

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER

Kandidat:

MATIJA ZAJEC

**KRČENJE S POLIPROPILENSKIMI VLAKNI
MIKROARMIRANEGA BETONA VISOKE TRDNOSTI**

Diplomska naloga št.: **3218/KS**

**SHRINKAGE OF POLYPROPYLENE FIBRE
REINFORCED HIGH STRENGTH CONCRETE**

Graduation thesis No.: **3218/KS**

Mentor:
doc. dr. Drago Saje

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 24. 4. 2012

IZJAVE

Podpisani Matija Zajec izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom »Krčenje s polipropilenskimi vlakni mikroarmiranega betona visoke trdnosti«.

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

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 13. 4. 2012

Matija Zajec

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| UDK: | 624.012.45:691.32(043.2) |
| Avtor: | Matija Zajec |
| Mentor: | doc. dr. Drago Saje |
| Naslov: | Krčenje s polipropilenskimi vlakni mikroarmiranega betona visoke trdnosti |
| Tip dokumenta: | diplomska naloga |
| Obseg in oprema: | 77 str., 15 pregl., 48 sl., 1 en. |
| Ključne besede: | krčenje, polipropilenska vlakna, beton visoke trdnosti, avtogeno krčenje |

Izvleček

V diplomskem delu obravnavamo analizo krčenja betona visoke trdnosti, ki je mikroarmiran s polipropilenskimi vlakni. Uporabili smo štiri različne dolžine polipropilenskih vlaken, in sicer dolžine 6 mm, 12 mm, 18 mm in 30 mm. Delež vlaken je pri vsaki betonski mešanici 0.5 % njene prostornine. Pri betonih visoke trdnosti je v prvih dneh po betoniranju zelo intenzivno avtogeno krčenje, zato smo prvi dan merili avtogeno krčenje elektronsko, s pomočjo merilnih uric. V nadaljevanju smo krčenje merili z nasadnim deformatrom. Avtogeno krčenje smo merili na zatesnjenih preskušancih, na ostalih, nezatesnjenih preskušancih, pa smo merili celotno krčenje betona visoke trdnosti. Analizirali smo tudi krčenje betona zaradi sušenja, ki predstavlja razliko med celotnim in avtogenim krčenjem betona. V analizi smo med seboj primerjali krčenje 1, 3, 7 in 28 dni starega betona. Dodatno smo preizkusili še tekoči dodatek proti krčenju Eclipse Plus, ki deluje na principu zmanjšanja površinske napetosti v kapilarnih porah. V okviru izvedenih eksperimentalnih raziskav smo ugotovili, da polipropilenska vlakna relativno malo pripomorejo k zmanjšanju krčenja betonov visoke trdnosti. Kot najbolj učinkovita so se, predvsem pri zgodnjem avtogenem krčenju, izkazala kratka polipropilenska vlakna, dolžine 6 mm.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.012.45:691.32(043.2)
Author: Matija Zajec
Supervisor: doc. dr. Drago Saje
Title: Shrinkage of polypropylene fibre reinforced high strength concrete
Document type: diploma work
Scope and tools: 77 p., 15 tab., 48 fig., 1 eq.
Keywords: shrinkage, polypropylene fibres, high strength concrete, autogenous shrinkage

Abstract

In this diploma paper we deal with the analysis of high strength concrete, micro-reinforced with polypropylene fibers. We used four different lengths of polypropylene fibers: 6mm, 12 mm, 18 mm and 30 mm. The share of fibers in each concrete mixture is 0.5 % of the total volume. With high strength concretes autogenous shrinkage is very intensive, so the first day we measured it electronically with dial gauges. Later we measured the shrinking with a mobile displacement transducer. We measured autogenous shrinkage on sealed samples, and on the unsealed samples we measured the total shrinkage of high strength concrete. We also analysed shrinkage of the concrete due to drying, which represents the difference between total and autogenous concrete shrinkage. In the analysis we compared concrete shrinkage of 1-, 3-, 7- and 28-day-old concretes. In addition we tested the liquid shrinkage reducing admixture Eclipse Plus which works by reducing surface tension in capillary pores. Through experimental researches we discovered that polypropylene fibers do not contribute much to reducing high strength concrete shrinkage. The most efficient were, especially in the early stages of autogenous shrinkage, short polypropylene fibers (6mm).

ZAHVALA

Za nesebično pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Dragu Sajetu. Za pomoč pri delu v laboratoriju na FGG se zahvaljujem laborantu Franciju.

Zahvaljujem se tudi svoji družini, predvsem staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija stala ob strani in me spodbujala.

Nazadnje gre največja zahvala Lei, ki me je vsa ta leta podpirala in spodbujala.

KAZALO VSEBINE

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| IZJAVE | I |
| BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK | II |
| BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT | III |
| ZAHVALA | IV |
| KAZALO VSEBINE | V |
| KAZALO PREGLEDNIC | VII |
| KAZALO SLIK | VIII |
| | |
| 1 UVOD | 1 |
| 2 SPLOŠNO O BETONU | 3 |
| 2.1 Uvod v beton | 3 |
| 2.2 Mineralni agregat | 3 |
| 2.3 Cement | 7 |
| 2.4 Voda | 10 |
| 2.5 Dodatki betonu | 11 |
| 2.5.1 Kemijski dodatki | 11 |
| 2.5.2 Mineralni dodatki | 13 |
| 3 BETON VISOKE TRDNOSTI | 14 |
| 3.1 Sestavine betonov visoke trdnosti | 14 |
| 3.2 Posebnosti zgradbe betona visoke trdnosti | 14 |
| 3.3 Mehanske in reološke lastnosti betonov visoke trdnosti | 15 |
| 3.4 Trajnost betonov visokih trdnosti | 17 |
| 3.5 Prednosti in pomanjkljivosti betonov visokih trdnosti | 18 |
| 4 VLAKNASTI BETON | 19 |
| 4.1 Splošno | 19 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2 Vrste vlaken..... | 20 |
| 4.3 Stično območje med vlakni in cementno matrico..... | 22 |
| 5 KRČENJE BETONA..... | 24 |
| 5.1 Splošno o krčenju betona..... | 24 |
| 5.2 Krčenje vlaknastih betonov visoke trdnosti..... | 24 |
| 6 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE | 27 |
| 6.1 Uporabljeni materiali..... | 27 |
| 6.1.1 Agregat..... | 27 |
| 6.1.2 Cement..... | 30 |
| 6.1.3 Voda | 31 |
| 6.1.4 Kemijski in mineralni dodatki | 31 |
| 6.1.5 Vlakna | 32 |
| 6.2 Sestava betonskih mešanic in priprava preizkušancev | 33 |
| 6.2.1 Sestava preiskovanih mikroarmiranih betonov visoke trdnosti | 33 |
| 6.2.2 Priprava preizkušancev in merjenje krčenja mikroarmiranega betona visoke trdnosti..... | 35 |
| 6.3 Časovni potek krčenja vlaknastega betona | 45 |
| 6.4 Rezultati in analiza eksperimentalnih raziskav | 47 |
| 6.4.1 Vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na velikost avtogenega krčenja vlaknastega betona..... | 47 |
| 6.4.2 Vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na velikost krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona..... | 57 |
| 6.4.3 Vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na velikost celotnega krčenja vlaknastega betona..... | 64 |
| 7 ZAKLJUČKI | 74 |
| VIRI..... | 76 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Preglednica 1: Oznake in imena mineralnih dodatkov..... | 9 |
| Preglednica 2: Skupine jeklenih vlaken v odvisnosti od načina izdelave | 21 |
| Preglednica 3: Lastnosti mivke Termit iz Moravč | 28 |
| Preglednica 4: Lastnosti kamnine agregata iz Separacije Kresnice..... | 29 |
| Preglednica 5: Sestavine, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti uporabljenega cementa | 30 |
| Preglednica 6: Delež mineralov v cementnem klinkerju uporabljenega cementa..... | 31 |
| Preglednica 7: Osnovne lastnosti antikorodina (TKK Serpenica) | 31 |
| Preglednica 8: Kemična sestava, fizikalno-kemične lastnosti mikrosilike (TTK Serpenica)... | 32 |
| Preglednica 9: Lastnosti uporabljenih polipropilenskih vlaken | 33 |
| Preglednica 10: Sestava preiskovanih betonskih mešanic visoke trdnosti mikroarmiranih s polipropilenskimi vlakni | 34 |
| Preglednica 11: Povprečni skrčki betonskih mešanic v ‰ pri različnih starostih in pripadajoče standardne deviacije | 47 |
| Preglednica 12: Velikost avtogenega krčenja betonov pri različnih starostih | 57 |
| Preglednica 13: Velikost krčenja zaradi sušenja betonov pri različnih starostih..... | 63 |
| Preglednica 14: Velikost celotnega krčenja obravnavanih betonov pri različnih starostih | 70 |
| Preglednica 15: Rezultati raziskave betona visoke trdnosti, mikroarmiranega s polipropilenskimi vlakni | 71 |

KAZALO SLIK

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1: Prostorninski deleži sestavin (a) v svežem in (b) v otrdelem betonu (Saje D., 1997) . | 3 |
| Slika 2: Zrnavost agregata v betonskem prerezu (Žarnić, 2003) | 5 |
| Slika 3: Shematski prikaz sejanja agregata (Žarnić, 2003) | 6 |
| Slika 4: Mejne krivulje območij primernosti agregata (Žarnić, 2003) | 6 |
| Slika 5: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001 | 8 |
| Slika 6: Vpliv superplastifikatorja in mikrosilike na razpored delcev | 14 |
| Slika 7: Vpliv poroznosti na tlačno trdnost cementne paste | 16 |
| Slika 8: Tipični delovni diagrami (A) agregata, (C) cementnega kamna in (B) betona | 16 |
| Slika 9: Vpliv velikosti agregata na razpored vlaken (Muravljov, 2003) | 19 |
| Slika 10: Oblike vlaken | 20 |
| Slika 11: Prikaz deležev ostanka mivke MP-GB na sitih | 27 |
| Slika 12: Uporabljena polipropilenska vlakna | 33 |
| Slika 13: Tehtanje posameznih količin | 36 |
| Slika 14: Mešalec za beton | 36 |
| Slika 15: Zgoščevanje betona na vibracijski mizi | 37 |
| Slika 16: Merjenje višine poseda | 38 |
| Slika 17: Merjenje razleza betonske mešanice | 39 |
| Slika 18: Deli naprave za merjenje vsebnosti zraka v betonu | 41 |
| Slika 19: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v betonu | 41 |
| Slika 20: Shematični prikaz merjenja zgodnjega avtogenega krčenja | 42 |
| Slika 21: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preskušancev | 43 |
| Slika 22: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona | 44 |
| Slika 23: Meritev celotnega krčenja z nasadnim deformetrom | 45 |
| Slika 24: Časovni potek krčenja zatesnjenega betona in časovni potek spreminjanja linearnega temperaturnega koeficienta raztezka betona α_T v prvih petih dneh (Saje, 2001) . | 46 |
| Slika 25: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC | 48 |
| Slika 26: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV12 | 49 |
| Slika 27: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV30 | 49 |
| Slika 28: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV6 | 50 |
| Slika 29: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV18 | 50 |
| Slika 30: Avtogeno krčenje primerjalnega betona visoke trdnosti HSC | 51 |
| Slika 31: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV12 | 52 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 32: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV30 | 53 |
| Slika 33: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV6 | 54 |
| Slika 34: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV18 | 55 |
| Slika 35: Avtogeno krčenje vseh v raziskavi uporabljenih betonov | 56 |
| Slika 36: Krčenje zaradi sušenja primerjalnega betona z oznako HSC | 58 |
| Slika 37: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV12..... | 59 |
| Slika 38: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV30..... | 60 |
| Slika 39: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV6..... | 61 |
| Slika 40: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV18..... | 62 |
| Slika 41: Prikaz krčenja zaradi sušenja vseh obravnavanih betonov visoke trdnosti | 63 |
| Slika 42: Celotno krčenje primerjalnega betona z oznako HSC..... | 64 |
| Slika 43: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV12..... | 65 |
| Slika 44: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV30..... | 66 |
| Slika 45: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV6..... | 67 |
| Slika 46: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV18..... | 68 |
| Slika 47: Prikaz celotnega krčenja za vse obravnavane betone visoke trdnosti..... | 70 |
| Slika 48: Časovni potek zgodnjega avtogenega krčenja in potek temperature betona HSC- eclipse | 73 |

1 UVOD

Zaradi visoke tlačne trdnosti, relativno velike trajnosti, možnosti poljubnega oblikovanja konstrukcij, sorazmerno majhnih vzdrževalnih stroškov in konkurenčne cene beton kljub slabostim, kot so velika lastna teža, majhna natezna trdnost in krčenje ter lezenje betona, predstavlja enega izmed najpogosteje uporabljenih gradbenih materialov. S posebno tehnologijo proizvodnje in vgrajevanja betona ter z različnimi dodatki lahko občutno povečamo tlačno trdnost, duktilnost in odpornost betona na atmosferske vplive ter zmanjšamo tako krčenje in lezenje betona kakor tudi širino razpok betonskih konstrukcij.

V literaturi smo zasledili različne ugotovitve o vplivu polipropilenskih vlaken na krčenje betona visoke trdnosti. Nekateri raziskovalci ugotavljajo, da polipropilenska vlakna zmanjšujejo krčenje betona visoke trdnosti za približno 25 %, medtem ko nekateri raziskovalci celo trdijo, da polipropilenska vlakna povečujejo krčenje betona visoke trdnosti.

Namen raziskav v okviru diplomske naloge je bil ugotoviti vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na krčenje betona visoke trdnosti. Osredotočili smo se predvsem na avtogeno krčenje betona, ki je pri betonih visoke trdnosti intenzivno predvsem v prvih nekaj dneh po betoniranju. Krčenje betona smo spremljali do 28. dneva starosti betona. Pri tej starosti smo opravili tudi preizkus tlačne trdnosti betona visoke trdnosti. Avtogeno krčenje betona visoke trdnosti smo merili na zatesnjenih betonskih preskušancih. Na ta način smo preprečili izmenjavo vlage iz betona v okolico. Celotno krčenje betona smo merili na sušenju izpostavljenih prizmah. Krčenje zaradi sušenja pa smo dobili tako, da smo od celotnega krčenja odšteli izmerjeno avtogeno krčenje betona.

Diplomska naloga poleg uvoda vsebuje še šest poglavij. V poglavju *Splošno o betonu* so predstavljene in opisane posamezne osnovne sestavine betonov. V naslednjem poglavju, *Beton visoke trdnosti*, so opisane sestavine betonov visoke trdnosti, posebnosti zgradbe letih na mikro nivoju, mehanske in reološke lastnosti ter parametri, ki vplivajo na trajnost betona visoke trdnosti. Poglavje se zaključuje z navedbo prednosti in slabosti betona visoke trdnosti. V poglavju *Vlaknasti beton* je na začetku splošen opis betona, ki vsebuje vlaknasto

armaturo. Predstavljene in opisane so različne vrste vlaken, ki jih uporabljamo pri tovrstnih betonih. Velik poudarek je na stičnem območju med vlaknom in cementno matrico. V poglavju *Krčenje betona* je opisano krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti. Poudarek je na avtogenem krčenju, ki je pri betonih visoke trdnosti kar veliko.

Eksperimentalni del diplomske naloge predstavlja poglavje *Eksperimentalne raziskave*. Na začetku poglavja so opisani uporabljeni materiali preskušancev in sestava betonskih mešanic. Sledi opis postopka izdelave preskušancev, postopka merjenja avtogenega krčenja in celotnega krčenja preskušancev. V preglednicah in diagramih so nazorno prikazani rezultati lastnih meritev avtogenega krčenja, krčenja zaradi sušenja in celotnega krčenja vlaknastega betona visoke trdnosti do 28. dneva starosti betona. Na podlagi analize meritev krčenja sledijo sklepne ugotovitve.

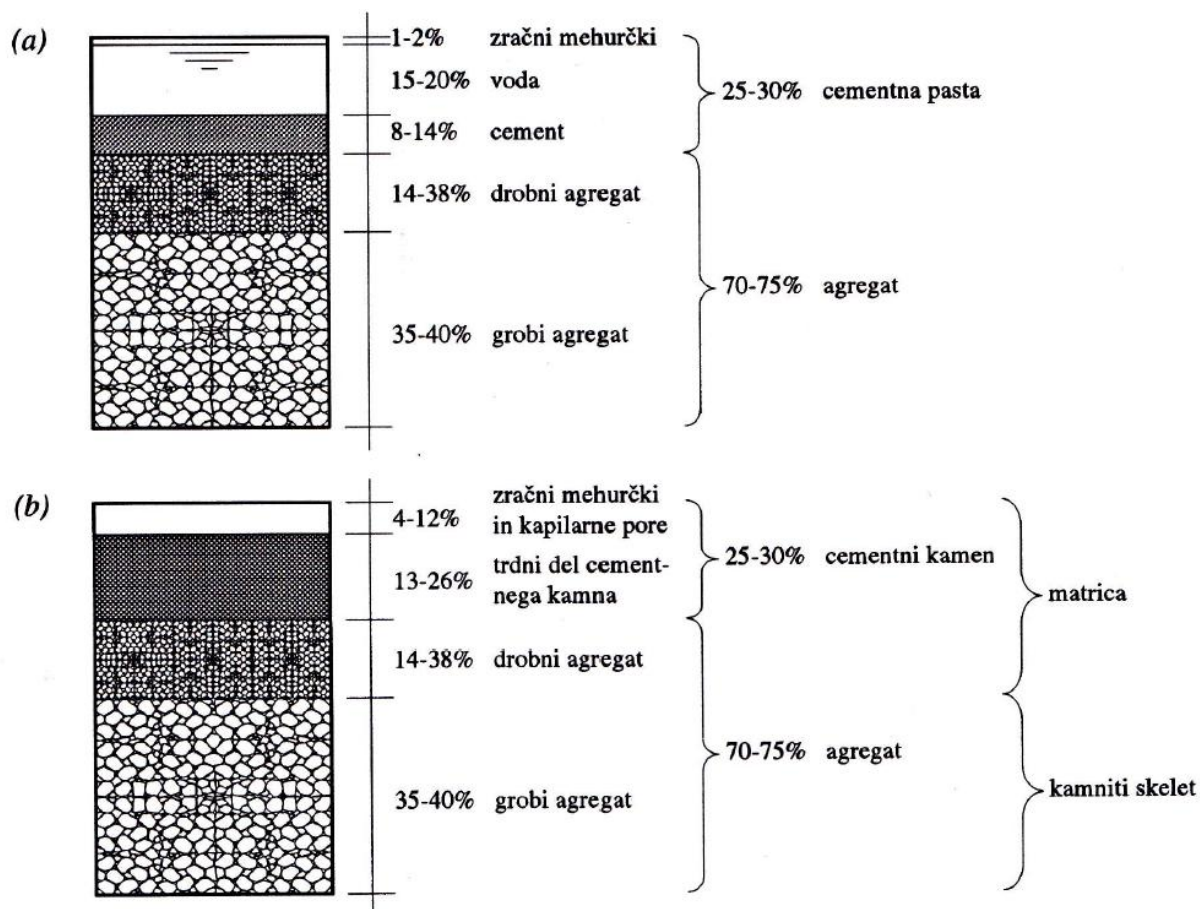
V *Zaključkih* diplomske naloge so zbrane pomembnejše ugotovitve, kako vpliva dolžina polipropilenskih vlaken na krčenje betona visoke trdnosti. Sledi usmeritev za nadaljnje raziskave avtogenega krčenja na področju vlaknastih betonov visoke trdnosti.

V poglavju *Viri* je zbrana literatura, ki je citirana v diplomski nalogi.

2 SPLOŠNO O BETONU

2.1 Uvod v beton

Beton je kompozitni material, ki je sestavljen iz mineralnega agregata, cementa, vode in dodatkov.



Slika 1: Prostorninski deleži sestavin (a) v svežem in (b) v otrdelem betonu (Saje D., 1997)

2.2 Mineralni agregat

Mineralni agregat razvrščamo glede na način nastanka in glede na način priprave ter obliko.

Agregat, ki je sestavljen iz grobih in drobnih zrn, običajno predstavlja približno 75 % volumna betona.

Lastnosti betonov so tako pogosto odvisne od vsebnosti vrste agregata. Vloga agregata v betonu je, da (Žarnić, 2003):

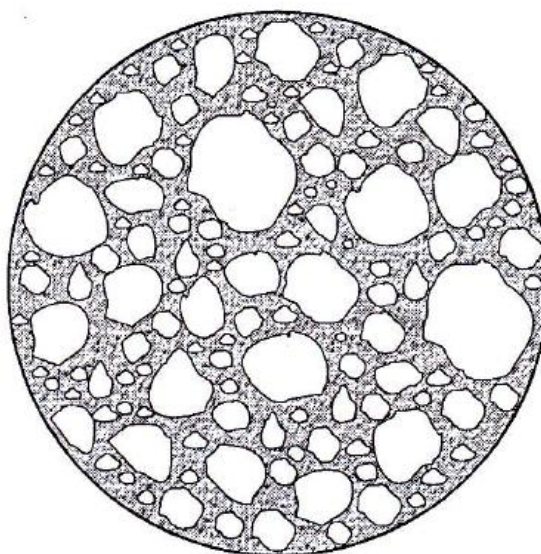
- znižujejo ceno betona,
- ustrezno sestavljeni po frakcijah ustvarjajo koheziven beton,
- znižujejo hidratacijsko temperaturo betona,
- zmanjšujejo krčenje betona.

Poleg navedenega lahko agregati služijo tudi za:

- uravnavanje površinske trdote,
- ustvarjanje barvitosti betonske površine,
- kontrolo gostote,
- zvišanje požarne odpornosti betona.

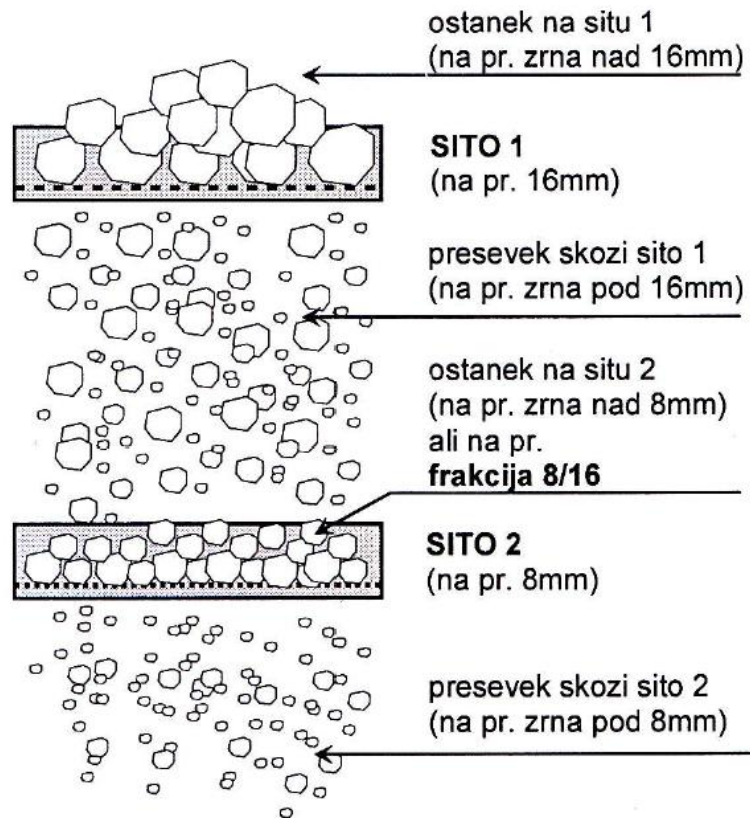
Beton mora vsebovati določen delež grobih in finih frakcij. Ustrezna granulometrijska sestava agregata omogoča izdelavo svežega betona ustreznih plastičnih lastnosti (vgradljivost, obdelovalnost) in otrdelega betona ustreznih lastnosti (trdnost, trajnost in izgled površine). Ustrezno granuliran agregat dobro zapolnjuje celoten prostor in onemogoča segregacijo sveže betonske mešanice. Praznine med posameznimi večjimi zrni se pri ustrezni sestavi pravilno zapolnijo z manjšimi zrni vse do najmanjših delcev (cementna zrnca). Na sliki 2 je prikazan primer granulometrijske sestave agregata v betonskem prerezu (Žarnić, 2003).

