralci in pospeševalci vezanja, zgoščevalci, dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah.
- Polimerni dodatki: akrilni polimer, polivinilacetat.

Najvidnejša lastnost betona je odlična sposobnost prenašanja tlačnih obremenitev. Z vidika nategov pri projektiranju konstrukcij privzamemo, da ni nosilen; v natezni coni natege prevzemamo z armaturo. Natezna trdnost betona je namreč zgolj desetina vrednosti pripadajoče tlačne trdnosti. Zato je sprijemnost med obema materialoma ključnega pomena. Standard SIST EN 1992-1-1 (EC 2) beton razvršča v 14 trdnostnih razredov, katerih simbol sestoji iz tlačne trdnosti valja in tlačne trdnosti betonske prizme, prikazuje jih spodnja slika. (Lopatič, 2018)

Trdnostni razredi betona														
f_{tk} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{tk,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ϵ_{cu1} (‰)										3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ϵ_{c2} (‰)										2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2} (‰)										3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n										1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ϵ_{c3} (‰)										1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ϵ_{cu3} (‰)										3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

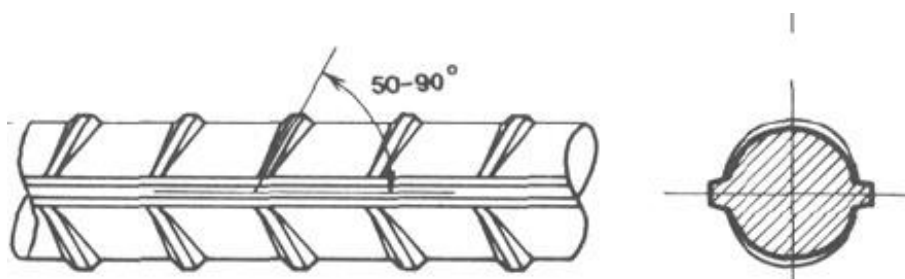
Slika 6: Trdnostni razredi betona po standardu SIST EN 1992-1-1 (Lopatič, 2018)

2.3 Sprijemnost betona in armature

Armiran beton so vse od odkritja sredi 19. stoletja nenehno izpopolnjevali in izboljševali materialne ter fizikalne lastnosti armature in samega betona. V osnovi gre za izboljšanje karakteristik narmiranega betona s pomočjo jekla, ki je nosilen material predvsem v nategu, medtem ko beton odlično prenaša tlačne napetosti. Na vseh mestih, kjer med procesom projektiranja identificiramo pojav nateznih in/ali prevelikih tlačnih obremenitev betonskih elementov, moramo vgraditi armaturo, običajno v obliki mrež, palic, košev ali kombinacij med naštetimi možnimi rešitvami. Dobro sposobnost materialnega sodelovanja betona in armature vsekakor omogoča zelo podoben koeficient termičnega raztezanja obeh snovi, saj tako ob temperaturnih spremembah ne nastajajo dodatne napetosti, ki bi lahko vodile v oslabeitev in porušitev armiranobetonske konstrukcije.

Sprijemna trdnost betona in armature je ena osnovnejših prvin, ki omogoča projektiranje, gradnjo in uporabo tovrstnih konstrukcij. Odvisna je od številnih parametrov, najpomembnejši so opisani v nadaljevanju. (Grum in sod., 2004)

- Oblika in premer armaturne palice. Ravne palice omogočajo betonski mešanici, da temeljito oblije armaturo, ob pojavu nateznih sil pa do dodatnih lokalnih momentnih obtežb ne prihaja. Večji premer načeloma izboljša sprijemnost materialov, zaradi večje stične površine (reber) (Kopač, 2016). Najpomembnejši faktor pri sprijemnosti z armaturo je vsekakor površina. Gladko armaturo dandanes praktično ne uporabljamo več, saj nudi znatno manjšo sprijemnost z betonom kot rebrasta.
- Beton boljše kvalitete vsebuje večjo količino veziva in zmanjšuje možnost lokalne porušitve materiala (npr. ob rebrih armaturnih palic), kar pripomore k boljši sprijemnosti in višji izvlečni trdnosti. Obenem ima pomembno vlogo tudi agregat – prevelike količine drobnih frakcij ne zagotavljajo zadostne trdnosti, prevelika vsebnost debelejših zrn pa povzroči krhkost strjenega betona običajne trdnosti.
- Smer betoniranja na sprijemnost vpliva predvsem z vidika oblivanja armature. Betoniranje v smeri osi armaturnih palic zagotavlja temeljitejšo zalitje, medtem ko vlivanje pravokotno na os palic zahteva večjo natančnost.
- Predvsem pri jekleni armaturi se spopadamo s težavo korozije. Bolj korodirana armatura se z betonsko mešanico slabše sprime in ne nudi maksimalne sprijemnosti s strjenim betonom, kot bi jo sicer. Pred samim betoniranjem je treba zagotoviti armaturne elemente brez rje oz. jih na delovišču ustrezno skladiščiti ali očistiti. (Kryžanowski, 2018)



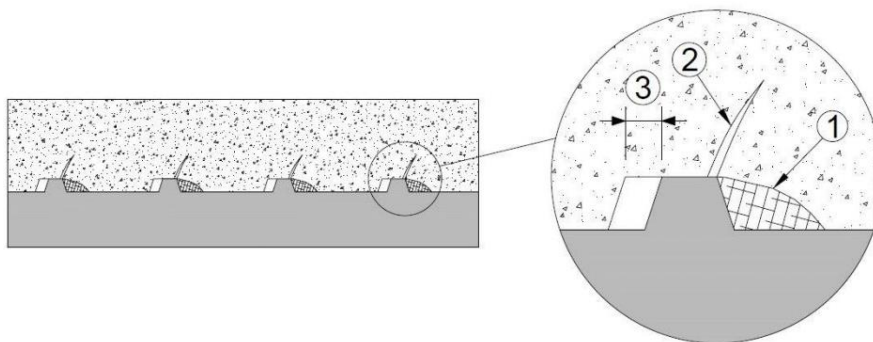
Slika 7: Tipična izvedba reber pri jeklenih armaturnih palicah (Spravljanje betona, 2013)

2.3.1 Mehanizmi sprijemnosti

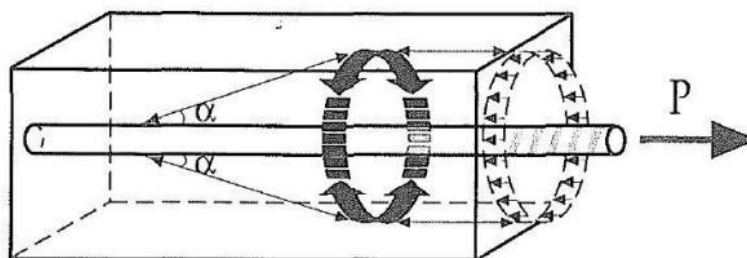
Pri gladki armaturi je sprijemna trdnost odvisna skoraj izključno od kvalitete in količine veziva, ki zagotavlja začetno zlepljenost, ter od trenja z betonom. Omenjena mehanizma pogosto nudita nezadostno izvlečno trdnost, zato vgrajujemo konstrukcijsko jeklo z rebri, ki, ob prej omenjenih mehanizmih, omogoča tudi dobro zasidranost v betonu. Gladke armature palice praktično ne uporabljamo več niti za stremena v nosilcih. Na gradbiščih je gladke armaturene elemente, zaradi očitnih konstrukcijskih slabosti, v celoti nadomestila rebrasta armatura.

Ob vnosu obtežbe na armiranobetonsko konstrukcijo se najprej aktivira adhezija oz. t. i. zlepljenost betona in armature. Ko obremenitve presežejo adhezijsko sprijemnost pride do zdrsa armature, kar privede do aktiviranja vpliva trenja med betonom in armaturo. Hrapava površina armature in betona (zrna agregata) omogočata nastanek relativno visoke odporne sile, v primerjavi z adhezijo. To je tudi razlog, da je lomljen agregat običajno konstrukcijsko primernejši od prodnega. Skoraj istočasno se z vplivom trenja pojavi še zaklinjanje reber armaturnih elementov v beton, ki jih obdaja.

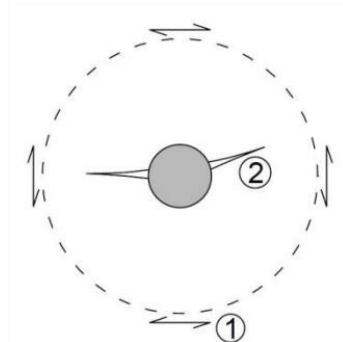
V primerjavi s prej omenjenima mehanizmoma adhezije in trenja ima zaklinjanje pomembnejšo vlogo v aspektu sprijemne trdnosti. Na stiku reber in betona nastanejo mikro razpoke, ki sicer še povečajo zdrs betona. Pojavi se lokalno drobljenje betona zaradi povečanih obremenitev, v območju zaklinjanja se zato njegova tlačna trdnost izniči (slika 8). Rebra armature zaradi zunanje obtežbe povzročajo reakcije v betonu, ki običajno delujejo pod kotom velikosti med 45° in 80° gledano na os armiranja (slika 9). Pravokotne komponente omenjenih reakcij povzročajo radialne napetosti v betonu. Posledica so cepilne razpoke, ki se večajo in prodirajo globlje v betonski sloj sorazmerno z naraščanjem obtežbe armiranobetonskega elementa; prikazuje jih slika 10. (Dežman, 2015)



Slika 8: Vzdolžni prerez armaturene palice v betonu in detajl stika reber in betona s področjem zdrobljenega betona (1), mikrorazpokami (2) in zdrsom (3) (Dežman, 2015)



Slika 9: Razporeditev sil, ki jih obremenjena armatura prenaša na beton (Juvanec, 2015)



Slika 10: Prečni prerez armaturne palice v betonu, ki prikazuje radialne napetosti (1), katere povzročajo cepilne razpoke (2) (Dežman, 2015)

Dogajanje okoli reber armature lahko povzroči porušitev betona oz. betonskega laboratorijskega vzorca na dva načina. Do razcepa betona pride, ko prej omenjene cepilne razpoke, ki nastanejo zaradi radialnih napetosti, prodrejo pregloboko od betonskega jedra proti zunanosti in kritično oslabijo betonsko kocko. Natezne napetosti so zaradi te oslabitve skoncentrirane na robovih preizkušanca, kar beton zaradi zelo nizke natezne trdnosti ni sposoben prenesti. Običajno tovrstna porušitev nastopi v primeru, ko se beton na stiku z armaturo ne poruši. (Murcia-Delso in sod., 2011)

Porušitev pa lahko nastopi tudi v obliki izvleka armaturne palice iz betonske kocke. Cepilne razpoke se ne razširijo dovolj, da bi ogrozile betonski vzorec. V tem primeru gre za lokalno porušitev (drobljenje) betona ob rebrih armature, katera se izvleče iz betonske kocke, slednja pa ostane, vsaj na zunaj, nepoškodovana. V nasprotju s prej opisanim načinom porušitve izvelek nastane ob manjših sprijemnih trdnostih. (Murcia-Delso in sod., 2011)

Bazaltne palice so prav tako lahko opremljene z rebri ali s peščenim posipom, ki ponujajo alternativo preverjeni rebrasti jekleni armaturi. Pričakujemo lahko, da bo porušitev nastopila v obliki izvleka armature, betonski vzorec pa bo ostal nepoškodovan. Pri bazaltnih palicah se lahko pojavi tudi zgladitev ali celo odstranitev peščenega posipa, ki ga povzroči trenje med površino armature in betonskim agregatom med zdrsom palice iz kocke. Jeklena rebra so veliko močnejša od betona, zato do porušitev reber pri preizkušancih, armiranih z jeklom, ne prihaja.



Slika 11: Palice bazaltne armature s peščenim posipom in spiralno deformacijo (Deutsche Basalt Faser GmbH, 2018)

Sam način izdelave bazaltne armature otežuje izvedbo sistema za dodajanje reber oz. preoblikovanje palic v ta namen. Palicam jeklene armature se rebra vtisnejo načeloma že med samim procesom izdelave, kar omogoča hitro, učinkovito, predvsem pa vedno enako kakovostno izvedbo, brez večjih anomalij, kot se lahko pojavijo pri bazaltnih palicah s posipom.

Omenili smo že vpliv premera armature na sprijemnost z betonom. Pri jekleni armaturi večji premer lahko pomeni tudi večjo sprijemno kapaciteto (Kopač, 2016) v nasprotju z bazaltnimi palicami, kjer manjši premer nudi višjo sprijemno trdnost. (Banibayat, 2011) Zanimivo lastnost je mogoče pojasniti z mehanizmi sprijemnosti. Pri rebrastem jeklu igra zaklinjanje zrn najpomembnejšo vlogo v aspektu sprijemne trdnosti, medtem ko je pri bazaltu v ospredju vpliv trenja. Za bazaltno armaturo s posipom je težko trditi, da omogoča učinkovito zaklinjanje, dejansko gre za nekakšno kombinacijo slednjega s trenjem. Med preizkusi tako pričakujemo sicer visoko sprijemno trdnost, a tudi precejšnje zdrse armaturnih palic iz vzorcev.

3 STANDARDNI PREIZKUSI

V diplomski nalogi smo opravili tri glavne preizkuse, s katerimi bomo analizirali materiale. Glede na to, da preizkušamo bazaltno armaturo, katero veljavni standardi še ne zajemajo, smo uporabili predpise, ki veljajo za jeklo oz. jekleno armaturo in smo jih (večinoma pri sami izvedbi poskusov) zgolj prilagodili značilnostim bazaltne. Priprava preizkušancev mora biti drugačna od uveljavljene za jekleno armaturo zaradi drugačnih materialnih lastnosti bazalta, da se preizkusi lahko sploh izvedejo.

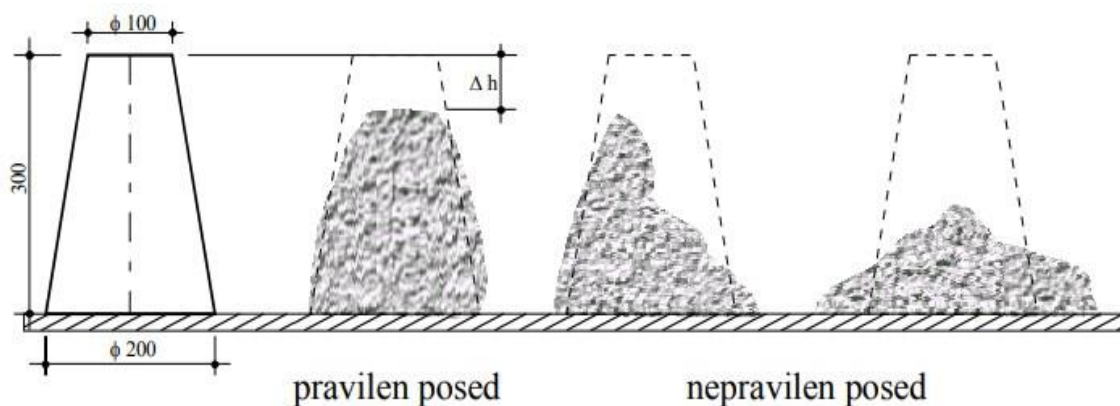
Za boljšo preglednost diplomskega dela si najprej oglejmo splošne zahteve standardov za vse tri izvedene preizkuse. V nadaljevanju pa sledi podroben praktičen opis priprave, izvedbe in rezultatov preizkusov v laboratoriju, v skladu z veljavnimi predpisi.

