

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Visokošolski strokovni študij
gradbeništva, Smer operativno
gradbeništvo

Kandidat:

Gašper Koželj

Odpornost proti prodoru vode za lahkogradljiv beton iz savskega proda iz Krške kotline

Diplomska naloga št.: 370

Mentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

Franci Čepon

Ljubljana, 2010

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **GAŠPER KOŽELJ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»ODPORNOST PROTI PRODORU VODE ZA LAHKOVGRADLJIV BETON IZ SAVSKEGA PRODA IZ KRŠKE KOTLINE«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Kamnik, 11.02.2010

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 961.32(043.2)

Avtor: Gašper Koželj

Mentor:izr. prof.dr. Violeta Bokan Bosiljkov

Naslov: Odpornost proti prodoru vode za lahko vgradljiv beton iz savskega proda iz Krške kotline

Obseg in oprema: 67 str., 25 pregl., 34 sl.

Ključne besede: struktura betona, odpornost betona, vodotesnost betona

Izvleček:

V diplomski nalogi smo ugotavljali odpornost betona izdelanega iz savskega proda iz krške kotline in cementa CEM I 42,5R (beton P1) ali cementa CEM II/B-M(W-L) 42,5N (beton P2) na njegovo odpornost proti prodoru vode pod pritiskom. Poleg tega smo preskušali tudi lastnosti betonov v svežem stanju ter njuno tlačno in cepilno natezno trdnost v strjenem stanju. Pri betonu P1 pa nas je zanimal tudi vpliv nizkih in povišanih temperatur v času vezanja in strjevanja betona na obravnavane lastnosti strjenega betona. Poleg tega pa smo za beton P1 študirali tudi vpliv razpok, ki so se oblikovale pri enaki obtežbi upogibnega elementa z izbranim deležem armature, armiranega z armaturnimi palicami različnih prerezov, ter vpliv gnezd, zračnih žepov, segregacije in hladnih stikov v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 961.32(043.2)

Author: Gašper Koželj

Supervisor: assoc. prof.dr. Violeta Bokan Bosiljkov

Title: Water penetration resistance of easily workable concrete made of gravel from the river Sava in the Krkška basin

Notes: 67 p., 25 tab., 34 fig.

Key words: concrete structure, concrete resistance, water penetration resistance of concrete

Abstract:

The diploma thesis deals with the resistance of concrete made by Sava river gravel from the Krško basin, tap water and cement CEM I 42,5R (concrete P1) or cement CEM II/B-M(W-L) 42,5N (concrete P2) against penetration of water under pressure. Beside this, fresh concrete properties were determined and compressive and splitting tensile tests were carried on hardened concretes. For the concrete P1 we studied influence of low and increased temperatures during setting and hardening of the concrete on the hardened concrete properties under consideration. Influence of reinforcing bars with larger and smaller diameter used for reinforcement of flexural element with selected reinforcement rate was also studied, through penetration of water under pressure into cracked concrete P1. At the end, study of influence of honeycombs, bug holes, segregation and cold joints on the resistance of the concrete P1 against penetration of water under pressure was carried out.

ZAHVALA

KAZALO:

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | UVOD | 1 |
| 2 | OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONOV | 2 |
| 2.1 | AGREGAT | 2 |
| 2.1.1 | TRDNOST AGREGATA | 3 |
| 2.1.2 | MAKSIMALNO ZRNO IN ZRNAVOSTNA SESTAVA | 3 |
| 2.1.3 | KAKOVOST IN VLAŽNOST AGREGATA | 5 |
| 2.2 | CEMENT | 7 |
| 2.2.1 | DODATKI CEMENTOM | 8 |
| 2.2.2 | VRSTE CEMENTOV GLEDE NA STANDARD SIST EN 197-1 | 9 |
| 2.2.3 | MEHANSKE ZAHTEVE | 10 |
| 2.2.4 | NADZOR NAD KAKOVOSTJO | 10 |
| 2.3 | VODA | 11 |
| 2.4 | KEMIJSKI DODATKI | 12 |
| 2.4.1 | KLASIFIKACIJA KEMIJSKIH DODATKOV | 13 |
| 3 | LASTNOSTI BETONOV | 16 |
| 3.1 | SVEŽA MEŠANICA | 16 |
| 3.1.1 | MEŠANJE BETONA | 16 |
| 3.1.2 | KONSISTENCA | 17 |
| 3.1.3 | VGRADLJIVOST | 17 |
| 3.1.4 | IZCEJANJE VODE | 17 |
| 3.1.5 | ZGOŠČEVANJE | 17 |
| 3.1.6 | PROCES HIDRATACIJE, VEZANJA IN STRJEVANJA BETONA | 18 |
| 3.2 | STRJEN BETON | 19 |
| 3.2.1 | TEHNOLOŠKE LASTNOSTI | 19 |
| 3.2.2 | MEHANSKE LASTNOSTI | 20 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4 | NEGA BETONA | 22 |
| 5 | METODE PREISKAV BETONOV | 24 |
| 5.1 | SPLOŠNO | 24 |
| 5.2 | LASTNOSTI SVEŽIH BETONSKIH MEŠANIC | 24 |
| 5.2.1 | PREISKAVE NA SVEŽI MEŠANICI | 24 |
| 5.2.1.1 | Odvzem vzorcev svežega betona za preiskave po standardu SIST EN 12350-1 | 24 |
| 5.2.1.2 | Postopek s posedom po standardu SIST EN 12350-2 z dodatnimi meritvami | 25 |
| 5.2.1.3 | Postopek razleza po standardu SIST EN 12350-5 | 27 |
| 5.2.1.4 | Postopek zgoščevanja z vibriranjem po standardu SIST EN 12350-4 | 28 |
| 5.2.1.5 | Postopek določanja zraka v svežem betonu po standardu SIST EN 12350-7 | 30 |
| 5.3 | STRJEN BETON | 31 |
| 5.3.1 | PREISKAVE STRJENEGA BETONA | 31 |
| 5.3.1.1 | Tlačna trdnost SIST EN 12390-3 | 31 |
| 5.3.1.2 | Cepilna natezna trdnost SIST EN 12390-6 | 33 |
| 5.3.1.3 | Odpornost proti prodoru vode SIST EN 12390-8 | 34 |
| 5.3.1.4 | Določanje dinamičnega modula elastičnosti z merjenjem hitrosti longitudinalnih ultrazvočnih valov | 37 |
| 5.3.1.5 | Modul elastičnosti JUS U.M1.025 | 38 |
| 6 | LASTNE PREISKAVE | 40 |
| 6.1 | UVOD | 40 |
| 6.2 | UPORABLJENI MATERIALI | 41 |
| 6.2.1 | AGREGAT | 41 |
| 6.2.2 | CEMENT | 41 |
| 6.2.3 | VODA | 43 |
| 6.2.4 | SUPERPLASTIFIKATOR NOVE GENERACIJE | 43 |
| 6.3 | OPIS PREISKOVANIH BETONSKIH MEŠANIC | 45 |
| 6.3.1 | MEŠANICA P1 | 45 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 6.3.2 | MEŠANICA P2 | 45 |
| 6.4 | PREISKAVE SVEŽIH MEŠANIC | 46 |
| 6.4.1 | PREIZKUS RAZLEZA | 46 |
| 6.4.2 | PREIZKUS RAZLEZA S POSEDOM | 47 |
| 6.4.3 | PREIZKUS ZGOŠČEVANJA PRI VIBRIRANJU | 48 |
| 6.4.4 | PREIZKUS VSEBNOSTI ZRAKA | 48 |
| 6.5 | PREISKAVE STRJENEGA BETONA | 50 |
| 6.5.1 | NEGA VZORCEV | 50 |
| 6.5.1.1 | Nega za preizkus tlačne trdnosti | 50 |
| 6.5.1.2 | Nega za preizkus cepilne trdnosti | 50 |
| 6.5.1.3 | Nega za preizkus vodotesnosti | 50 |
| 6.5.2 | TLAČNA TRDNOST | 51 |
| 6.5.3 | UGOTAVLJANJE DINAMIČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI S POMOČJO ULTRAZVOČNIH VALOV | 52 |
| 6.5.4 | CEPILNA NATEZNA TRDNOST | 52 |
| 6.5.4.1 | Cepilna natezna trdnost kock | 53 |
| 6.5.4.2 | Cepilna natezna trdnost valjev | 54 |
| 6.5.5 | GLOBINA PRODORA VODE | 54 |
| 6.5.5.1 | Primerjava vodotesnosti preizkušancev iz mešanic P1 in P2 | 55 |
| 6.5.5.2 | Vpliv napak na vodotesnost betona | 57 |
| 7 | SKLEP | 65 |
| 8 | VIRI | 67 |

KAZALO PREGLEDNIC:

| | |
|---|----|
| Preglednica 1: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1 | 9 |
| Preglednica 2: Trdnostni razredi cementov po standardu SIST EN 197-1 | 10 |
| Preglednica 3: Razredi konsistence v odvisnosti od razleza po standardu SIST EN 206-1 ... | 27 |
| Preglednica 4: Razredi konsistence v odvisnosti od zgostitve po standardu SIST EN 206-1 | 29 |
| Preglednica 5: Razredi tlačne trdnosti za normalno težek in težak beton po standardu SIST EN 206-1 | 32 |
| Preglednica 6: Dovoljene vrednosti prodora vode po standardu SIST EN 206-1 pri starosti betona najmanj 28 dni | 35 |
| Preglednica 7: Ocena kvalitete betona glede na hitrost potovanja ultrazvoka..... | 37 |
| Preglednica 8: Izbrana zrnastostna sestava..... | 41 |
| Preglednica 9: Lastnosti uporabljenega mineralnega agregata | 41 |
| Preglednica 10: Kemijska sestava in fizikalne zahteve cementa CEM I 42,5R | 42 |
| Preglednica 11: Kemijska sestava in fizikalne zahteve cementa CEM II/B-M (V-L) 42,5 N | 43 |
| Preglednica 12: <i>Receptura mešanice P1</i> | 45 |
| Preglednica 13: <i>Receptura mešanice P2</i> | 46 |
| Preglednica 14: <i>Prikaz povprečnega razleza betonskih mešanic</i> | 46 |
| Preglednica 15: <i>Čas potreben za končen razlez betonskih mešanic</i> | 47 |
| Preglednica 16: <i>Prikaz rezultatov poseda betonskih mešanic</i> | 47 |
| Preglednica 17: <i>Prikaz rezultatov poseda betonskih mešanic</i> | 48 |
| Preglednica 18: <i>Prikaz povprečne stopnje zgoščenosti betonskih mešanic</i> | 48 |
| Preglednica 19: <i>Prikaz poroznosti svežih betonskih mešanic</i> | 49 |
| Preglednica 20: <i>Prikaz povprečnih tlačnih trdnosti v odvisnosti od nege</i> | 51 |
| Preglednica 21: <i>Dosežene hitrosti ultrazvočnih valov</i> | 52 |
| Preglednica 22: <i>cepilne trdnosti kock v odvisnosti od nege</i> | 53 |
| Preglednica 23: <i>cepilne trdnosti kock v odvisnosti od napak v betonu</i> | 53 |
| Preglednica 24: <i>cepilne trdnosti valjev</i> | 54 |
| Preglednica 25: <i>Povprečna količina absorbirane vode preizkušancev iz mešanic P1 in P2</i> .. | 56 |

KAZALO SLIK:

| | |
|--|----|
| Slika 1: Mejne krivulje območji primernosti agregata pa JUS U.M1.057 _____ | 4 |
| Slika 2: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov _____ | 5 |
| Slika 3: Stopnje količine vlage v agregatu: a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago, (d) moker _____ | 6 |
| Slika 4: Shema proizvodnje cementa _____ | 7 |
| Slika 5: Vibrator za beton Slika 6: Vibriranje betona _____ | 16 |
| Slika 7: Odvisnost trdnosti betona od vodocementnega faktorja _____ | 20 |
| Slika 8: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona _____ | 22 |
| Slika 9: Kovinski konus _____ | 26 |
| Slika 10: Razlezna miza _____ | 26 |
| Slika 11: Pravilen posed stožca _____ | 26 |
| Slika 12: Postopek metode z razlezom _____ | 28 |
| Slika 13: Kalup za zgoščevanje _____ | 29 |
| Slika 14: Shema Porozimetra Slika 15: Porozimeter _____ | 30 |
| Slika 16: Primer tlačnega preizkusa kocke _____ | 31 |
| Slika 17: Shema kocke in valja za preskus tlačne trdnosti _____ | 33 |
| Slika 18: Shematski prikaz cepljena valja in kocke _____ | 34 |
| Slika 19: Shema naprave za preskus vodotesnosti _____ | 36 |
| Slika 20: Naprava za preizkus vodotesnosti _____ | 36 |
| Slika 21: Določevanje statičnega modula elastičnosti _____ | 38 |
| Slika 22: Grafični prikaz cikličnega obremenjevanja in razbremenjevanja _____ | 39 |
| Slika 23: Primer poseda z razlezom _____ | 47 |
| Slika 24: Primer prodora vode v kocko _____ | 55 |
| Slika 25: Primerjava globine prodora vode med mešanicama P1 in P2 _____ | 56 |
| Slika 26: Primer razklanega valja po površini hladnega stika _____ | 58 |
| Slika 27: Globina prodora vode zaradi gnezd _____ | 59 |
| Slika 28: Vpihovanje zraka za nastanek zračnih žepov _____ | 60 |
| Slika 29: Globina prodora vode zaradi zračnih žepov _____ | 60 |
| Slika 30: Globina prodora vode zaradi segregacije _____ | 62 |
| Slika 31: Vpliv razpok na vodotesnost valjev v primerjavi z mešanico P1, ki je bila brez napak _____ | 63 |

| | |
|--|----|
| Slika 32: Upogibna obremenitev plošče iz katere smo izvrtali valje _____ | 63 |
| Slika 33: Primerjava globine prodora vode v odvisnosti od nege _____ | 64 |
| Slika 34: Primerjava vodotesnosti vseh vzorcev _____ | 66 |

1 UVOD

Beton je keramični kompozitni material, ki je sestavljen iz mineralnega agregata, cementa, vode in kemijskih ter mineralnih dodatkov. Mineralni agregat predstavlja polnilo v matrici iz cementnega kamna. Cement predstavlja vezivo, ki v kombinaciji z vodo tvori cementno pasto, le ta pa se v procesu hidratacije spremeni v cementni kamen.

Zaradi svoje nizke cene in enostavnosti priprave je beton, kljub velikemu številu novih materialov, še vedno najpomembnejši material za gradnjo. Beton kot ga poznamo danes se uporablja že okrog 170 let. Njegov predhodnik z vezivom iz hidravličnega apna pa sega v čase starega Egipta.

V tej diplomski nalogi se bomo podrobneje posvetili predvsem eni bistveni lastnosti betona – vodoneprepustnosti. Odpornost betona proti prodoru vode je bistvena lastnost pri tistih vrstah betonov, ki se uporabljajo za gradnjo zelo zahtevnih objektov. Pri objektih kot so odlagališča jedrskih odpadkov, bazeni, skladišča nevarnih snovi, jezovi, pregrade, ipd. je potrebno zagotoviti vodotesnost zaradi zagotavljanja varnosti okolice in objekta samega.