Zrnavost ali granulometrijsko sestavo agregata določamo s pomočjo mejnih krivulj in sejalne analize.

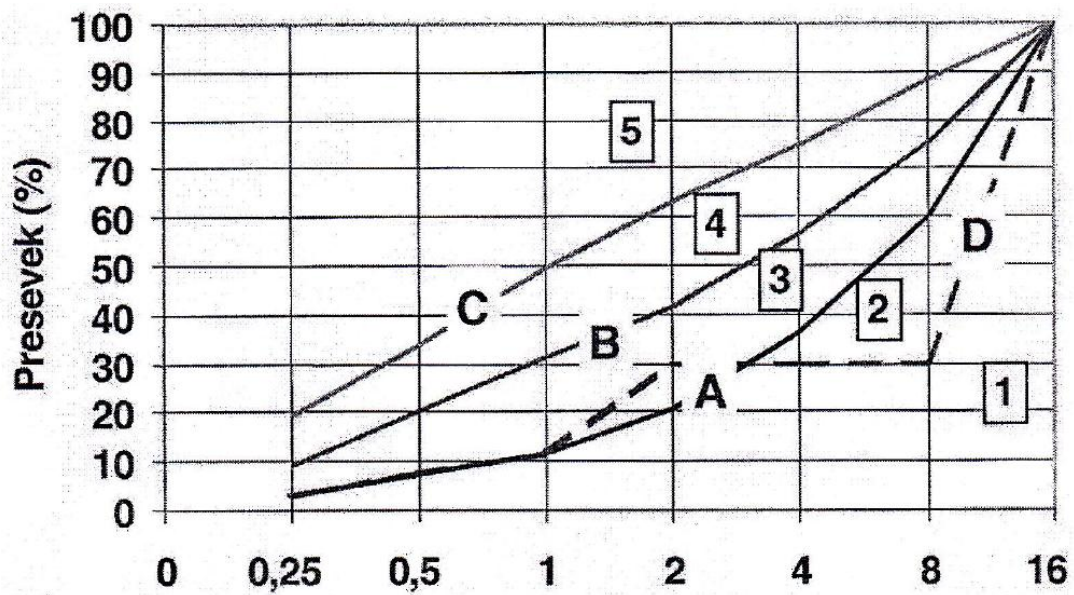


Slika 2: Zrnavost agregata v betonskem prerezu (Žarnić, 2003)

Sejalno analizo opravimo tako, da vzorec agregata presejemo skozi niz sit, ki so postavljena eno nad drugim. Sito z največjimi odprtinami je na vrhu. Osnovni komplet sit vsebuje sita z odprtinami 1, 2, 4, 8, 16, 31.5 in 63 mm. Po končanem sejanju stehtamo, koliko imamo posamezne frakcije. Frakcija je količina agregata, ki pade skozi sito z določenim premerom odprtin in ostane na situ z manjšim premerom odprtin (Žarnić, 2003). Če se s sejalno analizo agregata ugotovi, da granulometrijska krivulja poteka izven dovoljenih meja dopustnega območja, je potrebno sestavo popraviti z dodajanjem določenih frakcij agregata.



Slika 3: Shematski prikaz sejanja agregata (Žarnić, 2003)



Slika 4: Mejne krivulje območij primernosti agregata (Žarnić, 2003)

2.3 Cement

Cement je silikatni material in osnovno hidravlično vezivo v betonu. Sestavljajo ga predvsem minerali apna, kremenca, aluminijevega in železovega oksida (Žarnić, 2003). Osnovna surovina so minerali, ki jih vsebujejo naravni lapor, apnenec in glina. Ti se po izkopu drobijo in meljejo ter transportirajo v silose. Nato sledi žganje surovin v rotacijskih pečeh. Rezultat je zmes, ki se imenuje cementni klinker. Je podoben pepelu, ima granule s premerom približno 3 cm ter je močno porozen. Ko se ohladi na sobno temperaturo, se ga v krogelnih mlinih melje v fini prah – portland cement. Med mletjem se klinkerju dodajajo tudi sadra, žlindra, naravni ali umetni pucolan, apnenec in elektrofilterski pepel, ki dajejo končne lastnosti različnim vrstam cementov.

Kemijska in mineraloška sestava kot tudi finost mletja so pomembni parametri, ki jih je treba upoštevati pri izbiri cementa za izdelavo betona.

Portland cement ima sorazmerno konstantno kemijsko sestavo:

- vezani kalcijev oksid (62–67 %),
- silicijev dioksid (19–25 %),
- dialuminijev trioksid (2–8 %),
- diželezov trioksid (1–5 %),
- žveplov trioksid (3.5–4.5 %),
- magnezijev oksid (5 %),
- nevezan kalcijev oksid (2 %),
- baze (0.5–1.3 %).

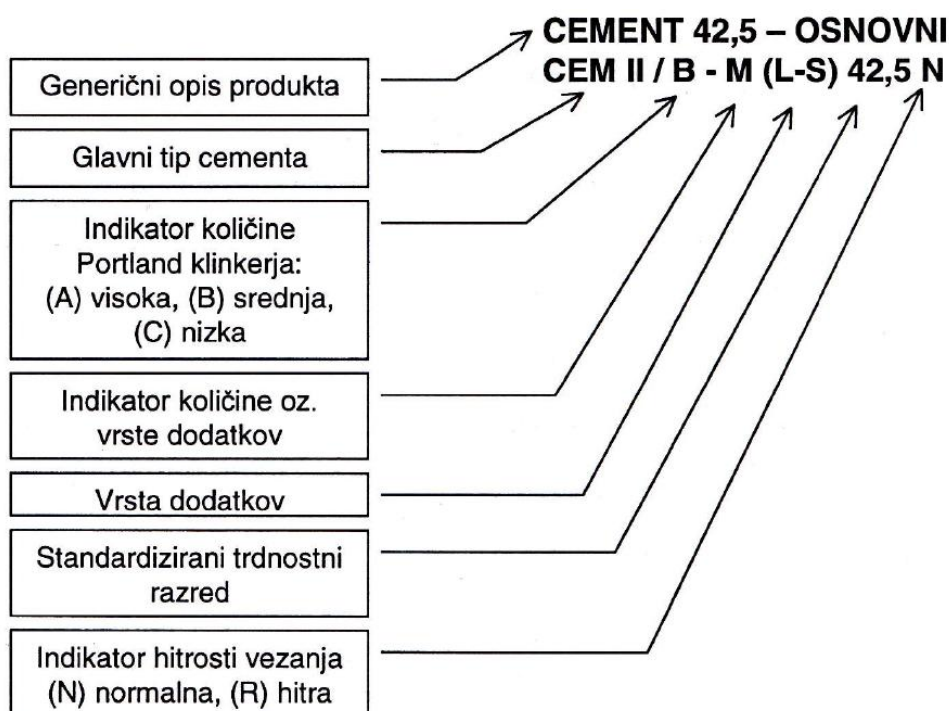
Nosilci lastnosti cementa so sestavljeni iz štirih mineralov:

- alit ali trikalcijev silikat (C_3S),
- belit ali dikalcijev silikat (C_2S),
- trikalcijev aluminat (C_3A),
- tetrakalcijev aluminat ferit (C_4AF).

Alit je najpomembnejši mineral običajnih portlandcementnih klinkerjev, saj sestavlja med 40 do 70 % celotne mase cementa. Njegova značilnost je, da močno reagira in pri strjevanju

prispeva k visokim trdnostim. Za belit je značilna nizka hidratacijska toplota, saj reagira počasi in počasi pridobiva na trdnosti. Trikalcijev aluminat je zelo občutljiv na sulfatno korozijo, zato ga poskušamo omejiti pod 5 % celotne mase cementa. Tetrakalcijev aluminat ferit strjuje počasi in je odporen proti sulfatni koroziji. Cementu daje značilno sivo barvo.

Vrsta cementa, njegova sestava in trdnost so razvidni iz standardizirane oznake cementa. Ta je podana v standardu SIST EN 197-1:2001. Sistem označevanja je prikazan na sliki 2.5.



Slika 5: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001

Standard cemente razporeja v pet glavnih skupin. Te so:

- CEM I – portlandski cement,
- CEM II – portlandski mešani cement,
- CEM III – metalurški cement,
- CEM IV – pucolanski cement,
- CEM V – mešani cement.

Osnovna oznaka CEM razvršča cemente glede na njihovo celotno sestavo, natančneje pa je sestava podana z nadaljnjimi oznakami. Z A so označeni cementi, ki vsebujejo nad 80 % klinkerja, z B tisti, ki vsebujejo od 20 do 80 % klinkerja, s C pa cementi, pri katerih je količina klinkerja pod 20 %. Cementnemu klinkerju je lahko dodan en dodatek ali več (2003). Oznake in imena mineralnih dodatkov so podane v preglednici 2.1.

Preglednica 1: Oznake in imena mineralnih dodatkov

| 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 skriljevec |
| L | Apnenec |
| LL | Apnenec |

Standard loči tri trdnostne razrede cementov:

- 32.5,
- 42.5,
- 52.5

in pri vsakem še cemente, ki vežejo:

- z normalno hitrostjo (N – normal),
- pospešeno (R – rapid).

Obstajata dve večji skupini cementov:

- silikatni,
- aluminatni.

Značilni predstavnik silikatnih cementov je portland cement. V to skupino spadajo še metalurški, pucolanski, superfosfatni, low-heat ter beli portland cement.

Ko zmešamo cement in vodo, se v istem trenutku začne proces hidratacije. To je eksotermna kemična reakcija med cementom in vodo, pri kateri se sprošča toplota. Na proces hidratacije in na količino sproščene toplote ter posledično na časovni razvoj krčenja in trdnosti cementnega kamna oziroma betona vplivajo zlasti naslednji parametri (D. Saje, 2001):

- razmerje vsebnosti štirih glavnih mineralov portland cementnega klinkerja,
- specifična površina cementa,
- količina in vrsta mineralnega dodatka,
- začetna temperatura betona,
- vrsta kamenega agregata,
- temperatura in vlaga okolja med procesom hidratacije,
- vodovezivno razmerje sveže betonske mešanice,
- vrsta in količina kemičnega dodatka v betonski mešanici.

Proces hidratacije razdelimo na tri faze, kjer prva faza traja približno eno uro, druga faza, ki predstavlja začetek strjevanja betona, traja od ene ure do enega dneva, ter tretja faza, v kateri cementni kamen otrdi in traja od enega dneva po zabetoniranju naprej.

2.4 Voda

Voda predstavlja osnovno sestavino za pripravo betonske mešanice, ki omogoči proces hidratacije cementa. Poleg tega pa omogoča tudi potrebno viskoznost sveže betonske mešanice, ustrezno vgradljivost in končno obdelavnost betona. Za izdelavo betona je primerna pitna voda brez posebnega okusa in vonja, ki je ni potrebno posebej analizirati. Če nimamo na razpolago pitne vode, moramo sestavo vode, ki jo bomo uporabili v betonu, analizirati in dokazati, da ne vpliva na kakovost betona.

Voda za pripravo betonske mešanice ne sme vsebovati snovi, ki bi:

- vplivale na čas začetka vezave cementa,
- vplivale na hidratacijo cementa,
- vplivale na kasnejše mehanske lastnosti,
- vplivale na obstojnost betona,
- povzročale korozijo armature v armiranobetonskih konstrukcijah.

Voda ne sme vsebovati glinastih delcev, delcev oglja in organskih delcev. Morska voda vsebuje veliko količino mineralov, zato se lahko uporablja le pogojno za nearmirane betone nižjih trdnosti.

2.5 Dodatki betonu

Poznamo dve skupini dodatkov, in sicer kemijske ter mineralne dodatke. Njihov glavni namen je zmanjševanje cene betona, doseganje določenih lastnosti betona ter vzdrževanje kakovosti betona med prevozom, vgrajevanjem in nego.

2.5.1 Kemijski dodatki

Kemijske dodatke razdelimo glede na vpliv v betonu na:

- plastifikatorje,
- superplastifikatorje,
- aerante,
- pospeševalce,
- zaviralce,
- antifrizo,
- preprečevalce korozije armature,
- preprečevalce alkali-silikatne reakcije,
- pigmente,
- dodatke za kompenziranje krčenja,
- dodatke za kontrolo hidratacije,
- mešane dodatke.

Plastifikatorji se uporabljajo za izboljšanje plastičnosti betona. S tem se olajša vgradljivost betona in zmanjša porabo vode (manjše vodocementno razmerje). Uporablja se predvsem v ozkih konstrukcijah in v konstrukcijah z velikim deležem armature.

Superplastifikatorje uporabljamo pri betonih visoke trdnosti, saj omogočajo še nižje vodocementno razmerje, pri čemer ne ogrožamo vgradljivosti in obdelovalnosti betona.

Aeranti v betonu povečajo odpornost proti ciklom zmrzovanja in tajanja ter povečujejo odpornost proti kemijski koroziji betona. Prav tako omogočajo lažje vgrajevanje betona in preprečujejo segregacijo agregata.

Pospeševalci pospešijo vezanje in povečajo zgodnje trdnosti betona, medtem ko zaviralci zavirajo vezanje in s tem omogočajo lažje vgrajevanje svežega betona ob visokih temperaturah, ki povzročajo hitro vezanje betona. Z uporabo zaviralcev se za malenkost zmanjša začetna trdnost betona.

Antifrizi omogočajo betoniranje v hladnem vremenu (≤ 0 °C) in delujejo tako, da znižajo temperaturo ledišča vode.

Preprečevalci korozije armature povečajo odpornost armature proti kloridom, medtem ko preprečevalci alkali-silikatne reakcije zmanjšajo nabrekanje zaradi te reakcije.

Pigmenti so barvila, ki obarvajo beton.

Dodatki za kompenziranje krčenja zmanjšajo krčenje betona zaradi sušenja in jih uporabljamo v objektih, kjer morajo biti razpoke zelo majhne.

Dodatki za kontrolo hidratacije uravnavajo potek hidratacije, ki jo lahko popolnoma zaustavimo s stabilizatorjem in jo zaženemo naprej z dodatkom aktivatorja.

Uporabljajo se tudi dodatki, ki povečujejo vodotesnost, izboljšajo povezave med starim in novim betonom, preprečujejo nabrekanja betona pred strjevanjem, preprečujejo poraščanje betona z lišaji, so sredstva proti spiranju cementa za uporabo pri betoniranju pod vodo ...

2.5.2 Mineralni dodatki

Mineralne dodatke razvrščamo glede na reakcijsko sposobnost z vodo. Delimo jih na tip I in tip II.

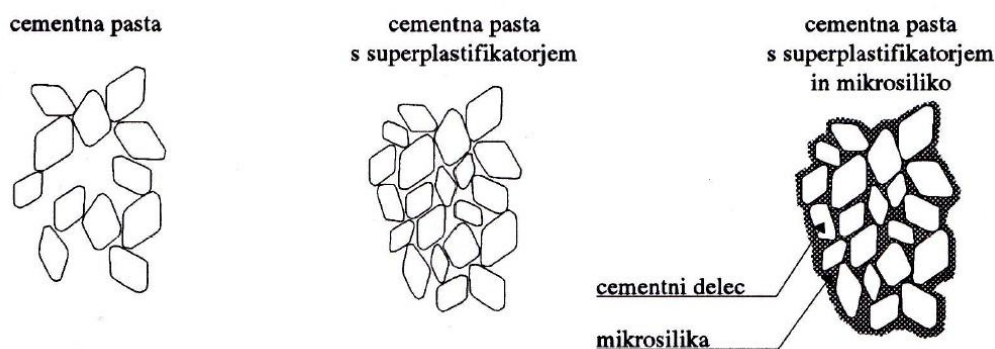
Tip I so nepucolanski dodatki, kot je apnenčeva ali dolomitna kamena moka, pri tem pa mora biti presevek na situ 0.063 mm večji kot 70 %.

Tip II so pucolanski dodatki, med katere uvrščamo elektrofiltrski pepel (EFP), mikrosiliko in granulirano plavžno žlindro. Elektrofiltrski pepel izboljšuje kohezivnost in zmanjšuje občutljivost na vsebnost vode v mešanici, medtem ko mikrosilika izboljšuje kohezivnost in segregacijsko odpornost. Granulirana plavžna žlindra zmanjšuje hidratacijsko toploto in je običajno že sestavni del cementov CEM II in CEM III.

3 BETON VISOKE TRDNOSTI

3.1 Sestavine betonov visoke trdnosti

Osnovne sestavine betonov visoke trdnosti so enake kot pri betonih običajne trdnosti. To so kameni agregat, cement, voda in različne vrste dodatkov. Razlika je v zahtevah glede zrnastostne sestave in največjega zrna agregata. Za doseganje višjih trdnosti del cementa nadomeščamo z mineralnimi dodatki, tj. z mikrosilikom in elektrofiltrskim pepelom. Ker imamo pri betonih visoke trdnosti manjše vodovezivno ali vodocementno razmerje, uporabljamo superplastifikatorje, da zagotovimo ustrezno vgradljivost betona. Razlika v primerjavi z betoni običajne trdnosti, je tudi v večji količini veziva, to je cementa in mineralnih dodatkov. Pri betonih običajne trdnosti se količina veziva običajno spreminja med 300 in 400 kg/m³ betona, pri betonih visoke trdnosti pa med 400 in 550 kg/m³ betona (Saje, 2001).



Slika 6: Vpliv superplastifikatorja in mikrosilike na razpored delcev

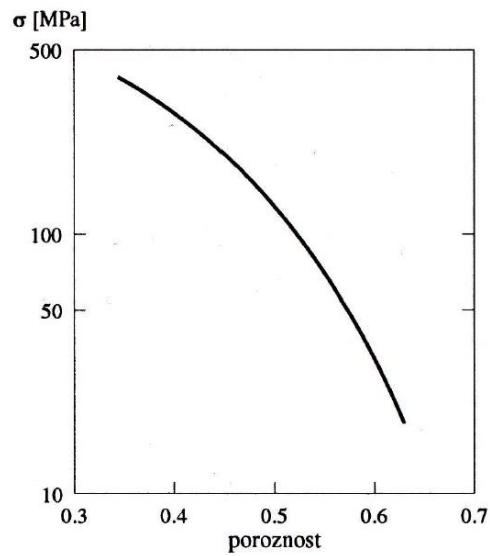
3.2 Posebnosti zgradbe betona visoke trdnosti

Ena izmed glavnih značilnosti betona visoke trdnosti, v primerjavi z betonom običajne trdnosti, je bolj enakomerna struktura. Kadar so portland cementu dodani zelo drobni delci mikrosilike pri nizkem vodovezivnem razmerju, se mikrostruktura takega sistema v glavnem sestoji iz slabo kristaliziranih kalcijevih silikat hidratov, ki sestavljajo veliko gostejšo matrico nizke poroznosti. Rezultat je izboljšanje mikrostrukture stičnega območja. Raziskovalec

Aitcin je ugotovil, da imajo betoni z mikrosiliko manj kristalizirano strukturo in manjšo poroznost kot betoni običajne trdnosti, poleg tega pa je tudi matrica v okolici agregatnih zrn zapolnjena z gostim kalcijevim silikat hidratom. Med agregatom in kalcijevim silikat hidratom se raje ustvari neposredna povezava kot med agregatom in kalcijevim hidroksidom. Pri betonih visoke trdnosti praktično ni opaziti smeri gradienta poroznosti, medtem ko je pri običajnih betonih smer padanja gradienta poroznosti jasno opazna z oddaljevanjem od površine agregata. Nadaljnje raziskave kažejo, da se značilna gosta mikrostruktura cementne matrice v betonih visoke trdnosti širi vse do površine agregata, zaradi česar lahko nehomogenost stičnega območja običajno zanemarimo.

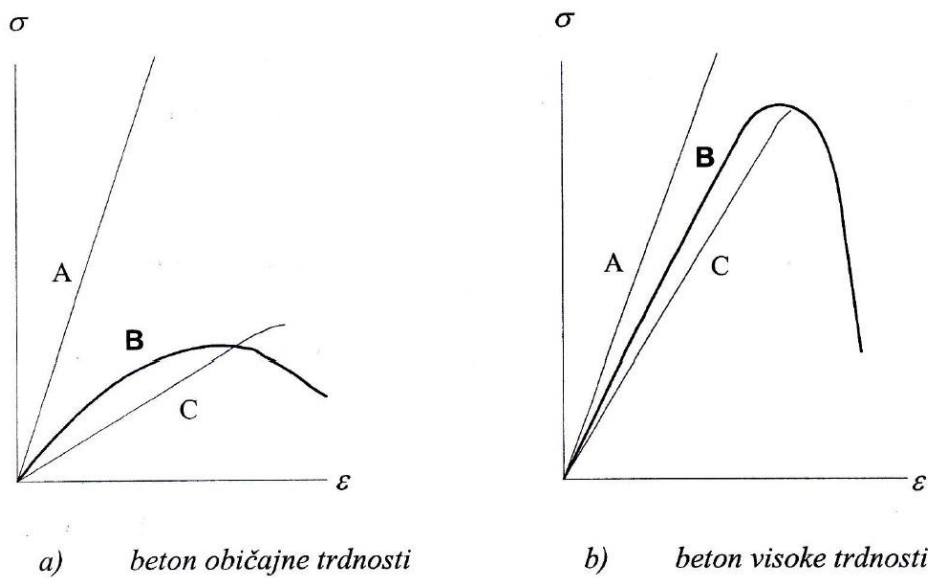
3.3 Mehanske in reološke lastnosti betonov visoke trdnosti

Izboljšanje stičnega območja med agregatom in cementnim kamnom vpliva tudi na obnašanje betona pod obremenitvijo. Tako je diagram napetost – deformacija pri enoosnem tlaku linearen do okoli 80 % tlačne trdnosti, medtem ko se začne pri običajnih betonih nelinearnost že pri napetostih okoli 30 do 40 % tlačne trdnosti betona (Saje, 1997). Pri betonih visoke trdnosti v začetnem obdobju trdnost narašča hitreje kot pri betonih običajne trdnosti, medtem ko v poznejšem obdobju razlika med časovnim povečevanjem trdnosti obeh vrst betonov ni več tako izrazita. Po predvidevanju je hitro pridobivanje na trdnosti v začetnem obdobju posledica večjega povečevanja temperature betona zaradi več hidratacijske toplote na enoto betona in zaradi manjše razdalje med delci, ki sodelujejo v hidrataciji. Manjša razdalja med temi delci pa je posledica nižjega vodovezivnega oziroma vodocementnega razmerja ter gostejše strukture betona. Prav tako se izboljša mikrostruktura stičnega območja med armaturo in cementnim kamnom, zaradi česar se pri vzdolžni armaturi poveča izvlečna sila (Saje, 1997).



Slika 7: Vpliv poroznosti na tlačno trdnost cementne paste

Raziskave so pokazale, da tlačna trdnost visokotrdnih betonov z mikrosiliko po 28 dneh ne narašča tako hitro kot pri visokotrdnih betonih brez mikrosilike (Saje, 1997).



Slika 8: Tipični delovni diagrami (A) agregata, (C) cementnega kamna in (B) betona

V primerjavi z betoni običajne trdnosti je obnašanje betonov visoke trdnosti bližje obnašanju homogenega materiala. Modul elastičnosti betona visoke trdnosti je večji kot pri betonu običajne trdnosti. Modul elastičnosti betonov visoke trdnosti se ne povečuje v taki meri kot trdnost, zato večje obremenitve in istočasno vitkejši elementi pri betonih visoke trdnosti povzročajo večje deformacije konstrukcij kot v primeru betona običajne trdnosti.