3.1 Preiskave sveže betonske mešanice

Preiskave sveže betonske mešanice so, ob osrednjih laboratorijskih testih, prav tako izrednega pomena za ustreznost analize materialov. V laboratoriju se izvedejo neposredno po pripravi betona, pred morebitno izdelavo vzorcev. V glavnem preverjamo konsistenco mešanice, ki je skupek lastnosti svežega betona. Po standardu SIST EN 12350 poznamo štiri metode. Pri našem eksperimentalnem delu smo uporabili dve najpogostejši in najenostavnejši metodi, ki zagotavljata zadostno zanesljivost rezultatov.

3.1.1 Metoda poseda po SIST EN 12350-2

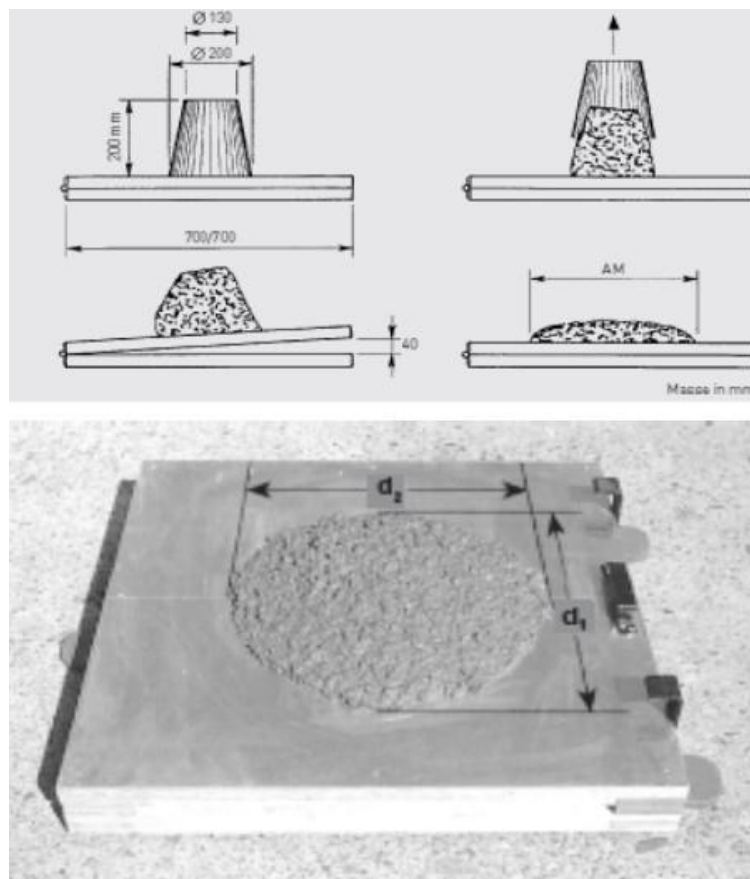
Metoda poseda se najpogosteje uporablja na terenu, npr. gradbišču. Najpomembnejši pripomoček je konus v obliki prisekanega stožca z zgornjo odprtino premera 100 mm, spodnjo premera 200 mm in višino 300 mm. Postavimo ga na spodnjo odprtino in pričnemo s polnjenjem betonske mešanice za preizkušanje do tretjine višine konusa. Nato beton skompaktiramo s pomočjo kovinske palice dolžine 60 cm premera 16 mm s 25 udarci. Prvo tretjino s palico prebadamo po celotni višini, naslednja sloja pa le do spodnje plasti. Nato odstranimo presežek mešanice na zgornji odprtini stožca in počakamo pol minute. Konus počasi dvignemo in ga postavimo ob vzorec. Prej omenjeno palico položimo na vrh konusa in si tako pomagamo pri meritvi poseda betona. (Žarnić in sod., 2015)



Slika 12: Pravilen in nepravilen način poseda sveže betonske mešanice (Žarnić in sod., 2015)

3.1.2 Metoda razleza po SIST EN 12350-5

Metoda razleza je povezana z metodo poseda. Ponovno uporabimo kovinski konus, katerega postavimo na preizkuševalno mizo in ga do polovice napolnimo z betonom. Sledi kompaktiranje betona z leseno palico 4 x 4 cm z 10 udarci. Enako storimo še z drugo plastjo in odstranimo presežek materiala. Po 30 sekundah počasi dvignemo stožec, podobno kot pri prejšnji metodi. Nato mizo dvignemo do distančnika (4 cm) in spustimo; naredimo 15 ponovitev, da se betonska mešanica razleze po površini preizkuševalne mize. Na koncu je še treba izmeriti med seboj pravokotna premera razleza, vzporedna s pripadajočo stranico, povprečje obeh meritev je naš rezultat. Spodnja slika prikazuje izvedbo in rezultat preiskave po metodi razleza. (Žarnić in sod., 2015)



Slika 13: Izvedba preiskave in odvzem meritev po metodi razleza (Žarnić in sod., 2015)

3.2 Tlačni preizkus betonskih prizem

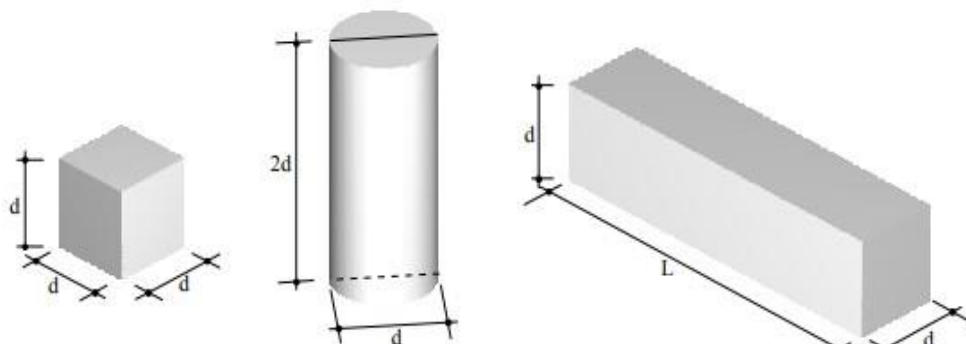
Tlačni preizkus je eden najosnovnejših pri testiranju več vrst materialov. To posebej velja za beton, katerega projektiramo za prenos tlačnih sil v določenem konstrukcijskem sklopu. Na ta način določimo tlačno trdnost, in ga, sodeč po rezultatih tlačne analize, armiramo po potrebi tudi v tlačni coni, v primeru prevelikih obremenitev, katere bi lahko povzročile poškodbe ali celo porušitev betonske strukture.

Celotna izvedba tlačnega preizkusa v splošnem poteka v treh fazah: priprava preizkušancev, nega vzorcev in sama izvedba preizkusa. Pri testiranju v laboratoriju smo upoštevali predpise standarda SIST EN 12390, ki navaja smernice in zahteve na področju preizkušanja strjenega betona.

3.2.1 Standardizirani preizkušanci po SIST EN 12390-1

Prvi del uporabljenega standarda se nanaša na standardizacijo preizkušancev, in sicer definira tri glavne oblike: kocko, pokončni valj in pokončno prizmo. Slednja je uporabna zgolj pri testiranju upogibne trdnosti betona, zato je v nalogi ne bomo obravnavali.

Za določanje tlačne trdnosti uporabljamo valj in kocko, iz podatkov o porušnih silah za obe telesi sestoji standardizirana oznaka betona po SIST EN 206- 1. Pri laboratorijskem delu smo uporabili kocko dimenzij 15 x 15 x 15 cm, ki določa standardizirano oznako betona.



d (mm)					d (mm)					d (mm)					L
100	150	200	250	300	100	150	200	250	300	100	150	200	250	300	$\geq 3,5d$

Slika 14: Standardizirani preizkušanci za tlačni (in natezni) preizkus betona (Žarnić in sod., 2015)

3.2.2 Izdelava in nega vzorcev po SIST EN 12390-2

Drugi del standarda vsebuje podatke o pripravi kalupa, vgradnji mešanice in potrebnih pogojih za negovanje betona med štiritedenskim strjevalnim procesom. Kalup, ki ga bomo uporabili za pripravo vzorcev ne sme vpijati vode in reagirati s cementom. Zagotavljati mora predpisane tolerance dimenzij preizkušancev.

Ob vgradnji betona je izrednega pomena primerno kompaktiranje betonske mešanice. Še prej moramo stranice kalupa premazati z opažnim ločilnim sredstvom. Zgoščevanje betona izvedemo lahko s pomočjo vibracijske mize, standardne kovinske palice, standardnega jeklenega nabijača ali vibracijske igle, slednjo smo tudi uporabili. Kompaktirati moramo vsaj dva posamezna sloja do višine 10 cm. Ko opazimo prenehanje izhajanja zračnih mehurjev iz mešanice in nastanek tanke plasti cementnega mleka na njeni površini, je zgoščevanje končano. Pretirano vibriranje betonske mešanice utegne biti škodljivo, saj lahko vodi v njeno segregacijo. (Žarnić in sod., 2015)

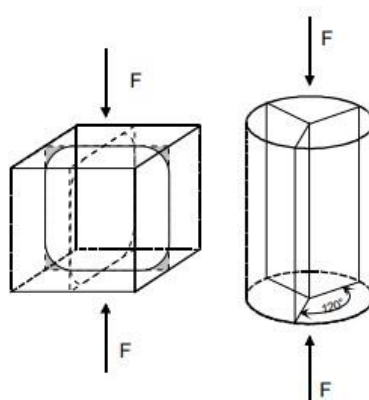
Izdelane preizkušance je treba vidno označiti in poskrbeti, da bodo oznake vidne tudi po končanem procesu strjevanja. Vzorce moramo v kalupu pustiti vsaj 16 ur oz. največ 3 dni po pripravi mešanice, zaščitene pred mehanskimi vplivi in izsušitvijo. Ko jim odstranimo kalup, jih potopimo v vodo ali postavimo v prostor z vsaj 95 % stalno vlago.

3.2.3 Izvedba tlačnega preizkusa po SIST EN 12390-3

Strjenim vzorcem lahko po 28 dneh negovanja v vodi določimo tlačno trdnost s porušno metodo. Uporabimo prešo, s katero definiramo potrebno silo za porušitev betonskega vzorca. S pomočjo znane površine, na katero nanašamo tlačno obremenitev, lahko izračunamo tlačno trdnost 28 dni starega preizkušanca s pomočjo spodnjega izraza:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Sila F predstavlja porušno silo, največjo doseženo vrednost, ki jo je prenesel betonski vzorec, A_c pa je površina, na katero je tlačna sila delovala (15 x 15 cm). SIST EN 12390-3 navaja še izraz, po katerem lahko izračunamo tlačno trdnost betona tudi kasneje po predpisanih štirih tednih od priprave betona. V našem primeru je ta podatek za diplomsko delo nepomemben, saj je bil eksperimentalni del izveden neposredno po 28-dnevni dobi strjevanja materiala. (Žarnić in sod., 2015)



Slika 15: Postavitev preizkušancev in smer nanašanja tlačne obremenitve (Žarnić in sod., 2015)

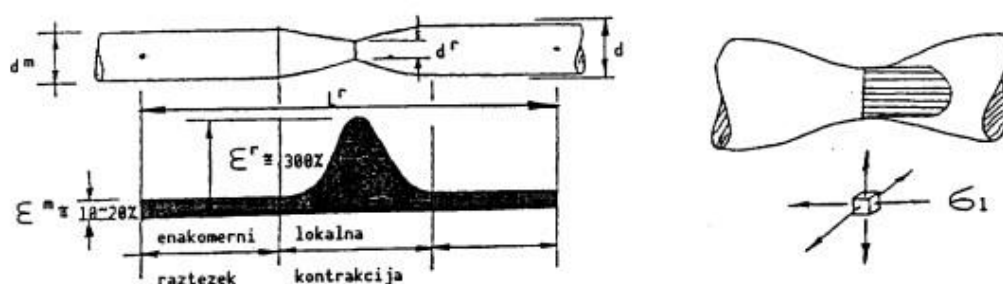
Razred tlačne trdnosti	Minimalna karakteristična tlačna trdnost (MPa)	
	Valj 15/30 $f_{ck,cyl}$	Kocka 15/15 $f_{ck,cube}$
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
.....		

Slika 16: Določitev razreda tlačne trdnosti betona (Žarnić in sod., 2015)

3.3 Natezni preizkus armature

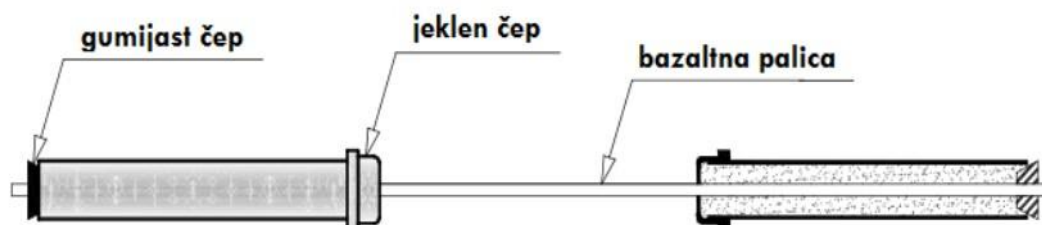
Predpise, katerim sledimo pri določanju lastnosti z nateznim preizkusom standardiziranih vzorcev oz. epruvet, najdemo v standardu SIST EN 10002. Zavedati se moramo, da se standard nanaša na preiskave kovin, najpogosteje se na ta način preverja gladko oz. rebrasto jekleno armaturo. Omenili smo že, da evropski standardi v predpisih ne zajemajo bazaltne armature, zato bomo pri izvedbi testiranj sledili zahtevam veljavnega standarda za preizkušanje kovin. (Žarnić in sod., 2015)

Dovoljena je uporaba neobdelanih vzorcev, torej tehničnih epruvet, za preverjanje betonske armature. Poskus se običajno izvede v horizontalnem trgalnem stroju, v našem laboratoriju smo si pomagali s hidravličnim preizkuševalnim strojem, ki je z namestitvijo ustreznih čeljusti, zadoščal merilom in obenem, skladno s standardom, zagotavljal natančne meritve deformacij. Preizkuševalna naprava mora biti povezana s pripravo za zapisovanje in obdelavo podatkov med samo izvedbo preizkusa. Slika 17 prikazuje obnašanje jeklene epruvete med preizkušanjem. (Žarnić in sod., 2015)



Slika 17: Mesto pojava lokalne kontrakcije jekla (Žarnić in sod., 2015)

Materialne lastnosti bazaltne armature zahtevajo popravke v standardnem nateznem preizkusu. Tovrstne armaturne palice imajo nizko odpornost proti prečnemu pritisku na vlakna. V ta namen na oba konca palice pritrdimo nastavek iz jeklene cevi, ki prevzame tlačne napetosti, ki delujejo pravokotno na armaturo na mestu vpetja. Na konec nastavka namestimo gumijast, na začetek pa jeklen čep, ki tesno objema armaturno palico, saj je jeklen nastavek večjega premera od bazaltne palice. Vmesni prostor pa zapolnimo z epoksi lepilom in suhim peskom ter tako zagotovimo sprijemnost nastavka z bazaltom in poravnavo armature na sredino nastavka. Slika 18 prikazuje pravilno pripravo vzorca. (Banibayat, 2011)



Slika 18: Priprava bazaltne armaturne palice na izvedbo nateznega preizkusa (Banibayat, 2011)

Rezultat preiskave je diagram sila-razteg (P- δ diagram), iz katerega lahko določimo diagram napetost-deformacija (σ - ϵ diagram). V nadaljevanju bomo opisali dejanski potek priprav armaturnih vzorcev v laboratoriju na testiranja, katere smo izvedli zaradi materialnih posebnosti bazalta.