Na odpornost betona proti prodoru vode vpliva veliko različnih parametrov, najpomembnejši pa so: pravilna izbira vrste in deležev osnovnih materialov, pravilna izbira dodatkov, ki se jih dodaja betonu, pravilna priprava in vgrajevanje ter pravilna nega. V okviru našega eksperimentalnega dela smo zato opravili študijo vpliva različnih parametrov na odpornost betonskega elementa proti prodoru vode. Zanimalo nas je kako vplivajo na prodor vode v beton dejavniki kot so:

- pojav zračnih žepov,
- gnezda,
- nizke in visoke temperature v času ko nege betona,
- hladni stiki,
- segregacija in
- razpokanost.

Poleg tega pa smo preskušali tudi betonske mešanice v svežem stanju, saj je pri lahkogradljivem betonu potrebno doseči lastnosti, ki izpolnjujejo kriterije za lahkogradljive betone.

2 OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONOV

2.1 AGREGAT

Agregat predstavlja največji delež materiala v eni prostorninski enoti betona, ki se giblje okrog 75 %. Prav zaradi tega so od agregata zelo odvisne tehnološke in tehnične lastnosti betona ter njegova cena. Mineralni agregat kot osnovna surovina za betone se razlikuje glede na to kako ga pridobivajo. Lomljen agregat pridobivajo v kamnolomih iz večjih kamnitih blokov z drobljenjem le teh, njegova značilnost pa je, da ima ostre robove in bolj homogeno mineralno sestavo. Prod se pridobiva iz rečnih nanosov, ima zaobljena zrna in je raznolike mineralne sestave. Prednost proda je prav v njegovi zaobljeni obliki, kar zelo pripomore k lažjemu vgrajevanju, po drugi strani pa se lomljen agregat zaradi svoje nepravilne olike in grobe površinske teksture boljše sprijema s cementnim kamnom. Z njim se lahko dosežajo višje trdnosti betona pri enakem vodocementnem razmerju, če so sama zrna dovolj trdna.

Agregat lahko definiramo kot čist, trd in inerten material, ki ga vgrajujemo v betonsko mešanico. Vloga agregatov v betonu je sledeča (Žarnić R. 2005):

- znižujejo ceno betona; so relativno poceni, ker postopek pridobivanja ni drag,
- ustrezno sestavljeni po frakcijah ustvarjajo koheziven beton, ki ga je lahko obdelovati v svežem stanju,
- znižujejo hidratacijsko temperaturo betona, ker so običajno kemično inertni in delujejo kot odvjalci toplote nastale s hidratacijo cementa,
- zmanjšujejo krčenje betona, ker na večino agregatov voda ne deluje in zato lahko ovirajo krčenje cementne paste med hidratacijo.

Poleg navedenega, agregati lahko služijo tudi za:

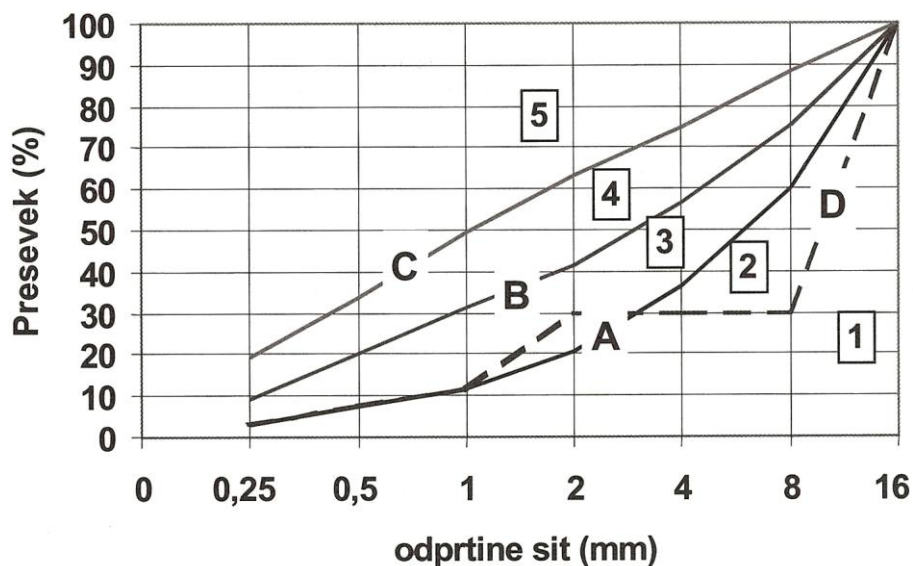
- uravnavanje površinske trdote betona, ker so večinoma bolj odporni na obruš kot cementni kamen, ki povezuje agregat,
- ustvarjanje betonske površine ali njene sposobnosti, da odbija svetlobo,
- kontrolo gostote,
- zvišanje požarne odpornosti betona.

2.1.1 TRDNOST AGREGATA

Trdnost agregata je zelo pomembna lastnost, saj z uporabo agregata nizke trdnosti ne moremo doseči betonov visokih trdnosti ne glede na kakovost ali količino ostalih komponent. Pri betonih visoke trdnosti zato uporabljamo agregate visokih trdnosti (na primer granit). Primernost agregata se da oceniti z analizo porušitve betonskih kock, pri tem pa gledamo koliko zrn agregata se je porušilo. V praksi se izkaže za pomembno dejstvo, da je včasih treba narediti kakšen drug ukrep za povečanje trdnosti, saj zaradi ekonomske upravičenosti ni vedno najboljša rešitev nabava trdnejšega agregata.

2.1.2 MAKSIMALNO ZRNO IN ZRNAVOSTNA SESTAVA

V splošnem velja, da maksimalno zrno agregata ne sme presežati 25% minimalne dimenzije betonskega konstrukcijskega elementa in mora biti manjše od najmanjše svetle razdalje med vzporednimi armaturnimi palicami. V večini primerov je maksimalno zrno velikost od 16mm do 32mm, pri nekaterih gradbenih objektih kot so npr. ločne pregrade, pa lahko dosega velikosti 64mm. V praksi stremimo k največjemu možnemu deležu najbolj grobe frakcije glede na to kakšne karakteristike se zahtevajo za svež in strjen beton. Povečanje deleža velikih frakcij v betonu pomeni manjšo potrebo po vodi in cementu, hkrati pa znižuje hidratacijsko temperaturo betona, s čimer se zmanjša možnost poškodb, ki nastajajo prav zaradi tega. Z izrazom zrnovostna sestava opišemo razmerje velikosti zrn med maksimalnim zrnem in najmanjšim prisotnim delcem, ki gre skozi sito odprtine 0,25mm. Delci velikosti okrog 0,25mm zadržujejo vodo in s tem preprečujejo njeno izcejanje, kar je posebej pomembno pri betonih, kjer se uporablja manjša količina cementa. Standardi priporočajo zrnovostno sestavo agregata v obliki mejnih krivulj, med katerimi naj poteka krivulja obravnavanega agregata. Če krivulja obravnavanega agregata poteka nad mejno krivuljo C in pod mejno krivuljo A pomeni, da izbran agregat ni primeren za izdelavo betonov in ga je potrebno popraviti z dodajanjem določenih frakcij. Če zrnovostna krivulja poteka med mejnima krivuljama C in A, so potrebne preiskave, s katerimi se dokaže ustrezna kakovost betona. Za optimalno zrnovostno sestavo velja območje med mejnima krivuljama A in B.



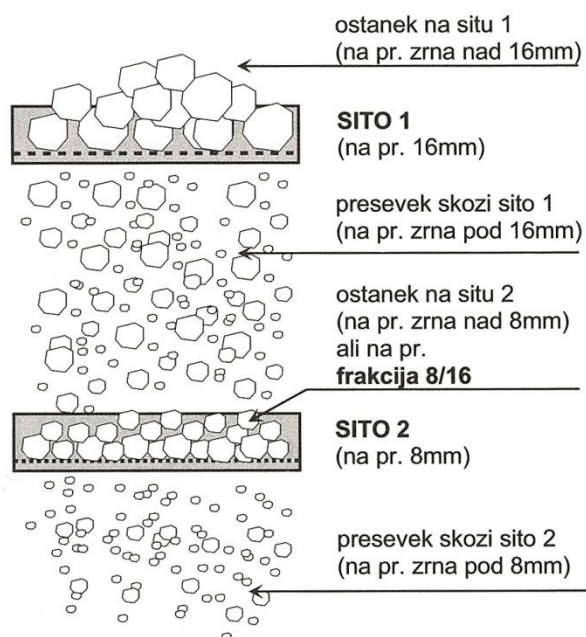
Slika 1: Priporočene mejne krivulje po SIST 1026:2008

Zrnavostno sestavo mineralnega agregata se določa s pomočjo sejalne analize po standardu SIST EN 933-1, pri kateri skozi standardna sita različnih velikosti odprtin presejemo agregat, ki je običajno razdeljen na frakcije. Pri tem postopku mora biti agregat suh, da se izognemo kepiciam v katere so sprijeta drobna zrna in bi se lahko tretirala kor velika zrna.

Pri sejalni analizi tako dobimo:

- ostanek na situ, t.j. količina agregata, ki ostane na situ z določenim premerom odprtin,
- presevek, t.j. količina agregata, ki pade skozi sito z določenim premerom odprtin in
- frakcijo, ki je količina agregata, ki pade skozi določeno sito in ostane na situ z manjšim premerom odprtin.

Tako je frakcija 8/16 količina agregata ki je padla skozi sito s premerom odprtin 16mm in ostala na situ s premerom odprtin 8mm.



Slika 2: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov. (Žarnić R. 2005)

2.1.3 KAKOVOST IN VLAŽNOST AGREGATA

Kakovost agregata je zelo pomembna lastnost, saj bistveno vpliva na kakovost samega betona, zato je pomembno kakšne primesi vsebuje agregat. V praksi se ne moremo izogniti praškastim delcem, ki so manjši od 0,075mm in zaradi katerih se poveča potreba po vodi, ker imajo veliko specifično površino in s tem nekoliko otežujejo vgradljivost.

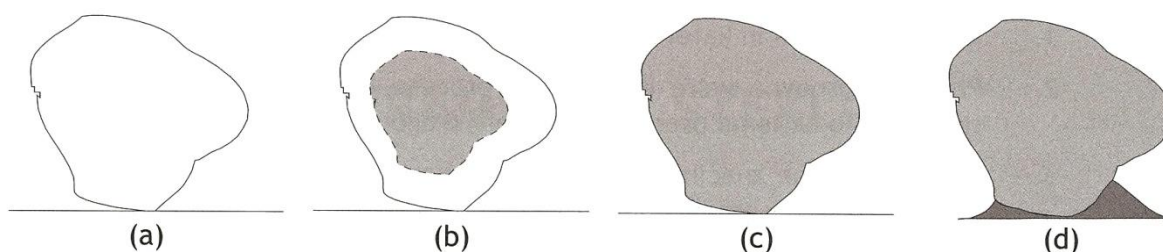
Problem predstavljajo tudi organske primesi, ker vplivajo na vezenje cementne paste in na njeno končno trdnost. Organske primesi so posledica odpadlega in odmrlega rastlinja ter živalskih izločkov, ki se pomešajo predvsem med prod v samem nahajališču.

Soli, ki se nahajajo v morski vodi predstavljajo zelo velik problem pri armiranih betonih, saj le te povzročajo korozijo armature. Pomembno pa je, da se lahko soli odstrani z agregata na dokaj preprost način in sicer z spiranjem s sladko vodo.

Probleme delajo še razne snovi v agregatu ki reagirajo z vodo. Primer je alkalno silikatna reakcija pri kateri nastane alkalno silikatni gel. Ta ob prisotnosti vode močno nabrekne in ustvari hidravlični pritisk, ki povzroči poškodbe v betonu.

Vlažnost agregata je faktor, ki vpliva na količino zamesne vode, zato je potrebno ugotoviti v kolikšni meri bo vlažnost vplivala na vgradljivost betona in v kolikšni meri na spremembo vodocementnega razmerja.

Agregat pred pripravo betonske mešanice v laboratoriju lahko osušimo v peči, največkrat pa za pripravo betona uporabimo zračno suh agregat ali pa agregat zasičen z vlago. V prvih dveh primerih je potrebno upoštevati dodatno količino vode, ki jo je potrebno dodati zaradi vpijanja vode v agregat, v primeru, da je agregat moker, pa je potrebno ugotoviti kolikšen je delež vode na površini agregatnih zrn.



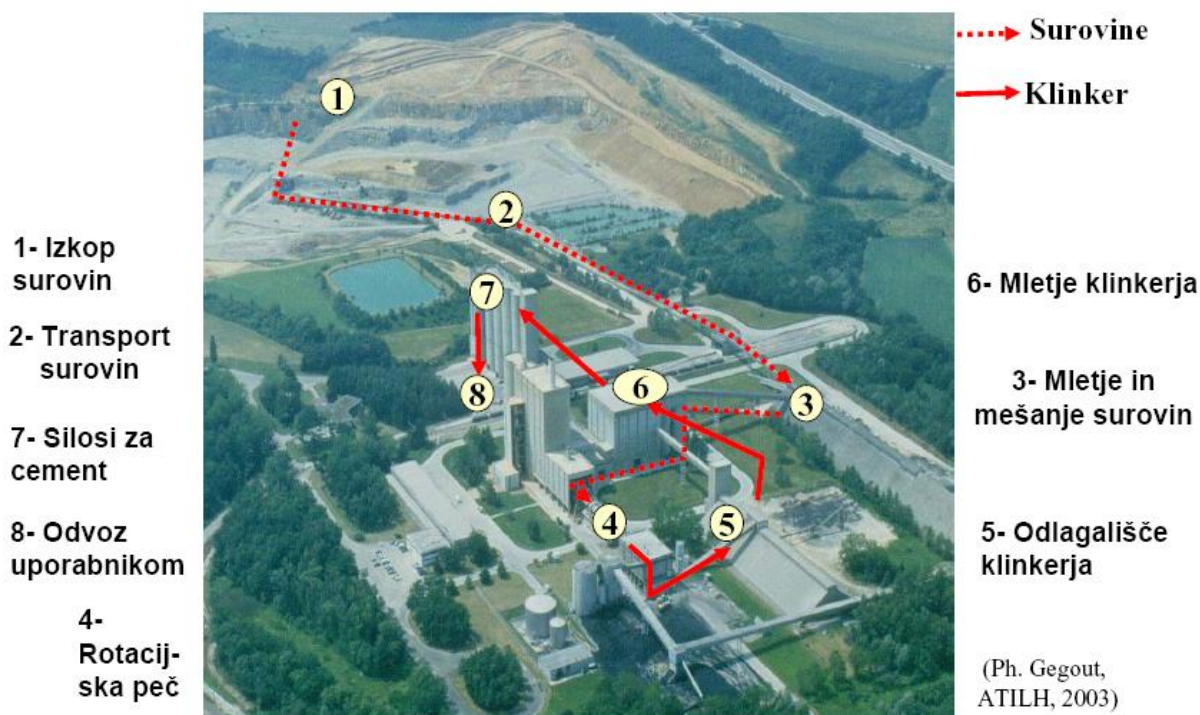
Slika 3: Stopnje količine vlage v agregatu: a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago, (d) moker. (Žarnić R. 2005)

2.2 CEMENT

Cement je hidravlično vezivo, ki je kljub številnim novim gradbenim materialom še vedno najpogosteje uporabljeno vezivo v gradbeništvu. Lastnost cementa je, da se zaradi hidratacije (reakcija z vodo) veže in strjuje na zraku ali v vodi. Ob tem iz cementne paste nastane trd in trden cementni kamen, ki prenaša visoke tlačne obremenitve. in ohrani svoje lastnosti, kot sta stabilnost in trdnost, tudi v vodi.