Lezenje betona je reološki pojav, ki je poleg starosti betona odvisen tudi od napetostnega stanja v betonu in starosti betona ob nanosu zunanje obtežbe. Lezenje betona razdelimo na osnovno lezenje, ki je neodvisno od izmenjave vlage med betonom in okolico, in na lezenje betona zaradi sušenja.

Pomembna reološka lastnost betonov je tudi krčenje, ki predstavlja zmanjšanje prostornine betona, ne da bi pri tem nanj delovale zunanje sile. Krčenje betonov delimo na avtogeno krčenje in krčenje zaradi sušenja. Avtogeno krčenje je pri betonih visoke trdnosti zaradi nizkega vodocementnega razmerja večje kot pri betonih običajne trdnosti. Ravno obratno pa je pri krčenju zaradi sušenja, kjer se zaradi nizkega vodocementnega razmerja voda porabi za hidratacijo cementa, zaradi česar je krčenje zaradi sušenja manjše. Več o krčenju betonov visoke trdnosti sledi v petem poglavju.

3.4 Trajnost betonov visokih trdnosti

Najpomembnejši parametri pri določanju trajnosti betona so poroznost, propustnost, kemijska korozija, odpornost proti zmrzovanju, korozija armature, odpornost proti obrusu in eroziji, temperaturni vplivi in požarna odpornost.

Pri betonih visoke trdnosti je propustnost manjša kot pri običajnih betonih predvsem zaradi mikrosilike, ki z zgostitvijo strukture zmanjšajo propustnost. Zaradi manjše propustnosti je odpornost visokotrdnih betonov na kemično korozijo večja kot pri običajnih betonih. Prav tako je pri visokotrdnih betonih tudi zaščita pred korozijo armature ter odpornost proti obrusu in eroziji boljša. Znano je tudi, da so visokotrdni betoni veliko bolj občutljivi na povišane

temperature kot betoni običajne trdnosti. Pri visokotrdnih betonih se začne s povišanjem temperature trdnost opazneje zmanjševati. Pri 150 °C se trdnost zmanjša že za okoli 30 % začetne trdnosti oziroma trdnosti, ki jo ima beton pri 20 °C.

3.5 Prednosti in pomanjkljivosti betonov visokih trdnosti

Prednosti betonov visokih trdnosti so (Saje, 1997):

- visoka trajnost, posebno odpornost proti zunanjim agresivnim vplivom,
- visoka trdnost v primerjavi z lastno težo,
- visoke zgodnje trdnosti dovoljujejo hitrejšo gradnjo in razopaževanje,
- porast elastičnih modulov in manjše lezenje,
- možna izvedba zelo visokih betonskih stavb,
- manjši prerezi stebrov zaradi boljših mehanskih lastnosti,
- razponi mostov s škatlastimi in monolitnimi prerezi se povečajo, kar poenostavi projektiranje in zniža ceno.

Obstajajo pa tudi pomanjkljivosti:

- višja cena na enoto prostornine,
- strožja kontrola kvalitete sestavnih materialov in izvedbe betona,
- porast togosti ni sorazmeren povečanju trdnosti,
- pogosto krhka porušitev konstrukcijskih elementov,
- manjša učinkovitost stremenske armature v stebrih pri porušitvi.

Zelo malo pomanjkljivosti je nepremagljivih.

4 VLAKNASTI BETON

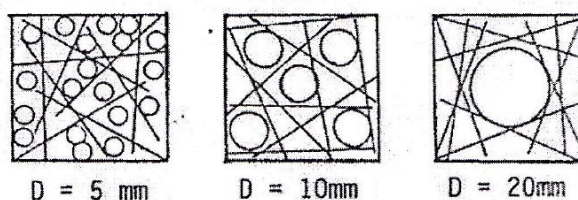
4.1 Splošno

Vlaknasti betoni se v zadnjem času vedno več uporabljajo zlasti za talne plošče in kot zaščitna plast pri sanaciji predorov ter za zavarovanje gradbene jame.

Vlaknasti beton je beton, ki poleg cementa, agregata, vode, kemijskih in mineralnih dodatkov vsebuje še jeklena ali kakšna druga vlakna.

Vlaknasti beton se lahko pripravlja iz katerega koli cementa. Pri izbiri agregata ni posebnih omejitev, le maksimalno zrno je praviloma manjše kot pri betonih brez vlaken. Navadno se pri vlaknastih betonih uporablja maksimalno zrno 8 mm ali največ 16 mm.

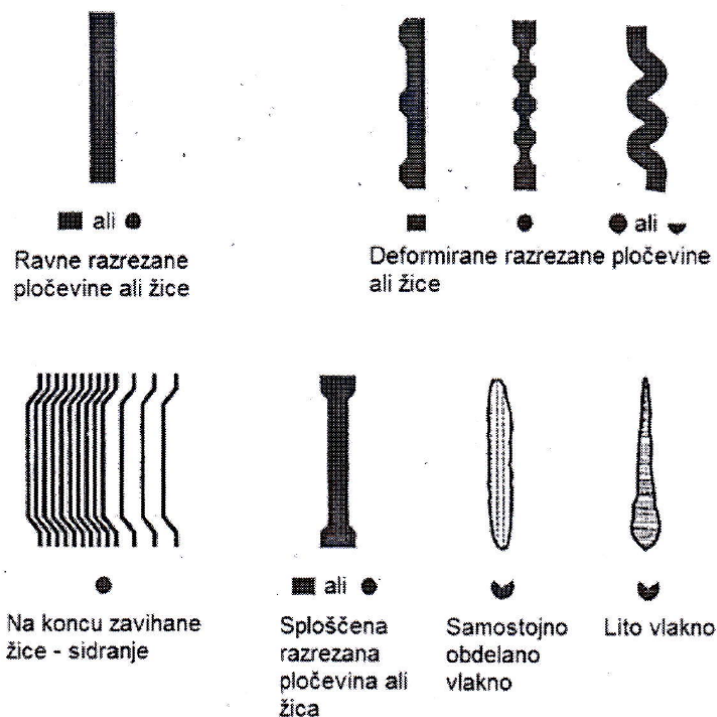
Pri vlaknastih betonih je izredno pomembno, da zagotovimo enakomerno razporeditev vlaken po kompozitu in preprečimo oblikovanje gnezd zaradi vlaknaste armature. Do oblikovanja gnezd pride s povečevanjem vsebnosti vlaken in količine grobega agregata. Za normalno uporabo se v betonsko mešanico dodaja do 1 % vlaken, za izdelavo posebnih izdelkov pa do 5 % vlaken glede na prostornino betona. Na sliki 9 je shematsko prikazana razporeditev vlaken v betonu pri različnih velikostih zrn agregata.



Slika 9: Vpliv velikosti agregata na razpored vlaken (Muravljov, 2003)

Zelo pomemben parameter pri izbiri vlaken je faktor oblike, ki je razmerje med dolžino in premerom vlaken. Faktor oblike vpliva na pripravo, vgrajevanje in na reološke lastnosti.

Manjši kot je faktor, lažje se jeklena vlakna vmešavajo in razporejajo v sveži betonski mešanici. Po drugi strani pa je vpliv vlaken na lastnosti strjenega betona tem boljši, čim večji je faktor oblike. Iz tega sklepamo, da uporaba tanjših vlaken daje boljše lastnosti kompozita. Najpogostejše oblike vlaken so prikazane na sliki 4.2.



Slika 10: Oblike vlaken

4.2 Vrste vlaken

Za izdelavo vlaknastega betona se uporabljajo naslednja vlakna:

- kovinska, ki so iz jekla ali nerjavečega jekla,
- sintetična, ki so iz polipropilena, akrila, ogljika, najlona, aramida, poliestra ali polietilena,
- mineralna, ki so predvsem iz alkalnoodpornega stekla,
- naravna, ki so predvsem iz celuloze.

Najpogosteje se uporabljajo jeklena vlakna, malo manj pa alkalnoodporna stekla, polipropilenska, ogljikova in celulozna vlakna.

Jeklena vlakna so izdelana iz običajnih ali nerjavečih jekel. Modul elastičnosti rjavečih jeklenih vlaken je približno 200 GPa, nerjavečih jeklenih vlaken pa 170 GPa. Natezna trdnost jeklenih vlaken je med 345 MPa in 1380 MPa. Prečni prerez jeklenih vlaken je pravokotne, krožne ali druge nepravilne oblike. Dolžina vlakna pa je navadno manjša od 75 mm. V okolju z visoko temperaturo se zahteva uporaba nerjavečih jeklenih vlaken. Za zagotovitev primerne načina vgrajevanja in zgoščenosti vlaknastega betona je priporočena prostorninska vsebnost jeklenih vlaken med 0.25 % in 1.50 % kompozita. Glede na postopek izdelave se jeklena vlakna v skladu s slovenskim standardom SIST EN 14889-1-2006 delijo v pet skupin (preglednica 4.1). Pri jeklenih vlaknih je obvezna kontrola oblike, premaza, dimenzij, natezne trdnosti in duktilnosti.

Preglednica 2: Skupine jeklenih vlaken v odvisnosti od načina izdelave

| | |
|-------------|-------------------------------|
| SKUPINA I | Hladno oblikovana žica |
| SKUPINA II | Rezana vrv |
| SKUPINA III | Ločeno s topljenjem |
| SKUPINA IV | Mehansko rezana topljena žica |
| SKUPINA V | Valjana iz blokov |

Pomembni mehanski lastnosti polipropilenskih vlaken predstavljata zlasti natezna trdnost, ki znaša od 310 MPa do 760 MPa, in nizek modul elastičnosti, ki znaša od 3.5 GPa do 4.9 GPa. Te lastnosti so odvisne od kemijske sestave, molekularne teže in drugih značilnosti polipropilenskih vlaken. Polipropilen se uporablja v betonih za zagotovitev zgodnje trdnosti in ker omogoča nadzorovan odziv na toplotne spremembe in spremembe vlage. Pomembna lastnost, zaradi katere se uporabljajo v vlaknastih betonih, je visoko razmerje med dolžino in premerom vlaken. Ugodna lastnost polipropilena je njegova odpornost na kisline in baze.

4.3 Stično območje med vlakni in cementno matrico

Stično območje med vlakni in cementno matrico, ki je najšibkejši del sistema, pomembno vpliva na mehanske in reološke lastnosti vlaknastega betona. Parametri, ki vplivajo na stično območje, so (Zajc, 1994):

- stanje matrice, ki je lahko brez razpok ali z njimi,
- sestava matrice,
- geometrijska oblika vlaken,
- tip vlaken,
- lastnosti površine vlakna,
- togost vlaken v primerjavi s togostjo matrice,
- porazdelitev ali orientacija vlaken,
- prostorninski delež vlaken v kompozitu,
- velikost obremenitev,
- obstojnost vlaken v kompozitu in spreminjanje lastnosti vlaken s časom.

Teoretično je na začetku cementna matrica homogena in nerazpokana, kasneje se ob obremenitvi zaradi strižnih napetosti pojavijo razpoke. Realno je cementna matrica vedno razpokana. Vlakna premoščajo razpoke in prenašajo obremenitve preko razpok. Ko natezna napetost betona prekorači natezno trdnost cementne matrice, se v vlaknastem betonu pojavijo razpoke. Pri natezni porušitvi vlaknastega betona se krajša vlakna izpulijo, daljša pa pretrgajo (Bandelj, 2010). Betoni z dodanimi daljšimi jeklenimi vlakni so bolj duktilni kot oni brez njih. Glede na način porušitve vlaknastega betonskega kompozita se v strokovni literaturi uporablja poseben parameter vlaken, ki ga imenujemo kritična dolžina. To je dolžina vlaken, ki še omogoča prenos sile brez pretrganja vlakna. Raziskovalci so ugotovili, da so polipropilenska vlakna zaradi nizkega modula elastičnosti bolj učinkovita pri omejevanju razpok v svežem kompozitnem betonu. Jeklena vlakna pa so zaradi višjega modula

elastičnosti in sposobnosti sidranja v betonsko maso bolj učinkovita pri zmanjšanju razpok v otrdelem vlaknastem betonu.

5 KRČENJE BETONA

5.1 Splošno o krčenju betona

Krčenje betona predstavlja zmanjšanje prostornine betona, ne da bi pri tem nanj delovale zunanje sile. Posledica krčenja so razpoke. Razen pri krčenju zaradi karbonatizacije, ki je posledica reakcije hidratizirane cementne paste z ogljikovim dioksidom iz okolice ob prisotnosti vlage, pride do krčenja betona zaradi izgube vode. Voda se lahko izloča iz betona v okolico ali pa se porabi pri hidrataciji cementa. Krčenje betona je posledica krčenja cementne paste oziroma cementnega kamna. Na velikost krčenja betona močno vplivajo uporabljeni agregat, količina cementa, vodovezivno razmerje ...

5.2 Krčenje vlaknastih betonov visoke trdnosti

Celotno krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti delimo na plastično, kemično in avtogeno krčenje ter krčenje zaradi sušenja (Neville, 1995). Avtogeno krčenje kompozita se prične ob začetku vezanja cementa in je posledica samoizsuševanja v porah cementne matrice. Plastično krčenje kompozita se pojavi že v času, ko je kompozit še plastičen. Krčenje površinskega sloja kompozitnega elementa ovira notranji del prečnega prereza kompozitnega materiala, ki se krči počasneje kot površina elementa, kar na površini elementa povzroča natege, v njegovi notranjosti pa ustrezne tlačne napetosti. Ko natezne napetosti na površini mladega kompozitnega elementa dosežejo oziroma presežejo natezno trdnost kompozita, se pojavijo razpoke. Plastično krčenje kompozita se lahko zmanjša z ustreznim nego kompozita, s katero se nadomešča pri procesu hidratacije cementa porabljeno vodo. Z nego kompozita je potrebno zagotoviti, da se zaloga vode v kompozitu ne zmanjša pod minimum. Velikost plastičnega krčenja betona oziroma kompozita je v največji meri odvisna od količine cementa in od vode v kompozitu (Muravljov, 2000). Raziskovalci ugotavljajo, da so polipropilenska vlakna zelo učinkovita prav pri plastičnem krčenju.

Kemično krčenje cementne paste predstavlja zmanjšanje njene prostornine, ki se pojavi zaradi kemičnega vezanja vode v procesu hidratacije cementa. Nastala prostornina

produktov, ki se formirajo pri kemični reakciji vode in cementa, je manjša od prostornine vhodnega cementa in vode skupaj. Glavni razlog za zmanjšanje prostornine cementne paste, v primerjavi s prostornino vode in cementa, je večja gostota kemično vezane vode v primerjavi s prosto vodo v sveži cementni pasti pred vezanjem cementa (FIB, 1999). Kemično krčenje cementne paste povzroča avtogeno krčenje kompozita.

Poleg predhodno navedenih vrst krčenja se pri vlaknastem betonu pojavi še krčenje zaradi karbonatizacije in temperaturno deformiranje vlaknastega betona. Pri kemični reakciji cementa in vode se v kompozitu sprošča toplota, kar povzroči povišanje temperature kompozita in njegovo deformiranje zaradi spremembe temperature. Sprememba temperature kompozita je odvisna od razmer v okolici in od sestave vlaknastega betona. Razlika temperature v notranjosti in na površini preskušanca povzroča diferenčne napetosti, ki ob površini elementa še dodatno pospešijo nastanek razpok v kompozitu. Z delovanjem CO₂ iz okolice pride v cementnem kamnu do kemične reakcije. Hitrost napredovanja karbonatizacije cementnega kamna v notranjosti elementa je odvisna od strukture por in od njihove nasičenosti z vodo. Prodiranje ogljikovega dioksida v notranjost elementa je počasnejše, če so pore zapolnjene z vodo. Karbonatizacija cementnega kamna poteka najhitreje v delno vlažnem kompozitu oziroma pri spremembi vlage kompozita.

Avtogeno krčenje betona oziroma hidratacijsko krčenje je posledica porabe vode pri procesu hidratacije cementa. Z napredovanjem procesa hidratacije se povečuje prostornina por. Po Boylevem zakonu je povečanje prostornine zaprtih por povezano z zmanjševanjem tlaka zraka v porah. Zmanjšanje tlaka posredno vpliva na relativno vlažnost v porah. Ob vzpostavljanju termodinamičnega ravnovesja v porah cementne paste izhlapeva najprej prosta kapilarna voda, nato pa voda iz adsorpcijske ploskve stene pore. Tanjšanje adsorpcijske plasti vode na stenah por povzroča natezne napetosti v adsorpcijski ploskvi. Te pa povzročajo znatne deformacije, ki se jim struktura upira s svojo trenutno togostjo. V začetnem obdobju procesa strjevanja, ko je modul elastičnosti cementne paste še razmeroma nizek, lahko omenjene natezne napetosti povzročijo velike zunanje deformacije, ki jih imenujemo avtogeno krčenje (Saje, 2001).

Največji vpliv na velikost avtogenega krčenja, ki predstavlja pomemben del celotnega krčenja betona visoke trdnosti, ima vodocementno razmerje betonske mešanice. V splošnem velja, da se avtogeno krčenje povečuje s padanjem vodocementnega razmerja. Rezultati eksperimentov, ki so jih opravili v Franciji, so pokazali, da je zmanjšanje vodocementnega razmerja z 0.41 na 0.33 povzročilo povečanje avtogenega krčenja za 56 % (Le Roy & De Larrard, 1993). Avtogeno krčenje pa se povečuje tudi s povečevanjem vsebnosti mikrosilike, kar je verjetno posledica finejše mikrostrukture hidratizirane cementne paste.

Nizko vodocementno razmerje in majhna propustnost betona visoke trdnosti vplivata tudi na krčenje betona zaradi sušenja. Ker se pri hidrataciji porabi skoraj vsa voda, praktično ni izmenjave vlage med betonom in tipičnim zunanjim okoljem, zato je tudi krčenje zaradi sušenja pri betonih visoke trdnosti, v primerjavi z betoni običajne trdnosti, znatno manjše. K zmanjšanju krčenja zaradi sušenja znatno prispeva tudi mikrosilika, saj je vodo iz finih por težje premakniti, ter gosta cementna pasta in kvalitetno stično območje med agregatom in cementnim kamnom, ki nudita večji odpor krčenju.

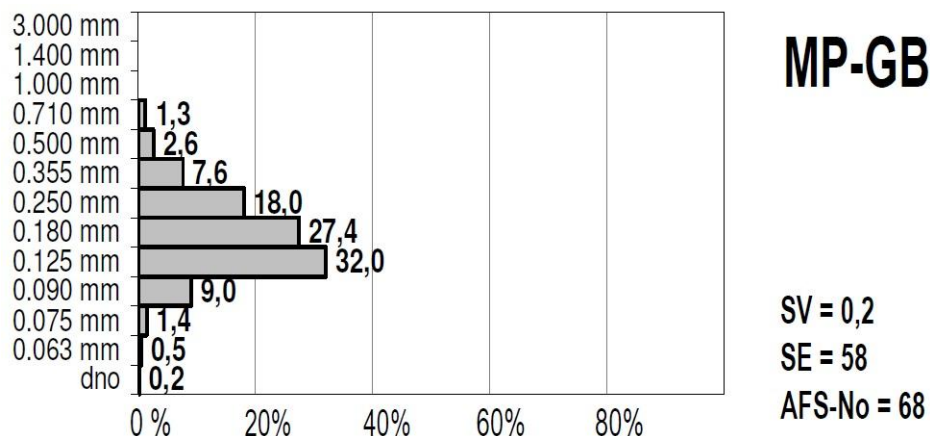
6 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE

6.1 Uporabljeni materiali

Pri eksperimentalnem delu smo za izdelavo betonskih mešanic uporabili materiale, ki so razpoložljivi na slovenskem trgu. Njihove fizikalne in kemijske lastnosti so podane v nadaljevanju.

6.1.1 Agregat

Za izdelavo mikroarmiranega betona visoke trdnosti smo uporabili drobljen agregat z največjim premerom zrn agregata 16 mm in kremenovo mivko. Uporabljeni agregat je sestavljen iz različnih frakcij pranelega drobljenega apnenčevega agregata iz Separacije Kresnice in mivke iz podjetja Termit d.d. iz Moravč. Lastnosti uporabljenega agregata so podane v preglednicah 3 in 4.



Slika 11: Prikaz deležev ostanka mivke MP-GB na sitih

Preglednica 3: Lastnosti mivke Termit iz Moravče

| Nahajališče | Moravče | | | |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------------------------|-------------------|
| Opis po standardu EN 932-3 | Mivko sestavljajo zrna kremenca s premerom od 0.063 do 2 mm, zrn s premerom, manjšim od 0.063 mm, je manj kot 1 %. Prevladujejo osteroba do slabo zaobljena zrna nepravilnih oblik monokristalnega kremenca (> 95 %). Pod stereoskopsko lupo opazujemo še večja delno zaobljena zrna polikristalnega kremenca, nekatera od njih so delno ali v celoti monolitizirana ali prevlečena z organsko snovjo. Obarvanih kremenovih zrn je v agregatu manj kot 5 %, monolitiziranih in zrn, prevlečenih z organsko snovjo, pa je pod 3 %. | | | |
| Gostota zrn | SIST EN 1097-6 | ρ_A | 2.644 | Mg/m ³ |
| Gostota suhih zrn | | ρ_{rd} | 2.577 | Mg/m ³ |
| Gostota nasičenih in površinskih suhih zrn | | ρ_{ssd} | 2.601 | Mg/m ³ |
| Lastnosti | Kemijska sestava | | Najmanj 98 % SiO ₂ | |
| | Srednja velikost zrn | | 0.20 mm | |
| | Granulacija | | 0.075–0.710 mm | |
| | Odstotek vlage | | Približno 5 % | |
| | Nasipna teža | | Približno 1.5 t/m ³ | |
| | Točka sintranja | | Najmanj 1500 °C | |

Preglednica 4: Lastnosti kamnine agregata iz Separacije Kresnice

| Nahajališče | Seperacija Kresnice | | | | | |
|--------------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|------|------|-------|
| Vrsta kamnine | apnenec | | | | | |
| Mineraloško-petrografska analiza | makroskopski opis | Preskušane je svetlo siv apnenec. Kamnina je trdna in gosta. Razpoke v obliki stilolitnih šivov so zapolnjene z rjavim netopnim ostankom glinenih materialov. Del razpok je zapolnjen s prekristaliziranim kalcitom. | | | | |
| | mikroskopski opis | Osnova kamenine je mikrit, v katerem opazujemo stilolitne šive in tektonske žilice, zapolnjene z netopnim ostankom glinenih materialov. V mikritni osnovi opazimo redke ostanke bioklastov. Ponekod je mikrit prekristaljen v mikrosparit oz. sparit, predvsem v zapolnitvah žilic. Dolomit nastopa v skupkih v obliki kristalčkov. | | | | |
| Tlačna trdnost kamenine | v suhem stanju | najmanjša | 118 MPa | | | |
| | | največja | 198 MPa | | | |
| | | srednja | 163 MPa | | | |
| | v mokrem stanju | najmanjša | 103 MPa | | | |
| | | največja | 173 MPa | | | |
| | | srednja | 143 MPa | | | |
| Gostota zrn | Enota | Metoda | Velikost zrn (mm) | | | |
| | | | 0/4 | 4/8 | 8/16 | 16/32 |
| <i>Gostota zrn</i> | [Mg/m ³] | SIST EN 1097-6 | 2.69 | 2.71 | 2.71 | 2.71 |
| <i>Gostota suhih zrn</i> | [Mg/m ³] | | 2.65 | 2.68 | 2.69 | 2.69 |
| <i>Gostota nasičenih in površinsko suhih zrn</i> | [Mg/m ³] | | 2.67 | 2.70 | 2.69 | 2.70 |
| <i>Vpijanje vode</i> | % | | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |

6.1.2 Cement

Za izdelavo mikroarmiranega betona visoke trdnosti smo uporabili cement vrste CEM II / A-M 42.5 R iz cementarne Salomit d.d. v Anhovem. Delež posameznih mineralov v cementnem klinkerju je prikazan v preglednici 5, v preglednici 6 pa so navedene kemijske sestavine, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti cementov.