3.4 Izvlečni preizkus

Izvlečni preizkus, imenovan tudi pull-out test, je osnovni način preizkušanja sprijemnosti armature z betonom in določanja karakteristik med obema materialoma, podrobno opisan v standardu SIST EN 10080:2005. Sprijemna trdnost je najpomembnejši parameter v armiranobetonskih konstrukcijah, tako v nateznih, kot tudi v tlačnih conah konstrukcijskih elementov. V osnovi gre za natežno obremenitev armature, ki je vpeta v betonski preizkušane kockaste oblike na eni in v pripravo za izvedbo eksperimenta na drugi strani. Izvlečni preizkus lahko izvajamo s hidravlično preizkuševalno napravo, kjer so vzorci postavljeni vertikalno.

Standard vsebuje predpise in smernice, ki določajo pripravo vzorcev in samo izvedbo preizkusa. Preizkušanci so v splošnem betonske kocke, katere prebada armaturna palica. Krajši konec armature služi meritvam pomika oz. zdrsa palice iz betona, daljši pa vpetju v preizkuševalno napravo in merjenju natezne sile.

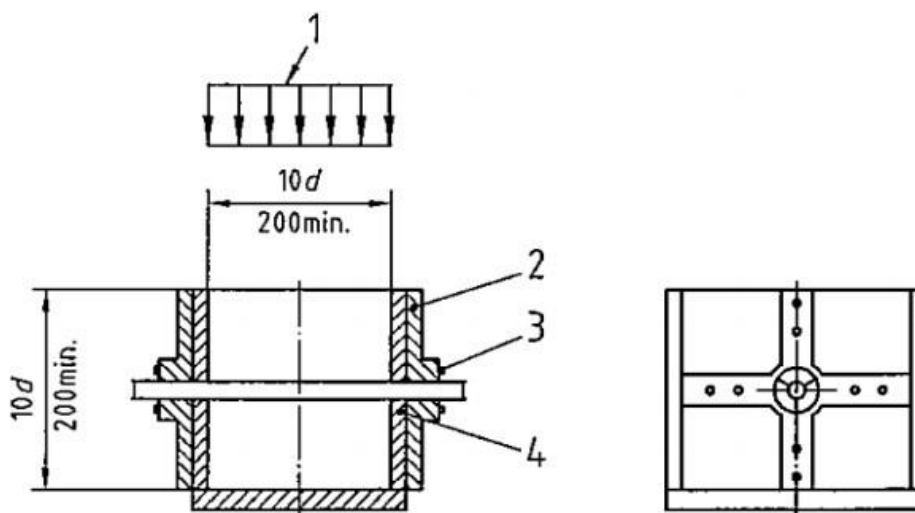
3.4.1 Izdelava vzorcev

SIST EN 10080:2005 zahteva preizkus tlačne trdnosti betona, katerega bomo uporabili v preizkusu bodisi s standardno prizmo bodisi z valjem. Armaturne palice morajo biti čiste, ravne, brez korozije in nepoškodovane. V primeru čiščenja korodirane površine, se te ne sme poškodovati (zgladiti), saj lahko tako vplivamo na rezultate preizkusa. Standard se sicer nanaša na jekleno armaturo, vendar bomo, podobno kot pri nateznem preizkusu, tem zahtevam sledili, kljub obravnavi bazaltne armature. (SIST EN 10080:2005)

S svežo betonsko mešanico napolnimo (lesen) kalup z luknjama, ki omogočata horizontalno namestitev armaturne palice, da prebada betonski vzorec. Hkrati mora biti kalup izveden tako, da se beton vliva pravokotno na os armature.

Spodnja slika shematsko prikazuje postavitev kalupa v obliki kocke, ki mora imeti dolžino stranice desetkratnika premera armature ali minimalno 200 mm. Shemo sestavljajo naslednje komponente:

- 1) smer vlivanja betona,
- 2) kalup,
- 3) pritrjevalni elementi (vijaki) in,
- 4) čep.



Slika 19: Kalup za izdelavo preizkušancev izvlečnega testa (SIST EN 10080:2005)

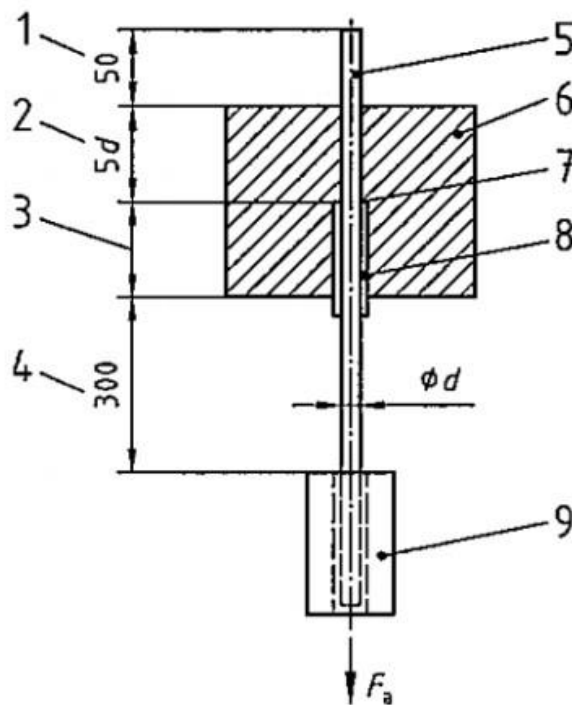
3.4.2 Preizkuševalna oprema

Po SIST EN 10080:2005 se izvlečni preizkus izvaja s pomočjo trgalne naprave, z možnostjo pravokotnega vnosa sile glede na površino betonske kocke in zveznega večanja obremenitve armaturne palice. Merilna naprava mora zagotavljati natančnost vsaj odstotka največje sile, ki jo bo vzorec prenesel oz. jo bo preizkuševalna naprava nanese. Merilec pomikov armaturne palice, ki je nameščen na njenem krajšem koncu, mora dosegati natančnost vsaj $\pm 0,01$ mm.

3.4.3 Postavitev preizkušanca

Spodnja shema (slika 20) prikazuje postavitev in obliko preizkušanca, katerega nato vpneemo v preizkuševalni stroj. Sestavljajo ga naslednji deli.

- 1) Dolžina krajšega konca palice, ki prebada betonsko kocko, za merjenje zdrsa (50 mm).
- 2) Sprijemna dolžina betona in armature ($5d$).
- 3) Dolžina plastične cevke, ki preprečuje sprijemnost ($5d$, min. 200 mm – $5d$).
- 4) Razdalja med spodnjim robom betonske kocke in vpetjem v preizkuševalno napravo (300 mm).
- 5) Armaturna palica, ki jo natežno obremenjujemo.
- 6) Betonska kocka, ki objema armaturo.
- 7) Čep, ki preprečuje uhajanje cementnega mleka med plastično cevko in armaturo.
- 8) Plastična cevka.
- 9) Vpetje v čeljust preizkuševalne naprave.



Slika 20: Shematski prikaz postavitve preizkušanca za izvlečni preizkus (SIST EN 10080:2005)

4 LABORATORIJSKO DELO

Eksperimentalni del naloge je najpomembnejše in najobširnejše poglavje diplomskega dela, saj v njem definiramo uporabljene materiale, opišemo izvedene preizkuse in predstavimo ter med seboj primerjamo dobljene izsledke. Predpostavke lahko z ureditvijo rezultatov iz laboratorija bodisi ovrzemo bodisi potrdimo in podkrepimo z dokazi.

Sprijemnost med betonom in armaturo je tema, ki so jo predhodno že raziskovali nekateri študenti s svojimi zaključnimi deli. Najvidnejši med njimi so Andraž Dežman, Blaž Juvanec (oba 2015), Rok Štesl in Jan Kopač (oba 2016), pod mentorstvom doc. dr. Draga Sajeta. Kalup, ki smo ga uporabili pri izdelavi preizkušancev za izvlečni preizkus armature, je izdelal Andraž Dežman, ob pomoči doc. dr. Draga Sajeta in izr. prof. dr. Jožeta Lopatiča.

Tudi v tem zaključnem delu smo se ukvarjali s sprijemno trdnostjo, vendar je jeklo nadomestil bazalt. Za bazaltno armaturo bomo uporabili rezultate, pridobljene iz lastnih laboratorijskih preizkusov, tj. iz nateznega in izvlečnega testa, analizo pa bomo obogatili še s preiskavami v eksperimentih uporabljenega betona. Podatke o vrednostih preizkusov jeklene armature bomo povzeli iz diplomskih del zgoraj omenjenih avtorjev za oba preizkusa, za nateznega in izvlečnega. Zaradi obilice testiranj in pridobljene količine podatkov o jekleni armaturi nima smisla ponavljati že izvedenih tovrstnih poskusov. Za jasnejšo sliko o obnašanju materialov, bomo uporabili dve vrsti betona; tako bo očitno, ali vrsta betona dejansko vpliva na sprijemno trdnost z armaturo pri obremenitvi in kako.

Za primerjavo dobljenih rezultatov naših preizkusov s podatki o jekleni armaturi smo se primarno odločili zaradi lažje predstave lastno pridobljenih vrednostih za bazaltno armaturo. Jeklo je z naskokom najbolj razširjen, uporabljen in analiziran armaturni material, zato nam bo primerjava s tovrstnimi rezultati dala jasno predstav o lastnostih, posebej pri nas za armiranje relativno nepoznanega in redko uporabljenega bazalta.

Izhajali smo iz predpostavk, da vrsta betona precej vpliva na sprijemno trdnost v bazaltno armiranem betonu. Prav tako smo pričakovali, da bo sprijemnost manjša kot pri rebrasti jekleni armaturi enakih dimenzij, že zaradi očitno bolj gladke površine bazaltne armature, ki s peščenim posipom le stežka omogoča hrapavo površino, ki bi se lahko primerjala z rebri jeklenih palic. Ravno relativno gladka površina bazaltnih palic je po našem mnenju povečala pomen kvalitetnega veziva in njegove količine v betonski mešanici, kar spominja na težave, s katerimi se soočamo pri betonu, armiranem z gladko jekleno armaturo.

4.1 Uporabljeni materiali

Pri betonu bomo, poleg že obravnavanih splošnih značilnostih, natančno definirali tudi sestavine in proces nege betona med 28-dnevnim procesom strjevanja. Pri določanju sestavin obeh vrst betona, ki smo jih uporabili pri raziskavi, smo se opirali na doktorsko disertacijo Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti doc. dr. Draga Sajeta (2001). Obe vrsti betonskih mešanic imata zelo podobne sestavine, a z nekaj pomembnimi razlikami, kar je povzročilo drugačne rezultate že med preiskavami sveže betonske mešanice, izvedenimi neposredno po pripravi svežega betona. Palice bazaltne armature so bile naročene pri nemškem proizvajalcu, kjer smo tudi dobili potrebne osnovne podatke, zato predhodnih raziskav, kot so bile napravljene pri betonski mešanici, nismo izvedli.

4.1.1 Agregat

Obe vrsti betonov smo pripravili s pranim drobljenim apnenčevim agregatom frakcij 0/4 mm, 4/8 mm in 8/16 mm, katerega je fakulteti priskrbel separacija iz Kresnic. Mivka frakcije 0/1 mm je kremenčev pesek, produkt podjetja Termit d. d. Moravče.

Uporabljene frakcije agregata so bile že predhodno ustrezno osušene in primerno skladiščene v vrečah po posameznih frakcijah v laboratorijskem skladišču. To smo upoštevali v vodocementnem razmerju za betonski mešanici. Ustrezno suho mivko je med proizvodnjo zagotovil že proizvajalec s pakiranjem v zrakotesne vreče.

4.1.2 Cement

Pri obeh vrstah betonov smo uporabili cement slovenskega proizvajalca Salonit Anhovo d. d. z oznako CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R po standardu SIST EN 197-1:2011. Gre za portlandski mešani cement z dvema mineralnima dodatkom (M) in zgodnjo visoko trdnostjo (R). Po standardu dosega tlačno trdnost 42,5 MPa. Sestavine so:

- portlandski klinker, minimalno 80 %,
- dodatki: apnenec (LL) in žlindra (S), 12-20 %,
- polnila, maksimalno 5 % in
- sadra (regulator vezanja).

	Zahteve standarda	Povprečne vrednosti
Kemijske zahteve		
Vsebnost sulfata (kot SO ₃)	≤ 4,0 %	2,6 %
Vsebnost klorida	≤ 0,1 %	0,05 %
Mehanske in fizikalne zahteve		
Zgodnja trdnost, 2 dni	≥ 20,0 MPa	29 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5 - 62,5 MPa	57 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 60 min	190 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 mm	< 1 mm

Slika 21: Zahteve po SIST EN 197-1:2011 in vrednosti za CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (Salonit Anhovo d. d., 2017)

Cement te vrste je namenjen predvsem za pripravo zahtevnejših transportnih betonskih mešanic in gradnje, kjer se zahtevajo visoke trdnosti na začetku in koncu vgradnje. Uporaben je za zmrzlinso odporne, brizgane in samozgoščevalne betonske mešanice ter izdelavo betonskih prefabrikatov. Primeren je za vse vrste armiranih in nearmiranih ter prednapetih konstrukcij. (Salonit Anhovo d. d., 2017)

4.1.3 Dodatki in voda

Mešanici betona visoke trdnosti smo dodali Antikorodin, protikorozijski superplastifikator za betone in malte, proizvajalca TKK d. o. o. iz Srpence. Dodatek je primeren za izdelavo betonov visokih trdnosti in izboljšanje vodonepropustnosti ter kemične odpornosti materiala (predvsem na korozijo). Glavni sestavini sta:

- superplastifikator (sulfonirani naftalen – formaldehid kondenzat) in
- mikrosilika (kompaktiran amorfni kremen SiO₂).

Za pripravo betonskih mešanic smo uporabili vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

4.1.4 Priprava betona običajne trdnosti

V konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani smo 23. maja 2019 laboratorijsko delo pričeli s pripravo betonskih mešanic. Prva je bila na vrsti mešanica betona običajne trdnosti (NSC – normal strength concrete). Šlo je za običajen beton, katerega trdnost smo preverili na podlagi tlačnega preizkusa, ki ga bomo podrobneje analizirali v nadaljevanju. Spodnja preglednica prikazuje vrsto in količino komponent betonske mešanice; pripravili smo 36 litrov (oz. 0,036 m³) betona.

Preglednica 1: Vrste in količine sestavin betona običajne trdnosti (NSC).

Surovina		Volumen [l]	Teža [kg]	Gostota [kg/m ³]
Cement		4,65	14,40	3100
Voda		7,49	7,49	1000
Agregat	Mivka	3,51	9,51	2710
	0/4	10,52	28,43	2700
	4/8	3,50	9,48	2700
	8/16	5,85	15,80	2700
Pore		0,47	-	-
Skupaj		36,00	85,10	2363,89



Slika 22: Pripravljene sestavine betona za mešanje v laboratorijskem mešalniku

Uporabili smo cement z oznako CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R po standardu SIST EN 197-1:2011. Vodocementno razmerje znaša 0,52. Mešanico smo pripravili v laboratorijskem mešalcu s planetarnim vrtenjem lopatic (slika 22). Najprej smo vse sestavine na suho zamešali, nato pa med samim mešanjem, ki je trajalo približno 5 minut, postopno dodali še vodo. Tako smo dobili homogeno zmes ustrezne konsistence.

4.1.5 Priprava betona visoke trdnosti

Beton visoke tlačne trdnosti (HSC – high strength concrete) smo pripravili neposredno po običajnem betonu, saj imata podobne sestavine. Ponovno smo pripravili 36 litrov (0,036 m³) betona. V spodnji preglednici si oglejmo vrste in količine komponent betonske mešanice.