Hidravlično vezivo, so prvi začeli uporabljati Egipčani, kasneje pa ga ponovno odkrili Grki in Babilonci. Uporabljali so ga tudi Rimljani. Vendar pa v teh primerih ni šlo za uporabo cementa, kot ga poznamo danes, ampak za uporabo hidravličnega apna in hidratiziranega apna z dodatki različnih pucolanskih materialov, kot je na primer vulkanski pepel. Za novodobnega cementa pa velja Josef Aspdin iz Anglije, ki ga je patentiral leta 1824. Pozneje je Charels Johnson ugotovil pravo mešalno razmerje osnovnih surovin, apnenca in gline, ter optimiral njihovo žganje (sintranje) ob primerni temperaturi. Tak cement se uporablja še danes.

Proizvodnja cementa



Slika 4: Shema proizvodnje cementa

2.2.1 DODATKI CEMENTOM

Dodatki cementom so fino zmleti materiali, ki se dodajajo cementu za doseganje ali ohranjanje določenih lastnosti kot so: nižja temperatura hidratizacije, manjša možnost segregacije agregata, manjša potreba po vodi za doseganje določene konsistence, zmanjšanje izcejanja vode, boljša odpornost strjenega betona na agresivne vplive iz okolja, podaljšanje časa potrebnega za vezanje in obarvanost betona.

Žindra oziroma granulirana plavžna žindra je možni dodatek cementu. Dobi se s hitrim hlajenjem žlindrine taline, ki nastaja ob taljenju železove rude v plavžu.

Pucolani so prav tako možni dodatki cementu. So naravne snovi, silikatne ali silikatno-aluminatne sestave. Naravni pucolani so ponavadi snovi vulkanskega izvora ali sedimentne kamnine s primerno kemično in mineraloško sestavo. Pucolanski materiali so tudi elektrofilterski prahovi in mikrosilika. Cementi z dodatkom žindre ali pucolanov so bolj odporni na delovanje sulfatnih soli, ki se nahajajo v tleh ali vodi, dosegajo pa manjšo začetno trdnost.

Elektrofilterski pepel je fin prah iz termoelektrarn, ki se dobi z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči, ki so kurjene z uprašenim premogom.

Mikrosilika nastaja v proizvodnji silicijevih in ferosilicijevih zlitin v elektro pečeh pri redukciji zelo čistega kremenca s premogom. Sestoji iz zelo drobnih kroglastih delcev, ki vsebujejo najmanj 85% mase amorfnega silicijevega dioksida.

Žgani skrilavci so možna sestavina cementa. Proizvajajo se v posebnih pečeh pri temperaturah okrog 800°C. Zaradi sestave naravnega materiala in proizvodnega procesa vsebuje faze klinkerja. Fino zmlet žgani skrilavec ima hidravlične in pucolanske lastnosti.

Aditivi in pigmenti so dodatki, ki se dodajajo cementu v manjših količinah (maksimalno 1,0%, če pa gre za organske dodatke maksimalno 0,5% mase cementa). Po navadi so to pigmenti, ki se dodajajo za obarvanje betona. Morajo biti barvno obstojni in stabilni v alkalnem okolju. Pri uporabi nekaterih se nam poveča potreba po vodi.

2.2.2 VRSTE CEMENTOV GLEDE NA STANDARD SIST EN 197-1

Standard SIST EN 197-1 razvršča običajne cemente glede na sestavine v pet vrst. Običajni cementi so označeni z oznako CEM in rimsko številko, ki pove vrsto cementa, sestavljeni pa iz glavnih sestavin, dodatnih sestavin in kalcijevega sulfata. Glavne sestavine so tiste, katerih masni delež v cementu je večji od 5%, masni delež vseh dodatnih sestavin (polnil) skupaj pa ne sme presegati 5% mase glavnih komponent. Masni delež kalcijevega sulfata mora biti prav tako nižji od 5%. Oznake A, B in C označujejo delež mineralnega dodatka, črke v oklepaju pa vrsto mineralnega dodatka.

Preglednica 1: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1

| Vrsta cementa | Opis | Glavne sestavine in njihove oznake | Delež mineralnih dodatkov |
|----------------|--|---|-------------------------------|
| CEM I | čisti portlandski cement | klinker | 100% klinker |
| CEM II | portlandski cement z mineralnimi dodatki | klinker, granulirana plavžna žindra (S), mikrosilika (D)*, pucolan (P, Q), elektrofiltrski pepel (V, W), žgani skrilavec (T), apnenec (L), mešani mineralni dodatek (M) | II/A (S,D,P,Q,V,W,T,L) 6-20% |
| | | | II/B (S,D,P,Q,V,W,T,L) 21-35% |
| CEM III | žlindrin cement | klinker, granulirana plavžna žindra (S) | III/A (S) 36-65% |
| | | | III/B (S) 66-80% |
| | | | III/B (S) 66-80% |
| | | | III/C (S) 81-95% |
| CEM IV | pucolanski cement | klinker, mikrosilika (D)*, pucolan (P, Q) elektrofiltrski pepel (V) | IV/A (D,P,Q,V) 11-35% |
| | | | IV/B (D,P,Q,V) 36-55% |
| CEM V | mešani cement | klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P, Q), elektrofiltrski pepel (V) | V/A (S, P,Q,V) 36-60% |
| | | | V/B (S, P,Q,V) 61-80% |

* Delež mikrosilike je omejen na 10%.

2.2.3 MEHANSKE ZAHTEVE

Poleg razmerja različnih sestavin v cementu postavlja standard SIST EN 197-1 tudi določene zahteve glede kemijske sestave cementa ter fizikalno-mehanskih lastnosti. Cement mora biti označen tudi z oznako trdnostnega razreda (marka cementa). Standard določa glede na tlačno trdnost po 28 dneh tri trdnostne razrede in sicer: 32,5, 42,5 in 52,5. Poleg tega so cementi z visokimi začetnimi trdnostmi označeni z veliko črko R (rapid), cementi z normalno začetno trdnostjo pa s črko N (normal).

Preglednica 2: Trdnostni razredi cementov po standardu SIST EN 197-1

| Tlačna trdnost (MPa) | | | | |
|----------------------|-----------------|-----------|--------------------|-------------|
| Oznaka trdnosti | Zgodnja trdnost | | Standardna trdnost | |
| | 2 dni | 7 dni | 28 dni</ | |
| 32,5 N | - | ≥ 16 | $\geq 32,5$ | $\leq 52,5$ |
| 32,5 R | ≥ 10 | | | |
| 42,5 N | ≥ 10 | | $\geq 42,5$ | $\leq 62,5$ |
| 42,5 R | ≥ 20 | | | |
| 52,5 N | ≥ 20 | | $\geq 52,5$ | - |
| 52,5 R | ≥ 30 | | | |

2.2.4 NADZOR NAD KAKOVOSTJO

Cement spada v regulirano področje in najstrožji sistem certificiranja, kar pomeni, da morata biti tako proizvod kot tudi proizvajalec nadzorovana s strani neodvisne pooblašene institucije. V skladu z evropsko direktivo CPD 89/106/E48 se za cement zahteva sistem certificiranja 1+, ki obsega notranjo kontrolo s strani proizvajalca, s strani zunanje institucije pa nadzor nad proizvodnjo, kontrolo in rezultati kontrole pri proizvajalcu ter v zadnji fazi tudi zunanji nadzor nad odvzetimi vzorci cementa. V bistvu so zahteve standarda SIST EN 197-2, katerega uporabo predvideva standard SIST EN 197-1, v celoti zahteve standarda ISO 9001 za sistem kakovosti. V Sloveniji je s strani CEN-a pooblaščen certifikacijski organ za cementarne Zavod za gradbeništvo Slovenije. CE znak omogoča proizvajalcu neomejen pretok blaga preko meja držav članic EU.

2.3 VODA

Voda povzroči, da se cement spremeni v obdelovalno cementno pasto in povzroči proces hidratizacije. V splošnem velja, da je pitna voda primerna za pripravo veziv, morska voda pa le pogojno uporabna in sicer za pripravo nearmiranih betonov. Razne organske in anorganske primesi raztopljene v vodi ustvarijo prevleke na agregatu in prekinitve med zrnici cementa ter s tem bistveno zmanjšajo sprijemanje cementne paste z agregatom, vplivajo pa tudi na proces hidratizacije.

Količina vode, ki je potrebna za proces hidratizacije je približno 40 % mase cementa. Vsakršno povečanje količine nad to vrednostjo pomeni povečanje deleža kapilarnih por v strjenem cementnem kamnu, kar pa škodljivo vpliva na trdnost in obstojnost strjenega betona. Pomembno pa je tudi, da se s povečanjem količine vode izboljšajo tudi nekatere lastnosti svežega betona kot je na primer vgradljivost zaradi bolj tekoče konsistence.

Primernost vode za pripravo betonov:

- **čista pitna voda** je primerna za pripravo betona brez predhodnih analiz,
- **morska voda** je lahko primerna za pripravo betonov brez armature,
- **naravna površinska in podtalna voda** je lahko primerna za proizvodnjo betona vendar mora biti analizirana,
- **prečiščene odpadne vode** je potrebno predhodno analizirati in izvesti primerjalne teste za trdnost cementnega kamna.

Analize, ki se delajo na vzorcih vode pokažejo ali so v vodi prisotne sledi soli, olj, maščob, kislin, penil in organskih ter anorganskih delcev v takšnih količinah, da bi lahko škodile cementnemu kamnu ali agregatu.

2.4 KEMIJSKI DODATKI

Če beton ni izpostavljen delovanju agresivnih snovi in velikim mehanskim obremenitvam, ga lahko pripravimo samo s kvalitetnimi osnovnimi komponentami betona – cementom, agregatom in vodo. V določenih primerih agresivnosti okolja lahko pripravimo kvaliteten trajen beton z uporabo specialnih veziv (npr. sulfatno odpornim cementom) ali z dodajanjem mineralnih dodatkov ustrezne kvalitete (npr. žindre, elektrofiltrskega pepela ali mikrosilike). Za izvajanje gradbenih del preko celega leta in za izdelavo trajnih betonov najrazličnejših kvalitet in lastnosti v svežem in strjenem stanju, so nujno potrebni kemijski dodatki za beton, saj ti omogočajo modificiranje oziroma izboljšanje lastnosti svežega betona in strjenega betona. Kemijske dodatke za beton v praksi uporabljamo kadar želimo:

- pripraviti beton, ki ustreza specifičnim zahtevam, npr. ima predpisano vodo-cementno razmerje (V/C), minimalno začetno ali končno trdnost, določen čas obdelavnosti itd,
- obdelavnost ob manjši količini vode, manjše izločanje vode na površini betona, manjšo segregacijo, lažjo in lepšo zaključno obdelavo površin, zmanjšati stroške betonarskih del z lažjim in hitrejšim vgrajevanjem, krajše cikle pri izdelavi prefabriciranih betonskih izdelkov ob manjši porabi energije,
- betonirati v neugodnih vremenskih razmerah (pozimi pri nizkih in poleti pri visokih temperaturah),
- izboljšati kvaliteto strjenega betona, npr. povečati zgodnje in končne trdnosti, povečati vodoneprepustnosti, zmanjšati kapilarno vodovpojnost, povečati odpornost na fizikalno in kemijsko agresijo in abrazijo.

Poznamo celo vrsto materialov, ki vplivajo na lastnosti svežega in/ali strjenega betona. Za uporabnost kemijskega dodatka v praksi so, poleg učinkovitosti, potrebni še čim manjša škodljivost (vpliv na korozijo armature, zdravje in okolje), cenovna sprejemljivost in skladnost z zahtevami veljavnih standardov.

Različne države imajo v nacionalne standarde vključene različne tipe dodatkov, nobeden od poznanih pa ne vključuje vseh možnih navedenih v literaturi in uporabljanih v praksi. Tako v praksi uporabljamo tudi dodatke, ki niso zajeti v standardih, na primer: nekatere večnamenske dodatke, dodatke za zemeljsko vlažne betone, polimerne dodatke – disperzije, mešanice

kemijskih in mineralnih dodatkov, dodatke za samozgoščevalne betone, itd.. Pri teh dodatkih niti ni standardiziranih postopkov preskušanja niti ni kriterijev za kvaliteto, zato mora njihovo ustreznost proizvajalec dokazati s preskusi, ki potrjujejo njihovo ustreznost za namen uporabe.

2.4.1 KLASIFIKACIJA KEMIJSKIH DODATKOV

Plastifikator

Plastifikator omogoča znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco ali zveča posed/razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkuje na oba načina. Plastifikator izboljša porazdelitev cementa v betonski mešanici, zato je beton bolj homogen.

Opazne so tudi naslednje prednosti:

- lažja obdelava svežega betona,
- občutno zvišanje trdnosti betona,
- omogočen daljši čas transporta,
- znižanje v/c razmerja,
- izboljšana vodotesnost in zmrzljinska odpornost betona.

Plastifikatorji so prijazni do okolja, ker ne vsebujejo formaldehida.

Superplastifikator

Ta omogoča visoko znižanje količine vode v mešanici betona brez vpliva na konsistenco ali znatno zveča posed/razlez brez vpliva na delež vode ali istočasno učinkuje na oba načina. Zmanjšanje količine zamesne vode je v glavnem odvisno od uporabljenega superplastifikatorja, začetne konsistence betona in lastnosti cementa. Superplastifikatorje delimo glede na kemijsko sestavo v štiri skupine:

1. sulfonirani melamin-formaldehidni kondenzati,
2. sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzati,
3. modificirani lignin-sulfonati in
4. modificirani polikarboksilati, t.i. hiperplastifikatorji.

Kemijski dodatek za zadrževanje vode

Kemijski dodatek z zmanjšanjem izločanja vode zmanjša izgubo vode, kar pripomore k manjšemu krčenju betona.

Aerant

Aeranti so proizvodi, ki med mešanjem betona vnesejo kontrolirano količino majhnih, enakomerno porazdeljenih zračnih mehurčkov, ki po strditvi ostanejo v betonu. Aeranti služijo izdelavi betonov odpornih na talilne soli in na zamrzovanje. V kombinaciji s plastifikatorji lahko izdelamo visokokakovostne betone za najrazličnejše inženirske objekte kot so mostovi, galerije, podporni zidovi in za katere so pomembne naslednje lastnosti:

- povečana vodotesnost,
- obstojnost na zamrzovanje
- manjša možnost nastajanja razpok,
- lažja obdelovalnost svežega betona in
- nadomestitev manjkajočih frakcij finih delcev mineralnega agregata.

Pospešilo vezanja

Ta sredstva se uporabljajo za tesnjenje vdorov vode in za skrajševanje časa do začetka prehoda mešanice iz plastičnega v trdno agregatno stanje. Uporabljajo se pri nizkih in visokih gradnjah za:

- površinsko tesnjenje vlažnih površin,
- tesnjenje vdorov vode na razpokah, stikih ali segregiranih mestih,
- zapiranje vdorov vode v podzemnih gradnjah in
- izdelavo hitrovezočih malt.