Preglednica 5: Sestavine, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti uporabljenega cementa

| Kemijska sestava | | |
|-----------------------------------------------|-----------|-------------------|
| Parameter | Izmerjeno | Zahteva standarda |
| Žarilna izguba (%) | 4,35 | - |
| Netopni ostanek (%) | 0,63 | - |
| SO ₃ (%) | 2,72 | ≤ 4,0 |
| Klorid (%) | 0,042 | ≤ 0,1 |
| SiO ₂ (%) | 20,36 | - |
| Al ₂ O ₃ (%) | 4,47 | - |
| Fe ₂ O ₃ (%) | 2,79 | - |
| CaO (%) | 60,81 | - |
| MgO (%) | 2,26 | - |
| Na ₂ O (%) | 0,37 | - |
| K ₂ O (%) | 0,70 | - |
| Fizikalne lastnosti | | |
| Parameter | Izmerjeno | Zahteva standarda |
| Ostanek na situ 0.09 mm (%) | 0,15 | - |
| Prostorninska masa (g/cm ³) | 3,08 | - |
| Specifična površina (cm ² /g) | 4300 | - |
| Voda s standardno konsistenco (%) | 28,2 | - |
| Pričetek vezanja (min) | 200 | ≥ 60 |
| Konec vezanja (min) | 230 | - |
| Prostorninska obstojnost Le Chatelier (mm) | 0,1 | ≤ 10 |
| Mehanske lastnosti | | |
| Upogibna trdnost (MPa) 2 dni | 5,1 | - |
| Upogibna trdnost (MPa) 28 dni | 8,2 | - |
| Tlačna trdnost (MPa) 2 dni | 28,2 | ≥ 20,0 |
| Tlačna trdnost (MPa) 28 dni | 54,1 | 42,5 – 62,5 |

Preglednica 6: Delež mineralov v cementnem klinkerju uporabljenega cementa

| Vrsta cementa | Vrsta cementnega klinkerja | Minerali klinkerja | | | |
|--------------------------|----------------------------|--------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | | C ₃ S | C ₂ S | C ₃ A | C ₄ AF |
| CEM II/A-M (LL-S) 42.5 R | običajni klinker | 64 % | 15 % | 9 % | 9 % |

6.1.3 Voda

Uporabili smo vodo iz vodovodnega sistema Ljubljana.

6.1.4 Kemijski in mineralni dodatki

Za eksperimentalne raziskave krčenja mikroarmiranega betona visoke trdnosti smo, zaradi nizkega vodovezivnega razmerja, ustrezno vgradljivost kompozita dosegli z uporabo superplastifikatorja (antikorodina). Antikorodin je praškasta mešanica mikrosilike in superplastifikatorja, ki je po kemični sestavi sulfonirani naftalen – formaldehid kondenzat. Lastnosti Antikorodina prikazujemo v preglednici 7 in 8.

Preglednica 7: Osnovne lastnosti antikorodina (TKK Srpenica)

| Dodatek | Gostota pri 20 °C (g/cm ³) | Delež suhe snovi pri 105 °C (%) |
|-------------|----------------------------------------|---------------------------------|
| Antikorodin | 2.40 | 100.0 |

Preglednica 8: Kemična sestava, fizikalno-kemične lastnosti mikrosilike (TTK Serpenica)

| Kemijska sestava | |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Parameter | Delež (%) |
| SiO ₂ | 95.50–95.90 |
| Al ₂ O ₃ | 0.13–0.17 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.09–0.12 |
| CaO | 0.35–0.55 |
| C prosti | 1.10–1.30 |
| C iz SiC | 0.30–0.50 |
| C celotni | 1.15–1.80 |
| SiC | 1.10–1.60 |
| MgO | 0.25–0.30 |
| SO ₃ | 0.20–0.30 |
| N ₂ O | 0.10–0.15 |
| K ₂ | 0.45–0.60 |
| Žaroizguba | 0.80–1.14 |
| Fizikalno-kemijske lastnosti | |
| Parameter | Delež |
| Nasipna gostota | 400–550 kg/m ³ |
| Prostorninska masa | 2200 kg/m ³ |
| Specifična površina (BET) | 21–23 m ² /g |
| Velikost delcev (80 %) | 0.1–0.3 μm |
| Vlaga | 0.25–0.30 % |

6.1.5 Vlakna

Vsem preiskovanim betonskim mešanici, razen primerjalni, smo dodali polipropilenska vlakna za mikroarmiranje betonov znamke Fibrils. Uporabili smo štiri različne vrste vlaken Fibrils, ki so se razlikovala po dolžini. Prostorninski delež vlaken v betonu je bil 0.5 %. Dolžine vlaken so bile 6, 12, 18 ter 30 mm. Podrobnejše lastnosti polipropilenskih vlaken so podane v preglednici 9.

Preglednica 9: Lastnosti uporabljenih polipropilenskih vlaken

| Gostota vlaken (g/cm ³) | Dolžina vlaken (mm) | Premer vlaken (μm) | Natežna trdnost vlakn (MPa) | Elastični modul vlakn (MPa) |
|----------------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0.91 | 6–30 | 35 x (250–600) | 340–500 | 8500–12500 |



Slika 12: Uporabljena polipropilenska vlakna

6.2 Sestava betonskih mešanic in priprava preizkušancev

6.2.1 Sestava preiskovanih mikroarmiranih betonov visoke trdnosti

Sestave posameznih betonskih mešanic, ki smo jih uporabili za potrebe diplomske naloge, so prikazane v preglednici 10. Mešanice vsebujejo različne dolžine polipropilenskih vlaken, vendar imajo vse enak prostorninski delež vlaken v betonu.

Preglednica 10: Sestava preiskovanih betonskih mešanic visoke trdnosti mikroarmiranih s polipropilenskimi vlakni

| Mešanica | HSC | HSC-PPV12 | HSC-PPV30 | HSC-PPV6 | HSC-PPV18 | HSC-EC |
|-----------------------------------------------------|-------|-----------|-----------|----------|-----------|--------|
| Vrsta agregata | (K) | (K) | (K) | (K) | (K) | (K) |
| Mivka [kg/m ³] | 285 | 283 | 283 | 283 | 283 | 285 |
| Agregat 0–4 mm [kg/m ³] | 853 | 847 | 847 | 847 | 847 | 852 |
| Agregat 4–8 mm [kg/m ³] | 284 | 282 | 282 | 282 | 282 | 284 |
| Agregat 8–16 mm [kg/m ³] | 474 | 470 | 470 | 470 | 470 | 473 |
| Količina veziva [kg/m ³] | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Količina cementa [kg/m ³] | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 | 360 |
| Količina antikorodina [kg/m ³] | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 | 48 |
| Polipropilenska vlakna | ne | da | da | da | da | ne |
| Prostorninski delež vlaken [%] | / | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | / |
| Dolžina vlaken [mm] | / | 12 | 30 | 6 | 18 | / |
| Količina vode [kg/m ³] | 144 | 144 | 144 | 144 | 144 | 137 |
| Vodovezivno razmerje | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.36 | 0.36 |
| Čas priprave mešanice | 10:51 | 10:05 | 9:15 | 9:15 | 9:21 | 9:45 |
| Posed [cm] | 15.5 | 1.5 | 1.0 | 1.5 | 1.2 | 14.5 |
| Razlez [cm] | 33.5 | 24 | 23 | 22 | 22 | 36 |
| Delež izmerjenih por [%] | 2.3 | 2.5 | 3.0 | 2.2 | 2.8 | 0.8 |
| Gostota svežega betona [kg/m ³] | 2352 | 2370 | 2353 | 2323 | 2369 | 2419 |
| Prostorninska masa pri 28 dneh [kg/m ³] | 2403 | 2395 | 2349 | 2347 | 2385 | 2428 |
| Temperatura svežega betona [°C] | 26 | 26,5 | 27 | 25,5 | 26 | 26 |
| Temperatura zraka pri svežem betonu [°C] | 24.5 | 25 | 25 | 23 | 24,5 | 25,9 |
| Vlaga zraka [%] | 44 | 47 | 59 | 63 | 53 | 53 |
| f _{cm,28dni} [MPa] | 76.62 | 77.63 | 76.86 | 80.82 | 81.26 | 77.93 |

Legenda:

(K) – agregat Kresnice

6.2.2 Priprava preizkušancev in merjenje krčenja mikroarmiranega betona visoke trdnosti

Za pripravo betonskih mešanic smo uporabili betonske mešanice, povzete po doktorski disertaciji (Saje, 2001), ki smo jim dodali vlakna. V laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani smo za vsako mešanico betona naredili po tri kocke dimenzij 15 x 15 x 15 cm in šest prizem dimenzij 40 x 10 x 10 cm. Priprava preskušancev in merjenje krčenja je potekalo od maja 2011 do julija 2011. Za zabetoniranje devetih kalupov smo zamešali 36 litrov sveže betonske mešanice.

Enačba 6.1 podaja prostorninske deleže sestavin v 1 m³ betonske mešanice.

$$1 \text{ m}^3 = \frac{m_V}{\rho_V} + \frac{m_A}{\rho_A} + \frac{m_{MS}}{\rho_{MS}} + \frac{m_C}{\rho_C} + \frac{m_{VL}}{\rho_{VL}} + \text{vol. por} \quad (6.1)$$

pri čemer je: m_V – masa vode,

ρ_V – gostota vode,

m_A – masa agregata,

ρ_A – gostota agregata,

m_{MS} – masa mikrosilike,

ρ_{MS} – gostota mikrosilike,

m_C – masa cementa,

ρ_C – gostota cementa,

m_{VL} – masa vlaken,

ρ_{VL} – gostota vlaken.

Že pred mešanjem betonskih mešanic smo agregat in mivko v laboratoriju površinsko osušili in s tem preprečili vnos dodatne vode v betonsko mešanico. Kalupe smo očistili in jih premazali z opažnim oljem, da smo preprečili prijemanje betona na železne kalupe. Na tehtnici smo odtehtali točno določene količine posameznih frakcij agregata, mivke, cementa, Antikorodina, vlaken in vode.



Slika 13: Tehtanje posameznih količin

Sestavine smo stresli v mešalec za beton, in sicer najprej vse frakcije agregata, cement, Atikorodin ter vlakna, ki smo jih ročno raztresli po ostalih sestavinah. Vse skupaj smo suho premešali, kar je trajalo približno eno minuto.

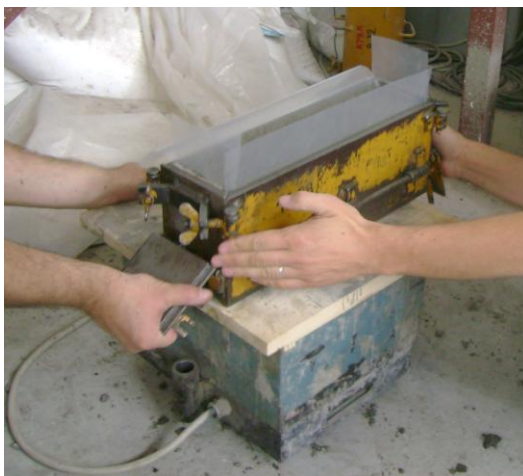


Slika 14: Mešalec za beton

Vodo smo s konstantnim, počasnim dolivanjem med mešanjem dodajali v mešalec. Mešali smo še približno štiri minute, da smo dobili enakomerno razmešano betonsko mešanico. Po končanem mešanju smo odprli pokrov mešalca ter izmerili temperaturo sveže betonske mešanice. Nato smo izmerili konsistenco sveže betonske mešanice z metodo razleza in

metodo poseda ter sproti beležili izmerjene podatke. Opravili smo tudi meritev vsebnosti por. Po preskusih smo sveži beton ponovno premešali, kar je trajalo približno pol minute. Sledilo je polnjenje kalupov in zgoščevanje na vibracijski mizi, da smo iz mešanice v kalupu spravili čim več zračnih mehurčkov. Z betonom napolnjene kalupe smo stekali in jih postavili na ravno površino ter pokrili s PVC folijo. Tri kalupe prizem, ki smo jih pripravili za merjenje avtogenega krčenja s pomočjo merilnih uric in računalnika, smo napolnili z betonom nazadnje (opis sledi v nadaljevanju).

Po približno 24 urah smo kalupe odprli in preskušance označili z oznako mešanice, ki je vsebovala vrsto betona, dolžino polipropilenskih vlaken in datum priprave. Prizme smo odnesli v posebno komoro, kjer smo jih pripravili za merjenje krčenja (opis sledi v nadaljevanju). Betonske kocke smo po označitvi potopili v posodo z vodo in jih tako shranjene negovali do osemindvajsetega dneva pri sobni temperaturi. Nato smo jim izmerili tlačno trdnost.



Slika 15: Zgoščevanje betona na vibracijski mizi

Postopek merjenja poseda po standardu SIST EN 12350-2

Metodo uporabljamo za plastične betone z $D_{\max} < 40$ mm. Pred izvedbo preskusa v posodi za mešanje vzorec premešamo s štirioglato lopatico (zidarsko žlico). Površino osnovne plošče in notranjost kalupa obrišemo z vlažno krpo in odstranimo odvečno vodo. Kalup, ki ga uporabljamo za preskus, je oblike prisekanega stožca (Abramsov stožec). Kalup nato postavimo na osnovno ploščo. Med polnjenjem moramo kalup pritisniti k osnovni plošči tako, da stojimo na obeh pločevinastih ušesih. Kalup polnimo v treh slojih, vsakega zgostimo z 20 udarci z zgoščevalno palico. Polnimo ga tako, da vsak sloj po zgoščevanju zavzame približno tretjino višine kalupa. Ko kalup napolnimo, s pomočjo zidarske žlice odstranimo odvečni beton na zgornjem obodu kalupa. Nato odstranimo še ves beton, ki je med polnjenjem padel na osnovno ploščo. Ko očistimo površino, s počasnim, enakomernim vlečenjem navzgor odstranimo kalup, pri čemer se premiki kalupa ne smejo prenašati na beton. Preverimo, kakšno obliko ima poseden vzorec svežega betona. Preskus je veljaven le, če se konča s pravilnim posedom. Če se preskušane poruši strižno, vzamemo drug vzorec betona in postopek ponovimo. Mera za konsistenco betona je višina poseda vzorca svežega betona po odstranitvi kalupa. Višino poseda zaokrožimo na najbližjih 10 mm in dobljeno vrednost zabeležimo.



Slika 16: Merjenje višine poseda

Postopek merjenja razleza po standardu SIST EN 12350-5:2001

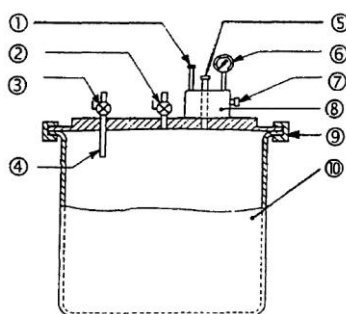
Metodo uporabljamo za plastične betone z $D_{\max} < 63$ mm. Pred izvedbo preskusa v posodi za mešanje vzorec premešamo s štirioglato lopatico (zidarsko žlico). Razlezno mizo postavimo na ravno in vodoravno površino, ki ni izpostavljena zunanjim vibracijam ali tresljajem. Površino razlezne mize in notranjost kalupa (prisekan stožec) obrišemo z vlažno krpo in odstranimo odvečno vodo. Kalup postavimo na sredino mize. Med polnitvijo moramo kalup pritisniti k osnovni plošči tako, da stojimo na obeh pločevinastih ušesih. Kalup napolnimo v dveh slojih in zgostimo z 10 udarci nabijala. Ko kalup napolnimo, s pomočjo zidarske žlice odstranimo odvečni beton na zgornjem obodu kalupa. Ko se površina betona poravna, počakamo 30 s, nato počasi dvignemo stožec navpično. Razlezno mizo stabiliziramo tako, da stopimo na stopalko na sprednji strani mize. Nato 15-krat počasi dvignemo zgornji del mize, dokler ta ne doseže distančnika, in ga nato spustimo, da prosto pade na spodnji distančnik. Z merilom izmerimo največjo dimenzijo razlezenega betona in meritev zaokrožimo na najbližjih 10 mm ter jo zabeležimo. Izmerjena dimenzija je mera za konsistenco betona.



Slika 17: Merjenje razleza betonske mešanice

Postopek merjenja vsebnosti zraka – manometrsko metoda po standardu SIST EN 12350-7:2000

Pred izvedbo preskusa je treba vzorec premešati. Beton se vgradi v posodo z lopatico tako, da se zajame čim manj zraka. Odvisno od konsistence betona in načina zgoščevanja se posoda napolni v enem ali več slojih, da se doseže popolna zgoščenost. Takoj po vgraditvi v posodo je potrebno beton zgostiti tako, da je popolna zgostitev betona dosežena brez prekomerne segregacije ali izločanja cementnega mleka. Popolna zgostitev z mehanskim vibriranjem je dosežena takrat, kadar na površini betona ni več opaziti velikih zračnih mehurčkov in postane površina relativno gladka in lesketajoča, brez prekomerne segregacije. Po možnosti naj bo posoda na mizo pritrjena ali pa jo je treba na mizi trdno držati. Pretiranemu vibriranju se je treba izogibati, ker lahko povzroči izgubo vnesenega zraka. Po zgostitvi betona se s palico za zgoščevanje odstrani višek materiala, površino se zgladi z žlico ali gladilko. Prirobnci na posodi in pokrovu je treba dobro očistiti. Namestimo pokrov in ga z zaklepom pritrdimo. Zagotoviti je treba dobro tesnitev med posodo in pokrovom. Zapremo glavni zračni ventil in odpremo ventila A in B. Z brizgalko vbrizgamo vodo skozi ventil A ali ventil B, dokler voda ne izstopi skozi drugi ventil. Napravo rahlo potolčemo z lesenim kladivom, dokler se zajeti zrak ne izloči. Zapremo ventil za izpust zraka na zračni komori in s črpalko polnimo zračno komoro z zrakom toliko časa, da je kazalec na manometru na znački začetnega pritiska. Ko se po nekaj sekundah stisnjeni zrak ohladi na temperaturo okolice, je treba kazalec na manometru na znački začetnega pritiska stabilizirati tako, da se zrak po potrebi dodaja ali izpušča. Med tem rahlo udarjamo po manometru. Zapremo ventila A in B, nato pa odpremo glavni zračni ventil in močno tolčemo po steni posode. Med rahlim udarjanjem po manometru odčitamo prikazano vrednost, ki pomeni navidezni odstotek zraka. Vsebnost zraka je treba izraziti na najbližjih 0,1 % točno. Odpremo ventila A in B, da razbremenimo pritisk, preden odstranimo pokrov naprave.



Legenda:

- | | |
|----------------------------------------------------|--------------------------|
| 1) Črpalka | 6) Manometer |
| 2) Ventil B | 7) Izpustni ventil zraka |
| 3) Ventil A | 8) Zračna komora |
| 4) Cevni podaljšek za preverjanja pri kalibriranju | 9) Zaklep |
| 5) Glavni zračni ventil | 10) Posoda |

Slika 18: Deli naprave za merjenje vsebnosti zraka v betonu

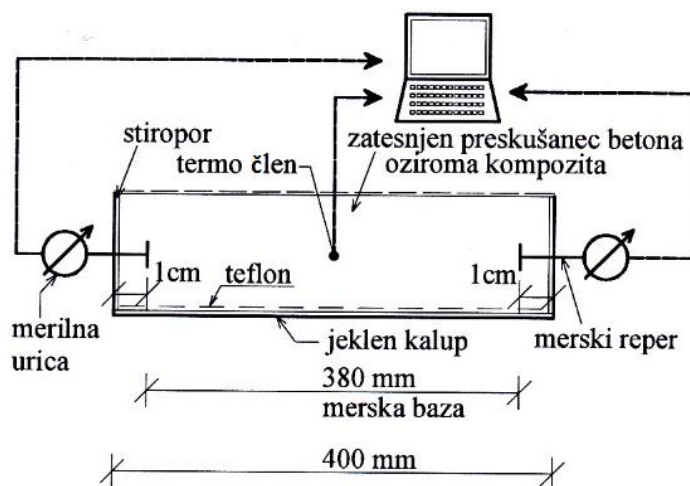


Slika 19: Naprava za merjenje vsebnosti zraka v betonu

Avtogeno in celotno krčenje betona smo merili na betonskih prizmah dimenzij 40 x 10 x 10 cm. Za merjenje zgodnjega avtogenega krčenja betona, ki se začne kmalu po zamešanju betona, smo uporabili metodo, ki je bila razvita v okviru doktorskih disertacij Draga Sajeta in Branka Bandlja (Saje, 2001; Bandelj, 2010). Metoda je opisana v nadaljevanju. Celotno

krčenje betona od enega dneva starosti betona naprej smo merili po standardnem načinu merjenja, to je z nasadnim deformetrom.

Po zamešanju smo beton vgradili v jeklene kalupe dimenzij 40 x 10 x 10 cm, ki smo ga priredili tako, da smo na končnih stranicah jeklenega kalupa izvrtali luknji, skozi kateri smo namestili merske reperje za merjenje krčenja. Merski reperji so bili nameščeni tako, da je dolžina merske baze znašala 380 mm. Zgodnje avtogeno krčenje smo začeli meriti takoj, ko so se odčitki na merilnih uricah umirili, to je v času, ko je bila trdnost stika med merilnimi reperji in betonom dovolj velika, da so reperji začeli slediti deformiranju preskušanca. Med preskušane in podlago kalupa smo, da bi zmanjšali trenje, vložili teflonsko folijo. Da smo preprečili izmenjavo vlage med betonom in okolico, smo beton že v času vgradnje v kalup po vzdolžnih stranicah zatesnili s polietilensko folijo. Na oba konca kalupa pa smo vstavili stiropor debeline 5 mm. Tako pripravljene preskušance za vsak tip kompozita in primerjalnega betona smo odnesli v klimatsko komoro s konstantno vlago $70 \% \pm 3 \%$ in temperaturo $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ter začeli meriti temperaturo in zgodnje avtogeno krčenje preskušancev. Shematični prikaz merjenja avtogenega krčenja je prikazan na sliki 20.



Slika 20: Shematični prikaz merjenja zgodnjega avtogenega krčenja

Temperaturo v sredini preskušanca smo merili s pomočjo termo-člena v sredini vzorca. Za začetek avtogenega krčenja preskušancev smo privzeli začetek naraščanja temperature v

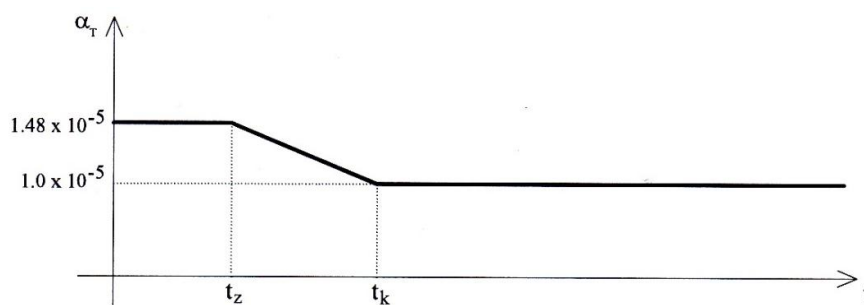
mikroarmiranem betonu, kar je približno enako začetku vezanja cementa. Japonski inštitut za beton namreč definira za začetek merjenja avtogenega krčenja čas začetka vezanja cementa, ki je približno enako začetku naraščanja temperature preskušanca, če se ta nahaja v okolju s konstantno temperaturo.