Preglednica 2: Vrste in količine sestavin betona visoke trdnosti (HSC).

Surovina		Volumen (l)	Teža (kg)	Gostota (kg/m ³)
Cement		4,18	12,96	3100
Antikorodin		0,79	1,74	2200
Voda		5,18	5,18	1000
Agregat	Mivka	3,80	10,27	2710
	0/4	11,37	30,70	2700
	4/8	3,79	10,23	2700
	8/16	6,32	17,06	2700
Pore		0,58	-	-
Skupaj		36,00	88,14	2448,33

Ponovno smo uporabili cement z oznako CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R po standardu SIST EN 197-1:2011. Iz zgornje tabele je razvidno, da smo, v nasprotju s prejšnjo mešanico, dodali antikorodin, tj. praškasta mešanica mikrosilike in superplastifikatorja, ki se uporablja za betone in malte in poveča predvsem korozijsko odpornost materiala. Vodocementno razmerje je znašalo 0,4, vodovezivno pa 0,36. Priprava je potekala v istem mešalcu in na enak način kot pri prejšnji vrsti betona.

4.1.6 Preiskave sveže betonske mešanice

Preiskave sveže betonske mešanice smo izvedli takoj po zaključku procesa mešanja sestavin. Sledili smo predpisom standarda SIST EN 12350, opisanih v prejšnjem poglavju.

Pri običajnem betonu smo, glede na predhodne izkušnje in podatke iz drugih že izvedenih preiskav, upoštevali, da pore predstavljajo 1,3 % volumna materiala. Takoj po pripravi je temperatura svežega betona znašala 18,5 °C; v laboratoriju je bilo ob mešanju materiala 20 °C. Izmerili smo tudi posed, ki je znašal 13 cm, in razlez velikosti 46 cm. Z mešanico smo nato napolnili kalupe za tlačni preizkus betonskih prizem in izvlečni test. S tehtanjem napolnjenih kalupov za izdelavo prizem (kalup tehta cca 11,5 kg) smo določili gostoto betona, ki je znašala slabih 2364 kg/m³. Slika 23 prikazuje meritve poseda in razleza svežega betona običajne trdnosti.



Slika 23: Merjenje poseda (levo) in razleza (desno) sveže betonske mešanice običajne trdnosti

Mešanica betona visoke trdnosti je privedla do drugačnih rezultatov. Upoštevali smo nekoliko večji delež por pri prostornini, in sicer 1,6 %. Vrednost smo privzeli po preiskavah betona iz preteklih testov. Takoj po pripravi mešanice je temperatura svežega betona znašala 20,1°C; v laboratoriju je bilo 20°C. Posedek je v tem primeru znašal kar 24 cm, razlez pa 56 cm (slika 24), kar je znatno več kot pri predhodno pripravljeni običajni betonski mešanici. S svežim materialom smo nato napolnili preostale kalupe za tlačni preizkus betonskih prizem in izvlečni test. Na enak način kot prej smo določili gostoto betona, ki je v tem primeru nekoliko višja, in sicer nekaj manj kot 2450 kg/m³.



Slika 24: Merjenje razleza sveže betonske mešanice visoke trdnosti

4.1.7 Palice bazaltne armature

Pri izvlečnem preizkusu smo uporabili 100 cm dolge palice bazaltne armature s premerom 12 mm. Za natezni preizkus pa smo potrebovali nekoliko daljše vzorce istega premera, zato je njihova dolžina znašala 130 cm. Tako smo za natezni preizkus pripravili tri vzorce armature, za test izvlečne trdnosti pa šest vzorcev, po tri za vsako vrsto betona.

Bazaltno armaturo je Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo nabavila pri nemškem ponudniku tovrstnih izdelkov Deutsche Basalt Faser GmbH iz Sangerhausna, ki med drugim izdeluje še bazalna vlakna za vgradnjo v beton, armaturne mreže ipd. Gre za palice s spiralno deformacijo in peščenim posipom. Proizvajalec zagotavlja natezno trdnost 113 kN za premer 12 mm. (Deutsche Basalt Faser GmbH, 2018)

4.2 Priprava preizkušancev na testiranje

Omenjene materiale je bilo nato treba, pred izvedbo preizkusov, ustrezno pripraviti in izdelati preizkušance v pripadajočih kalupih za vse tri vrste preizkusov. Tudi pri nateznem in izvlečnem preizkusu armaturnih palic, kjer navadno posebna predpriprava ni potrebna, je bilo treba, zaradi materialnih posebnosti bazaltne armature, preizkušance pripraviti na preizkus nekoliko drugače kot sicer.

4.2.1 Betonske kocke za izvlek armature

Že pred pripravo mešanice betona smo v laboratoriju sestavili lesen kalup, izdelan posebej za preiskave na področju izvlečne trdnosti preizkušancev že za diplomske naloge predhodnikov. Gre za enoten kalup z devetimi razdelki za izdelavo več vzorcev hkrati in ustreza standardu SIST EN 10080:2005, katerega smo opisali v prejšnjem poglavju.

Pred vlitjem betona pa je bilo po standardu treba namestiti tudi armaturne palice. Armaturo smo na koncu, kjer prebada kalup, pritrdili z žico in tako onemogočili morebitne premike navkljub sicer skrbnemu vlivanju betona. Plastično cevko, ki smo jo namestili na armaturo, smo zatesnili s steklarskim kitom in tako preprečili dostop cementnemu mleku med palico in cevko, saj je slednja rahlo večjega premera od armature, katero obdaja, zaradi lažje namestitve. Spodnja slika prikazuje pripravljen kalup z armaturnimi palicami na vlitje betona.



Slika 25: Lesen kalup z nameščeno armaturo (levo) in pozicija plastičnih cevk (desno)

Po pripravljeni betonski mešanici in opravljenih preiskavah svežega betona smo z delom svežega betona napolnili 6 prekatov vnaprej pripravljenega oz. sestavljenega kalupa, po tri prekate za navaden in po tri za visoko trden beton. Na sliki 26 je lepo vidna barvna razlika med mešanicama – beton visoke trdnosti je izrazitejše sive barve zaradi dodatkov. Mešanico smo previdno z manjšo vibracijsko iglo povibrirali in poskrbeli, da so bili razdelki zapolnjeni ter armaturna palica ustrezno obdana z betonsko mešanico.



Slika 26: Napolnjeni kalupi z visoko trdnim in običajnim betonom

Po štirih dneh, betonske vzorce smo pustili mirovati čez konec tedna, smo kocke vzeli iz kalupa, jih označili in postavili v vodo, kjer smo jih negovali 28 dni, od dneva vlitja mešanice. Kalup smo nato razstavili, očistili in naoljili za bodočo uporabo.



Slika 27: Negovanje vzorcev v vodi za izvlečni preizkus

4.2.2 Betonske prizme

Preostanek betonske mešanice od vlivanja v lesen kalup je bil namenjen pripravi standardnih betonskih prizem 15 x 15 x 15 cm v jeklenih kalupih po SIST EN 12390-2 za preizkus tlačne trdnosti. Prizme in prej omenjene kocke betona smo pripravili z enako vrsto betona, zato upoštevamo enake vrednosti preiskav sveže mešanice, kot smo jih navedli pri opisu priprave betona.

Svež beton smo ustrezno povibrirali in poskrbeli za temeljito zapolnitev celotnega kalupa, brez zračnih žepov, ki bi lahko negativno vplivali na rezultate tlačnega preizkusa. Tudi prizme smo po štirih dneh odstranili iz kalupa in jih nato postavili v vodo zraven betonskih kock, kjer so se 28 dni od priprave strjevale v predpisanih pogojih vlažnosti. Skupno smo imeli ponovno po tri vzorce vsake vrste betona.



Slika 28: Betonske prizme

4.2.3 Armaturne palice

Pri izvlečnem in nateznem preizkusu je v ospredju armatura, obremenjena v nategu. Zaradi relativno majhne odpornosti bazaltnih palic na prečno obremenitev, jih je bilo treba na predvidenem mestu vpetja v preizkuševalni stroj ustrezno ojačati oz. zagotoviti, da prečno obremenitev prevzame drug material. Odločili smo se za jeklene cevi z notranjim premerom 14 mm in debelino 2 mm.

Pri palicah, ki bodo služile za natezni preizkus, smo na vsak konec namestili jekleno cev dolžine 60 cm (50 ϕ). Tako nam je na sredini preizkušancev ostalo 10 cm prostora, kjer smo lahko med preizkusom opazovali in nadzirali dogajanje z bazaltnimi vlakni. Jeklene cevi pa je bilo potrebno na bazaltno armaturo še ustrezno pritrditi. Pomagali smo si z dvokomponentnim lepilom oz. epoksijem Sikadur 52 Injection Tip N proizvajalca Sika. Izračunali smo prostornino potrebnega lepila med jekleno cevjo in armaturo, preprosto z razliko med volumni obeh materialov. Cev smo na eni strani zamašili s plutovinastim zamaškom in preprečili iztekanje ter vlili pripravljen epoksi. Nato smo palico armature potopili v cev, zaradi točnega izračuna je epoksi smola oblila celotno armaturo, po celotni dolžini cevi. Slika 29 prikazuje vlivanje epoksija v jeklene cevne nastavke.



Slika 29: Vlivanje epoksija v jeklen nastavek (levo) in pripravljeni nastavki za namestitev palic bazaltne armature vanje (desno)

Tako smo naenkrat namestili 3 nastavke za natezni preizkus, a zgolj na eni strani. Vzorce smo postavili pokončno v posebej pripravljeno leseno stojalo, da epoksi ne izteka in s pomočjo kosov žice poskrbeli, da so bile bazaltne palice poravnane na sredino cevi in temeljito obdane z lepilom (slika 30). Kljub drugačnim navedbam proizvajalca, ki zagotavlja krajši čas strjevanja, smo nadaljevali šele naslednji dan in na enak način pritrdili jeklene cevi še na drugo stran preizkušancev. Tako je bila bazaltna armatura pripravljena na vpetje v preizkuševalne čeljusti laboratorijskega stroja, kjer bi se brez predhodno pritrdjenih jeklenih palic zdrobila oz. vsaj poškodovala do te mere, da pravilna izvedba poskusa ne bi bila mogoča.



Slika 30: Pripravljeni vzorci bazaltnih palic (levo) in detajl armature med nastavkoma (desno)

S podobno težavo smo se srečali tudi pri pripravi armature za izvlečni test. Betonske kocke z vgrajenimi bazaltnimi palicami so bile že pripravljene, potrebno je bilo le še pritrditi jeklene cevi na armaturo, kjer bo vpeta v preizkuševalni stroj in prečno obremenjena. V tem primeru smo pričakovali manjšo potrebno silo, saj bi se vzorec prej porušil zaradi prekoračitve sprjemnosti med betonom in armaturo, kot pa natezne trdnosti armature. Vendar je treba armaturo še vedno vpeti s silo, ki bi utegnila povzročiti poškodbe na mestu vpetja v čeljust.

Betonske kocke smo namestili na vnaprej pripravljeno stojalo tako, da so bili daljši konci armature, namenjeni vpetju v preizkuševalni stroj, obrnjeni navzdol (podobno postavitvi za izvedbo preizkusa izvleka). Sledila je priprava epoksija enakih količin, saj smo ponovno pritrdjevali jekleno cev dolžine 60 cm. Nato smo vzorce potopili v epoksi in cevi podložili z lesenimi deskami, da so ostale trdno na mestu med sušenjem lepila (slika 31). Enako smo naredili z vsemi šestimi vzorci, s pomočjo žice jih tudi poravnali na sredino nastavka in v tem položaju pustili en dan, da se je lepilo posušilo.



Slika 31: Sušenje epoksija na armaturi vzorcev za izvlečni test

Na drugem koncu armature pri betonskih kockah, kjer smo jo v skladu s standardom pustili 5 cm zunaj betona, smo s pomočjo silikonskega kita na konec palice pritrdili košček stekla. V skladu s standardom smo še dodali merilnik pomika, da bomo med samim preizkusom nadzorovali tudi zdrs armature iz betonskega vzorca. Kos prilepljenega stekla zagotavlja ravno in gladko površino v primerjavi z neravno odrezanim koncem palice armature, saj smo želeli čim natančnejše odčitke zdrsa. Na isto stran smo s silikonskim kitom tudi prilepili kovinsko ploščico na beton. Merilnik se namreč pritrdjuje s pomočjo magneta, ki zagotavlja čvrsto in zanesljivo vpetje. Medtem ko bo betonska kocka nepremično vpeta, bo merilna naprava spremljala dogajanje z natezno obremenjeno armaturno palico.

4.3 Izvedba preizkusov

S preizkusi smo v laboratoriju pričeli 13. junija 2019, in sicer z nateznim testom, ki je zahteval najmanj priprav in časa. Teden dni kasneje (28 dni po pripravi betonskih preizkušancev) smo izvedli še izvlečni in tlačni test ter tako sklenili delo v laboratoriju. Pri slednjih smo vzorce preizkušali s hidravličnim preizkuševalnim strojem Instron 1345 z obremenilno kapaciteto ± 1000 kN. Preizkus tlačne trdnosti betona smo izvedli z elektromehansko preizkuševalno napravo.

4.3.1 Tlačni preizkus

Tlačni preizkus, porušna metoda preiskave, je sicer prišel na vrsto kot zadnji, vendar ga obravnavajmo na začetku, saj gre za manj pomemben del laboratorijskih poskusov, namenjen zgolj določitvi tlačne trdnosti obeh strjenih betonskih mešanic in zagotovitvi, da smo pripravili ustrezen beton za naše eksperimente. Sledili smo predpisom iz standarda SIST EN 12390-3.

Potek preizkusa je bil relativno enostaven. Odločili smo se za izmenično testiranje visoko trdnih in preizkušancev normalne trdnosti. Vzorce (prizme $15 \times 15 \times 15$ cm) smo namestili na sredino ravnine za nanos tlačne napetosti v elektromehanski preši in postopoma večali jakost sile vse do porušitve vzorca. Po odčitjanju vrednosti sile, potrebne za porušitev vzorca, smo s pomočjo znane površine (15×15 cm), na katero je preša delovala, izračunali tlačno trdnost. Na sliki 32 lahko vidimo tipično tlačno porušitev enega od betonskih vzorcev v obliki peščene ure.



Slika 32: Tlačna porušitev betonske prizme

4.3.2 Natezni preizkus

Natezni preizkus je najprej zahteval namestitev ustreznih čeljusti na preizkuševalnem stroju Instron, in sicer primerne za armaturo premera 14 mm (nastavek iz jeklene cevi). Prvi vzorec smo vpeli z jakostjo pritiska 100 bar, kot je navadno za jekleno armaturo, in pričeli s postopnim večanjem natezne sile. Kmalu je sledila porušitev, vendar zaradi drugačnega vzroka in na drugem mestu, kot smo sprva pričakovali. Spodnja slika prikazuje postavitev preizkušanca neposredno pred izvedbo preizkusa in pozicijo ekstenziometra.



Slika 33: Vpetje preizkušanca v preizkuševalni stroj

Čeljust je vzorec zaradi prevelike obremenitve vpetja prestrigla. Sredinski del bazaltne palice, kjer smo pričakovali porušitev ali vsaj deformiranje, je ostala cela. Zaradi tega so dobljeni rezultati nateznega preizkusa nižji od naših pričakovanj in od vrednosti, ki jih navaja proizvajalec bazaltnih armaturnih palic.