Pospešilo strjevanja

Povečuje hitrost razvoja začetnih trdnosti brez ali z vplivom na čas vezanja. Ta dodatek se uporablja pri zimskem betoniranju, omogoča pa izdelavo kvalitetnega betona pri srednje nizkih temperaturah (če poteka betoniranje pri manjši dnevni ali nočni zmrzali).

Zavlačilo vezanja

Podaljšuje čas do začetka prehoda mešanice iz plastičnega v trdno agregatno stanje.

Gostilo

Gostilci zmanjšujejo kapilarno vpijanje strjenega betona ali malte, ker vsebujejo sredstva, ki hidrofobirajo in zapirajo pore.

Zavlačilo vezanja/plastifikator

Učinkuje kot plastifikator (osnovni učinek) in zavlačilo vezanja (dodaten učinek).

Zavlačilo vezanja /superplastifikator

Učinkuje kot superplastifikator (osnovni učinek) in zavlačilo vezanja (dodaten učinek).

Pospešilo vezanja/plastifikator

Učinkuje kot plastifikator (osnovni učinek) in pospešilo vezanja (dodaten učinek).

3 LASTNOSTI BETONOV

3.1 SVEŽA MEŠANICA

Betonska mešanica je večkomponentna struktura, ki vsebuje cement, vodo, agregat in v manjši meri zračne pore. Lahko rečemo, da je beton v ožjem pomenu besede keramični kompozitni material, sestavljen iz mineralnega agregata in cementnega kamna, ki predstavlja matrico. Glavni dejavnik, ki najbolj vpliva na lastnosti betona, je masno razmerje med količino vode in cementa oziroma tako imenovan vodocementno razmerje (v/c). Na splošno velja, da je velikost vodocementnega razmerja obratno sorazmerna s kvaliteto betona ob pogoju enake vgradljivosti. Prav zaradi tega se pri betonih, ki zahtevajo nižji v/c poslužujemo nekaterih kemijskih dodatkov za boljšo vgradljivost ali pa jih vgrajujemo s pomočjo vibriranja.



Slika 5: Vibrator za beton



Slika 6: Vibriranje betona

3.1.1 MEŠANJE BETONA

Sestavine betona se morajo dobro premešati v homogen celoto, pri tem pa je pomembno v kakšnem zaporedju jih dodajamo v mešalec. Najbolje je, da naprej premešamo cement in agregat, nato pa dodamo vodo z ali brez dodatkov, odvisno od potrebe. Pri mešalcih je pomembna hitrost obračanja bobna, velikost in oblika lopatic in pa polnjenje glede na kapaciteto bobna mešalca.

3.1.2 KONSISTENCA

Konsistenca je parameter, ki določa plastičnost betona. V splošnem velja, da naj bo beton take konsistence, da se ga lahko oblikuje z rokami. Konsistenco se določa s standardiziranimi metodami (metoda s posedom, metoda z razlezom, ve-be metoda, metoda zgoščevanja pri vibriranju), s katerimi ugotovimo stopnjo konsistence (trdoplastična, serdnjeplastična in tekoča).

3.1.3 VGRADLJIVOST

Pojem vgradljivosti betona je povezan z enostavnostjo vgrajevanja, zgoščevanja in finalnim obdelovanjem betonske mešanice. Bistvenega pomena je, da med samim transportom in vgrajevanjem zrna v mešanici ostanejo enakomerno razdeljena po celotni masi, beton mora ohranjati homogenost brez pojava segregacije in/ali izcejanja vode ves čas manipuliranja. Najbolje je, da se sama priprava betona vrši kar najbližje mesta vgradnje, transportira pa se ga v posebnih mešalcih.

3.1.4 IZCEJANJE VODE

Izcejanje vode je pojav, do katerega pride zaradi usedanja drobnih delcev in potovanja vode z notranje plasti mešanice proti površju. Posledice izcejanja vode se odražajo v zmanjšani odpornosti na zunanje vplive, saj ima taka površina na splošno slabše mehanske lastnosti, ker se na površini, kjer se voda nabira, poveča vodocementno razmerje. Izcejanje vode je predvsem velik problem pri betonih, ki se uporabljajo za izdelavo nepropustnih plasti in za zalivanje votlin. Ta pojav pa se da omejiti in zmanjšati z ustreznimi ukrepi, kot so:

- ustrezna zrnastostna sestava agregata,
- kemijski dodatki,
- aeriranje in
- bolj fini cementi (višja kakovost cementov).

3.1.5 ZGOŠČEVANJE

Za vgrajevanje betonov, ki vsebujejo večja zrna in manjšo količino cementne paste, je potrebna dodatno dovedena energija, ki se jo dovaja z nabijali in vibratorji. Vibrator s tresenjem spravi delce betona v gibanje in s tem zmanjša njihovo medsebojno trenje ter spravi

mešanico v stanje gostega fluida. Običajno se vibrira betone, ki jih ne moremo ročno vgraditi, pri tem pa uporabljamo vibratorje z iglo (slika na strani 16) ali pa vibratorje pritrjene na kovinske opaže.

3.1.6 PROCES HIDRATACIJE, VEZANJA IN STRJEVANJA BETONA

Hidracija je kemijsko fizikalen proces vezanja vode in cementa, pri katerem potekajo kompleksne reakcije med minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata, ta v nadaljevanju postane bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidrationskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov.

Spreminjanje cementne paste v cementni kamen imenujemo strjevanje, ki lahko traja več let. Procese pri katerem cementna pasta in kasneje cementni kamen pridobiva na trdnosti lahko razdelimo na tri faze:

- faza vezanja cementa (začetna faza po 1 uri),
- faza intenzivnega strjevanja (po 6 urah),
- faza stabilizacije silikatne strukture (po 24 urah).

Bistven za hidracijo je pravilno vodocementno razmerje $v/c = 0,38$ do $0,42$, ki pa v praksi pogosto ne zadošča za pripravo betona. Pri tej količini vode naj bi teoretično hidratizirala vsa zrna cementa, vendar pa se v praksi izkaže, da jih hidratizira le okrog 80 do 90%. Pri višjih v/c se oblikujejo kapilarne pore večjega premera, ki znižujejo trdnost betona in zmanjšujejo njegovo vodoneprepustnost.

Poseben problem pa predstavlja tudi razvoj hidrationske toplote in njen vpliv na lastnosti betona. V primeru nizkih temperatur hidrationska toplota deloma ščiti beton pred zmrzovanjem, pri masivnih konstrukcijah pa povzroča notranje obremenitve. Hitrovezočni cementi v kratkem času razvijejo veliko količino hidrationske toplote, zato je za načrtovanje transporta in vgradnje potrebno dobro poznavanje procesa hidrationske.

3.2 STRJEN BETON

3.2.1 TEHNOLOŠKE LASTNOSTI

Pomembne tehnološke lastnosti betona so:

- odpornost na obrabo,
- vodoneprepustnost,
- zmrzljinska odpornost in
- prostorninska obstojnost betona.

Odpornost na obrabo betona je pomembna predvsem za površine, ki so izpostavljene mehanskim vplivom in tekoči vodi. Obrabnost je sorazmerna s trdnostjo betona. Visoko odporni betoni morajo biti izdelani iz trdnega in trdega agregata in površinsko ustrezno obdelani.

Vodoneprepustni betoni morajo zadrževati vodo brez vidnega prepuščanja. Prepuščanje vode je odvisno od prepustnosti cementnega kamna in agregata ter od razmerja med njima. Cementni kamen je manj prepusten: če je cementna pasta pripravljena z manjšo količino vode, če je stopnja hidratacije betona visoka in če je bil le ta med strjevanjem ustrezno negovan.

Največji vpliv na vodoneprepustnost pa imata razpokanost in odprta poroznost betona. Vodoneprepusten beton zagotovimo z dobrim vgrajevanjem – pravilnim vibriranjem. S prepustnostjo betona je povezana tudi zmrzljinska odpornost betona. Proces zmrzovanja znižuje življenjsko dobo betona, dodatno pa jo znižujejo še prisotnost in vpliv raznih kemikalij. Zmrzljinska odpornost betona se lahko poveča s postopkom aeracije betone, pri čemer v betonu umetno ustvarimo drobne zračne pore.

Prostorninska stabilnost betona vpliva na njegovo delovanje znotraj konstrukcije v katero je vgrajen. Strjen beton lahko svojo prostornino spreminja zaradi temperaturnih sprememb, sprememb vlage okolja in obremenitev. Na prostorninsko stabilnost vplivajo še zrnastostna

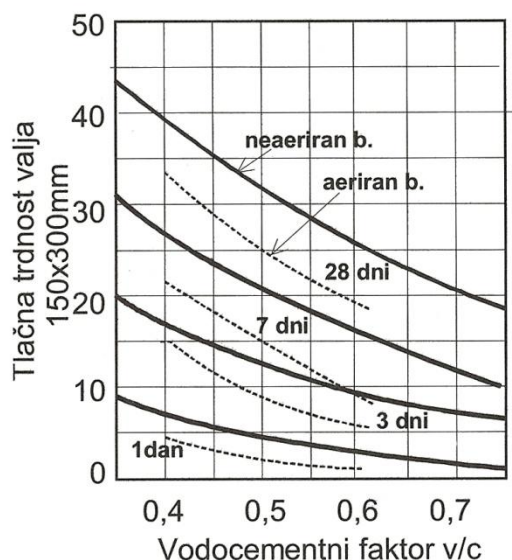
sestava in delež agregata, način nege betona med strjevanjem in stopnja hidratacije (www.nivo.si).

3.2.2 MEHANSKE LASTNOSTI

Pomembne mehanske lastnosti betona so:

- tlačna trdnost,
- karakteristična tlačna trdnost,
- razred tlačne trdnosti,
- upogibna natezna trdnost,
- cepilna natezna trdnost,
- modul elastičnosti in
- gostota.

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev pri določeni starosti. Ta se preskuša na preizkušancih iz kock ali valjev standardiziranih dimenzij, ki smo jih hranili v prostoru z najmanj 95% odstotno vlažnostjo ali v vodi pri temperaturi $20 \pm 3^\circ\text{C}$.



Slika 7: Odvisnost trdnosti betona od vodocementnega faktorja. (Žarnić R. 2005)

Karakteristična tlačna trdnost betona je vrednost, pod katero je za preiskani beton možno pričakovati največ 5% vseh rezultatov preiskav tlačne trdnosti.

Razred tlačne trdnosti betona je normirana tlačna trdnost betona izražena v [MPa], ki izhaja iz karakteristične tlačne trdnosti betona pri starosti betona 28 dni. Za armirano betonske konstrukcije se uporabljajo betoni, ki imajo razrede tlačnih trdnosti vsaj C25/30.

Upogibna natezna trdnost betona je sorazmerna z njegovo tlačno trdnostjo, določamo jo s preskusom betonskih prizem, znaša pa približno 15% tlačne trdnosti ugotovljene s preizkusom kock in 20% tlačne trdnosti ugotovljene s preizkusom valjev.

Cepilna natezna trdnost betona je pomembna pri oceni obremenitev, pri katerih nastanejo razpoke v betonu. Njena velikost znaša približno 7% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preizkusom kock in 10% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preizkusom valjev. Pri višjih razredih tlačne trdnosti betona so natezne trdnosti procentualno manjše kot pri nižjih razredih tlačne trdnosti.

Gostota običajnih betonov je okrog 2400 kg/m^3 , kar je seveda odvisno od sestave betona. Gostota pri betonih lahko niha od 250 kg/m^3 za lahke betone do 6000 kg/m^3 za masivne težke betone.

4 NEGA BETONA

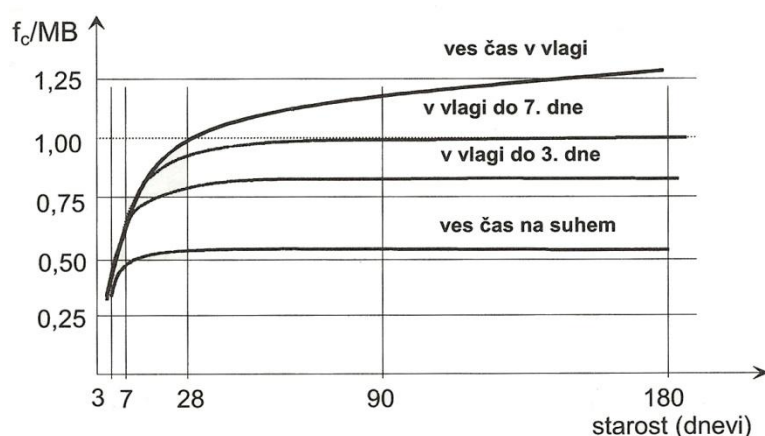
Na lastnosti strjenega betona močno vpliva njegova nega. Za trajno sprijemljivost mora biti sveži beton zavarovan predvsem pred naslednjimi vplivi:

- predčasno izsušitvijo zaradi vetra ali sonca, pred ekstremnimi temperaturami in hitrimi temperaturnimi spremembami,
- dežjem in
- tresenjem.

Če te ukrepe prezremo ali jih začnemo prepozno izvajati, lahko pride do izgube vode, ki je nujno potrebna za hidratacijo. Na podlagi tega pa lahko pride do posledic kot so:

- zmanjšana trdnost na površini,
- večja vodoprepustnost,
- razpoke zaradi krčenja in
- nevarnost kasnejših razpok zaradi izgube vode.

Končna trdnost betona narašča ves čas staranja, dokler se v cementni pasti še nahajajo nehidratizirana zrnca cementa in voda. Proces hidratizacije cementa lahko poteka, če sta izpolnjena pogoja, da je relativna vlažnost višja od 80% in temperatura dovolj visoka (nad mejo zmrzovanja).



Slika 8: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona. (Žarnić R. 2005)

Iz slike na prejšnji strani je razvidno, kako zelo pomembna je vlaga pri procesu hidratacije cementa, saj beton, ki je bil ves čas v vlagi, po 28 dneh doseže skoraj še enkrat višjo trdnost kot beton, ki je bil ves čas na suhem.

Ukrepi za zagotovitev primerne vlage v betonu:

- razpršitev sredstva za nego betona na osnovi parafina,
- pokrivanje s folijo (na vidnih betonih se folija ne sme položiti direktno na beton, paziti je treba na pravilno prekrivanje in preprečevanje prepaha),
- pokrivanje z mokro juto, ki jo redno močimo ali pa jo prekrijemo s folijo,
- močenje in vzdrževanje mokrote, je najbolj pogost način nege, vendar izmenično škropljenje z vodo lahko vpliva negativno, saj se pri masivnih betonih pojavijo razpoke zaradi šokov,
- pri nizkih temperaturah pa beton prekrijemo s filcem, hkrati pa moramo paziti tudi na izgubo vode.

5 METODE PREISKAV BETONOV

5.1 SPLOŠNO

V poglavju o preiskavah betonov se bom osredotočil samo na preiskave, ki sem jih za potrebe tega diplomskega dela opravljal tudi sam s pomočjo mentorice in somentorja.