Meritve so potekale na treh zatesnjenih preskušancih za vsak tip kompozita oziroma primerjalnega betona. Računalniško voden obseg rezultatov meritev je potekal prek šestih merilnih uric z natančnostjo 0.001 mm, ki so bile postavljene na merske reperje preskušancev.



Slika 21: Elektronsko merjenje avtogenega krčenja preskušancev

Elektronsko izmerjene deformacije v prvih 24 urah po zamešanju predstavljajo celotne deformacije kompozita. Velikost avtogenega krčenja kompozita smo določili z razliko izmerjenih in temperaturnih deformacij preskušancev, ki smo jih ocenili na podlagi razteznostnega koeficienta svežega betona oziroma kompozita $\alpha_T = 1.48 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ in izmerjene spremembe temperature preskušanca (Saje, 2001). Od časa, ko je temperatura betona začela naraščati, pa do časa, ko se je temperatura preskušanca pri izotermnih razmerah okolja spet izenačila s temperaturo okolice, smo za temperaturni razteznostni koeficient upoštevali linearno interpolacijo med vrednostma, ki veljata za sveži oziroma otrdeli beton (slika 22).



Slika 22: Časovno spreminjanje temperaturnega razteznostnega koeficienta betona

Po enem dnevu, ko prirastek krčenja ni bil več tako izrazit, smo meritev krčenja nadaljevali z mehanskim nasadnim deformetrom. Preskušance smo vzeli iz kalupov ter namestili merilne reperje tako, da smo na nasprotnih vzdolžnih stranicah zatesnjenega preskušanca v polietilenski foliji naredili po dve luknjici, skozi kateri smo s sekundnim lepilom prilepili po dva kovinska reperja z bazno razdaljo 25.4 cm in izmerili začetno medsebojno oddaljenost točk. Ker je bil stik med merilnim reperjem in betonom, zagotovljen s sekundnim lepilom, zaradi vlažnega betona zanesljiv le približno 1 dan, smo istočasno merilni reper prilepili še z dvokomponentnim lepilom za sveži beton proizvajalca Sika. To lepilo je za zagotovitev trdnosti stika med reperjem in betonom potrebovalo približno 12 ur. Tako sta obe lepili skupaj zagotovili kvaliteten stik od začetka do konca meritev krčenja betona. Dvokomponentno lepilo je istočasno služilo za ponovno zatesnitev vzorca na mestih okoli merilnega reperja. Meritve smo v začetnem obdobju izvajali enkrat dnevno, kasneje, ko je bil prirastek deformacij manjši, pa redkeje.

Sistem zatesnitve preskušanca se je pokazal kot zelo dober, saj je preskušanec z maso približno deset kilogramov izgubil na teži manj kot 1 g na mesec, kar je skladno z japonskimi standardi, ki dovoljujejo izgubo mase 0.05 % v času merjenja (Saje idr. 2000).

Celotno krčenje mikroarmiranega betona visoke trdnosti smo merili na treh prizmah dimenzij 40 x 10 x 10 cm, ki so bile po sestavi betona enake preskušancem za merjenje avtogenega krčenja. Te preskušance smo 24 ur po zabetoniranju razkalupili in namestili v klimatsko komoro z relativno vlažnostjo 70 % ± 3 % in temperaturo 22 °C ± 2 °C. Nato smo na preskušance s sekundnim ter dvokomponentnim lepilom namestili merilne reperje. Merjenje

krčenja smo izvajali z nasadnim deformetrom z natančnostjo 0.001 mm. Za krčenje preskušencev smo upoštevali srednjo vrednost izmerjenega krčenja na dveh med seboj vzporedno ležečih ploskvah prizme.

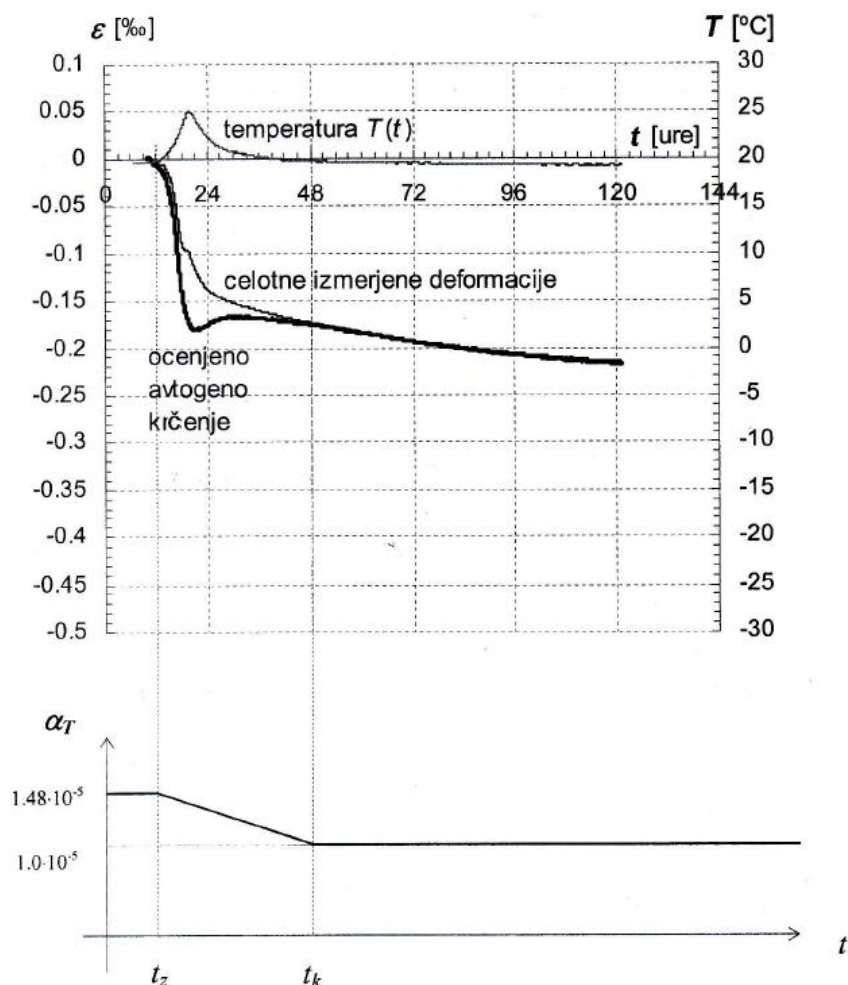


Slika 23: Meritev celotnega krčenja z nasadnim deformetrom

6.3 Časovni potek krčenja vlaknastega betona

Proces krčenja preiskovanih betonov se je začel, odvisno od vrste betonske mešanice, 7 do 9 ur po zamešanju. Pri tej starosti betona v splošnem še ne izpostavimo izsuševanju, ker je v kalupu in ga negujemo oziroma pokrivamo s folijami, s čimer preprečujemo izhlapevanje vode. Zato lahko z zadostno natančnostjo trdimo, da je deformiranje vlaknastega betona visoke trdnosti v začetnem obdobju sestavljeno le iz avtogenega krčenja in temperaturnih deformacij betona.

Elektronsko izmerjene deformacije predstavljajo celotne deformacije betona. Na sliki 24 je prikazan časovni potek krčenja zatesnjenega betona in privzeti časovni potek spreminjanja linearnega temperaturnega koeficienta raztezka betona α_T v prvih petih dneh njegove starosti.



Slika 24: Časovni potek krčenja zatesnjenega betona in časovni potek spreminjanja linearnega temperaturnega koeficienta raztezka betona α_T v prvih petih dneh (Saje, 2001)

Od časa, ko je temperatura betona začela naraščati, pa do časa, ko se je temperatura vzorca pri izotermnih razmerah okolja zopet izenačila s temperaturo okolice, smo upoštevali linearni potek temperaturnega koeficienta raztezka betona od začetne vrednosti koeficienta za sveži beton pa do vrednosti koeficienta za otrdeli beton. Razlika celotnih deformacij in temperaturnih deformacij predstavlja avtogeno krčenje betona visoke trdnosti.

Po preteku enega dneva smo krčenje merili z nasadnim deformetrom. Meritve smo opravljali na zatesnjenih vzorcih (avtogeno krčenje) ter na nezatesnjenih vzorcih (celotno krčenje). Na začetku smo meritve izvajali vsak dan, po preteku desetih dni pa smo meritve opravljali

dvakrat na teden, saj se krčenje betona ne povečuje več tako hitro. Tako smo dobili dokaj natančen časovni potek avtogenega krčenja, krčenja zaradi sušenja in celotnega krčenja.

6.4 Rezultati in analiza eksperimentalnih raziskav

Preglednica 11: Povprečni skrčki betonskih mešanic v ‰ pri različnih starostih in pripadajoče standardne deviacije

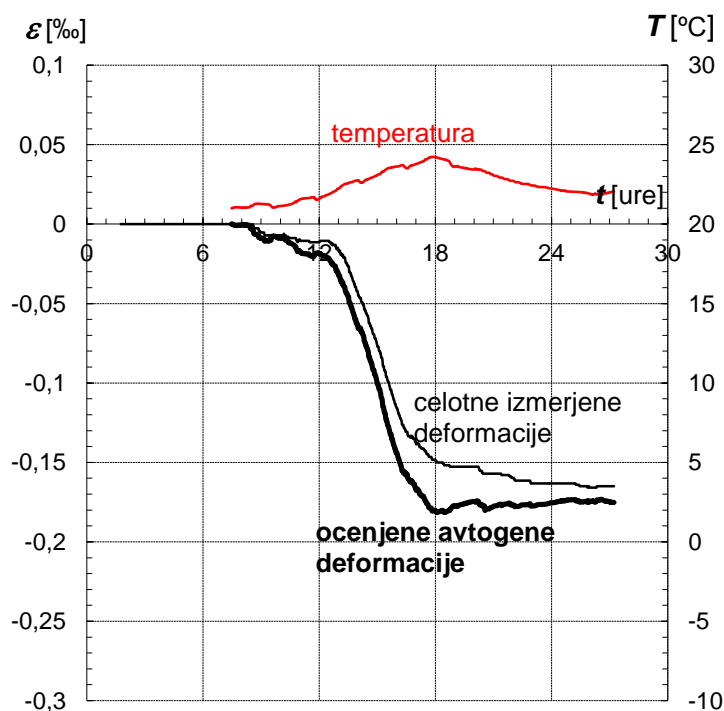
| Mešanica | Starost betonske mešanice | | | |
|-------------|------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | Povprečen skrček betonske mešanice v (‰) | | | |
| | Standardna deviacija v (‰) | | | |
| | 1 dan | 3 dni | 7 dni | 28 dni |
| HSC | -0.184 ±0.036 | -0.275 ±0.038 | -0.376 ±0.034 | -0.494 ±0.034 |
| HSC-PPV12 | -0.247 ±0.024 | -0.351 ±0.015 | -0.435 ±0.012 | -0.541 ±0.011 |
| HSC-PPV30 | -0.236 ±0.026 | -0.335 ±0.030 | -0.433 ±0.025 | -0.538 ±0.021 |
| HSC-PPV6 | -0.147 ±0.092 | -0.280 ±0.100 | -0.354 ±0.093 | -0.464 ±0.093 |
| HSC-PPV18 | -0.168 ±0.049 | -0.276 ±0.044 | -0.378 ±0.035 | -0.470 ±0.028 |
| HSC-ECLIPSE | -0.022 ±0.021 | -0.127 ±0.092 | -0.194 ±0.082 | -0.263 ±0.089 |

6.4.1 Vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na velikost avtogenega krčenja vlaknastega betona

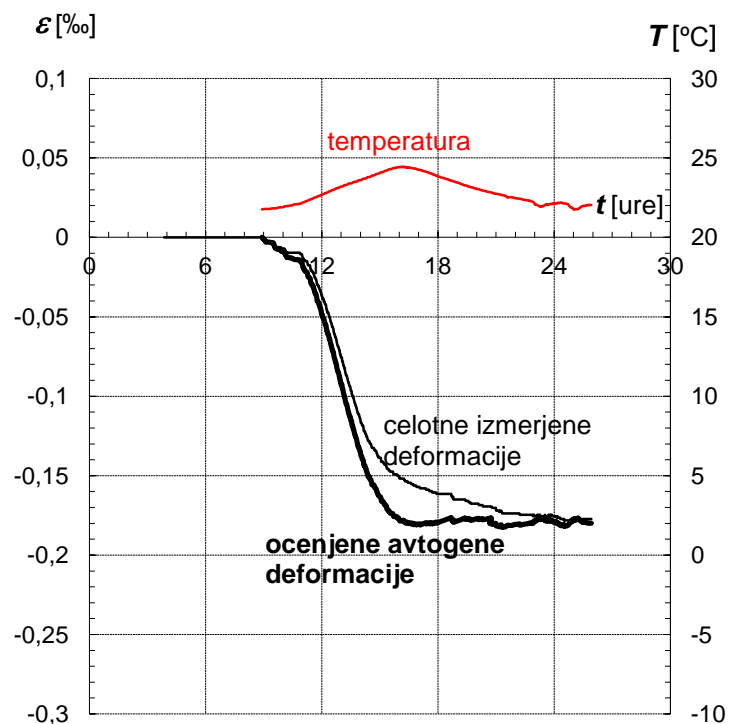
Na sliki 25 in v nadaljevanju na slikah 26, 27, 28 ter 29 je prikazano avtogeno krčenje za prvi dan po zamešanju betonske mešanice. Na krivuljah avtogenega krčenja opazimo rahlo zmanjšanje avtogenega krčenja betona, in sicer med časom, ko je v betonu dosežena največja temperatura, in časom, ko se temperatura betona izenači s temperaturo okolice. To

lahko razložimo s pomočjo termodinamičnega ravnovesja v porah cementnega kamna. Ko začne temperatura v betonu padati, se beton zaradi linearnega temperaturnega raztezka krči. Tako se zmanjša tudi prostornina zaprtih por v cementnem kamnu. Fenomen razložimo na primeru ene pore. Ker se prostornina zaprte pore zmanjša, se po zakonih termodinamike poveča relativna vlažnost v pori, kar zmanjša natezne sile, ki delujejo na stene pore, in tako se zmanjša tudi avtogeno krčenje. Zaradi padca temperature zraka v zaprti pori ob vzpostavitvi termodinamičnega ravnovesja naraste relativna vlažnost zraka, kar zopet vodi v zmanjšanje avtogena krčenja.

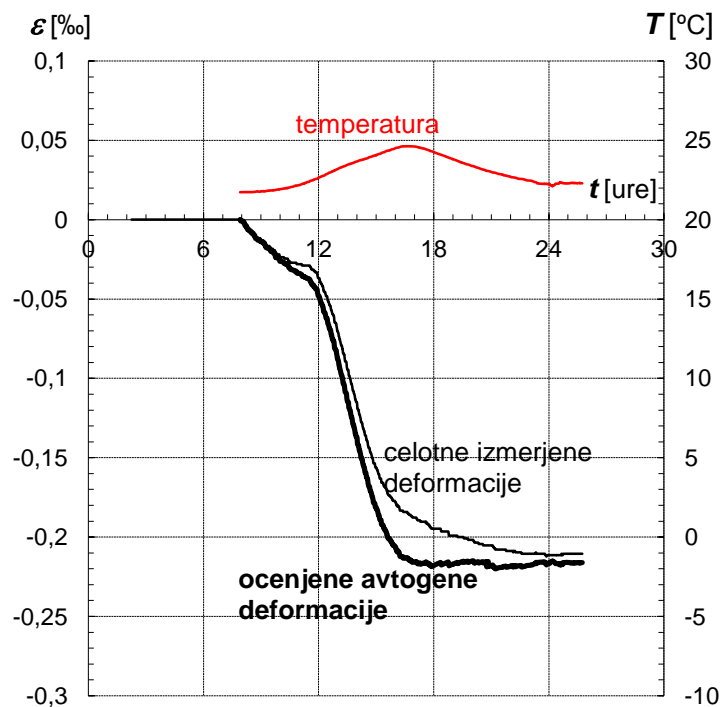
Razlika celotnih deformacij in temperaturnih deformacij predstavlja avtogeno krčenje betona.



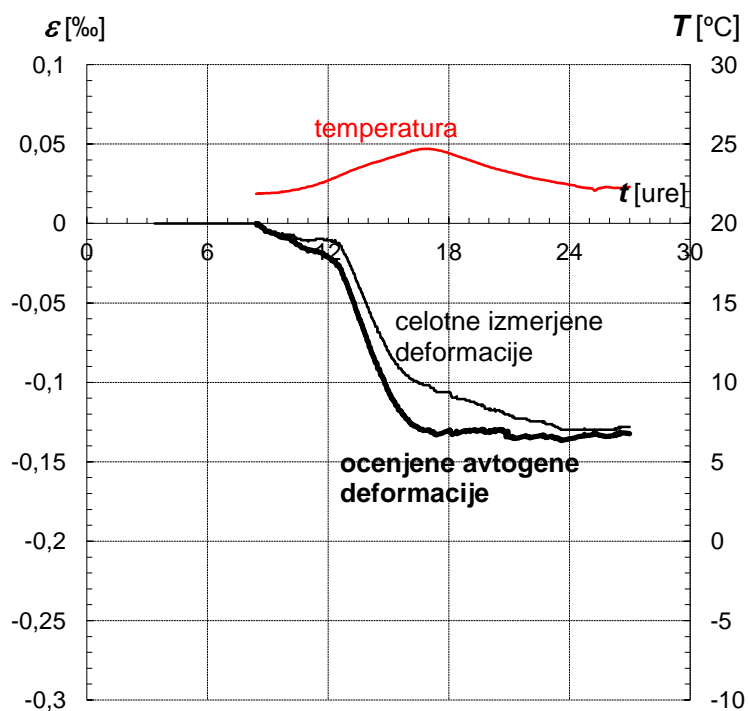
Slika 25: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC



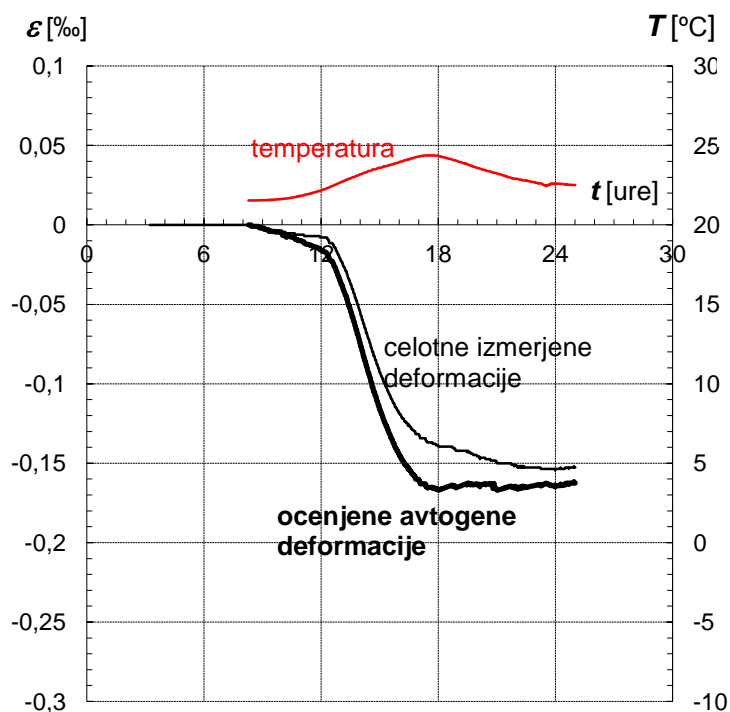
Slika 26: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV12



Slika 27: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV30

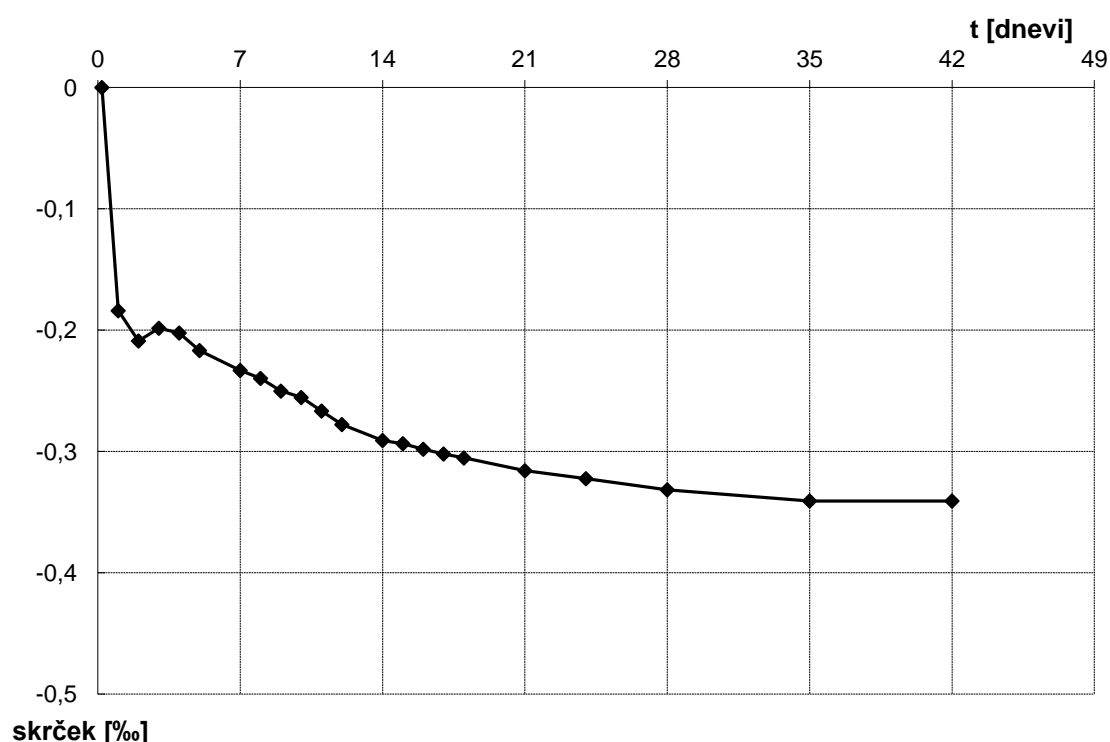


Slika 28: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV6



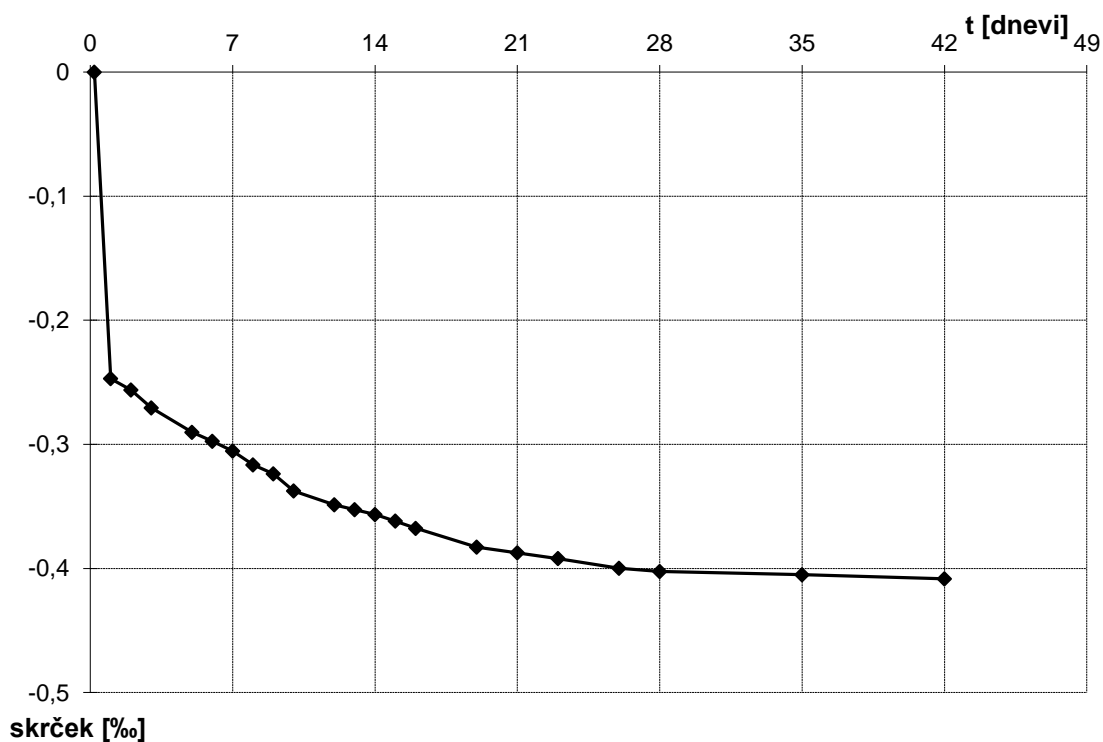
Slika 29: Časovni potek zgodnjega krčenja in temperature betona HSC-PPV18

Na sliki 30 je prikazano avtogeno krčenje primerjalnega betona visoke trdnosti brez dodatka vlaken z oznako HSC. Vodovezivno razmerje primerjalnega betona je 0.36 in vsebuje 400 kg/m³ veziva. Skrček je po prvem dnevu znašal -0.184 ‰. Glede na to vrednost se je do tretjega dne skrček povečal za 1.076-krat, do sedmega dne za 1.266-krat ter do osemindvajsetega dne za 1.804-krat.