Drugi vzorec smo vpeli z za četrtno manjšim pritiskom, in sicer s 75 bar, z namenom, da bo sedaj porušitev nastopila zaradi natezne preobremenitve same armature. V tem primeru je ob poružitvi vzorec prenesel znatno večji nateg, vendar je bila sila vpetja, zaradi ponovnega prestriga vzorca ob čeljusti stroja, očitno še vedno prevelika. Posebej med preizkušanjem tega vzorca je bilo jasno slišati pokanje posameznih vlaken bazalta na sredini preizkušanca, vendar do vidnejših razpok oz. deformacij ni prišlo.

Na voljo nam je ostal še tretji preizkušanec, jakost vpetja smo drastično znižali na zgolj slabo polovico prvotne, 40 bar. Kmalu po začetku obremenjevanja je spodnja čeljust preizkuševalne naprave popustila prijem in poskus je bilo treba prekiniti. Očitno je bilo, da je 40 bar pritiska vpetja premalo. Zato smo bazalt ponovno vpeli, jakost vpetja zvišali na 50 bar in z delom nadaljevali.

Kmalu smo lahko na sredini armature palice začeli opazati dogajanje; bazalt je sicer na videz ostal nepoškodovan, opazili pa smo lahko milimetrski zdrs epoksi lepila iz jeklene cevi. Pomik je nato še nekaj časa ostal nespremenjen, natezna napetost je naraščala. Po nekaj minutah pa je sledil počasen padec natezne sile, epoksi je dokončno popustil, zdrs lepila iz jeklene cevi pa je postajal očitnejši in se le še povečeval.

Za preizkus natezne trdnosti bi morali gotovo pripraviti še večje število preizkušancev, saj je bila že sama določitev primerne pritiska vpetja zahtevna naloga. Kljub temu se nam zadnji vzorec ni porušil na mestu vpetja. Predvidevali smo, da je večja sila vpetja pri prejšnjih dveh preizkušancih vplivala tudi na nosilnost epoksi lepila, saj je deformacija jeklene palice ob vpetju povečala njegovo sprijemno kapaciteto. Ob zadnjem vzorcu, katerega smo vpeli z manjšim pritiskom, pa je natezna trdnost armature presegla sprijemno trdnost lepila in jeklene cevi, slednja je najverjetneje zaradi gladke površine nudila nezadostno sprijemnost. Epoksi in bazalna armatura pa sta ostala trdno sprijeta, saj je peščeni posip bazaltnih palic pripomogel k boljši sprijemnosti.

Za bodoče tovrstne preizkuse bi bilo smotno izbrati močnejšo jekleno cev večje debeline in hrapave notranje površine, ki bi se sicer še vedno zmerno deformirala ob vpetju, a bi obenem učinkovito zaščitila bazalt pred prestrigom vlaken in nudila zadostno sprijemno površino epoksiju ali drugi vrsti lepila. Menim, da je bila izbira dvokomponentnega lepila ustrezna, med preizkusom smo skrbno nadzirali dogajanje, zato je, kljub še na videz nedotaknjeni armaturi v vzorcih, poskus uspel predvsem v smislu preizkušanja novih materialov in potrebnih tehnik, ki so zahtevane ob posebnih pogojih in predpripravi za uspešno izvedbo tovrstnih poskusov.

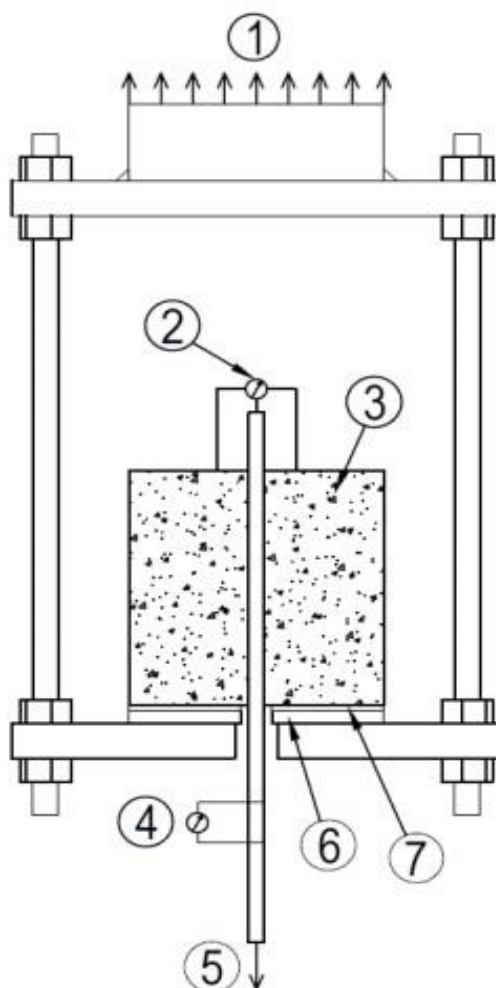
4.3.3 Izvlečni preizkus

Najpomembnejši in tudi najzahtevnejši preizkus je bil test izvlečne trdnosti (pull-out test). Pred testiranjem že pripravljenih betonskih kock je bilo potrebno poskrbeti še za ustrezno pripravo preizkuševalnega stroja. Uporabili smo isto napravo (Instron) kot pri predhodno izvedenem nateznem preizkusu, a s peščico pomembnih sprememb.

Preizkušali smo enako armaturo, zato spodnjo čeljust ni bilo potrebno zamenjati. Zaradi namestitve posebnega jeklenega stojala, ki se uporablja za tovrstne poskuse in se vpne v zgornjo polovico stroja, pa smo zgornje čeljusti nadomestili z gladkimi, ki omogočajo vpetje ploščatega nosilca stojala. Zgornji del stroja je tako nepremičen in podpira betonsko kocko, spodnji pa se pomika navzdol in v armaturo vnaša natezno napetost.

Ogrodje stojala je iz jekla, s pomočjo matic lahko prilagajamo višino podložnih plošč in poravnamo površino. Priprava sestoji iz sedmih glavnih delov, shematsko jih prikazuje slika 34.

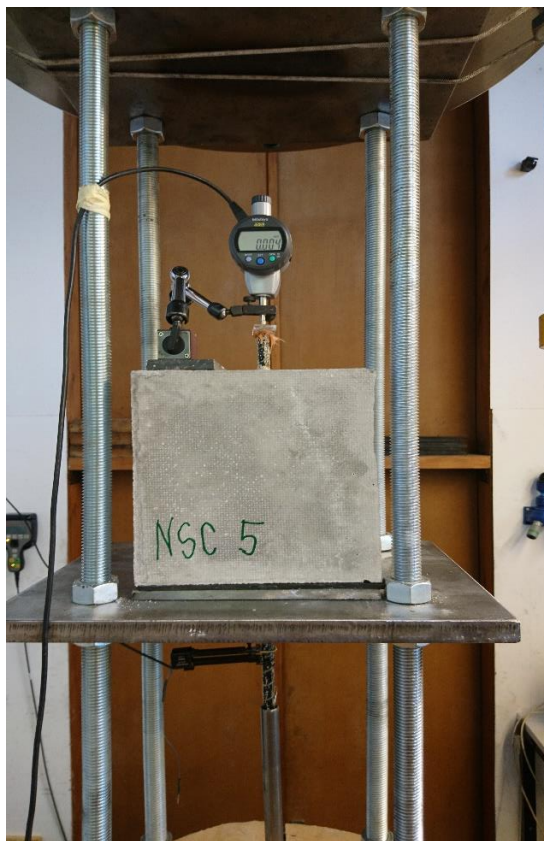
- 1) Vpetje v zgornjo čeljust preizkuševalnega stroja.
- 2) Merilna urica, s katero smo spremljali zdrs armature iz betonske kocke.
- 3) Betonski preizkušanec.
- 4) Ekstenziometer za merjenje deformacije bazaltne armature.
- 5) Bazalna armatura, ki je vpeta v spodnjo čeljust preizkuševalnega stroja.
- 6) Dodatna jeklena podložna ploščica.
- 7) Gumijasta podloga med betonskim vzorcem in jekleno podlago.



Slika 34: Shematski prikaz izvedbe preizkusa izvlečne trdnosti (Dežman, 2015)

Spodnja nosilna jeklena plošča in obe podlogi za betonsko kocko imajo na sredini okroglo luknjo, skozi katero namestimo armaturno palico in betonski vzorec položimo na stojalo. Sledilo je vpetje armature, odločili smo se za 50 bar pritiska glede na izkušnje, pridobljene iz predhodno izvedenega nateznega preizkusa. Zaradi večje trdnosti bazaltnih vlaken od betona smo pričakovali deformacije oz. porušitev betonskih kock. Slika 35 prikazuje postavitev v laboratoriju z merilnikom zdrsa in ekstenziometrom.

Nedolgo po začetku vnašanja izvlečne sile je merilni inštrument začel zaznavati pomik armature, ki se je bolj ali manj konstantno povečeval tekom preizkusa. Navkljub drsenju armature se je sila povečevala. Ko je začela upadati, nismo več dolgo nadaljevali, saj je zdrs armature znatno presegel maksimalni pomik, ki ga merilna urica še lahko izmeri. Praktično enako se je zgodilo pri vseh preizkušancih, ne glede na vrsto betona. Edina razlika je bila v tem, da je beton visoke trdnosti armaturi nudil boljše sprijemnost, zato so ti vzorci prenesli višjo izvlečno silo. Pri tem testu ni bilo očitne porušitve, niti armature niti betona. Očitno je šlo v celoti za lokalno dogajanje med armaturo in betonom znotraj vzorca.



Slika 35: Laboratorijska postavitev vzorca izvlečnega preizkusa v preizkuševalno napravo

4.4 Rezultati laboratorijskega dela

V temu delu naloge sledita pregled in obdelava rezultatov, dobljenih z eksperimentalnim preizkušanjem bazaltnih palic in betona. V nadaljevanju lastne rezultate nateznega in izvlečnega testa primerjamo s predhodnimi rezultati testiranja jeklene armature.

4.4.1 Tlačni preizkus betona običajne in visoke trdnosti

Začnimo s tlačnim preizkusom, ki prikazuje dejansko trdnost oziroma kvaliteto v raziskavah uporabljenega betona. Rezultate tlačne trdnosti običajnega in visokotrdnega betona prikazuje spodnja preglednica 3.

Preglednica 3: Rezultati tlačnih preizkusov betonskih prizem po vrstnem redu izvedbe.

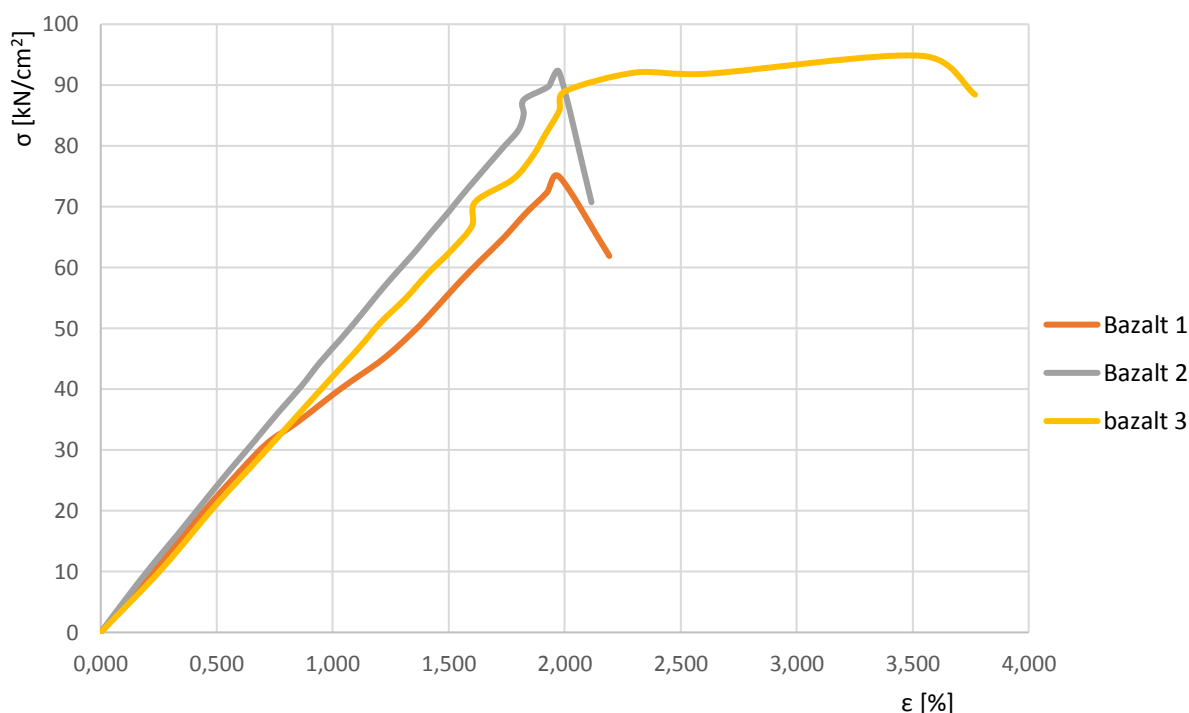
Zap. št.	Vrsta betona	Dimenzije [cm]	Porušna sila [kN]	Tlačna trdnost [MPa]
1	NSC	15 x 15 x 15	935	41,55
2	HSC	15 x 15 x 15	1656	73,58
3	NSC	15 x 15 x 15	1060	47,11
4	HSC	15 x 15 x 15	1647	73,19
5	NSC	15 x 15 x 15	960	42,60
6	HSC	15 x 15 x 15	1543	68,57

Povprečna tlačna trdnost vzorcev betona običajne trdnosti znaša 43,8 MPa, beton visoke trdnosti pa je dosegel v povprečju 71,8 MPa. Tlačno trdnost ni bilo težko določiti, saj smo porušno silo le delili s površino, na katero je delovala, torej 15 x 15 cm.

Visoko trdni beton sicer dosega nekoliko nižjo tlačno trdnost od pričakovane, glede na sestavine in skrbno nego vzorcev. Vendar lahko ključno vlogo pri lastnostih strjenega materiala odigrajo tudi razmere okolja, v katerem se pripravlja beton. V laboratoriju je bila med drugim še kar nizka vlaga, kar ima pogosto zaznaven vpliv na svežo betonsko mešanico. Kljub temu pa je ta mešanica dosegla za nekaj manj kot 40 % višjo trdnost kot običajna, zato lahko računamo na opaznejše razlike v obnašanju armature v preizkušnjah iz obeh vrst betonov.

4.4.2 Natezni preizkus bazaltne armature

Grafikon 1: Zveza med natezno napetostjo in deformacijo za palice bazaltne armature.



Zgornji σ - ϵ diagram ponazarja potek napetosti v bazaltni armaturni palici premera 12 mm v odvisnosti od deformacije. Napetost je definirana kot razmerje med natezno silo in pripadajočo površino, tj. presekom palice armature (1,131 cm²). Potek grafa je linearen (anomalije so posledica delovanja preizkuševalne naprave), obravnavamo tipičen primer krhkega materiala.

V laboratoriju smo dosegli natezno trdnost skoraj 1000 MPa oz. 100 kN/cm² in se z rezultati približali vrednosti (1130 MPa), katero navaja proizvajalec uporabljene armature (Deutsche Basalt Faser GmbH). Že v poglavju, kjer so opisani poteki preizkusov, smo razložili, da bodo rezultati v našem primeru med seboj verjetno precej odstopali zaradi posebne predpriprave preizkušancev, predvsem zaradi vpetja v preizkuševalno napravo, ki bi nezaščiteno palico armature lahko poškodovala.