Reološke raziskave svežega betona so pomembne zaradi velikega pomena vgradljivosti, kohezivnosti, homogenosti in zgoščevanja betonske mešanice, saj se te lastnosti izražajo s kakovostjo strjenega betona. Za preučevanje lastnosti kot sta konsistenca in vgradljivost, se v laboratorijih uporabljajo identične metode kot na gradbišču, poleg teh metod pa se delajo tudi bolj kompleksni poskusi za katere na gradbišču ni opreme in časa. Najpomembnejša lastnost svežega betona je konsistenca oziroma sposobnost dobrega zgoščevanja ob pomoči različnih sredstev za dovajanje energije (vibratorji,...) ali brez njih. Potrebna vgradljivost betonske mešanice je sposobnost, da se le ta enostavno vgradi in lepo zapolni opaž ter se dobro zgosti, pri tem pa ohrani dobro homogenost. V nekaterih primerih se zahteva taka obdelovalnost betonske mešanice, da se poleg vgrajevanja in zgoščevanja lahko enostavno obdelata tudi vidne površine.

5.2 LASTNOSTI SVEŽIH BETONSKIH MEŠANIC

Izbira ustreznih materialov in sestave betonske mešanice sta zelo pomembna koraka pri izdelavi betona, ki bo izpolnil zahteve glede trdnosti in obstojnosti konstrukcijskih elementov in materiala. Posebno pozornost pa je potrebno posvetiti še sami proizvodnji in tehnološkim operacijam, ki jim je beton izpostavljen v zgodnji starosti. Te operacije so: mešanje, transport, vgrajevanje v opaže, zgoščevanje, zaključna obdelava površine, nega in odstranitev opažev.

5.2.1 PREISKAVE NA SVEŽI MEŠANICI

5.2.1.1 Odvzem vzorcev svežega betona za preiskave po standardu SIST EN 12350-1

Postopek: Iz količine betona, ki jo preizkušamo, odvzamemo količino svežega betona, ki je vsaj 1,5 krat večja od količine potrebne za izvedbo preiskave sveže mešanice in ne manjša od

0,02 m³. To količino imenujemo vzorec, ki sestoji iz zahtevanega števila delov, ki so odvzeti na različnih mestih pripravljene količine betona, ki jo preiskujemo. V primerih sprotnega spremljanja izdelave betona ali naključne kontrole pripravljenega betona, je lahko vzorec odvzet smo na enem mestu. Vzorec pred preiskavo hranimo na čisti površini ali v čisti posodi. Pred vgradnjo v naprave za preizkušanje sveže mešanice moramo vzorec temeljito premešati. Čas med odvzemom in preizkušanjem mora biti čim krajši. V vseh fazah odvzema, transporta in uporabe, moramo vzorce zaščititi pred izgubo vode, pred vplivi povišane temperature in segregacijo.

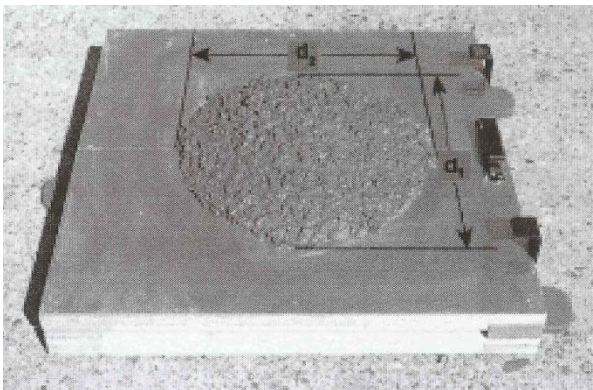
5.2.1.2 Postopek s posedom po standardu SIST EN 12350-2 z dodatnimi meritvami

Za posed se uporablja zelo preprosta metoda, ki se pogosto uporablja tudi na gradbiščih. Kljub svoji preprostosti je dovolj zanesljiva, da z njo lahko določimo konsistenco tekočih, srednje ter mehko plastičnih mešanic. Mera za konsistenco je višina poseda vzorca po odstranitvi kalupa.

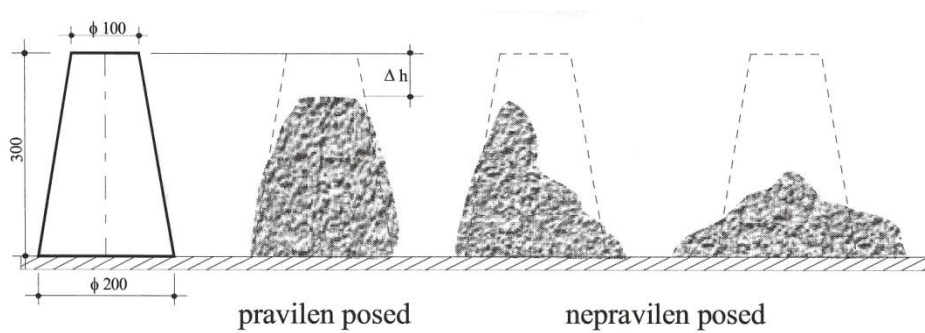
Postopek: Kovinski konus postavimo na ravno in vodoravno podlago ga polnimo z zidarsko žlico v treh plasteh približno enake višine. Vsako plast prebodemo s standardno kovinsko palico (ϕ 16, z zaobljenim vrhom dolžine 60 cm) s 25 udarci. Prvo plast prebadamo po celi višini, pri prebadanju naslednjih plasti pa mora palica prodreti do spodnje plasti. Ko zgostimo vrhno plast, odstranimo presežek betona in zravnamo površino z zidarsko žlico. Trideset sekund po napolnitvi dvignemo konus in ga prestavimo ob betonski stožec. Konus dvigujemo počasi (5 do 10 s), ob tem pa lahko vključimo štoparico ter merimo čas do trenutka, ko preskušanec zavzame končno obliko in ga zaokrožimo na 0,1 s natančno. Ravnilo ali standardizirano palico položimo na zgornji rob konusa tako, da seže nad betonski stožec in izmerimo razliko višin. Razlika višin (Δh) se zaokroži na 10 mm. Na koncu lahko z merilom izmerimo še največji dimenziji razleza s posedom d_1 in d_2 v dveh smereh, vzporednih z stranicami osnovne plošče in obe meritvi zaokrožimo na 10 mm natančno. Če zgornja površina posedenega betonskega stožca ni vodoravna je merodajna najmanjša razlika višin. Celoten postopek mora potekati brez prekinitvev in ne sme trajati več kot 150 s. Merjenje časa do razleza s posedom in meritev razleza betonskega vzorca se izvaja pri lahkogradljivih betonih, pri katerih je posed večji od 210mm.



Slika 9: Kovinski konus in poseden betonski vzorec.



Slika 10: Razlezna miza.



Slika 11: Pravilen in nepravilen posed stožca.

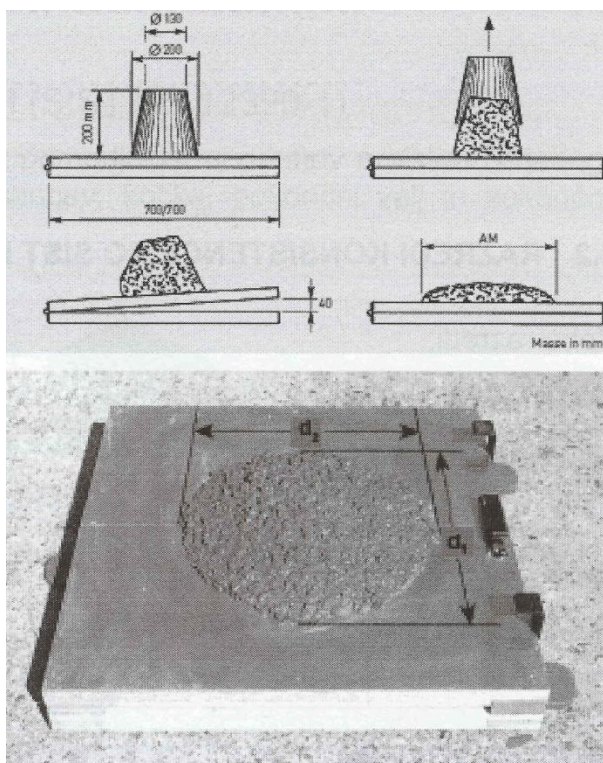
5.2.1.3 Postopek razleza po standardu SIST EN 12350-5

Metoda z razlezom je enostavna metoda, ki se uporablja za plastične in tekoče mešanice. Primerna je za določitev konsistence svežih betonov pri katerih se razlez giblje od 340 mm do 620 mm. Izven teh vrednosti je merjenje razleza lahko neprimerno, zato je potrebno uporabiti drugo metodo.

Postopek: Na razlezno mizo postavimo skrajšan kovinsko konus (premer osnove 200 ± 2 mm; premer vrha 130 ± 2 mm; višina 200 ± 2 mm), ki ga napolnimo v dveh približno enakih plasteh. Vsako plast nabijemo z desetimi udarci z lesenim nabijačem prečnega prereza 4×4 cm. Po nabijanju druge plasti odstranimo presežek betona. Po 30-ih sekundah pazljivo odstranimo konus. Stopimo na stopalko na sprednji strani osnovnega okvirja razlezne mize, dvignemo zgornjo ploščo za 4 cm (do distančnika) in jo spustimo. Postopek ponovimo petnajstkrat. Betonska masa se razleze po razlezni mizi. Mera konsistence po tej metodi je povprečje dveh med seboj pravokotnih premerov razlezene betonske mase vzporedno s stranicama mize, zaokroženo na 10 mm.

Preglednica 3: Stopnje konsistence v odvisnosti od razleza po standardu SIST EN 206-1

| Stopnja | Razlez v (mm) |
|---------|---------------|
| F1 | ≤ 340 |
| F2 | 350 do 410 |
| F3 | 420 do 480 |
| F4 | 490 do 550 |
| F5 | 560 do 620 |
| F6 | ≥ 630 |



Slika 12: Postopek metode z razlezom

5.2.1.4 Postopek zgoščevanja z vibriranjem po standardu SIST EN 12350-4

Ta metoda daje dobre rezultate pri določanju konsistence trdih in srednje plastičnih mešanic. Ta metoda je dovolj enostavna, da je primerna za gradbišče kot tudi za laboratorij.

Postopek: Kalup z dimenzijami 20×20×40 cm do vrha napolnimo z betonom. Beton vgrajujemo tako, da pada preko ene od širših stranic zidarske žlice. Ko se kalup napolni odstranimo presežek betona in poravnamo zgornjo površino. Betonsko mešanico vibriramo enako kot pri vgrajevanju betona na gradbišči (s previbratorjem ali na vibracijski mizici). Po končanem vibriranju izmerimo višino od površine zgoščenega betona do vrha kalupa v vseh štirih vogalih in izračunamo merodajno višino (povprečna višina). Po tej metodi je mera konsistence razmerje med začetno višino betona in višino po vibriranju.

Stopnjo zgoščenosti izračunamo po enačbi:

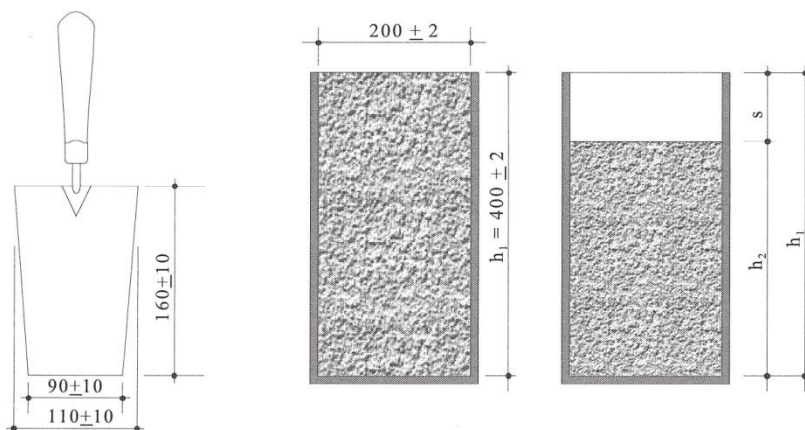
$$C = \frac{h_1}{h_2} = \frac{h_1}{h_1 - s}$$

kjer je:

- C stopnja zgoščenosti,
- h_1 notranja višina kalupa,
- h_2 višina zgoščenega betona in
- s povprečna oddaljenost površine zgoščenega betona od zgornjega roba kalupa.

Preglednica 4: Stopnje konsistence v odvisnosti od zgostitve po standardu SIST EN 206-1

| Stopnja | Mera zgostitve |
|---------|----------------|
| C0 | $\geq 1,46$ |
| C1 | 1,45 do 1,26 |
| C2 | 1,25 do 1,11 |
| C3 | 1,10 do 1,04 |

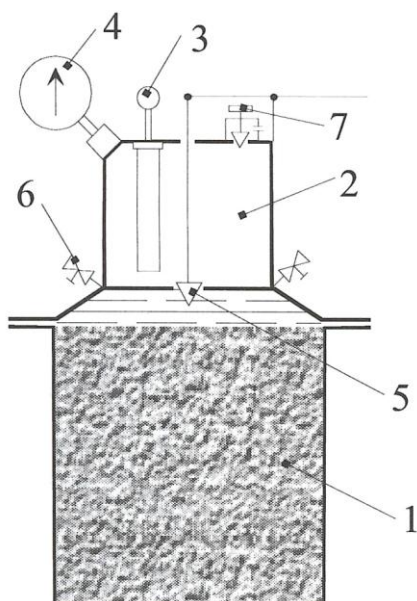


Slika 13: Kalup za zgoščevanje

5.2.1.5 Postopek določanja zraka v svežem betonu po standardu SIST EN 12350-7

Vzorec odvezamemo v skladu s SIST EN 12350-1. Neposredno pred preskušanjem vzorec z lopatico (ročno) dobro premešamo – homogeniziramo.

Postopek: Osnovno posodo (1) napolnimo s svežim betonom. Vgradimo ga v treh slojih po postopku, ki ga uporabljamo pri vgrajevanju svežega betona v kalupe. Višek materiala odstranimo s kovinskim ravnilom in sicer tako, da ostane zgornja površina betona v posodi po odstranitvi odvečnega betona gladka. Nalegajoče površine osnovne posode in pokrova (2) pazljivo očistimo. Na osnovno posodo pritrdimo pokrov. Skozi odprtini z ventilom (6) vlijemo vodo, s katero zapolnimo prostor med osnovno posodo in pokrovom. Ko prenehajo izhajati zračni mehurčki, ventila zapremo. Z ročno zračno črpalko (3) vnesemo toliko zraka v predkomoro (pokrov), da kazalec na manometru (4) pokaže ničlo (takrat je zračni pritisk v predkomori 98,066 kPa). V primeru, da je pritisk v predkomori previsok, odvečen zrak izpustimo skozi izpustni ventil (7). Nekaj sekund po izravnanju tlaka odpremo ventil (5) in na manometru odčitamo porozimetrijski indeks. Če je porozimeter pravilno umerjen predstavlja porozimetrijski indeks hkrati tudi delež zraka v % glede na celotno prostornino svežega betona v posodi.



Slika 14: Shema Porozimetra



Slika 15: Porozimeter

5.3 STRJEN BETON

Beton je na nivoju mikrostrukture zelo heterogen material. Zaradi različnih mehanskih lastnosti posameznih faz in strukturnih napak (kot so zračne pore in učinki zgostitve materiala pri vgrajevanju beton, obstoj mikrorazpok v stičnem območju, itd.), se pri homogeni zunanji obremenitvi vzpostavi v notranjosti betonskega elementa heterogen in kompleksen potek napetosti.