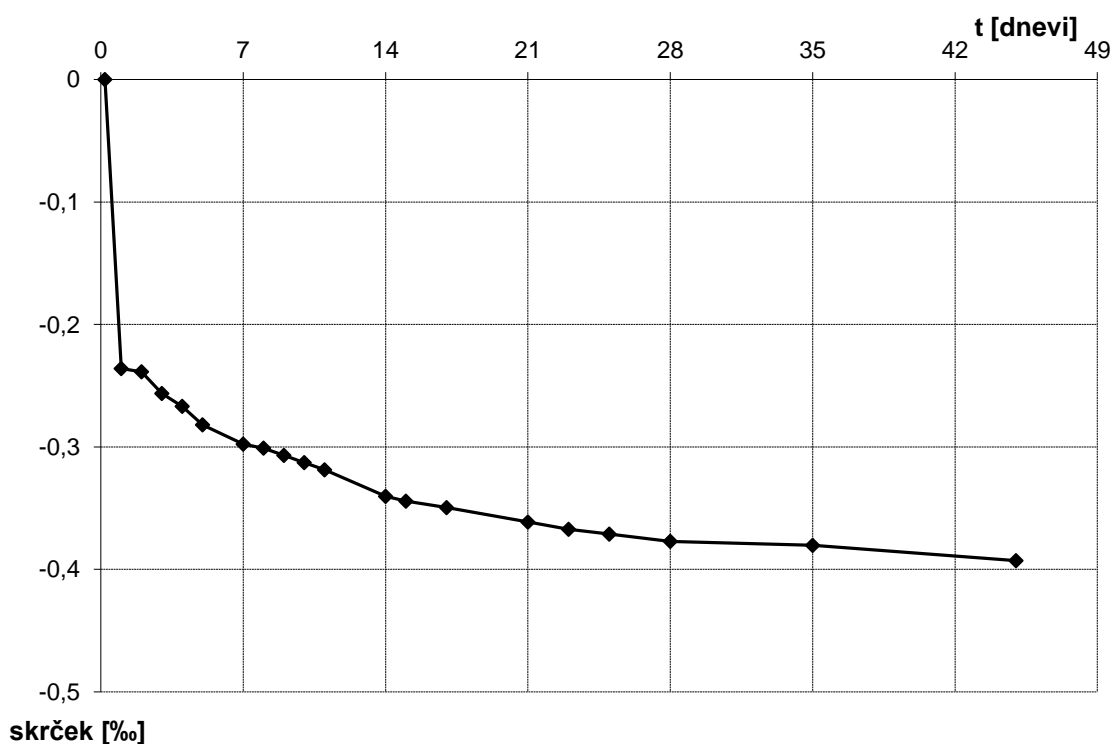
Slika 30: Avtogeno krčenje primerjalnega betona visoke trdnosti HSC

Na sliki 31 je prikazano avtogeno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV12, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 12 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m³ veziva. Skrček je po prvem dnevu znašal -0.247 ‰. Glede na to vrednost se je do tretjega dne skrček povečal za 1.097-krat, do sedmega dne za 1.235-krat ter do osemindvajsetega dne za 1.632-krat.



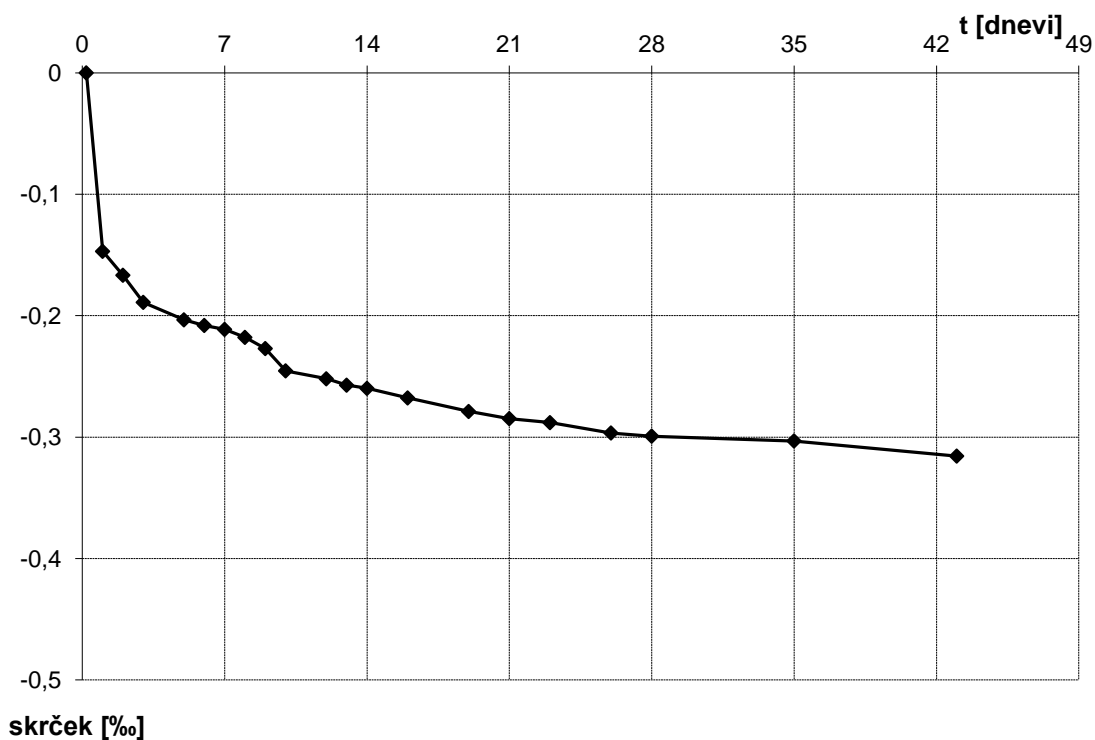
Slika 31: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV12

Na sliki 32 je prikazano avtogeno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV30, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 30 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrčec je po prvem dnevu znašal -0.236 ‰ . Glede na to vrednost se je do tretjega dne skrčec povečal za 1.085-krat, do sedmega dne za 1.263-krat ter do osemindvajsetega dne za 1.597-krat.



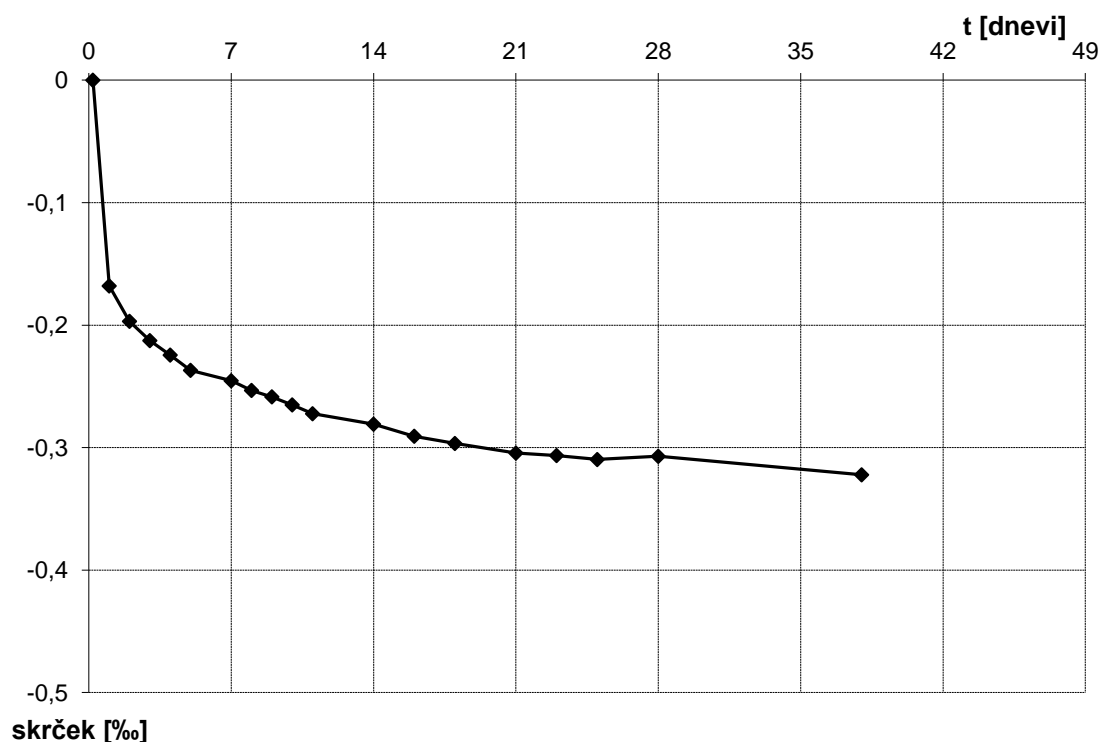
Slika 32: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV30

Na sliki 33 je prikazano avtogeno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV6, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 6 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrčec je po prvem dnevu znašal -0.147 ‰ . Glede na to vrednost se je do tretjega dne skrčec povečal za 1.286-krat, do sedmega dne za 1.435-krat ter do osemindvajsetega dne za 2.034-krat.



Slika 33: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV6

Na sliki 34 je prikazano avtogeno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV18, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 18 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrčec je po prvem dnevu znašal -0.168 ‰ . Glede na to vrednost se je do tretjega dne skrčec povečal za 1.268-krat, do sedmega dne za 1.458-krat ter do osemindvajsetega dne za 1.827-krat.



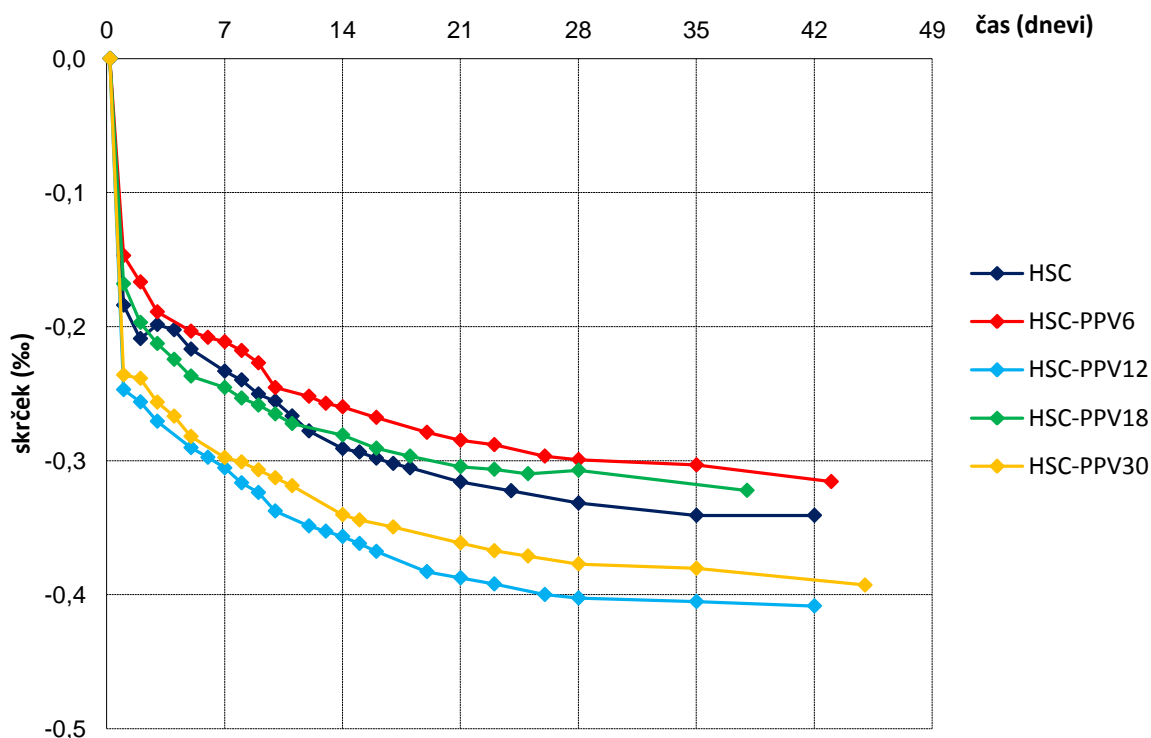
Slika 34: Avtogeno krčenje betona z oznako HSC-PPV18

Na sliki 35 so prikazani poteki avtogenega krčenja vseh v raziskavi uporabljenih betonov. Najmanjše avtogeno krčenje je bilo izmerjeno pri betonu z dodatkom polipropilenskih vlaken dolžine 6 mm. Avtogeno krčenje primerjalnega betona HSC brez vlaken je bilo pri enem dnevu starosti betona za 34.2 % manjše od avtogenega krčenja betona z oznako HSC-PPV12, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 12 mm, in za 28.3 % manjše od avtogenega krčenja betona z oznako HSC-PPV30. Avtogeno krčenje primerjalnega betona HSC pa je bilo pri enem dnevu starosti betona za 20.1 % večje od avtogenega krčenja betona z oznako HSC-PPV6 in za 8.7 % večje od avtogenega krčenja betona z oznako HSC-PPV18.

Avtogeno krčenje betona s polipropilenskimi vlakni dolžine 6 mm in 18 mm je bilo pri starosti osemindvajset dni manjše kot pri primerjalnem betonu brez polipropilenskih vlaken. Avtogeno krčenje betona s polipropilenskimi vlakni dolžine 12 mm in 30 mm pa je bilo večje kot avtogeno krčenje primerjalnega betona brez vlaken. Razmerje med velikostjo avtogenega krčenja pri starosti betonov osemindvajset dni in starostjo betona en dan je bilo

pri betonu s 6 mm dolgimi vlakni 2.03, pri betonu z 12 mm dolgimi vlakni 1.63, pri betonu z 18 mm dolgimi vlakni 1.83 in pri betonu z 30 mm dolgimi vlakni 1.60. Pri primerjalnem betonu pa je bilo to razmerje 1.80.

Iz analize rezultatov ugotavljamo, da je pri betonih visoke trdnosti z oznako HSC-PPV6 in HSC-PPV18 avtogeno krčenje manjše od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez polipropilenskih vlaken, medtem ko je pri betonih z oznako HSC-PPV12 in HSC-PPV30 avtogeno krčenje občutno večje od avtogenega krčenja primerjalnega betona brez polipropilenskih vlaken.



Slika 35: Avtogeno krčenje vseh v raziskavi uporabljenih betonov

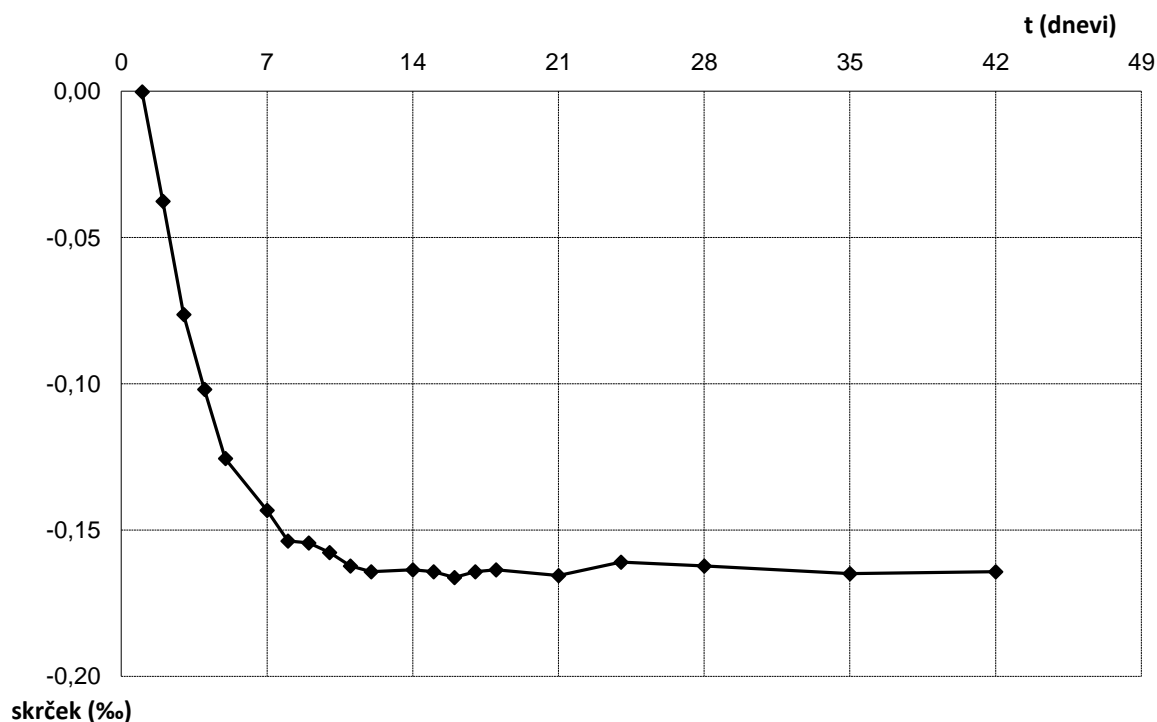
V preglednici 12 so podani povprečni skrčki avtogenega krčenja vlaknastih betonov in primerjalnega betona brez vlaken pri različnih starostih v promilih (‰).

Preglednica 12: Velikost avtogenega krčenja betonov pri različnih starostih

| | 1 dan | 3 dni | 7 dni | 28 dni |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| HSC | -0,184 | -0,198 | -0,233 | -0,332 |
| HSC-PPV12 | -0,247 | -0,271 | -0,305 | -0,403 |
| HSC-PPV30 | -0,236 | -0,256 | -0,298 | -0,377 |
| HSC-PPV6 | -0,147 | -0,189 | -0,211 | -0,299 |
| HSC-PPV18 | -0,168 | -0,213 | -0,245 | -0,307 |

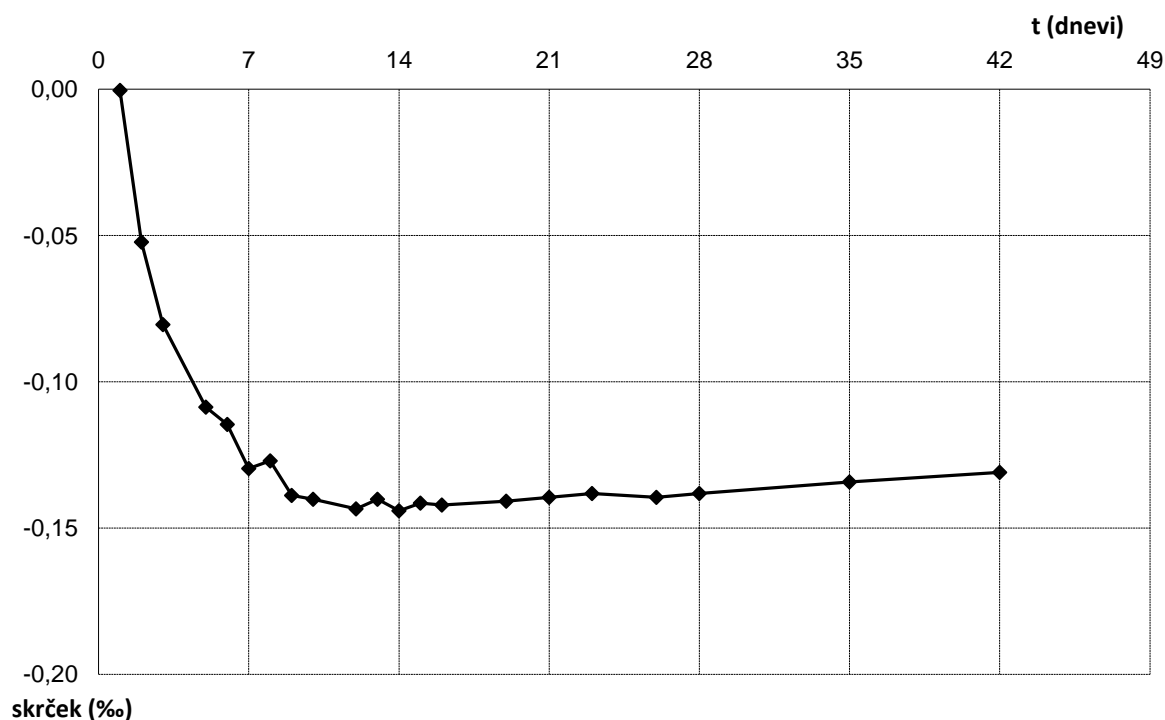
6.4.2 Vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na velikost krčenja zaradi sušenja vlaknastega betona

Na sliki 36 je prikazano krčenje zaradi sušenja primerjalnega betona visoke trdnosti brez polipropilenskih vlaken z oznako HSC. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m³ veziva. Skrček dva dni starega betona je znašal -0.038 ‰. Glede na to vrednost se je tretjega dne skrček povečal 2.00-krat, sedmega 3.76-krat in osemindvajsetega 4.26-krat. Ugotovili smo, da se je skrček od drugega do sedmega dneva povečal za 3.76-krat, medtem ko se je od sedmega dne do osemindvajsetega dne povečal le za 1.13-krat.