Prvi vzorec bazaltne armature je prestrigla prevelika sila vpetja in je zato prenesel nižjo napetost, pri drugem preizkušancu je strižna porušitev nastopila kasneje, prenesel je višjo natezno silo. Od vseh pa najbolj izstopa tretji preizkušanec, kjer smo uspešno prilagodili pritisk vpetja, saj do nezaželenega prestriga ni prišlo. Velike deformacije po dosegu maksimalne natezne napetosti so posledica prekoračitve prijemnosti epoksi lepila in jeklene cevi. Posledično se je zgodil delni izvlek bazaltne palice iz omenjenega jeklenega nastavka, ki je ščitil bazalt pred lokalno strižno porušitvijo. Kljub temu pa je vzorec dosegal visoko natezno trdnost.

Naključno smo ob sami armaturi pri zadnjem vzorcu preizkusili tudi sprijemno trdnost med epoksijem in jekleno cevjo, ki dosega visoko vrednost in potrjuje, da smo lepilo ustrezno izbrali. Maksimalne dosežene natezne napetosti in pripadajoče deformacije prikazuje preglednica 4.

S pomočjo dobljenih rezultatov lahko izračunamo modul elastičnosti za bazaltno armaturo, ki okvirno znaša od 40 do 90 GPa in variira predvsem glede na kvaliteto surovine, ki sovpada z lokacijo njenega pridobivanja. V splošnem je elastični modul razmerje med mehansko napetostjo in relativnim raztezkom ter velja za proporcionalni del σ - ε diagrama, kjer je določen tudi Hookov zakon ($\sigma = E \cdot \varepsilon$). Geometrijsko je modul definiran kot nagib premice v linearnem delu σ - ε diagrama z enačbo:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

E v enačbi predstavlja modul elastičnosti, σ je napetost (razmerje med natezno silo in presekom palice), ε pa pripadajoča deformacija. Modul elastičnosti praktično ni odvisen od premera armaturne palice. Kljub odstopanjem v grafu predpostavljamo linearen potek, kar omogoča izračun elastičnega modula, vrednosti za bazaltne preizkušance so zbrane v preglednici 4.

Preglednica 4: Natezne trdnosti, deformacije in moduli elastičnosti vzorcev bazaltne armature.

Vzorci	Natezna trdnost [MPa]	Pripadajoča deformacija [%]	Modul elastičnosti [GPa]
Bazalt 1	749,16	1,98	37,84
Bazalt 2	920,45	1,98	46,49
Bazalt 3	948,01	3,53 ¹	41,04
Povprečje	872,54	2,50	41,79

V gradbeništvu krhki materiali načeloma niso zaželeni. Tipičen primer relativno krhkega materiala je beton, kateremu potrebno duktilnost doda jeklena armatura, saj jeklo, poleg nateznih, v kombinaciji z betonom dobro prenaša tudi dinamične obremenitve. Konstrukcije iz krhkih materialov se porušijo nenadoma, torej brez predhodnih večjih deformacij, ki naznanjajo porušitev oz. odpoved nosilnosti. Pri projektiranju objektov iz tovrstnih materialov je torej pomembno, da konstrukciji zagotovimo nosilnost v elastičnem področju. Bazaltna armatura ob vseh prednostih predstavlja izziv za standardizacijo in samo projektiranje zaradi nezadostne sposobnosti neelastičnega deformiranja. Slaba sposobnost neelastičnega deformiranja bazaltne armature onemogoča izvedbo duktilnih konstrukcij, kar je neugodno za gradnjo na potresnih območjih.

4.4.3 Izvlečni preizkus

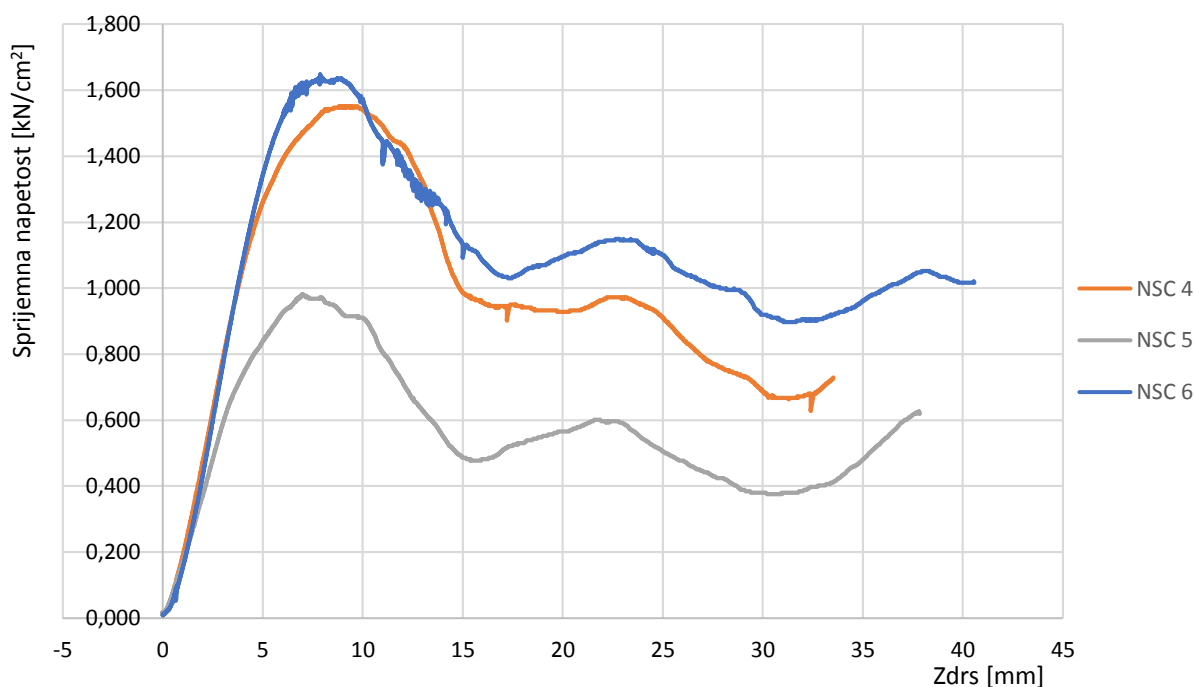
Pri izvlečnem testu podajamo rezultate sprijemne napetosti za običajen in visoko trden beton. Pričakujemo podobno obliko grafov a z različno maksimalno sprijemno napetostjo zaradi različnih vrst betonov. Preizkus smo po dosegu sprijemne trdnosti še nadaljevali, saj nas je zanimalo obnašanje materialov kljub nižanju sprijemne napetosti, kar se lepo vidi v poteku krivulj na grafikonih 2 in 3. Prav tako smo želeli doseči vidnejšo porušitev oz. začetne poškodbe vzorca.

Silo, s katero je bila obremenjena armaturna palica na izvelek, smo delili s stično površino betona in armature (22,62 cm²) ter dobili sprijemno napetost. Rezultate smo prikazali v obliki grafov, ki predstavljajo relacijo med sprijemno napetostjo in zdrsom armature iz betonske kocke.

¹ Vrednost deformacije je tako velika zaradi popuščanja epoksi lepila med bazaltno armaturno palico in jeklenim cevničnim nastavkom.

4.4.3.1 Beton običajne trdnosti in bazalna armatura

Grafikon 2: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in običajen beton.



Iz grafikona 2 je razvidno, da vrednosti sprijemne trdnosti vzorcev običajnega betona precej odstopajo med seboj. Vzorca NSC 4 in 6 sta prenesla sprijemno napetost okoli 1,6 kN/cm², NSC 5 pa zgolj 1 kN/cm². Poudariti je treba, da ima bazalna armatura peščen posip pogosto neenakomerno razporejen po površini palice. Vzorec NSC 5, ki najbolj odstopa od ostalih, je verjetno prenesel nižjo izvlečno silo zaradi odpovedi posipa armature v smislu nezadostne sprijemnosti. Kljub temu pa imajo vsi trije grafi zelo podobno obliko, kar nam lahko pomaga pri razumevanju dogajanja v vzorcu med izvedbo preizkusa. Spodnja preglednica prikazuje najvišje dosežene vrednosti sprijemne napetosti za vse tri preizkušance.

Preglednica 5: Maksimalna dosežena sprijemna napetost za preizkušance iz običajnega betona.

Preizkušanci	NSC 4	NSC 5	NSC 6	Povprečje
Sprjemna trdnost [kN/cm²]	1,55	0,98	1,64	1,39

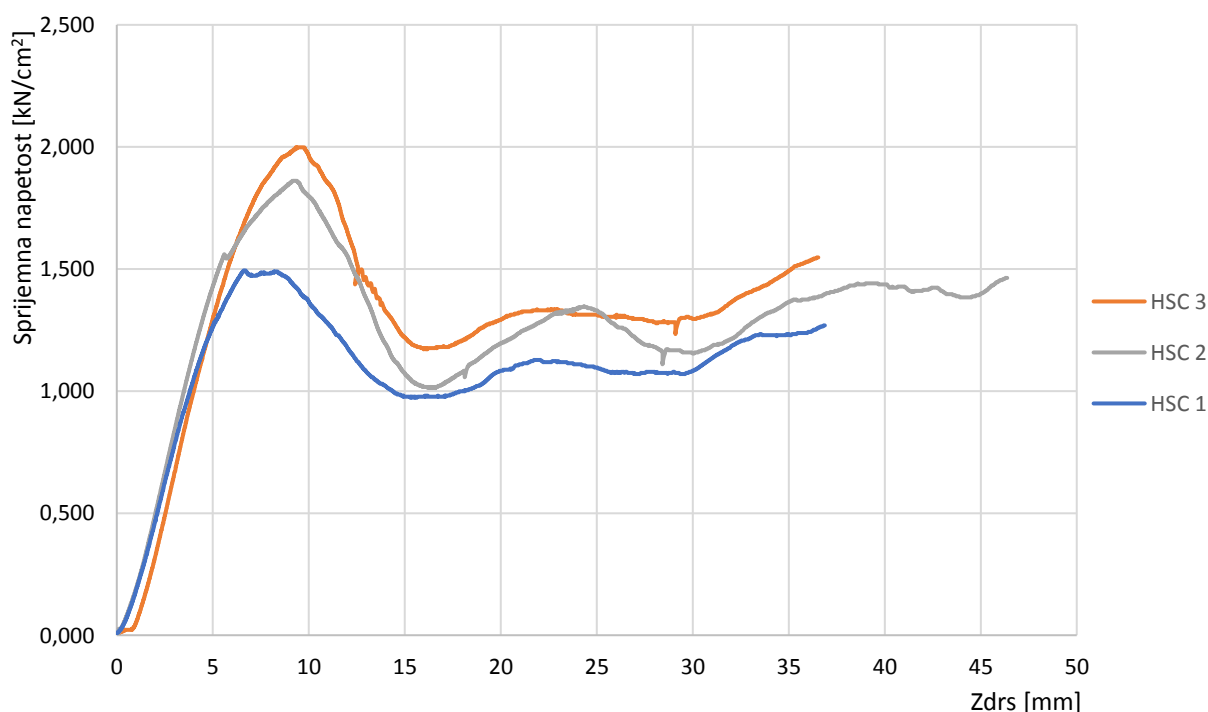
Vsi preizkušanci so dosegli maksimalno obremenitev z razmeroma majhnimi zdrsi glede na končne vrednosti. Z večanjem zdrsa sprijemna napetost pada, vendar vzorci kljub temu še dosegajo, v primerjavi z maksimalno vrednostjo, relativno visoko sprijemno napetost. Očitno ob večanju zdrsa poleg trenja, deluje tudi mehanizem zaklinjanja agregatnih zrn med posip armature in deformirano površino palice. Predvidevamo, da je preizkušanec dosegel tolikšno sprijemno trdnost predvsem zaradi kombinacije mehanizmov trenja in zaklinjanja; to pomeni, da sta omenjena mehanizma pri bazaltni armaturi s posipom najpomembnejša. Ob večanju zdrsa sta mehanizma trenja in zaklinjanja delovala do samega konca preizkusa. Če bi s testom nadaljevali, bi gotovo še nekaj časa spremljali relativno visoko vrednost sprijemne nosilnosti med armaturo in betonom, navkljub, predvsem s konstrukcijskega vidika, enormnemu izvleku.

Praktično takoj po začetku vnašanja izvlečne sile v armaturno palico so se pojavili zdrsi. To pomeni, da je začetna zlepljenost oz. adhezija relativno majhna. Za učinkovanje mehanizma adhezije armatura ne sme zdrseti iz betona.

Zanimiv je tudi potek diagrama po dosegu največje sprijemne napetosti; sprijemna napetost niha, kar lahko razložimo z že prej omenjenim mehanizmom zaklinjanja. Sprijemna napetost je narasla ob stiku posipa in agregatnega zrna betona, nato pa spet upadla, predvidevamo, da zaradi rahlega zdrsa armature iz betonske kocke; dogajanje je periodično. Glede na precej konstanten potek lahko trdimo, da bi sprijemna napetost podobno nihala vse do skoraj celotnega izvleka armaturene palice. Z uporabljenjo opremo, zaradi omejenega hoda bata hidravlične naprave, preizkusa povsem do konca oz. do dokončne porušitve ni bilo možno izvesti.

4.4.3.2 Beton visoke trdnosti in bazaltna armatura

Grafikon 3: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in visoko trden beton.



Beton visoke trdnosti je po pričakovanjih zagotovil boljšo sprijemnost kot običajni beton, kar prikazuje grafikon 3. Ponovno imamo odstopanje vrednosti enega vzorca, tudi v tem primeru najverjetneje zaradi neenakomernosti posipa bazaltne palice. Vzorce so prenesli napetost do 2 kN/cm^2 . V tem primeru imamo sicer podoben potek grafa po dosegu maksimalne sprijemne napetosti, vendar ta manj niha in ohranja relativno visoko sprijemno napetost še po dosegu najvišje vrednosti. Ta vrsta betona očitno zagotavlja bolj učinkovite mehanizme zaklinjanja in trenja, kar smo, zaradi nižjega vodocementnega razmerja in boljše kvalitete betonske mešanice, tudi pričakovali.

Predpostavka, da bo kvaliteta veziva odigrala pomembno vlogo se je izkazala za pravilno, saj so preizkušanci iz betona visoke trdnosti armaturi zagotovili precej večjo sprijemno kapaciteto. Enako kot pri običajnem betonu mehanizem zaklinjanja v kombinaciji s trenjem po dosegu najvišje sprijemne napetosti še vedno zagotavlja visoko sprijemno nosilnost. V preglednici 6 so prikazane najvišje dosežene vrednosti sprijemnih napetosti posameznih vzorcev.

Preglednica 6: Maksimalna dosežena sprijemna napetost za preizkušance iz visoko trdnega betona.