5.3.1 PREISKAVE STRJENEGA BETONA

5.3.1.1 Tlačna trdnost SIST EN 12390-3

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev pri obravnavani starosti. Preskuša se na preizkušancih iz kock, ki imajo stranico 150 mm ali valjev višine 300 mm in premera 150mm. Preizkušance naj bi hranili v prostoru z najmanj 95% odstotno vlažnostjo ali v vodi pri temperaturi $20\pm 3^{\circ}\text{C}$. Na osnovi znanih dimenzij in ugotovljene porušne sile določimo tlačno trdnost preizkušanca. V spodnji preglednici so podani razredi tlačne trdnosti za normalno težek in težek beton po standardu SIST EN 206-1.



Slika 16: Primer tlačnega preizkusa kocke

Preglednica 5: Razredi tlačne trdnosti za normalno težek in težek beton po standardu SIST EN 206-1

| Trdnostni razredi | Minimalna karakteristična trdnost valja $f_{ck, cyl}$ (N/mm ²) | Minimalna karakteristična trdnost kocke $f_{ck, cube}$ (N/mm ²) |
|--------------------------|--|---|
| C 8/10 | 8 | 10 |
| C 12/15 | 12 | 15 |
| C 16/20 | 16 | 20 |
| C 20/25 | 20 | 25 |
| C 25/30 | 25 | 30 |
| C 30/37 | 30 | 37 |
| C 35/45 | 35 | 45 |
| C 40/50 | 40 | 50 |
| C 45/55 | 45 | 55 |
| C 50/60 | 50 | 60 |
| C 55/67 | 55 | 67 |
| C 65/75 | 60 | 75 |
| C 70/85 | 70 | 85 |
| C 80/95 | 80 | 95 |
| C 90/105 | 90 | 105 |
| C 100/115 | 100 | 115 |

V tabeli lahko vidimo oznake tlačnih trdnosti C, ki so podane v [MPa], izhajajo pa iz karakterističnih tlačnih trdnosti betona pri starosti 28 dni. Primer C 20/25 pomeni, da je karakteristična tlačna trdnost dobljena na valju vsaj 20 MPa, na kocki pa vsaj 25 MPa.

Tlačna trdnost je podana z enačbo:

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

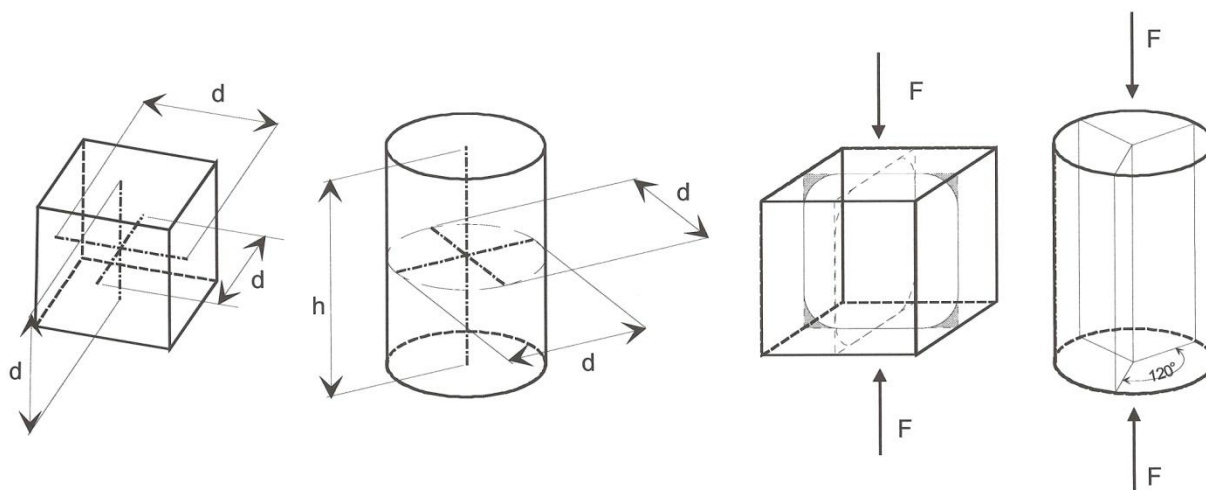
kjer je:

f_c tlačna trdnost [MPa],

F največja porušna sila [KN] in

A_c površina vodoravnega prereza preizkušanca [mm].

Določitev tlačne trdnosti obravnava standard SIST EN 12390-3, odvzem vzorcev pa mora potekati v skladu z standardom SIST EN 12350-1.

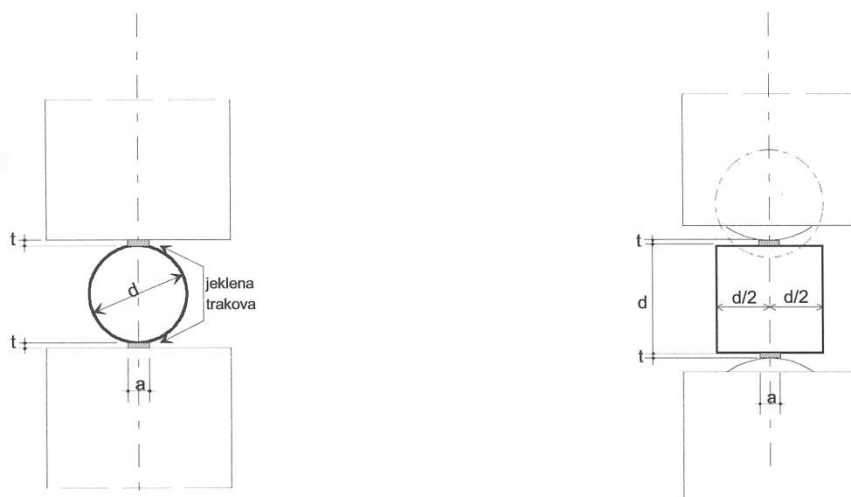


Slika 17: Shema kocke in valja za preskus tlačne trdnosti. (Žarnič R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V. 2009/2010)

5.3.1.2 Cepilna natezna trdnost SIST EN 12390-6

Cepilna natezna trdnost je pomembna pri oceni obremenitve, pri kateri nastanejo razpoke v betonu. Postopek preizkušanja je opisan v standardu SIST EN 12390-6.

Dobljeni rezultati so odvisni predvsem od oblike in dimenzije preizkušanca. Betonske kocke prenesejo 10 % večje obremenitve kot valji. Kocke dimenzij 150/150/150 mm dajejo slabše rezultate kot kocke dimenzij 100/100/100 mm, za betonske valje pa vpliv dimenzije na rezultate ne moremo opredeliti.



Slika 18: Shematski prikaz cepljenja valja in kocke

Cepilna natezna trdnost je podana z enačbo:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

kjer je:

f_{ct} cepilna natezna trdnost [MPa],

F največja sila [N],

L dolžina raznosa sile [mm] in

d nazivna dimenzija prečnega prereza [mm].

5.3.1.3 Odpornost proti prodoru vode SIST EN 12390-8

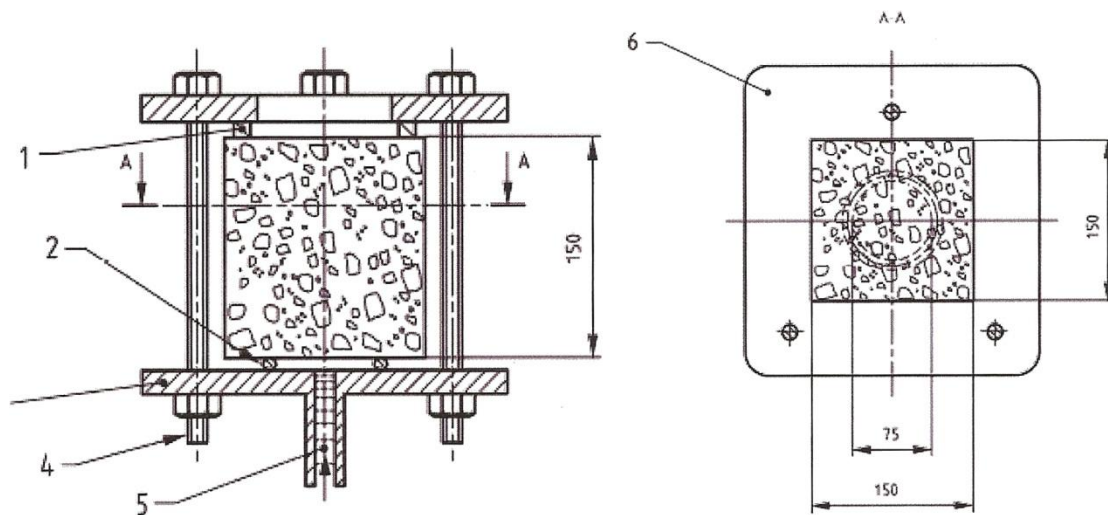
Preizkus vodotesnosti opravimo, kadar nas zanima, kako odporen je beton proti prodiranju vode ali katere druge tekočine. Zanimiv je predvsem za zahtevnejše inženirske objekte kot so: pregrade, bazeni, odlagališča jedrskih odpadkov, skladišča plinov, čistilne naprave itd., pri katerih bi vdor vode ali druge tekočine negativno vplival na sam objekt ali na njegovo okolico.

Če se zahteva, je treba odpornost proti prodoru vode preskušati po SIST EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni in največ 35 dni na treh preizkušancih izdelanih iz različnih vzorcev svežega ali strjenega betona iste vrste in enake starosti. V spodnji tabeli so določene stopnje odpornosti betona proti prodoru vode PV, pripadajoče največje vrednosti prodora vode v preizkušane pri preskusu pa SIST EN 12390-8 in največji dovoljeni odkloni posameznih rezultatov.

Preglednica 6: Dovoljene vrednosti prodora vode po standardu SIST EN 206-1 pri starosti betona najmanj 28 dni

| Stopnja odpornosti proti prodoru vode | Največji dovoljeni prodor vode (mm) | Največji dovoljeni odklon (mm) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| PV -I | 50 | +15 |
| PV-II | 30 | +10 |
| PV-III | 20 | +5 |

Postopek: Ko preizkušance razkalupimo jih na tisti strani, kjer bodo izpostavljeni vodi, očistimo z žično krtačo, da odstranimo cementno mleko s površine. Po predpisani negi preizkušance stare med 28 in 35 dni namestimo v napravo ZA PRESKUŠANJE in nastavimo delovanje vode na 500 ± 50 kPa za obdobje 72 ± 2 ur. Med preiskavo opazujemo ali tesnilo oziroma naprava pušča vodo. Pa preteku 72 ur preizkušance odstranimo iz naprave, jih razcepimo pravokotno na površino na katero je delovala voda pod pritiskom in odčitamo maksimalno globino prodora vode v mm. To je tudi rezultat preiskave.



Slika 19: Shema naprave za preskus vodotesnosti



Slika 20: Naprava za preizkus vodotesnosti

5.3.1.4 Določanje dinamičnega modula elastičnosti z merjenjem hitrosti longitudinalnih ultrazvočnih valov

Ultrazvočna metoda omogoča oceno homogenosti betona v obstoječih konstrukcijah. Z ustrezno kalibracijo opravljeno na betonskih preizkušancih določene sestave lahko ocenimo tlačno trdnost vgrajenega betona z enako sestavo, hkrati pa je metoda zelo primerna tudi za oceno homogenosti in kvalitete vgrajenega betona.

Preglednica 7: Ocena kvalitete betona glede na hitrost potovanja ultrazvoka

| Hitrost ultrazvočnih valov (km/s) | Kvaliteta vgrajenega betona |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| nad 4,570 | dobra |
| 3,660 do 4,570 | v splošnem dobra |
| 3,050 do 3,660 | vprašljiva |
| 2,130 do 3,050 | v splošnem slaba |
| Pod 2,130 | zelo slaba |

Naprava za preskušanje s pomočjo ultrazvoka je sestavljena iz merilnega inštrumenta, dveh sond (od katerih je ena oddajnik druga pa sprejemnik ultrazvočnih impulzov), kablov (ki spajajo merilni inštrument s sondami) in kalibratorja, ki služi za preverjanje pravilnosti delovanja aparature. Vzorec, na katerem želimo meriti hitrost ultrazvoka postavimo med sondi, ki jih pritisnemo na preizkušane. Pomembno je, da zagotovimo dober stik med sondo in preizkušancem. To dosežemo s čiščenjem površine in nanašanjem tankega sloja vazelina ali silikonske paste, obvezno je namreč treba odstraniti zrak na stiku sonda- vzorec.

Hitrost ultrazvočnih valov izračunamo s pomočjo izraza:

$$v = \frac{s}{t} \times 10^6$$

kjer je:

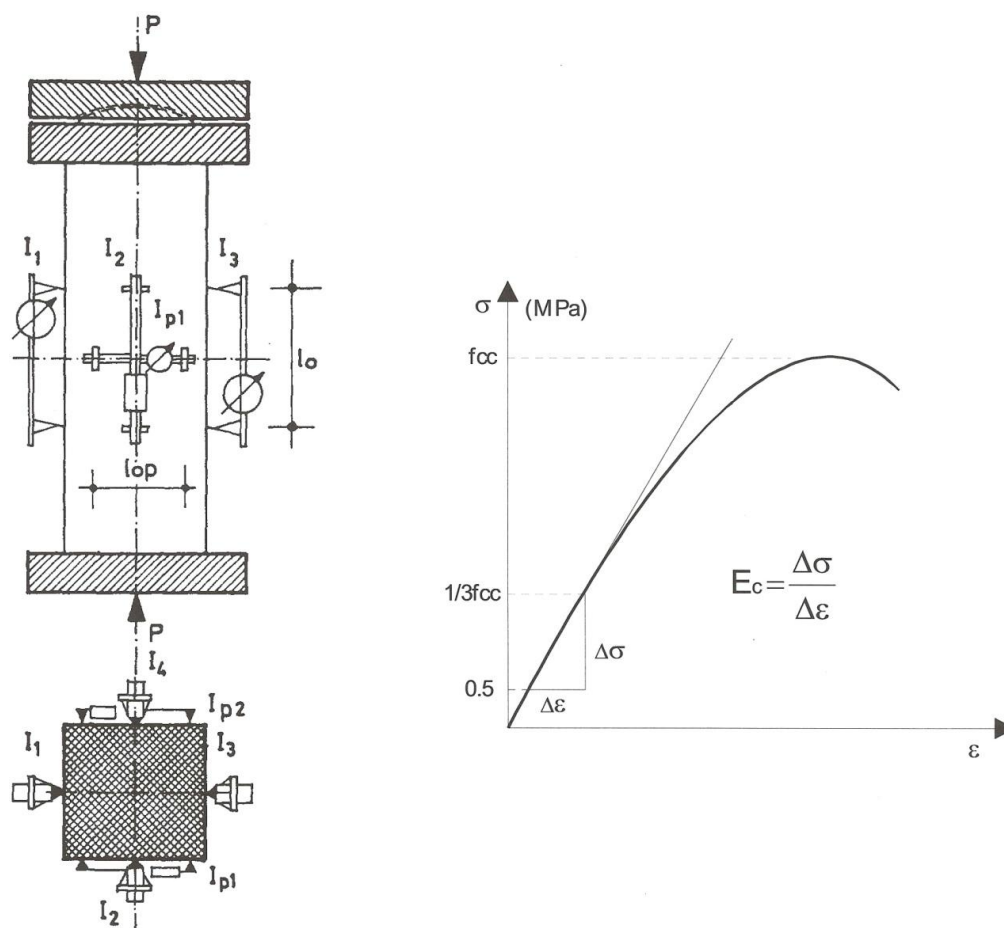
v hitrost ultrazvočnih valov [m/s],

s dolžina poti [m] in

t potovalni čas [μ s].