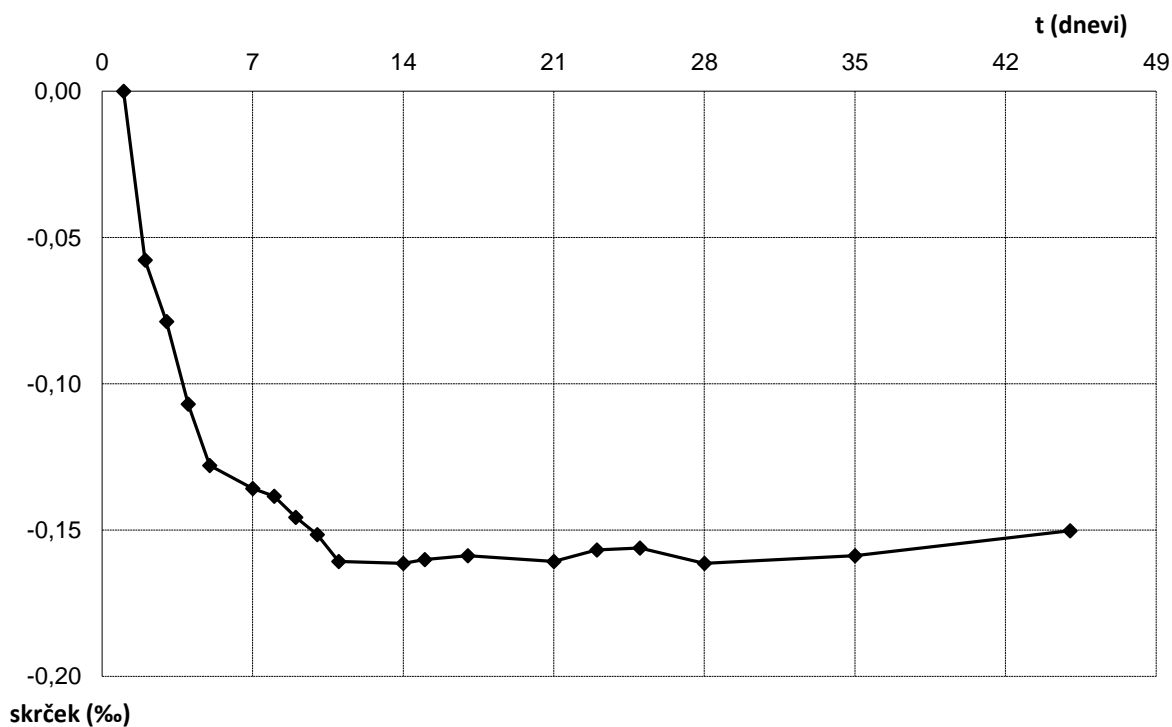
Slika 36: Krčenje zaradi sušenja primerjalnega betona z oznako HSC

Na sliki 37 je prikazano krčenje zaradi sušenja betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV12, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 12 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrček dva dni starega betona je znašal -0.052% . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrček povečal 1.54-krat, sedmega 2.50-krat in osemindvajsetega dne 2.65-krat. Ugotovili smo, da se je skrček od drugega do sedmega dneva povečal 2.50-krat, medtem ko se je od sedmega do osemindvajsetega dne povečal le 1.06-krat.



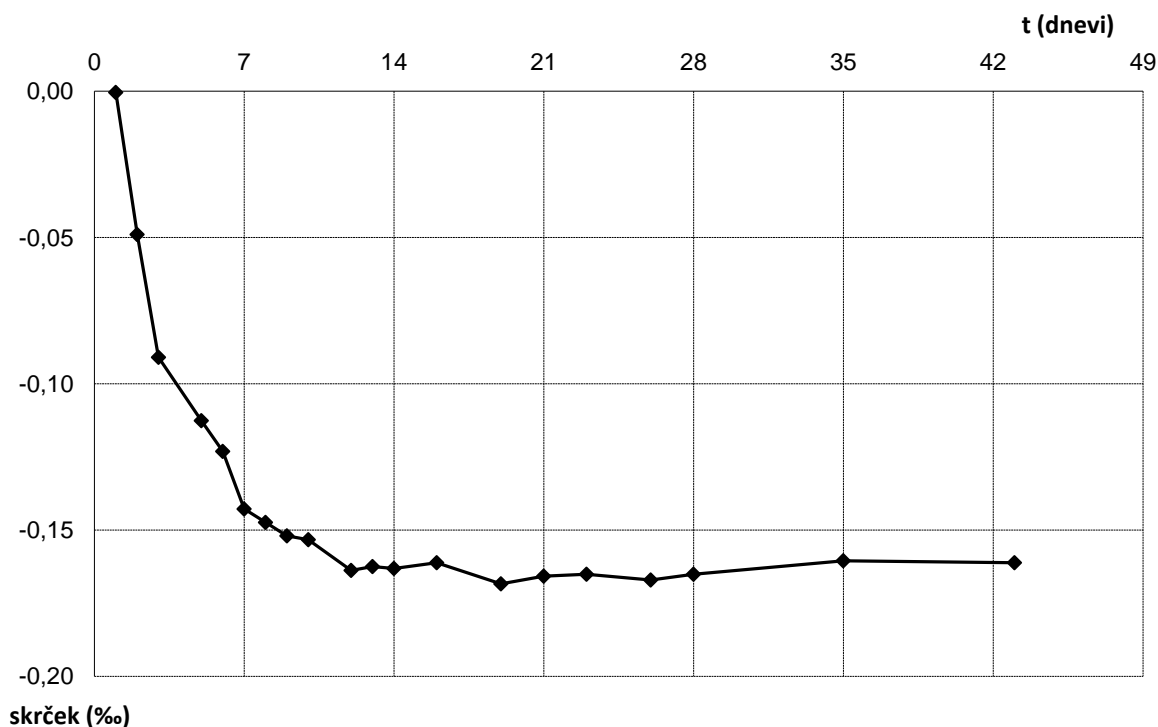
Slika 37: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV12

Na sliki 38 je prikazano krčenje zaradi sušenja betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV30, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 30 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrček dva dni starega betona je znašal -0.058 ‰ . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrček povečal 1.36-krat, sedmega dne 2.34-krat in osemindvajsetega dne 2.78-krat. Ugotovili smo, da se je skrček od drugega do sedmega dneva povečal 2.34-krat, medtem ko se je od sedmega do osemindvajsetega dne povečal le 1.18-krat.



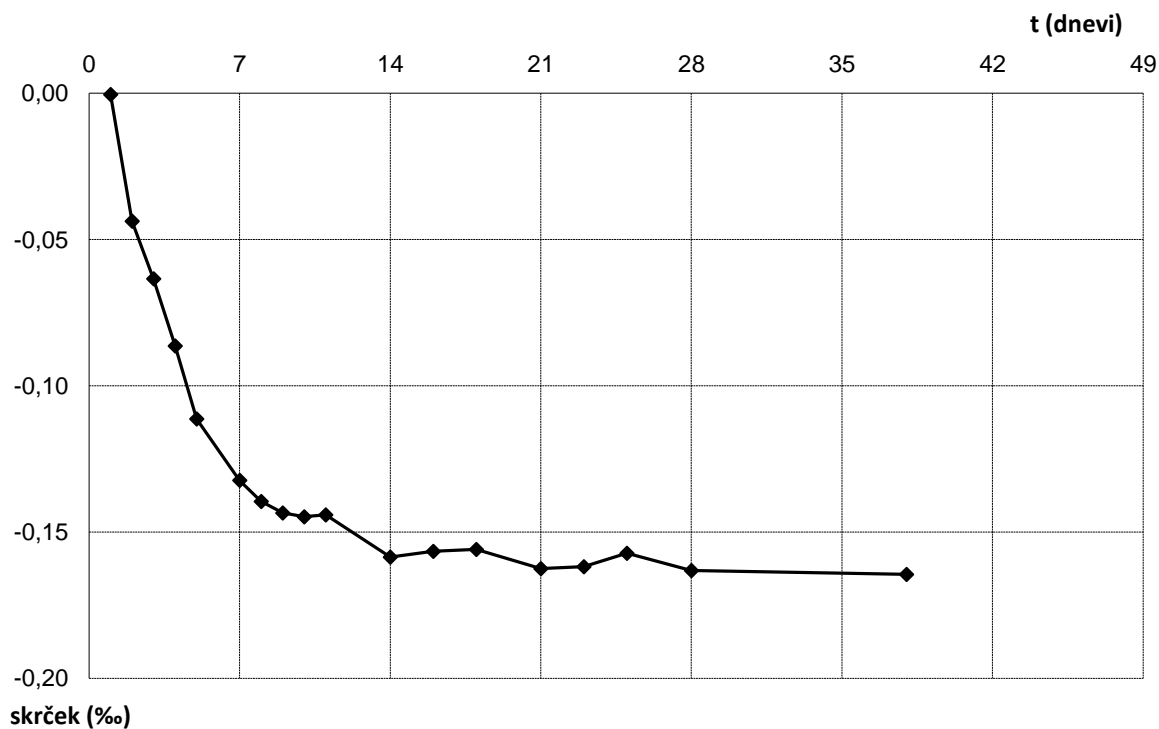
Slika 38: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV30

Na sliki 39 je prikazano krčenje zaradi sušenja betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV6, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 6 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrčec dva dni starega betona je znašal -0.049% . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrčec povečal 1.86-krat, sedmega dne 2.92-krat in osemindvajsetega dne 3.37-krat. Ugotovili smo, da se je skrčec od drugega do sedmega dne povečal 2.92-krat, medtem ko se je od sedmega do osemindvajsetega dne povečal le 1.15-krat.



Slika 39: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV6

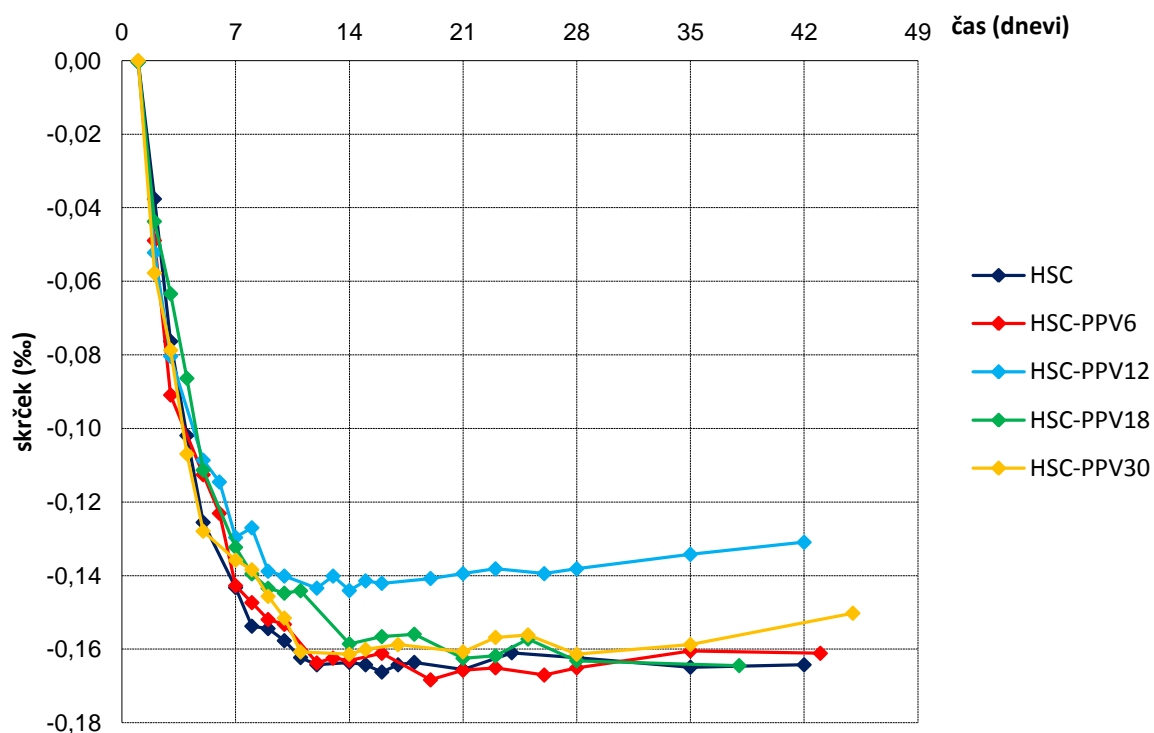
Na sliki 40 je prikazano krčenje zaradi sušenja betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV18, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 18 mm. Vodovезivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrček dva dni starega betona je znašal -0.044 ‰ . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrček povečal 1.43-krat, sedmega dne 3.00-krat in osemindvajsetega dne 3.70-krat. Ugotovili smo, da se je skrček od drugega do sedmega dneva povečal 3.00-krat, medtem ko se je od sedmega do osemindvajsetega dne povečal le 1.23-krat.



Slika 40: Krčenje zaradi sušenja betona z oznako HSC-PPV18

Na sliki 41 so prikazani grafi krčenja zaradi sušenja vseh betonov visoke trdnosti. Krivulje so pri vseh betonih približno enake, izstopa le beton visoke trdnosti z oznako HSC-PPV12, kjer je opaziti manjše krčenje zaradi sušenja. Krčenje zaradi sušenja je v tem primeru približno 15 % manjše od primerjalnega betona visoke trdnosti. Pri ostalih betonih visoke trdnosti pa je krčenje zaradi sušenja približno za 0,5 % do 2,0 % večje oziroma manjše v primerjavi s primerjalnim betonom. Ugotovili smo, da je krčenje zaradi sušenja najmanjše ravno pri betonu z oznako HSC-PPV12, ki je izkazoval največje avtogeno ter celotno krčenje.

Velik prirastek krčenja zaradi sušenja je opazen predvsem v prvih dvanajstih dneh, ko se v primerjavi z začetnim krčenjem zaradi sušenja poveča približno 3-krat. Po dvanajstem dnevu se krčenje betona visoke trdnosti zaradi sušenja zelo malo povečuje. V povprečju se poveča za približno 2 do 3 % glede na dvanajsti dan. Kasneje je celo opaziti rahlo zmanjšanje krčenja zaradi sušenja, kar pripisujemo predpostavki, da je avtogeno krčenje betona, sušenega na zraku, po prvem dnevu enako krčenju betona, zatesnjenega s folijo.



Slika 41: Prikaz krčenja zaradi sušenja vseh obravnavanih betonov visoke trdnosti

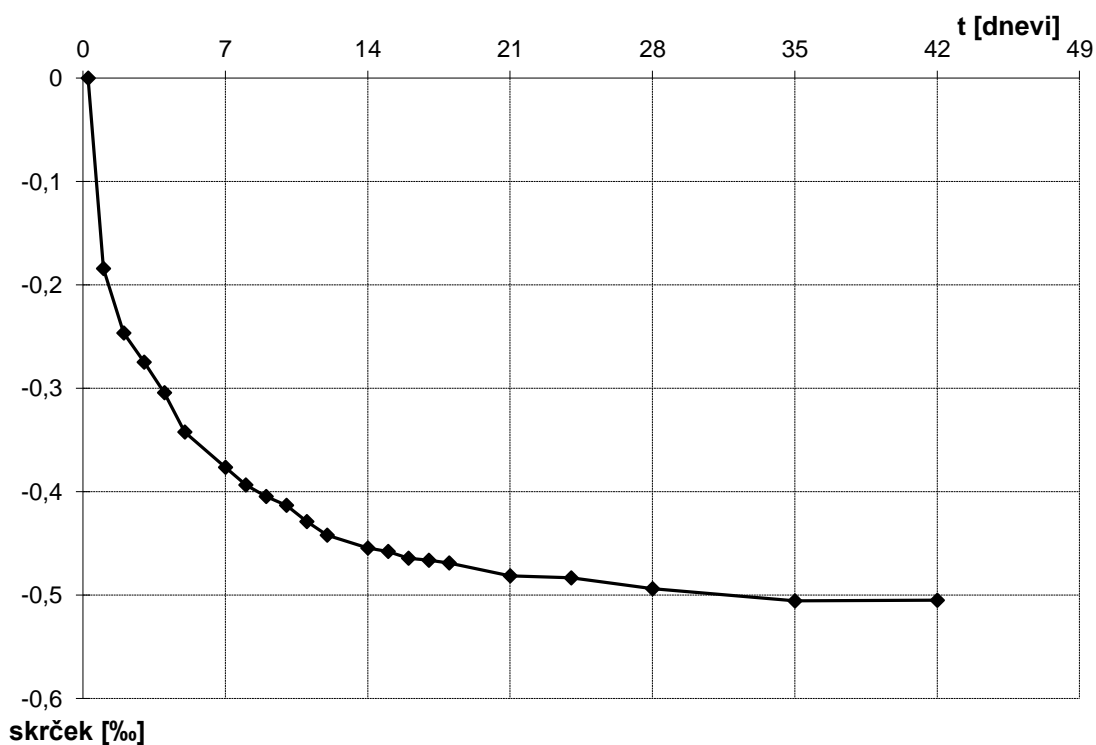
V preglednici 13 so podani povprečni skrčki krčenja zaradi sušenja vlaknastih betonov visoke trdnosti in primerjalnega betona brez vlaken pri različnih starostih v promilih (‰).

Preglednica 13: Velikost krčenja zaradi sušenja betonov pri različnih starostih

| | 1 dan | 3 dni | 7 dni | 28 dni |
|------------------|-------|--------|--------|--------|
| HSC | 0 | -0,077 | -0,143 | -0,162 |
| HSC-PPV12 | 0 | -0,080 | -0,130 | -0,138 |
| HSC-PPV30 | 0 | -0,079 | -0,135 | -0,161 |
| HSC-PPV6 | 0 | -0,091 | -0,143 | -0,165 |
| HSC-PPV18 | 0 | -0,063 | -0,133 | -0,163 |

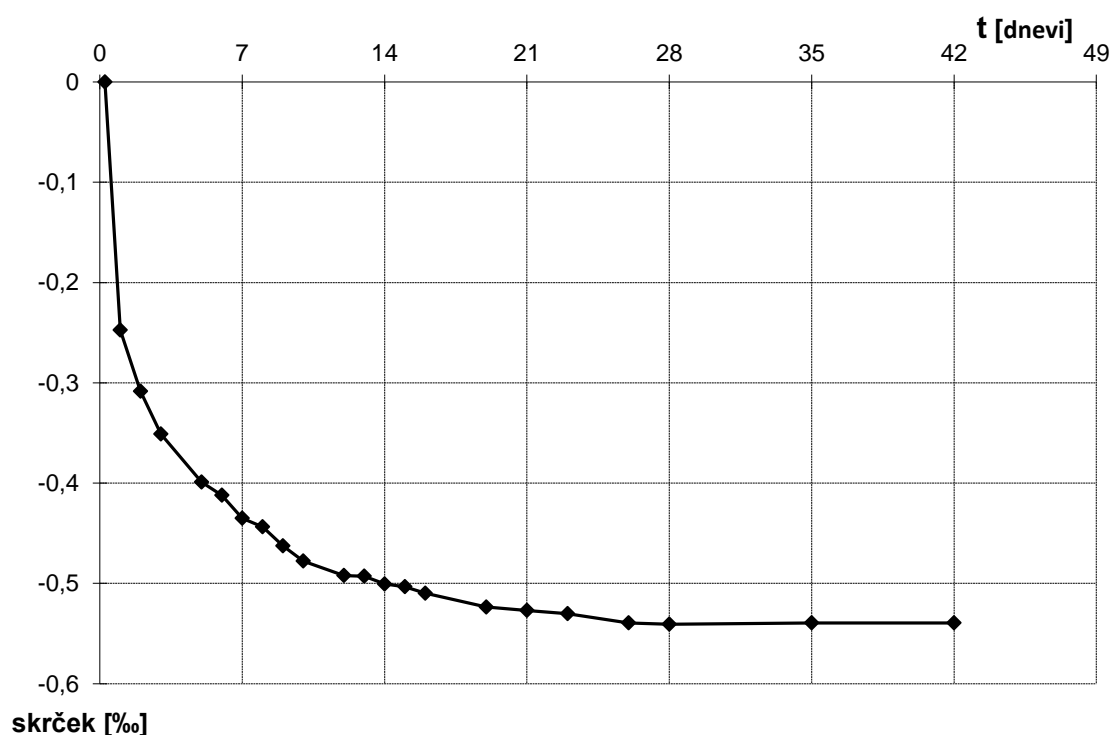
6.4.3 Vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na velikost celotnega krčenja vlaknastega betona

Na sliki 42 je prikazano celotno krčenje primerjalnega betona visoke trdnosti z oznako HSC, ki ne vsebuje polipropilenskih vlaken. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrček en dan starega betona je znašal -0.184 ‰ . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrček povečal 1.49-krat, sedmega 2.04-krat in osemindvajsetega 2.68-krat.



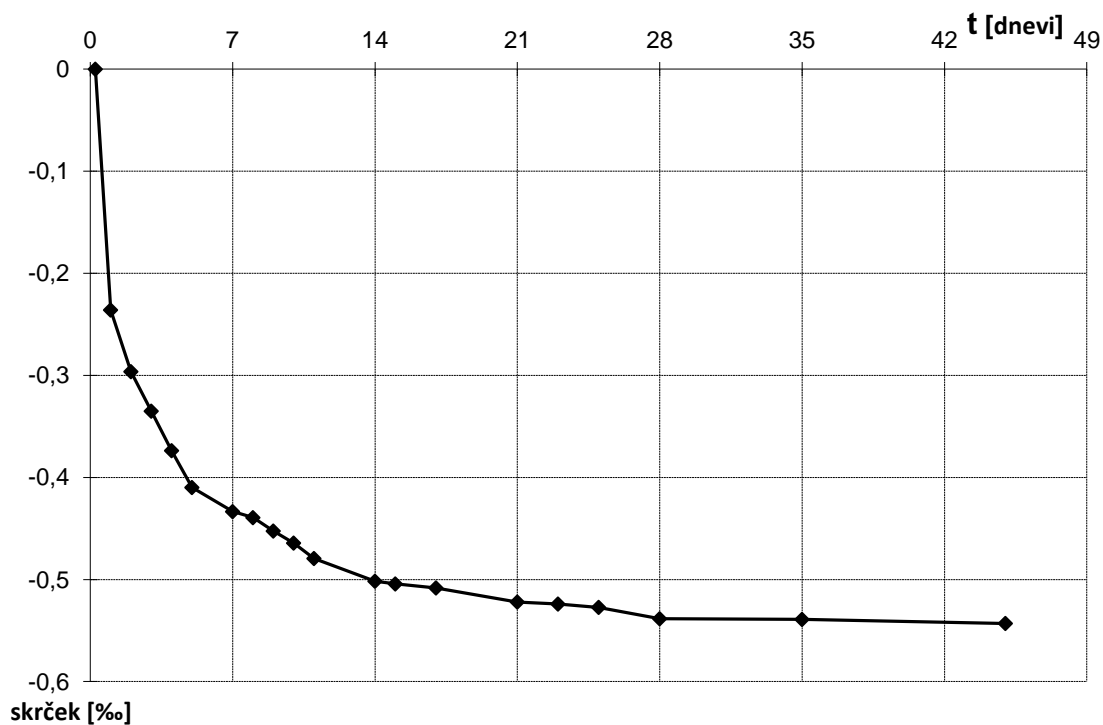
Slika 42: Celotno krčenje primerjalnega betona z oznako HSC

Na sliki 43 je prikazano celotno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV12, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 12 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrček en dan starega betona je znašal -0.247 ‰ . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrček povečal 1.42-krat, sedmega 1.76-krat in osemindvajsetega 2.19-krat.



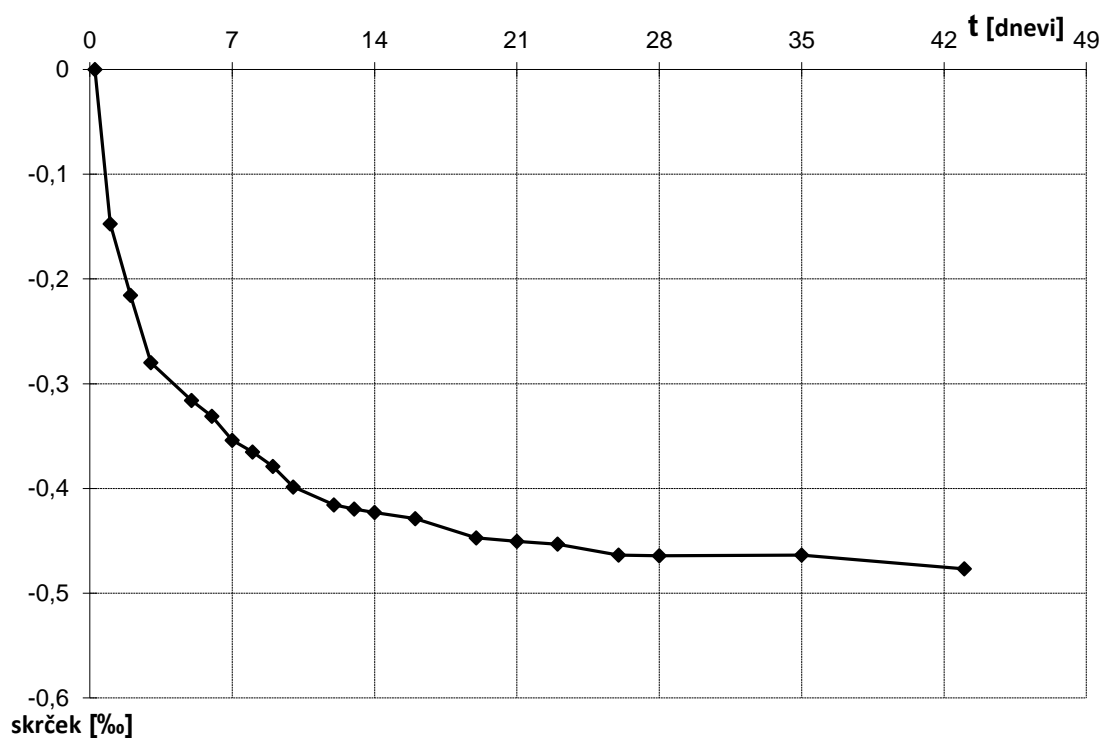
Slika 43: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV12

Na sliki 44 je prikazano celotno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV30, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 30 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrček en dan starega betona je znašal -0.236 ‰ . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrček povečal 1.42-krat, sedmega 1.83-krat in osemindvajsetega 2.28-krat.