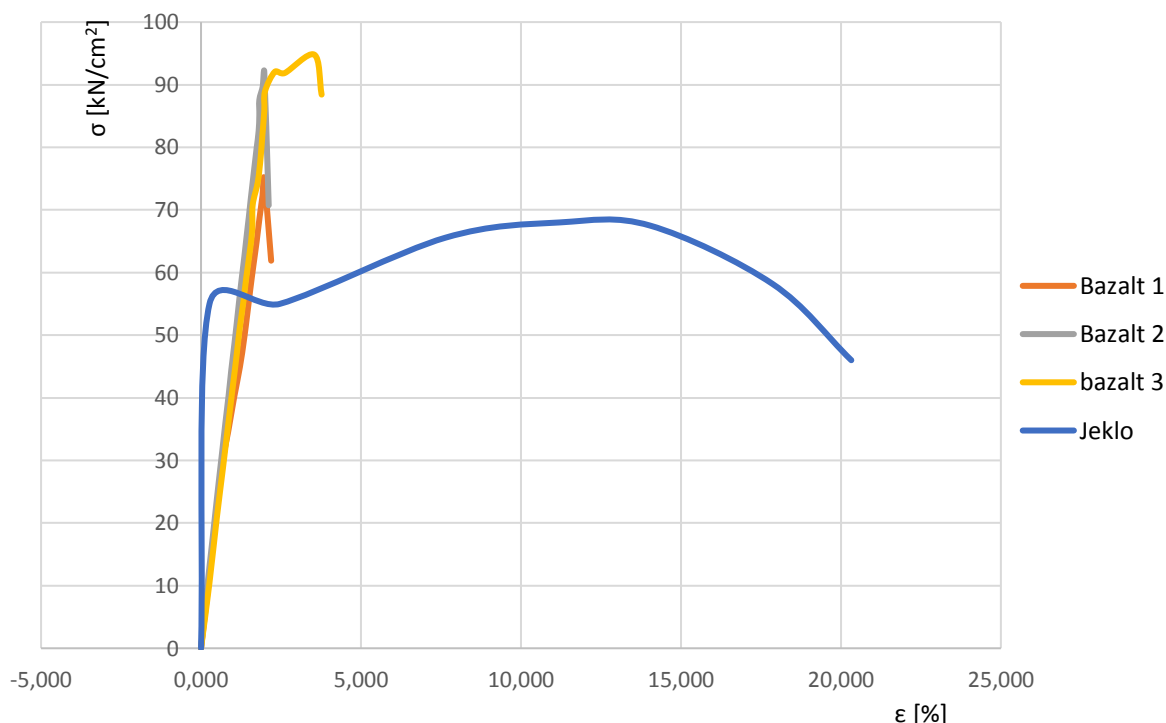
Preizkušanci	HSC 1	HSC 2	HSC 3	Povprečje
Sprijemna trdnost [kN/cm^2]	1,47	1,80	1,98	1,75

4.5 Primerjava rezultatov med jekleno in bazaltno armaturo

V nadaljevanju primerjamo rezultate nateznega in izvlečnega testa, dobljene pri testiranju jeklene in bazaltne armature premera 12 mm. Obravnavane jeklene palice so rebraste, bazaltne pa hrapave zaradi peščenega posipa in rahle spiralne vdolbine, katera imata enak namen kot rebra pri jekleni armaturi.

4.5.1 Natezni preizkus

Grafikon 4: Zveza med napetostjo in deformacijo za bazaltno in jekleno armaturo.



Rezultatom nateznega preizkusa bazaltnih palic smo za primerjavo dodali še primer σ - ϵ diagrama za jekleno armaturo. Gre sicer za jeklo, ki lahko prenaša precejšnje obremenitve in bi ga lahko uvrstili v trdnostni razred B500. Bazaltne palice dosegajo znatno višjo natezno trdnost, v tem primeru za kar tretjino (vzorca z najvišjo doseženo natezno trdnostjo), kljub težavam pri določanju sile vpetja, ki je povzročala neželeno porušitev zaradi prestriga armature.

Zelo očitna je razlika tudi v sposobnosti deformiranja v elastičnem in neelastičnem področju (duktilnosti). Jeklo lahko ob neprimerljivo večjih deformacijah še vedno dosega visoko natezno trdnost. Bazalt se obnaša kot krhek material in odpove v trenutku brez večjih deformacij. Zanimivo je, da se pri jeklu pojavi tečenje pri razmeroma nizkih deformacijah, bazalt pa ohranja elastičnost še pri veliko večjih deformacijah. Elastični modul določamo v območju, kjer velja Hookov zakon, torej nas zanima linearen del diagrama. Bazalt ima skoraj v celoti, praktično do porušitve, linearen potek, jeklo pa zgolj v majhnem delu na začetku. Najvišja dosežena trdnost pri jeklu leži izven linearnega območja.

Iz dobljenih rezultatov nateznega preizkusa, prikazanih v prejšnjem poglavju, smo določili modul elastičnosti bazaltne armature, ki znaša 42 GPa, modul elastičnosti jeklene armature pa 203 GPa, kar je približno petkratnik dobljene vrednosti za primer bazaltne armature. Preglednica 7 prikazuje številčne vrednosti modula elastičnosti za jekleno in bazaltno armaturo.

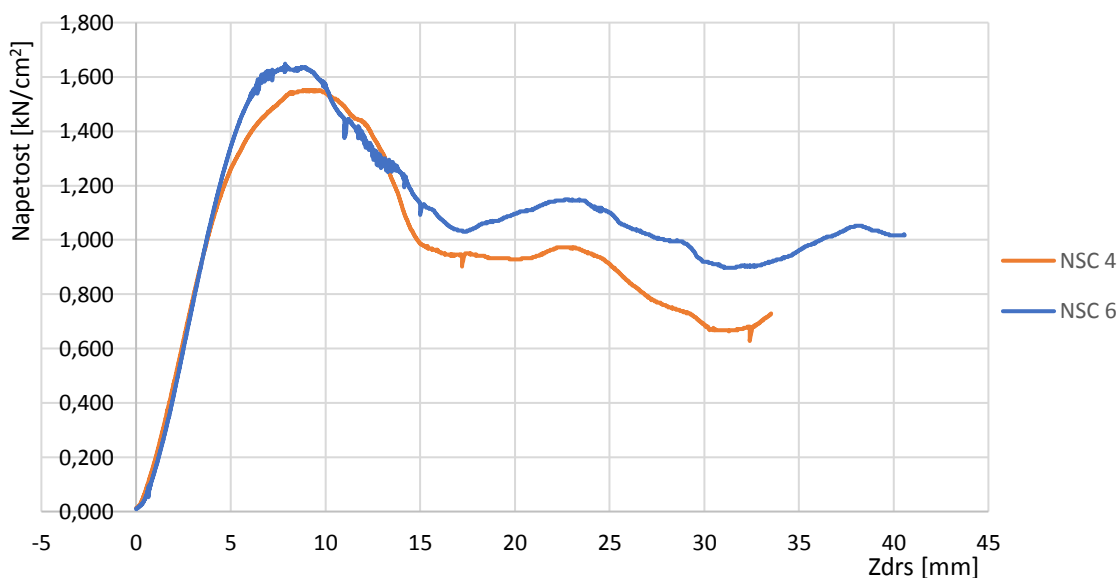
Preglednica 7: Primerjava natezne trdnosti, deformacije in modula elastičnosti med materialoma

Material	Natezna trdnost [MPa]	Pripadajoča deformacija [%]	Modul elastičnosti [GPa]
Bazalt (povprečje)	872,54	2,50 ²	41,79
Jeklo	674,88	13,0	203,33

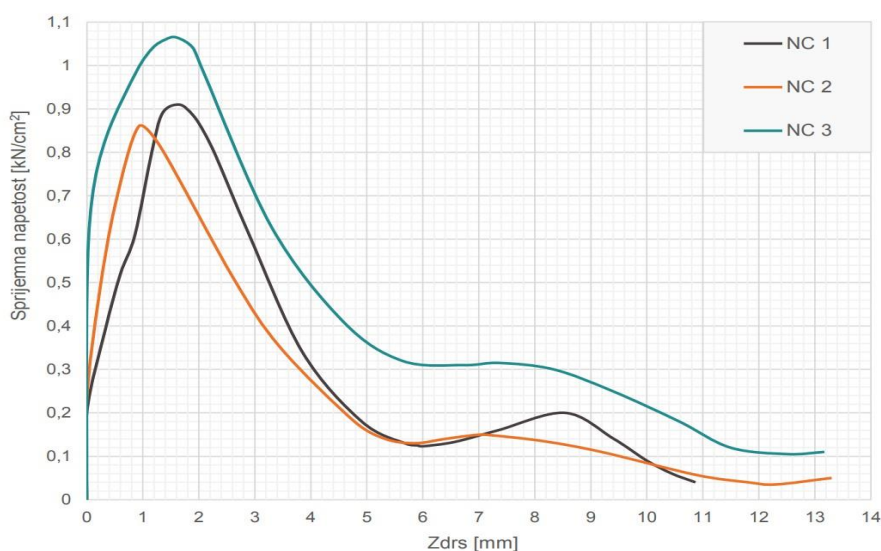
4.5.2 Izvlečni preizkus

4.5.2.1 Beton običajne trdnosti in armatura

Grafikon 5: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in običajen beton (brez preizkušanca z nižjo doseženo sprijemno trdnostjo)



Grafikon 6: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za rebrasto jekleno armaturo in običajen beton (Dežman, 2015)



² V povprečni vrednosti deformacije je zajeto tudi popuščanje epoksi lepila med bazaltno armaturno palico in jeklenim cevničnim nastavkom pri tretjem vzorcu.

Grafikona 5 in 6 prikazujeta potek sprijemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za jekleno rebrasto in bazaltno armaturo s posipom. Vzorec NSC 5 smo izločili iz primerjave zaradi očitnega odstopanja od ostalih vzorcev. Zelo zanimivo je, da, v nasprotju s pričakovanji, bazaltna armatura v kombinaciji z navadnim betonom dosega za skoraj 40 % višjo sprijemno napetost z betonom kot rebrasto jeklo in pri enaki vrsti betona. Očitno je, da je peščen posip zagotavljal dobra mehanizma zaklinjanja in trenja. Pri jeklu lahko že na samem začetku opazimo pojav določene napetosti brez da bi armatura zdrsnila. V tem delu je deloval izključno mehanizem adhezije oz. začetne zlepljenosti. Graf bazaltne armature tega območja dejansko nima, zato sklepamo, da pri tem materialu vpliva adhezije na potek sprijemne napetosti praktično ni.

V grobem sta si obliki grafov precej podobni; pri obeh materialih, bazaltu in jeklu, imamo očitni vrh (maksimalna sprijemnost), kateremu sledi padec sprijemne napetosti, ki nato še nekaj časa variira do konca meritve. Obenem so se vzorci z bazaltno in jekleno armaturo porušili z izvlekom armature, zato ju je lažje primerjati med seboj. Pri bazaltni armaturi je omenjen padec vrednosti sprijemne napetosti, po dosegu maksimalne vrednosti, veliko manjši v primerjavi z maksimalno vrednostjo kot pri jeklu in z veliko nižjo tendenco padanja. Prav tako ima bazalt očitnejše nihanje sprijemne napetosti med nadaljevanjem preizkusa.

Predhodno opisano dejstvo lahko pojasnimo s pomočjo načina porušitve (izvleka) betona ob armaturi. Jeklo z močnimi rebri ustvarja velike lokalne kontaktne tlačne napetosti na okoliški beton, kar dejansko vodi v njegovo lokalno porušitev. Bazaltov peščen posip je veliko manj odporen od jeklenih reber, zato se pojavlja lokalna porušitev tako pri betonu, kot pri vrhnjem sloju bazaltnih armaturnih palic. Ko se beton ob jeklenih rebrih poruši, armatura izgubi sidrno oporo, pri bazaltu pa se beton le delno poškoduje in zato še zagotavlja znatno odpornost na izvlek armature, kar ponazarja zelo počasen padec napetosti.

Obojestranska lokalna porušitev betona in bazalnega posipa je razlog za velike pomike. Jeklena armatura izgubi praktično vso sprijemno nosilnost že po dobrih 10 mm zdrsa. Bazaltna palica pa še pri več kot 40 mm zdrsa dosega sprijemno napetost, primerljivo z maksimalno vrednostjo pri rebrastih jeklenih palicah. Bazaltna armatura lahko še prenaša znatno obremenitev navkljub zelo velikim zdrsom. Preizkusa izvleka nismo uspeli pripeljati do konca zaradi omejitve hoda bata v preizkuševalnem stroju. Preglednica 8 prikazuje primerjavo številskih vrednosti za sprijemno trdnost med bazaltno in jekleno armaturo. Za slednjo smo uporabili podatke iz diplomskega dela Andraža Dežmana.

Preglednica 8: Primerjava rezultatov izvlečnega testa med armaturama v običajnem betonu.

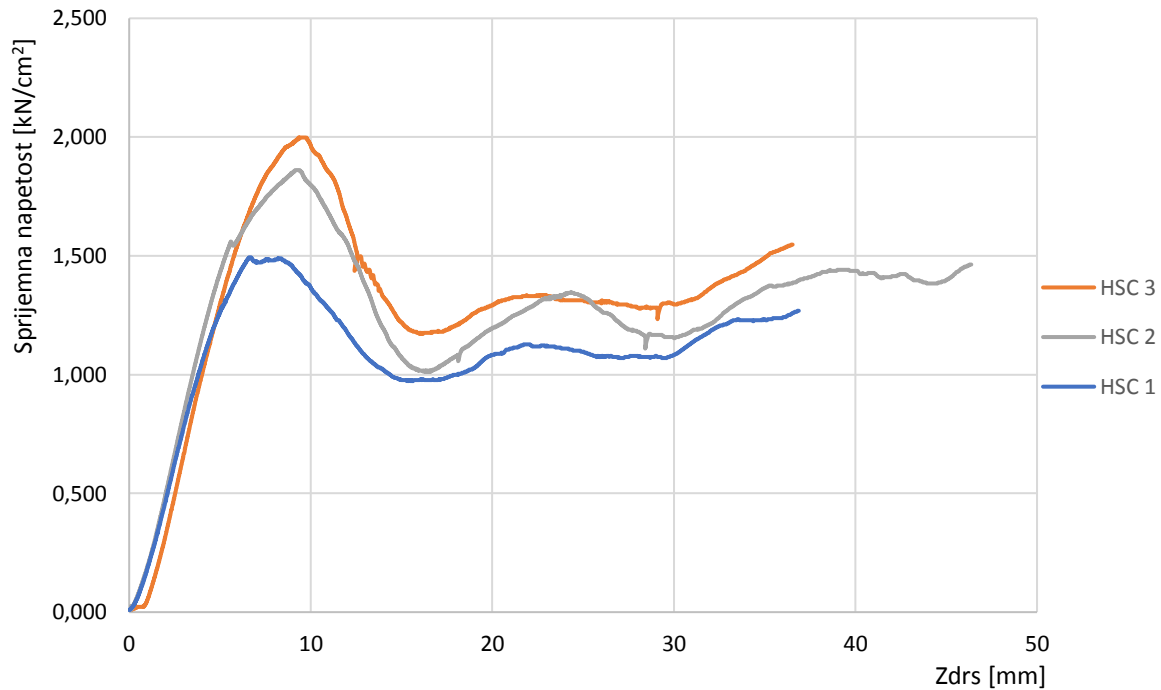
Material	Sprijemna trdnost [MPa]
Bazalt (povprečje)	15,95 ³
Jeklo (povprečje)	9,50

Omenili smo že, da se vzorci za testiranje izvleka, betonske kocke z jekleno armaturo, lahko porušijo lokalno zgolj ob armaturi (izvlek) ali pa s porušitvijo betonskega ovoja (razcep). Predvidevamo, da se pri standardnem testiranju izvleka v primeru bazaltne armature s posipom vedno zgodi izvlek armature iz betona in ne razcep betonskega ovoja. Tako kocka betona, ki objema armaturo, navzven ostane nepoškodovana. V konstrukcijskem smislu je ta lastnost lahko pozitivna, saj krovna plast betona, kljub velikim pomikom oz. zdrsom armature v elementu, ne bi odpadla, betonsko jedro pa bi ostalo nepoškodovano in bi bilo sposobno še naprej prenašati tlačne obremenitve.