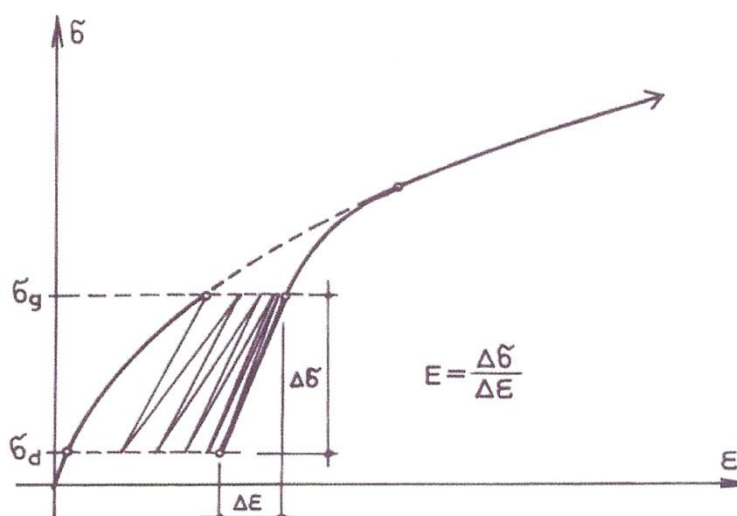
5.3.1.5 Modul elastičnosti JUS U.M1.025

Modul elastičnosti betona se določa s preiskavami na betonskih prizmah dimenzije 400/100/100 mm ali valjih dimenzije $h = 300$ mm, $d = 100$ -150 mm. Vzorci morajo biti stari 28 dni in negovani v vodi ali pa v prostoru s 95 % vlažnostjo. Pomembno je tudi to, da mora biti dimenzija krajše stranice, minimalno štiri krat večja od največjega zrna agregata v betonu. Na preizkušancih potrebujemo dve merilni mesti za prečne deformacije in dve merilni mesti za vzdolžne deformacije. Za preskušanje potrebujemo 6 preizkušancev in sicer 3 za preskus tlačne trdnosti in 3 za ciklično obremenjevanje.



Slika 21: Določanje statičnega modula elastičnosti

Pri preiskavah modula elastičnosti uporabljamo postopek večkratnega tlačnega obremenjevanja in razbremenjevanja preskušancev. Začnemo z obremenjevanjem pri majhni vrednosti σ_d (0,5 MPa), nadaljujemo s postopnim obremenjevanjem s hitrostjo $0,6 \pm 0,4$ MPa/s do σ_g ($1/3 f_{cc}$) in nato razbremenimo do σ_d . Cikle ponavljamo dokler se krivulji dveh zaporednih ciklov ne prekrijeta. Ponavadi zadostuje pet ciklov obremenjevanja in razbremenjevanja, pri šestem ciklu pa se preizkušanec obremeni do porušitve.



Slika 22: Grafični prikaz cikličnega obremenjevanja in razbremenjevanja

Elastični modul je določen z enačbo:

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

kjer je:

- E modul elastičnosti [MPa],
- $\Delta\sigma$ razlika napetosti $\sigma_g - \sigma_d$ [MPa] in
- $\Delta\varepsilon$ razlika pripadajočih deformacij [%].

6 LASTNE PREISKAVE

6.1 UVOD

Eksperimentalno delo je potekalo na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, v prostorih Konstrukcijsko prometnega laboratorija. Agregat za beton je bil savski prod iz krške kotline. Parametri, ki smo jih preiskovali so bili: tlačna trdnost, odpornost proti prodoru vode, ter vpliv segregacije, gnezd, zračnih žepov, vrste nege in razpok na odpornost betona proti prodoru vode.

V okviru eksperimentalnega dela smo pripravili dve mešanici betonov. Razlika v mešanicah je bila pri izbiri cementa. Za mešanico P1 smo izbrali cement CEM I 42,5R, za mešanico P2 pa CEM II/B-M (V-L) 42,5 N. Cement za mešanico P2 še ni v prosti prodaji, ker ga cementarna še razvija. Količine, izvor in parametri ostalih materialov so bili enaki, edino količino superplastifikatorja smo z začetnega 1,5% mase cementa povečali na 2,7% mase cementa. Najprej smo povečali količino za 0,5%, potem dvakrat za 0,2% in na koncu za 0,3%, kar je na koncu pomenilo 270g superplastifikatorja več na 10 kg cementa.

6.2 UPORABLJENI MATERIALI

6.2.1 AGREGAT

Za izdelavo betonov smo uporabili savski prod iz krške kotline (karbonatni prod). Izbrali smo kombinacijo frakcij, ki so podane v tabeli 8 in se skozi potek preiskav ni spreminjala.

8: Izbrana zrnastostna sestava

| Frakcija | Delež (%) |
|----------|-----------|
| 0/4 | 50 |
| 4/8 | 15 |
| 8/16 | 35 |

Lastnosti mineralnega agregata pa so prikazane v tabeli 9.

Preglednica 9: Lastnosti uporabljenega mineralnega agregata

| Frakcija | Prostorninska masa zrn (kg/m^3) | Vodovpojnost zrn (%) |
|----------|--|----------------------|
| 0/4 | 2680 | 0,7 |
| 4/8 | 2710 | 1,0 |
| 8/16 | 2710 | 0,8 |

6.2.2 CEMENT

Kot glavno vezivo za mešanico P1 smo uporabili cement CEM I 42,5R, to je portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo (R). Sestavljen je iz minimalno 95% klinkerja, koz regulator vezanja pa je dodana sadra. Njegova kemijska sestava in fizikalne lastnosti so podane v spodnji tabeli.

Preglednica 10: Kemijska sestava in fizikalne zahteve cementa CEM I 42,5R

| Kemijske zahteve | Zahteve standarda SIST EN 197-1 | Dosežene vrednosti |
|--|--|-------------------------------|
| Vsebnost sulfata (kot SO ₃) | < 4,0% | < 3,0% |
| Mehanske in fizikalne zahteve | | |
| Zgodnja trdnost, 2 dneva | > 20 MPa | > 28 MPa |
| Standardna trdnost, 28 dni | 42,5 - 62,5 MPa | > 54 MPa |
| Čas začetka vezanja | > 60 min | > 100 min |
| Prostorninska obstojnost | < 10 mm | < 1 mm |
| Prostorninska teža | | 3,05 – 3,10 g/cm ³ |

Za vezivo v mešanici P2 smo izbrali cement CEM II/B-M (W-L) 42,5 N. Gre za mešani portlandski cement z dvema dodatkom, kalcijem elektrofilitrskim pepelom (W) in apnencem (L), trdnostnega razreda 42,5 z normalno zgodnjo trdnostjo. Kot sem že omenil, ta cement cementarna še razvija, zato ga v času mojih preiskav ni bilo mogoče dobiti v prosti prodaji. Njegova kemijska sestava je podana v tabeli 11.

Preglednica 11: Kemijska sestava in fizikalne zahteve cementa CEM II/B-M (W-L) 42,5 N

| Kemijske zahteve | Zahteve standarda SIST EN 197-1 | Dosežene vrednosti |
|---|--|---------------------------|
| Vsebnost sulfata (kot SO ₃) | < 4,0% | < 2,89% |
| Mehanske in fizikalne zahteve | | |
| Zgodnja trdnost, 2 dneva | > 20 MPa | > 23,2 MPa |
| Standardna trdnost, 28 dni | 42,5 - 62,5 MPa | > 53,3 MPa |
| Čas začetka vezanja | > 60 min | > 235 min |
| Prostorninska obstojnost | < 10 mm | < 0,61 mm |
| Prostorninska teža | | 2,91 g/cm ³ |

6.2.3 VODA

Uporabili smo vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

6.2.4 SUPERPLASTIFIKATOR NOVE GENERACIJE

Uporabili smo superplastifikator nove generacije švicarskega proizvajalca na modificirani polikarboksilatni bazi, ki se uporablja za pripravo transportnih betonov. Odlikujeta ga zelo visoka začetna in končna trdnost betona, odlično zgoščevanje betona ter visoka redukcija vode. Superplastifikator se adsorbira na cementne delce, zaradi svoje prostorske strukture polimerne molekule omrežijo cementne delce in preprečijo njihovo združevanje. Adsorpcija poteka postopno in dalj časa, zato je učinkovitost večja oziroma je čas obdelavnosti betonov pripravljenih z uporabljenim superplastifikatorjem daljši kot pri običajnih superplastifikatorjih.

Gostota znaša 1,08 g/cm³, doziramo pa ga 0,2 -1,5% na maso cementa, odvisno od v/c razmerja in želene obdelavnosti betona, vrste in količine cementa in vrste betona. Superplastifikator lahko dodajamo betonski mešanici razredčenega z zamesno vodo ali še bolje, koncentriranega na že pripravljeno svežo betonsko mešanico manjše obdelavnosti. Optimalne rezultate dosežemo, če dodatek dodamo betonski mešanici, potem ko smo najprej

dodali 50-70 % zamesne vode. Dodajamo previdno! Priporočljiv čas mokrega mešanja je 3 minute, najkrajši pa 1 minuto.

Uporabljen superplastifikator pripomore k :

- daljšemu času obdelavnosti betona – tudi pri višjih temperaturah,
- prihranku energije,
- lažjemu in hitrejšemu vgrajevanju in črpanju betona,
- visokim zgodnjim in visokim končnim trdnostim,
- počasnejši karbonatizaciji.

6.3 OPIS PREISKOVANIH BETONSKIH MEŠANIC

6.3.1 MEŠANICA P1

V okviru preiskav smo najprej pripravili mešanico, ki smo jo poimenovali P1. Ta mešanica je sestavljena iz cementa CEM I 42,5R, karbonatnega proda iz krške kotline (ki je bil izkopan iz reke Save), vode iz ljubljanskega vodovodnega omrežja in superplastifikatorja. Količina betona, ki smo ga zamešali in vgrajevali v preizkušance je bila 45l. Kot pa je v uvodu že omenjeno, smo morali količino superplastifikatorja z začetnih 1,5% mase cementa povečati na 2,7% mase cementa. Količine materiala so podane v tabeli 12:

Preglednica 12: Receptura mešanice P1

| MEŠANICA P1 | 1 m ³ BETONA (kg) | PROSTORNINSKA MASA (kg/m ³) | VOLUMEN (m ³) | 45 L BETONA (kg) |
|--------------------------|------------------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| CEMENT | 400 | 3100 | 0,129 | 18,000 |
| VODA | 160 | 1000 | 0,160 | 7,830 |
| VODOCEMENTNO RAZMERJE | 0,435 | | | 0,435 |
| SUPERPLASTIFIKATOR | 10,8 | 1080 | 0,010 | 0,414 |
| AGREGAT 0/4 | 925 | 2680 | 0,345 | 41,625 |
| AGREGAT 4/8 | 278 | 2710 | 0,103 | 12,510 |
| AGREGAT 8/16 | 648 | 2710 | 0,239 | 29,160 |

Mešanico smo izdelovali tako, da smo najprej dobro premešali suhe sestavine (čas mešanja 15s), nato smo dodali prvo polovico predpisane vode in čez 20s še drugo polovico vode pomešane z superplastifikatorjem. Vse skupaj smo še mešali 85s, tako da je bil skupni čas mešanja 120s. Mešanje je potekalo v protitočnem laboratorijskem mešalcu s kapaciteto 50l.

6.3.2 MEŠANICA P2

Nadaljevanje preiskav je potekalo z mešanico P2. Pri tej mešanici smo uporabili enake sestavine kot pri mešanici P1 z izjemo cementa, ki je bil v tem primeru CEM II/B-M (W-L) 42,5 N. Količina superplastifikatorja iz prve mešanice je bila prevelika, kar se je odražalo na segregaciji, zato smo jo z 2,7 % mase cementa zmanjšali na 2% mase cementa.

Preglednica 13: Receptura mešanice P2

| MEŠANICA P1 | 1 m ³ BETONA (kg) | PROSTORNINSKA MASA (kg/m ³) | VOLUMEN (m ³) | 45 L BETONA (kg) |
|--------------------------|------------------------------------|--|------------------------------|------------------------|
| CEMENT | 400 | | | 18,000 |
| VODA | 160 | 1000 | 0,160 | 7,830 |
| VODOCEMENTNO RAZMERJE | 0,435 | | | 0,435 |
| SUPERPLASTIFIKATOR | 8 | 1080 | 0,0075 | 0,360 |
| AGREGAT 0/4 | 925 | 2680 | 0,345 | 41,625 |
| AGREGAT 4/8 | 278 | 2710 | 0,103 | 12,510 |
| AGREGAT 8/16 | 648 | 2710 | 0,239 | 29,160 |

Postopek mešanja je bil enak kot pri mešanici P1.

6.4 PREISKAVE SVEŽIH MEŠANIC

Preiskave na svežih mešanicah so temeljile predvsem na določevanju konsistence. Konsistenca je parameter, ki določa plastičnost betona. V splošnem velja, da naj bo beton take konsistence, da se ga lahko oblikuje z rokami. Konsistenco se določa s standardiziranimi metodami kot so metoda s posedom, metoda z razlezom ter metoda z zgoščevanjem pri vibriranju in s katerimi ugotovimo stopnjo konsistence (trdoplastična, serdnjeplastična in tekoča).

6.4.1 PREIZKUS RAZLEZA

Preizkus razleza je zelo preprost preizkus, ki je zasnovan na merjenju deformacij zbitega betonskega konusa. Konsistenca bi se morala gibati med mehkoplastično in tekočo ali celo zelo tekočo. To pomeni, da se giblje med stopnjama F5 in F6.

Preglednica 14: Prikaz povprečnega razleza betonskih mešanic

| MEŠANICA | DOSEŽEN POVPREČNI RAZLEZ (mm) | DOSEŽENA STOPNJA KONSISTENCE |
|----------|-------------------------------------|------------------------------------|
| P1 | 620 | F5 (tekoča) |
| P2 | 660 | F6 (zelo tekoča) |

6.4.2 PREIZKUS RAZLEZA S POSEDOM

Ta preiskava je zelo preprosta, vendar zelo učinkovita pri preverjanju sposobnosti tečenja sveže betonske mešanice. Uporabna je predvsem za samozgoščevalne in lahkovgradljive betone. Pri preizkusu smo v našem primeru merili čas, ki je bil potreben za končni razlez, nato pa smo izmerili še razlez in posed stožca.



Slika 23: Primer razleza s posedom

Preglednica 15: Čas potreben za končen razlez betonskih mešanic

| MEŠANICA | DOSEŽEN POVPREČNI ČAS (s) |
|----------|---------------------------------|
| P1 | 30,20 |
| P2 | 55,5 |

Preglednica 16: Prikaz rezultatov poseda betonskih mešanic

| MEŠANICA | DOSEŽEN POVPREČNI POSED (MM) |
|----------|------------------------------------|
| P1 | 208 |
| P2 | 225 |

Preglednica 17: Prikaz rezultatov razleza betonskih mešanic

| MEŠANICA | DOSEŽEN POVPREČNI RAZLEZ S POSEDOM (MM) |
|----------|--|
| P1 | 497 |
| P2 | 460 |

6.4.3 PREIZKUS ZGOŠČEVANJA PRI VIBRIRANJU

Ta metoda je uporabna za mešanice trde in srednjeplastične konsistence. Stopnja zgoščenosti pa se določa z razmerjem višin pred in po vibriranju betona v kovinskem kalupu. Ta metoda za naša primera ni merodajna, uporabili pa smo jo zgolj zaradi indikacije deleža zajetega zraka v lahkogradljivih betonih, ki se vgrajujejo brez zgoščevanja.