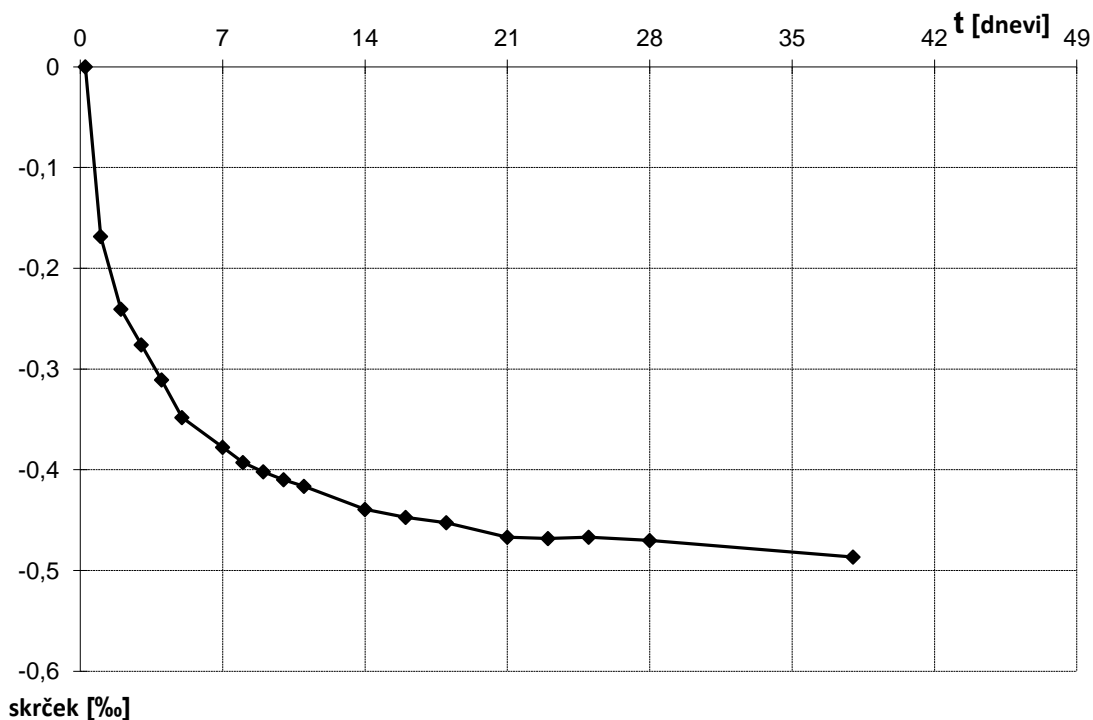
Slika 44: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV30

Na sliki 45 je prikazano celotno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV6, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 6 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrčec en dan starega betona je znašal -0.147 ‰ . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrčec povečal 1.90-krat, sedmega 2.41-krat in osemindvajsetega 3.16-krat.



Slika 45: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV6

Na sliki 46 je prikazano celotno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV18, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 18 mm. Vodovezivno razmerje betona je bilo 0.36 in je vseboval 400 kg/m^3 veziva. Skrčec en dan starega betona je znašal -0.168 ‰ . Glede na to vrednost se je tretjega dne skrčec povečal 1.64-krat, sedmega 2.25-krat in osemindvajsetega 2.80-krat.



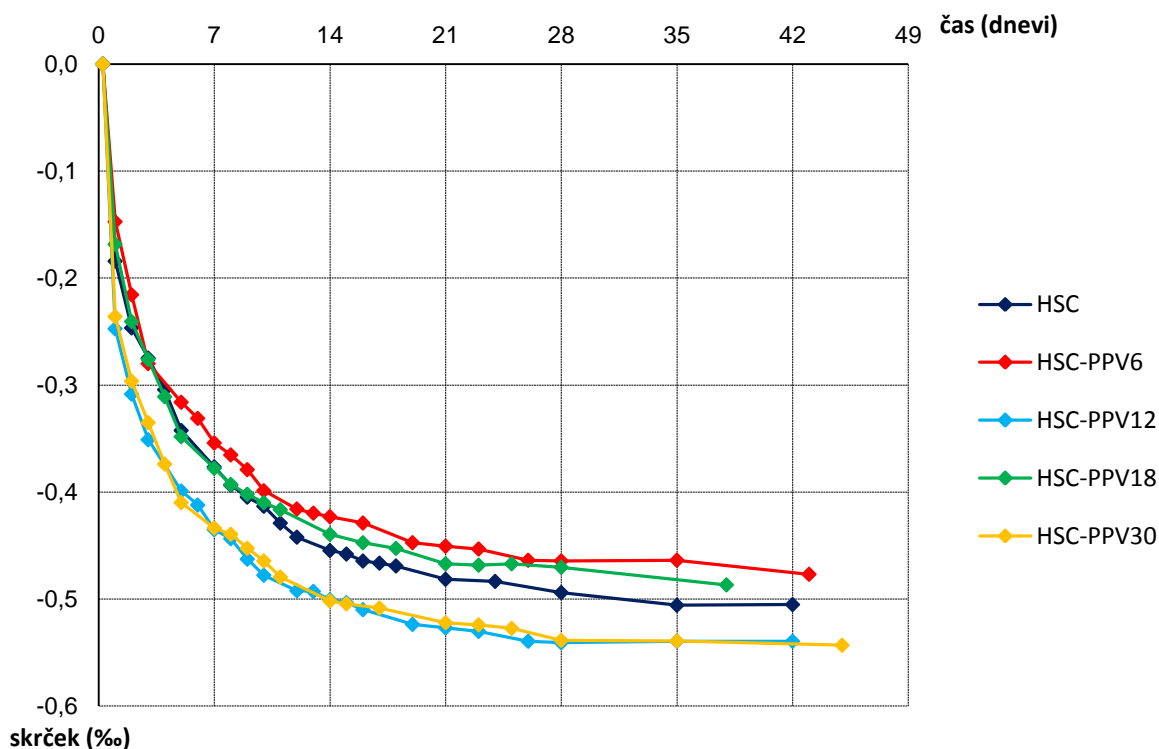
Slika 46: Celotno krčenje betona z oznako HSC-PPV18

Na sliki 47 je prikazan potek celotnega krčenja vseh obravnavanih betonov visoke trdnosti. Najmanjše celotno krčenje je bilo izmerjeno pri betonu z oznako HSC-PPV6, ki je vseboval polipropilenska vlakna dolžine 6 mm. Celotno krčenje tega betona je za 20.1 % manjše od krčenja primerjalnega betona z oznako HSC. Celotno krčenje primerjalnega betona HSC brez vlaken je bilo pri enem dnevu starosti betona za 34.2 % večje od celotnega krčenja betona z oznako HSC-PPV12, za 8.7 % manjše od celotnega krčenja betona z oznako HSC-PPV18 ter za 8,7 % manjše od celotnega krčenja betona z oznako HSC-PPV30.

Po enem tednu od zabetoniranja preskušancev je bilo celotno krčenje vlaknastih betonov manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken HSC samo pri betonski mešanici HSC-PPV6, in sicer za 5.9 %. Pri ostalih betonih visoke trdnosti je bilo celotno krčenje v primerjavi s celotnim krčenjem primerjalnega betona HSC nekoliko večje.

Po osemindvajsetih dneh od zabetoniranja preskušancev je bilo celotno krčenje betona visoke trdnosti z oznako HSC-PPV6 za 6.1 % manjše, pri betonu z oznako HSC-PPV12 za 9.5 % večje, pri betonu z oznako HSC-PPV18 za 4.9 % manjše in pri betonu z oznako HSC-PPV30 za 8.9 % večje od celotnega krčenja primerjalnega betona HSC.

Iz rezultatov meritev vidimo, da se razlika celotnega krčenja vlaknastih betonov in celotnega krčenja primerjalnega betona brez vlaken s starostjo betona zmanjšuje. Pri betonu z oznako HSC-PPV6 je bilo krčenje pri enem dnevu starosti za 20.1 % manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken HSC. Pri osemindvajsetih dneh starosti je bilo celotno krčenje betona manjše od krčenja primerjalnega betona brez vlaken samo še za 6.1 %. Še večjo razliko v krčenju je opaziti pri betonih z oznako HSC-PPV12, kjer je pri enem dnevu starosti krčenje betona za 34.2 % večje od primerjalnega betona visoke trdnosti brez dodatka polipropilenskih vlaken. Pri osemindvajsetih dneh starosti pa je celotno krčenje betona HSC-PPV12 večje od krčenja primerjalnega betona samo še za 9.5 %. Razlika med celotnim krčenjem vlaknastega betona in celotnim krčenjem primerjalnega betona brez vlaken je bila pri starosti betona osemindvajset dni v povprečju za 15 % manjša od razlike celotnega krčenja vlaknastega in primerjalnega betona pri starosti betona en dan.



Slika 47: Prikaz celotnega krčenja za vse obravnavane betone visoke trdnosti

V preglednici 14 so podani povprečni skrčki celotnega krčenja betona visoke trdnosti pri različnih starostih v promilih (‰).

Preglednica 14: Velikost celotnega krčenja obravnavanih betonov pri različnih starostih

| | 1 dan | 3 dni | 7 dni | 28 dni |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| HSC | -0,184 | -0,275 | -0,376 | -0,494 |
| HSC-PPV12 | -0,247 | -0,351 | -0,435 | -0,541 |
| HSC-PPV30 | -0,236 | -0,335 | -0,433 | -0,538 |
| HSC-PPV6 | -0,147 | -0,28 | -0,354 | -0,464 |
| HSC-PPV18 | -0,168 | -0,276 | -0,378 | -0,470 |

V preglednici 15 so zbrani rezultati meritev betonov visoke trdnosti, ki smo jih analizirali v diplomski nalogi. Prikazana je vrednost razleza, deleža por in gostota svežega betona ter tlačna trdnost osemindvajset dni starega betona. Za vse uporabljene betone je podana tudi

velikost avtogenega krčenja pri enem in osemindvajset dni starem betonu ter velikost krčenja zaradi sušenja in velikost celotnega krčenja pri starosti betona osemindvajset dni.

Preglednica 15: Rezultati raziskave betona visoke trdnosti, mikroarmiranega s polipropilenskimi vlakni

| Ime preskušanca | razlez [cm] | pore [%] | gostota svežega betona [kg/m ³] | tlačna trdnost [MPa] |
|-----------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| HSC | 33,5 | 2,3 | 2352 | 76,6 |
| HSC-PPV6 | 22 | 2,2 | 2323 | 80,8 |
| HSC-PPV12 | 24 | 2,5 | 2370 | 77,6 |
| HSC-PPV18 | 22 | 2,8 | 2369 | 81,3 |
| HSC-PPV30 | 23 | 3,0 | 2353 | 76,9 |
| Ime preskušanca | krčenje t = 1dan [‰] | celotno krčenje t = 28dni [‰] | avtogeno krčenje t = 28dni [‰] | krčenje zaradi sušenja t = 28dni [‰] |
| HSC | 0,18 | 0,49 | 0,33 | 0,16 |
| HSC-PPV6 | 0,15 | 0,46 | 0,30 | 0,165 |
| HSC-PPV12 | 0,25 | 0,54 | 0,40 | 0,14 |
| HSC-PPV18 | 0,17 | 0,47 | 0,31 | 0,16 |
| HSC-PPV30 | 0,24 | 0,54 | 0,38 | 0,16 |

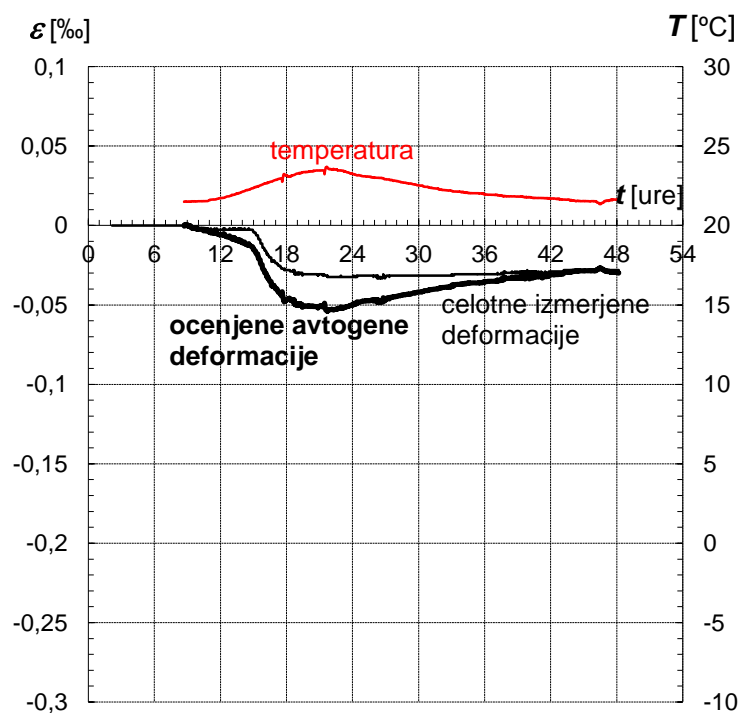
Primerjalno smo naredili tudi beton brez polipropilenskih vlaken, kateremu smo dodali kemični dodatek za zmanjševanje krčenja betona z imenom Eclipse plus. To je tekoči dodatek, ki se je do sedaj dodajal le betonom običajne trdnosti oziroma cementnim maltam, in hitro zmanjšuje krčenje betona zaradi izsuševanja. Iz podatkov proizvajalca tega dodatka je razvidno, da se pri dozaciji Eclipse plus 7,5 l/m³ betona krčenje po osemindvajsetih dneh zmanjša do 80 %, končno krčenje pa do 50 %. Dodajanje Eclipse plus lahko privede tudi do 15 % manjših tlačnih trdnosti, odvisno od betonske mešanice in uporabljenih materialov. Običajno se tlačna trdnost zmanjša največ za 10 % (Informacija o proizvodu Eclipse plus, prospekt).

Zanimalo nas je, če dodatek Eclipse plus vpliva tudi na krčenje betonov visoke trdnosti, predvsem na zgodnje avtogeno krčenje. Betonski mešanici smo dodali 5 % tekočega

dodatka Eclipse plus glede na težo zamesne vode. To je priporočena vrednost. Zaradi dodatka smo zmanjšali količino vode, da smo ohranili enako vodovezivno razmerje. Po zamešanju betona smo opazili, da Eclipse in voda delno reagirata, kar se je odražalo z višjo temperaturo svežega betona. Vsebnost por je znašala 0.8 %, kar je znatno manj v primerjavi z deležem por v diplomski nalogi predhodno raziskanih betonov. Rezultati raziskav običajnih betonov z dodatkom Eclipse plus so pokazali, da betonske mešanice za enako količino zračnih por zahtevajo višje dozacije aeranta. Tako lahko, glede na naše rezultate, zgornjo trditev potrdimo tudi za betone visoke trdnosti.

Ker nas je zanimalo predvsem zgodnje avtogeno krčenje, smo krčenje preskušanca elektronsko merili dva dni. Rezultati meritev zgodnjega krčenja betonov so prikazani na sliki 48. Ugotovili smo, da temperatura betona ni tako hitro padla kot pri betonih z dodatkom vlaken. Skrček en dan starega betona je znašal -0.022 ‰, dva dni starega pa -0.025 ‰. Glede na primerjalno betonsko mešanico brez vlaken je krčenje betona z Eclipse plus po enem dnevu manjše za 88 %, medtem ko je v primerjavi s krčenjem betonske mešanice z dodatkom polipropilenskih vlaken dolžine 6 mm krčenje betona z vsebnostjo Eclipse plus manjše za 85 %. Rezultati meritev zgodnjega avtogenega krčenja betona visoke trdnosti kažejo, da je dodatek Eclipse plus zelo učinkovit tudi pri betonih visoke trdnosti.

Po preteku osemindvajsetih dni od zabetoniranja preskušancev smo opravili še preizkus tlačne trdnosti. Tlačna trdnost betona je bila v primerjavi s primerjalno betonsko mešanico brez vlaken za 1.7 % večja, kar je v nasprotju z rezultati, dobljenimi pri običajnih betonih, kjer je prišlo do zmanjšanja tlačne trdnosti do 10 %. V primerjavi z betonom HSC-PPV6, ki je vseboval 6 mm dolga polipropilenska vlakna, se je tlačna trdnost zmanjšala za 3.6 %.



Slika 48: Časovni potek zgodnjega avtogenega krčenja in potek temperature betona HSC-eclipse

7 ZAKLJUČKI

V okviru diplomske naloge smo raziskovali krčenje vlaknastega betona visoke trdnosti, ki je mikroarmiran s polipropilenskimi vlakni. Diplomska naloga vsebuje lastne eksperimentalne rezultate. V okviru teh raziskav smo preučevali vpliv dolžine polipropilenskih vlaken na časovni razvoj avtogenega krčenja, krčenja zaradi sušenja in celotnega krčenja betona.

Pri betonih visoke trdnosti predstavlja avtogeno krčenje velik del celotnega krčenja. Najmanjše avtogeno krčenje smo dobili pri betonski mešanici z vlakni dolžine 6 mm. Z večanjem dolžine vlaken se je večalo tudi avtogeno krčenje in se tako vedno bolj približevalo avtogenemu krčenju primerjalnega betona brez vlaken. Medsebojna razlika med krčenji vlaknastih betonov je relativno majhna. Pri največji dolžini vlaken dobimo tudi največje avtogeno krčenje, ki je približno za 20 % večje kot krčenje primerjalnega betona. Domnevamo, da je vzrok za povečano krčenje kompozita glede na krčenje primerjalnega betona večja poroznost kompozita in posledično večja izguba vode. Domnevamo, da so se pri kompozitih na stiku med vlakni in cementno matrico pojavile povezane pore, ki povečujejo poroznost kompozita. Večjo vsebnost por pri daljših vlaknih smo zabeležili tudi pri merjenju vsebnosti zraka s porozimetrom. Večjo poroznost betona lahko povežemo s problemom gnezdenja vlaken, ki je veliko večje pri uporabi daljših vlaken. Domnevamo, da gnezdenje vlaken povzroča dodatne zračne prostore med vlakni v betonu, v katerih je shranjena voda. Veliko manjše avtogeno krčenje v primerjavi s krčenjem primerjalnega betona brez vlaken je imel beton, ki je vseboval dodatek Eclipse plus. Ta beton je imel za 85 % manjše avtogeno krčenje kot primerjalni beton brez vlaken.

Krčenje zaradi sušenja betona predstavlja razliko med njegovim celotnim in avtogenim krčenjem. Pri krčenju zaradi sušenja betona opazimo, da je najbolj intenzivno v prvih dveh tednih po zamešanju betona. V primerjavi s primerjalnim betonom brez vlaken je krčenje v prvih treh dneh za približno 3 do 8 % večje, kasneje, po štirih dneh po zamešanju betona, pa je krčenje zaradi sušenja manjše v primerjavi s krčenjem primerjalnega betona brez vlaken.

Celotno krčenje betona je sestavljeno iz avtogenega krčenja in krčenja betona zaradi sušenja. Meritve smo izvajali do osemindvajsetega dneva starosti betona. Najmanjše krčenje je pri betonski mešanici s polipropilenskimi vlakni dolžine 6 mm, nato pa se s povečevanjem dolžine vlaken povečuje tudi krčenje betona visoke trdnosti. Vpliv polipropilenskih vlaken na zmanjšanje krčenja betona visoke trdnosti je relativno majhen. Pri betonu z daljšimi vlakni je krčenje betona večje kot krčenje primerjalnega betona visoke trdnosti brez dodatka polipropilenskih vlaken.

Pri preizkusu tlačne trdnosti betona smo dobili večje vrednosti tlačnih trdnosti vlakastega betona kot v primeru primerjalnega betona brez vlaken. Tlačne trdnosti so večje za okoli 3.5 % in največje vrednosti zopet dobimo pri betonih z vsebnostjo krajših polipropilenskih vlaken.

Zaključimo lahko, da v splošnem polipropilenska vlakna relativno malo pripomorejo k zmanjšanju krčenja betonov visoke trdnosti. Najbolj učinkovita so kratka vlakna, ki se po betonski mešanici relativno lepo razporedijo, brez gnezdenja. Pri daljših vlaknih ni opaziti zmanjšanja krčenja, opazno je bilo rahlo povečanje. Predvidevamo, da pride do gnezdenja vlaken, kar poveča poroznost betonske mešanice.

Glede na rezultate meritev krčenja betonov predvidevamo, da bi bil dodatek Eclipse Plus, ki se trenutno uporablja za zmanjšanje krčenja betonov običajnih trdnosti, primeren tudi za betone visoke trdnosti, saj ne zmanjšuje tlačne trdnosti betona, močno pa zmanjšuje njegovo zgodnje avtogeno krčenje. Morali pa bi preveriti še njegov vpliv na ostale lastnosti, kot so trajnost betona, lezenje, dolgotrajno krčenje ... Za potrditev vesplošne ustreznosti dodatka betonu Eclipse plus, ki zmanjšuje zgodnje avtogeno krčenje betona visoke trdnosti, bi bile potrebne še nadaljnje raziskave.

VIRI

Aitcin, P. - C. 1998. High – performance concrete. London, E&FN Spon: 591 str.

Bandelj, B. 2010. Reološke lastnosti vlaknastih betonov. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 194 str.

Bandelj, B., Saje, D., Saje, F. 2010. Vpliv polipropilenskih vlaken na krčenje betona visoke trdnosti. V: 10. Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, Slovenija 20. – 22. oktober 2010: str. 1331-1339.

Jelušič, M. 2009. Tlačna trdnost vlaknastih betonov. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 77 str.

Le Roy, R., De Larrard, F. 1993. Creep and shrinkage of high-performance concrete. V: Bažant, Z.P. (ur.), Carol, I. (ur.). Proceedings of the 5th International Symposium on Creep and Shrinkage of Concrete, E & FN Spon, London, 1993: str. 499-504.

Muravljov, M. 2000. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, Građevinska knjiga, 451 str.

Muravljov, M., Jevtić, D. 2003. Građevinski materijali 2. Beograd, Akademska misao, 209 str.

Neville, A. M. 1995. Properties of concrete. Harlow, Pearson Education: 844 str.

Saje, D. 1997. Posebnosti betonov visoke trdnosti. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 90 str.

Saje, D. 2001. Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 157 str.

SIST EN 197–1: 2002 – Evrokod – Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.

SIST EN 12350: 2000 – Evrokod – Preskušanje betonov.

Zajc, A. 1994. Mikroarmirani betoni. V: Slovenski kolokvij o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, Slovenija, 26. maj 1994. Ljubljana: IRMA: str. 9–13.

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