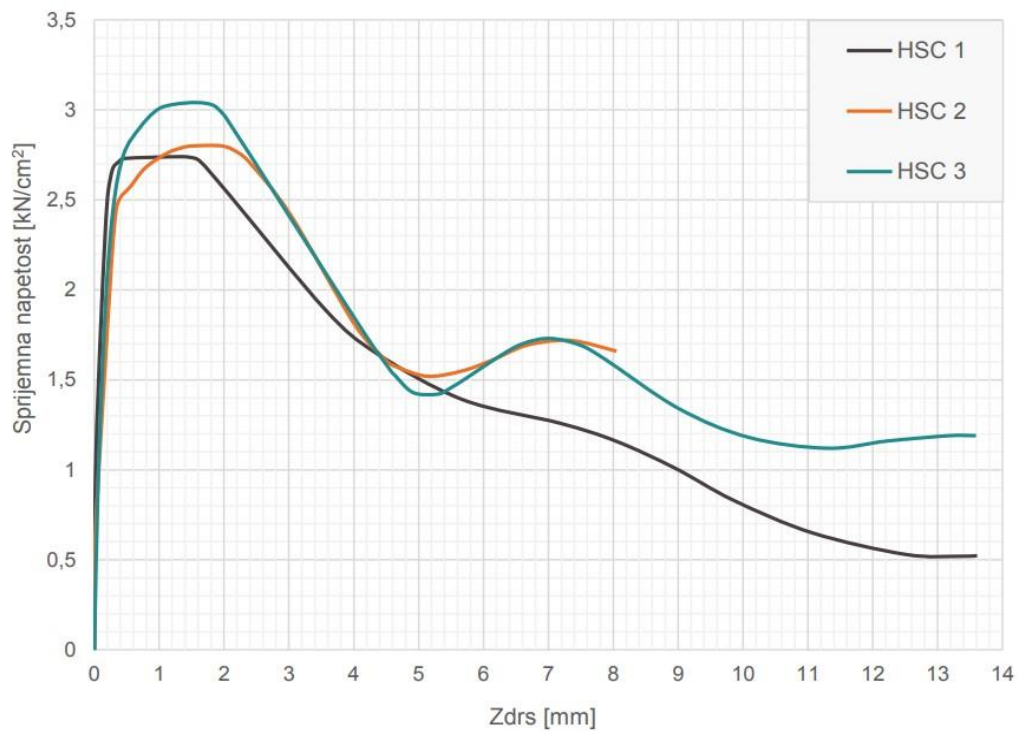
³ Povprečna vrednost sprijemne trdnosti ne vključuje najslabše vrednosti tretjega preizkušanca.

4.5.2.2 Beton visoke trdnosti in armatura

Grafikon 7: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za bazaltno armaturo in beton visoke trdnosti.



Grafikon 8: Zveza med sprijemno napetostjo in zdrsom za rebrasto jekleno armaturo in beton visoke trdnosti (Dežman, 2015)



Grafikona 7 in 8 prikazujeta potek sprijemnih napetosti v odvisnosti od zdrsa za rebrasto jekleno in bazaltno armaturo s posipom v kombinaciji z betonom visoke trdnosti. V tem primeru je, glede na beton običajne trdnosti, situacija obratna: jeklena armatura je prenesla za približno 30 % višjo obremenitev na izvlek kot bazaltne palice.

Jeklena armatura (grafikon 8) je, v kombinaciji z betonom visoke trdnosti, prenesla večjo obremenitev kot v kombinaciji z betonom običajne trdnosti predvsem zaradi močne adhezije, ki je odvisna od kvalitete veziva betona. HSC beton je prav tako veliko odpornejši na lokalne kontaktne tlačne obremenitve na stiku jeklenih reber in betona, kar je tudi vzrok za višje dobljene vrednosti sprijemne trdnosti pri betonu visoke trdnosti glede na običajen beton. Ob dosegu maksimalne sprijemne napetosti, pri betonu visoke trdnosti, smo zaznali minimalne zdrse, vendar je preizkušanelec relativno dolgo časa prenašal maksimalno obremenitev, precej dlje kot jeklene palice v običajnem betonu (grafikon 6). Ta je znašala 2,5 kN/cm², kar pomeni, da je preizkuševalna naprava vnašala natezno silo naslednje jakosti. (Dežman, 2015)

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

kjer S predstavlja stično površino armaturne palice in betona, τ sprijemno napetost, F pa silo na poteznem koncu. Dobili smo natezno silo $F = 56,5 \text{ kN}$. Izračunajmo še natezno napetost v palici ob dosegu maksimalne vrednosti z deljenjem natezne sile s presekom palice. (Dežman, 2015)

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

Dobljena napetost med preizkusom pomeni, da se je jeklena armatura že začela plastificirati. Beton visoke trdnosti je zagotavljal tako visoko sprijemno trdnost, da je izvlečna sila plastificirala jeklo in deformacije so narasle. Kljub temu je natezna nosilnost jekla večja od njegove sprijemne odpornosti z betonom, zato je beton vzorca popustil. (Dežman, 2015)

Pri bazaltni armaturi do plastifikacije oz. porušitve armaturne palice ni prišlo, saj je bila sprijemna nosilnost manjša od natezne nosilnosti bazaltne armaturne palice. Glede na grafikon 7 imamo podobno primerjavo kot v prejšnjem poglavju, kjer smo analizirali izvlek armature iz običajnega betona. Zdrsi, pri katerih imamo še razmeroma visoko sprijemno nosilnost, so pri bazaltnih palicah, tudi v primeru betona visoke trdnosti, znatno večji kot pri jeklenih. Mehanizmi sprijemnosti so pri betonu visoke trdnosti delovali podobno kot pri običajnem betonu za obe vrsti armatur. Pri bazaltu, kljub kvalitetnejšemu betonu, vpliva mehanizma adhezije na sprijemno trdnost praktično ni zaznati. Na velikost sprijemne napetosti vplivata predvsem trenje med betonom in armaturno palico ter zaklinjanje agregatnih zrn med posip palic. Kvalitetnejši beton zviša doseženo sprijemno trdnost pri obeh vrstah armatur. Preglednica 9 prikazuje primerjavo številčnih vrednosti sprijemne trdnosti obeh vrst armatur. Za jekleno armaturo smo uporabili podatke iz diplomskega dela Andraža Dežmana (Dežman, 2015).

Preglednica 9: Primerjava rezultatov izvlečnega testa med armaturama v betonu visoke trdnosti.

Material	Sprijemna napetost [MPa]
Bazalt (povprečje)	17,50
Jeklo (povprečje)	28,60

4.5.3 Porušitve vzorcev nateznega in izvlečnega preizkusa

Slika načina porušitve vzorcev pri nateznem in izvlečnem testu nam je v pomoč pri razlagi dobljenih rezultatov. V nadaljevanju, na slikah 36 do 39, prikazujemo način porušitve vzorcev nateznega in izvlečnega preizkusa.

Bazaltna armatura se v nategu v splošnem poruši z razcepljanjem in pretrgom posameznih vlaken. V našem primeru sta dva vzorca odpovedala zaradi prestriga vlaken in eden zaradi prekoračitve sprijemnosti na stiku lepila – epoksi smole in jeklenega cevne nastavka. Zato prave porušitve vlaken armature nismo dobili, kljub temu da so preizkušanci dosegli visoke natezne trdnosti.



Slika 36: Porušitev vzorca zaradi izvleka epoksi smole iz jeklenega cevne nastavka

Pri jeklu je zgodba drugačna. Ob dosegu meje tečenja pri nateznem preizkusu se vzorec podaljša in stanjša – območje izboljšanja materiala, deformacije narastejo. Nato se natezna sila povečuje do pretrga. Oblika σ - ϵ diagrama je za različne vrste jekel drugačna (Korelc, 2019), pri bazaltu kvaliteta materiala na obliko grafa bistveno ne vpliva.

Veliko manj očitno porušitev smo dobili pri izvlečnem testu bazaltne armature. Po dosegu maksimalne sprijemne napetosti je zdrs neprekinjeno naraščal, kar je vidno na sliki 37, kjer je skoraj celoten po standardu zunaj betonske kocke puščen del armature (5 cm) izginil vanjo, beton pa je na zunaj ostal nepoškodovan. Slika 38 prikazuje lokalno dogajanje ob armaturni palici za obe vrsti betona. Vzorca so bili previdno prerezani s kotno brusilko tako, da je na eni polovici armaturna palica še sprijeta z betonom. Jasno so vidni ostanki peščenega armaturnega posipa na betonu, kar nakazuje pretežno na odpoved površine armature, okoliški beton pa je manj poškodovan. Armaturni posip ni sposoben prenesti oz. ustvariti tolikšnih obremenitev na strjen beton, da bi ga lahko močneje poškodoval, zaradi nezadostne trdnosti komponent površinskega nanosa in premajhne površine pripadajočih zrn posipa za zaklinjanje z agregatom v betonu.



Slika 37: Zdrs bazaltne armature, ki je prekoračil maksimalno razdaljo zaznavanja merilnika



Slika 38: Porušitev z izvlekom na stiku med betonom in bazaltno palico za običajen (levo) in visoko trden beton (desno)

Na sliki 39 sta vidni možni porušitvi pri izvlečnem testu za jekleno armaturo – izvlek in razcep. Porušitev stika oziroma maksimalna sprijemna napetost pri preizkušancih z bazaltno armaturo je bila v našem primeru dosežena izključno z izvlekom.



Slika 39: Izvlek jeklene armature iz vzorca (levo) in razcep (desno) (Štesl, 2016)

Kljub očitnim zdrsom armature pa je bazaltna armatura še vedno zagotavljala relativno visoko sprijemno nosilnost. Preizkusa pravzaprav nismo niti uspeli pripeljati do konca, zaradi omejitve hoda bata v preizkuševalni napravi. Izvlek bazaltne palice iz betona ni nenadna porušitev kot pri nateznem testu bazaltne armaturene palice, temveč stik popušča postopno s premagovanjem trenja, kar po našem mnenju prispeva k večji duktilnosti konstrukcij. Bazaltna armatura je, v naših preiskovanih primerih, po relativno velikem zdrsu armature, še vedno zagotavljala precejšnjo sprijemno nosilnost. Upamo, da bi ta ugodna lastnost lahko vsaj delno omilila negativen sloves uporabe bazaltne armature pri gradnji na potresnih območjih, to je krhka natezna porušitev bazaltne armature.

5 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi smo med seboj primerjali lastnosti jeklene rebraste in bazaltne armature s posipom in vzdolžnim spiralnim utorom. Izvedli smo natezni preizkus bazaltnih armaturnih palic in izvlečni test bazaltne armature iz betona, običajne in visoke trdnosti.

Ugotovili smo, da kvaliteta in sama sestava betona pomembno vplivata na izvlek armature iz betona. Beton visoke trdnosti znatno izboljša sprijemnost z obema vrstama armatur, v primerjavi z betonom običajne trdnosti.

Ugotovili smo tudi, da bazalna armatura omogoča primerljivo sprijemno trdnost glede na jekleno; pri preizkušancih iz običajnega betona je bila vrednost sprijemne trdnosti pri bazaltni armaturi celo višja kot pri jekleni, pri preizkušancih iz visokotrdnega betona pa nižja. Posip armaturnih palic iz bazaltnih vlaken in spiralni utor sta lahko učinkovitejša kot jeklena rebra. Glede na dobljene rezultate izvlečnega testa lahko, pri bazaltni armaturi, v več primerih pričakujemo zgolj izvlek in ne razcep okoliškega betona.

Pri preizkušanju natezne trdnosti bazaltnih armaturnih palic se je izkazalo, da je bazalna armatura precej močnejša od jekla, a tudi bolj krhka, kar je pri gradnji armiranobetonskih konstrukcij z bazaltno armaturo, predvsem na potresnih območjih, neugodna lastnost. Po drugi strani pa bazalna armatura po relativno velikem zdrsru še vedno zagotavlja precejšnjo sprijemno nosilnost, kar po našem mnenju omogoča večjo duktilnost konstrukcij.

Pri izvedbi nateznega in izvlečnega preizkusa se je kombinacija epoksija in jeklenih cevi izkazala za primerno.

Tako kot jeklena ima tudi bazalna armatura svoje prednosti in slabosti, kar predstavlja izziv za projektiranje in gradnjo objektov. Bazalna in jeklena armatura se v mnogih pogledih dopolnjujeta, zato bi lahko v prihodnosti predstavljali novost na področju armiranobetonske gradnje v obliki kombinacije obeh materialov. Vsekakor bo armatura iz bazalta igrala pomembno vlogo pri sanacijah infrastrukturnih in ostalih objektov, posebej na območjih z agresivnim okoljem.

VIRI

Antolinc, D., 2019. Diagram napetost-defomacija. Osebna komunikacija. (3. 9. 2019.)

Banibayat, P. 2011. Experimental investigation of the mechanical and creep rupture properties of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars. Doktorska disertacija. Akron, The Graduate Faculty of The University of Akron: 216 str.

https://etd.ohiolink.edu/!etd.send_file?accession=akron1323229543&disposition=inline

(Pridobljeno 2. 8. 2018.)

Basalt Rebar zur Betonbewehrung, Deutsche Basalt Faser GmbH.

<https://www.deutsche-basalt-faser.de/produkte/basalt-faser-zur-betonbewehrung/> (Pridobljeno: 22. 6. 2019.)

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

Grum, B., Čebular, U., Kavčič, F., Šušteršič, J., Gerbec, B., Leskovar, I., Bergant, M., Dobnikar, V. 2004. Sanacije betonskih objektov. Ljubljana. I2 družba za založništvo, izobraževanje in raziskovanje d.o.o.: 271 str.

Homenbuild. Beton se strdi. Kako hitro se suši beton?

<https://homenbuild.ru/sl/concrete-hardens-how-quickly-the-concrete-mix-dries/> (Pridobljeno: 14. 8. 2019.)

Izjava o lastnostih št.:1404-CPR-2106. 2017. Salonit Anhovo, d. d.

<https://www.salonit.si/proizvodi/cementi/2018091016350476> (Pridobljeno: 29. 7. 2019.)

Juvanec, B. 2015. Sprijemnost med vlaknastim betonom in armaturo. Diplomski naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba B. Juvanec): 52 str.

Kopač, J., 2016. Vpliv premera armaturne palice na sprijemnost z betonom. Diplomski naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Kopač): 34 str.

Korelc, J. 2018. Jeklo kot material. Predavanja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 88 str.

https://ucilnica1819.fgg.uni-lj.si/pluginfile.php/6568/mod_resource/content/1/2.%20Material.pdf

(Pridobljeno 20. 8. 2019.)

Kryžanowski, A. 2018. Armirani beton. Predavanja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 47 str.

Leban, J. 2018. Vpliv protikorozijske zaščite na sprijemnost med betonom in armaturo. Diplomski naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba J. Leban): 51 str.

Lopatič, J. 2012. Betonske konstrukcije (študijsko gradivo, UNI GR_B). Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 26 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.

Opara, A., 2018. Bazalna armatura za ojačenje betonskih konstrukcij. Diplomski naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba A. Opara): 33 str.

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.

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

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

Spravljanje betona. Tablica armature.

<https://spravljanjebetona.com/2013/12/22/tablice-armature/> (Pridobljeno: 29. 8. 2019)

Štesl, R. 2016. Vpliv vrste cementa na sprijemnost med betonom in armaturo. Diplomski naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo (samozaložba R. Štesl): 34 str.

Technobasalt. Basalt rebar.

<http://technobasalt.com/our-products/basalt-rebar/> (Pridobljeno 30. 7. 2019.)

Žarnić, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 351 str.

Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bosiljkov, V. B. 2015. Gradiva vaje 2015/2016. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str.