Preglednica 18: Prikaz povprečne stopnje zgoščenosti betonskih mešanic

| MEŠANICA | DOSEŽENA POVPREČNA ZGOSTITEV | DOSEŽEN RAZRED KONSISTENCE |
|----------|------------------------------------|----------------------------------|
| P1 | 1,03 | ni določljivo |
| P2 | 1,01 | ni določljivo |

Kot je razvidno iz preglednice 18 v našem primeru konsistenca z preskusom zgostitve ni določljiva, ker sta mešanici preveč tekoči.

6.4.4 PREIZKUS VSEBNOSTI ZRAKA

Vsak beton vsebuje določeno količino por in votlin. Največje pore nastanejo zaradi neustrezne oblike zrn, neustrezne granulometrijske sestave in slabega vgrajevanja. Manjše pore nastanejo zaradi zračnih mehurčkov, ki so posledica premajhne zgoščenosti, premalo vode ali pa izhlapele vode. Najmanjše pore nastajajo v spletu kristalne zgradbe, ki ne izpolnjuje vsega prostora. Te pore ne vplivajo na kvaliteto betona. Porozen beton ima nižjo trdnost, večjo

vodoprepustnost in je zato manj odporen proti mrazu, pa tudi proti drugim agresivnim sredstvom.

V okviru naših preiskav smo izmerili poroznosti, ki so prikazane v tabeli 19:

Preglednica 19: Prikaz poroznosti svežih betonskih mešanic

| MEŠANICA | DOSEŽENA POVPREČNA POROZNOST (%) |
|-----------------|---|
| P1 | 1,66 |
| P2 | 1,60 |

6.5 PREISKAVE STRJENEGA BETONA

6.5.1 NEGA VZORCEV

6.5.1.1 Nega za preizkus tlačne trdnosti

Vzorci, na katerih smo opravljali preizkus tlačnih trdnosti smo negovali na tri različne načine. Eno serijo vzorcev smo za 28 dni shranili v sušilnico in tam vzdrževali 40°C. Drugo serijo vzorcev smo dali v vodo, ki je imela konstantno sobno temperaturo (20±2°C), tretjo serijo pa smo postavili v prostor pod stopnice, ki vodijo proti vhodu v glavno stavbo FGG. Pri tretji seriji smo merili tudi relativno zračno vlažnost (80%) in temperaturo (2°C), vendar pa sta se ta dva parametra spreminjala iz ure v uro. Kar se temperature tiče, je bila povprečno okrog 0°C.

6.5.1.2 Nega za preizkus cepilne trdnosti

Preizkuse cepilnih nateznih trdnosti smo izvajali na preizkušancih iz kock in valjev.

Nega kock je potekala na podoben način kot nega za preizkus tlačnih trdnosti. Prvo serijo kock smo negovali najprej 14 dni v vodi nato smo kocke osušili do konstantne mase in jih pustili odležati na sobni temperaturi do starosti 28 dni (mešanica P1). Drugo serijo smo postavili v prostor pod stopnice, ki vodijo proti vhodu v fakulteto, skupaj s kockami za preizkus tlačnih trdnosti. Tretjo serijo pa smo za 28 dni shranili v sušilnico in tam vzdrževali 40°C.

Valje pa smo negovali samo tako, da smo jih najprej za 14 dni postavili v vodo nato smo jih osušili do konstantne mase in jih pustili odležati na sobni temperaturi, skupaj tudi 14 dni.

6.5.1.3 Nega za preizkus vodotesnosti

Nega za preizkus vodotesnosti je potekala na enak način kot nega za preizkus cepilne natezne trdnosti, saj so bili vsi vzorci isti.

6.5.2 TLAČNA TRDNOST

Tlačna trdnost je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev pri obravnavani starosti, praviloma pri starosti 28 dni. Primerjali smo tlačne trdnosti kock s stranico 150mm, izdelanih iz mešanic P1 in P2, v odvisnosti od različne nege. Pri mešanici P2 smo uporabili tudi tiste preizkušance, ki so segregirali zaradi prevelike količine dodanega superplastifikatorja.

Preglednica 20: Prikaz povprečnih tlačnih trdnosti v odvisnosti od nege

| MEŠANICA | NEGA | POVPREČNA DOSEŽENA TLAČNA TRDNOST (MPa) |
|----------|-------------------------------|---|
| P1 | 28 dni na hladnem (okrog 0°C) | 60,7 |
| | 28 dni sušilnica 40°C | 54,8 |
| | 28 dni v vodi | 68,4 |
| P2 | 28 dni v vodi segregirana | 55,6 |
| | 28 dni v vodi neselegirana | 57,1 |

Primerjava tlačnih trdnost nam pokaže, da najvišjo tlačno trdnost dosega mešanica P1, ki je bila v vodi 28 dni. Tak rezultat ni nič neobičajnega, saj pri preizkušancih, ki so bili izpostavljeni stalni vlagi, hidratizira večji del cementnih zrn in to privede do višjih rezultatov. V primeru mešanice P2 je zanimivo to, da razlika med segregirano in neselegirano mešanico ni velika, lahko rečemo, da je zanemarljiva saj znaša komaj 2,6%. Velika razlika pa je opazna pri obeh mešanicah v primeru preizkušancev, ki so bili ves čas v vodi in niso segregirali, kar 11,3MPa. Ta razlika se pojavi verjetno zaradi tega, ker je cement pri mešanici P1 sestavljen iz vsaj 95% klinkerja, cement pri mešanici P2 pa vsebuje mineralna dodatka apnenec in elektrofilterski pepel, pa tudi cement iz mešanice P1 je bolj fino mlet, kot cement iz mešanice P2.

6.5.3 UGOTAVLJANJE DINAMIČNEGA MODULA ELASTIČNOSTI S POMOČJO ULTRAZVOČNIH VALOV

Hitrost potovanja ultrazvočnih valov smo določili na treh betonskih prizmah dimenzij 400/100/100mm izdelanih iz mešanice P1. Starost prizem je bila 35 dni. V tabeli 21 so podane vrednosti, ki smo jih dobili:

Preglednica 21: Dosežene hitrosti ultrazvočnih valov

| PRIZMA | ČAS POTOVANJA ULTRAZVOKA (μ s) | HITROST ULTRAZVOKA (m/s) |
|--------|---|--------------------------------|
| 1 | 81,4 | 4914 |
| 2 | 81,1 | 4932 |
| 3 | 81,4 | 4914 |

Iz doseženih vrednosti lahko sklepamo, da gre za beton, ki je dobro vgrajen in kompakten, z minimalno količino šibkih mest, saj je hitrost ultrazvočnih valov precej višja kot 4570m/s, kar je pogoj za dobro vgrajene betone. Tak rezultat je zelo pomemben za lahkogradljive betone za katere se zahtevajo dobre mehanske lastnosti.

6.5.4 CEPILNA NATEZNA TRDNOST

Preizkuse cepilnih trdnosti smo izvajali zaradi opazovanj globine prodora vode v preizkušance, zaradi tega rezultati niso povsem merodajni, saj so bili preizkušanci vsaj delno zasičeni z vodo.

6.5.4.1 Cepilna natezna trdnost kock

Preglednica 22: cepilne trdnosti kock v odvisnosti od nege

| MEŠANICA | NEGA | POVPREČNA DOSEŽENA CEPILNA TRDNOST (MPa) |
|----------|--|--|
| P1 | 14 dni voda, osušeni do konstantne mase, ostalo odležali | 4,17 |
| | 28 dni na hladnem (okrog 0°C) | 2,87 |
| | 28 dni na toplem (okrog 40°C) | 4,08 |
| P2 | 14 dni voda, osušeni do konstantne mase, ostalo odležali, segregirana | 4,08 |
| | 14 dni voda, osušeni do konstantne mase, ostalo odležali, nese segregirana | 4,09 |

Preglednica 23: cepilne trdnosti kock v odvisnosti od napak v betonu

| MEŠANICA | NEGA | VRSTA NAPAKE | POVPREČNA DOSEŽENA CEPILNA TRDNOST (MPa) |
|----------|--|--------------|--|
| P1 | 14 dni voda, osušeni do konstantne mase, ostalo odležali | zračni žepi | 2,75 |
| | 14 dni voda, osušeni do konstantne mase, ostalo odležali | gnezda | 2,93 |

Iz tabele 22 in 23 je razvidno, da so cepilne trdnosti kock majhne, razlike pa so praktično zanemarljive. Vendar pa lahko opazimo bistveno zmanjšanje cepilne trdnosti pri kockah, ki so bile izpostavljene mrazu. Zmanjšanje cepilne trdnosti je verjetno posledica počasne

hidratacije cementa zaradi prenizke temperature in s tem povezane slabše trdnosti stičnega območja med vezivom in zni agregata. Prav tako je opazno odstopanje pri kockah v katerih so vgrajene napake (zračni žepi in gnezda) v primerjavi z ostalimi kockami. Napake v kockah privedejo do mehanskih oslabitev, kar se v tem primeru odraža v slabši cepilni trdnosti.

6.5.4.2 Cepilna natezna trdnost valjev

Za preizkus cepilne natezne trdnosti valjev smo uporabili dve vrsti valjev, ki pa smo jih pripravili iz mešanice P1. Prva skupina valjev je bila izvrtana iz plošče, v katero smo v enem primeru položili armaturo ϕ 8mm, v drugem pa armaturo ϕ 20mm, delež armature je bil v obeh primerih enak. Plošči sta bili dimenzij d/š/v 600/350/100mm. Obe plošči smo upogibno obremenili do sile 70kN. Druga skupina valjev je bila izvrtana iz plošče, v katero smo beton vgradili namenoma na tak način, da je segregiral. Daljša stranica plošče je bila obrnjena pravokotno na tla tako, da je plošča stala pokonci. Beton v spodnjem delu plošče je tako vseboval velik delež grobega agregata, zgornji del plošče pa je vseboval večji del finega agregata. Vsi valji so bili premera 150mm in višine 100mm. Valje, ki so vsebovali armaturo smo cepili na tak način, da je bila armatura vzporedno z ravnino razcepitve.

Preglednica 24: cepilne trdnosti valjev

| VALJ | POVPREČNA DOSEŽENA CEPILNA TRDNOST (MPa) |
|--------------------------------|---|
| Plošča z armaturo ϕ 8 | 4,28 |
| Plošča z armaturo ϕ 20 | 6,75 |
| Segregacija | 4,01 |

6.5.5 GLOBINA PRODORA VODE

Preiskave vodotesnosti so bile osrednji del našega eksperimentalnega dela. Preizkus poteka tako, da voda pod pritiskom 5-ih barov prodira v strjen beton 72ur. Pomembno je, da so preizkušanci enake starosti in enake vrste. Vsi preizkušanci so bili stari od 28 do 35 dni. Po

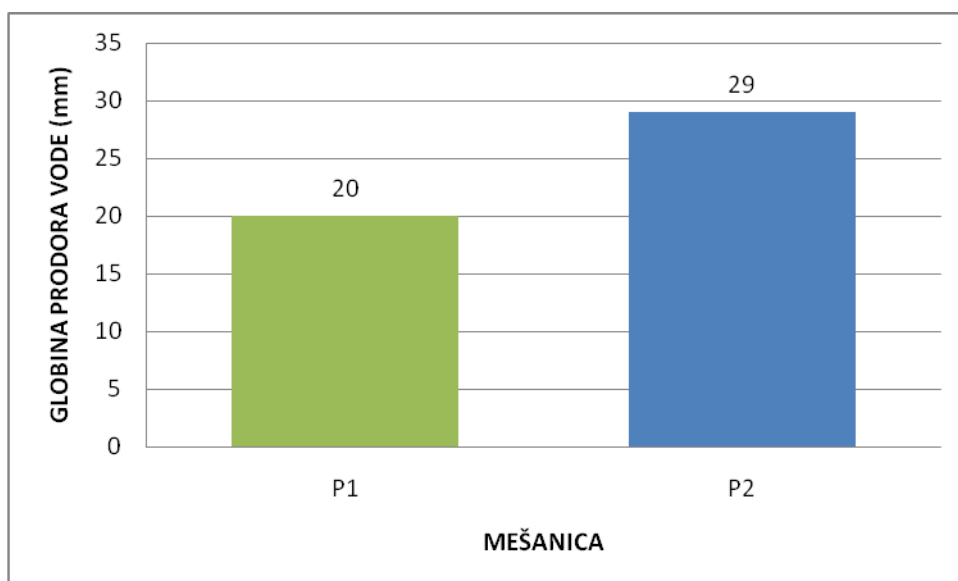
72 urah preizkušance vzamemo iz naprave in stehtamo, da ugotovimo količino absorbirane vode. Preizkušance nato razcepimo z cepilnim nateznim preskusom in izmerimo globino prodora vode.



Slika 24: Primer prodora vode v kocko

6.5.5.1 Primerjava vodotesnosti preizkušancev iz mešanic P1 in P2

Glavni namen teh preiskav je bilo ugotoviti, katera mešanica ima boljšo odpornost proti prodoru vode. Preizkušanci so bili standardnih dimenzij 150/150/150 mm. Rezultati preizkusa so prikazani na sliki 25:



Slika 25: Primerjava globine prodora vode med mešanicama P1 in P2

Rezultati kažejo, da je povprečna globina prodora vode v preizkušance pri mešanici P1 20,0mm, kar pomeni, da beton iz te mešanice ravno pade v stopnjo PV-III. Nekoliko slabše rezultate daje mešanica P2, saj je povprečna globina prodora vode 29,0mm. To pa pomeni, da ta mešanica pade v stopnjo PV-II. Mešanica P1 torej zadostuje potrebam gradnje najzahtevnejših objektov, pri katerih je zelo pomembno, da zagotovimo minimalen prodor vode skozi beton.

Povprečna količina vode, ki so jo preizkušanci absorbirali, pa je podana v tabeli 25:

Preglednica 25: Povprečna količina absorbirane vode preizkušancev iz mešanic P1 in P2.

| MEŠANICA | P1 | P2 |
|---|----|----|
| POVPREČNA KOLIČINA ABSORBIRANE VODE (g) | 38 | 30 |

Povprečno količino absorbirane vode smo dobili na podlagi tehtanja kock, ki so bile osušene do konstantne mase, nato pa smo stehali te kocke še enkrat, ko je bil opravljen preizkus vodotesnosti.

6.5.5.2 Vpliv napak na vodotesnost betona

Pri vgradnji betona lahko pride do napak, zato smo naredili preizkušance, v katere smo namerno vgradili napake oziroma šibka mesta. Vsi preizkušanci so bili iz mešanice P1. Zanimalo nas je, kako vplivajo na prodor vode gnezda in pa povečana poroznost betona oziroma zračni žepi. Naredili smo tudi preskus hladnih stikov. Hladne stike smo zabetonirali iz dveh plasti betona s časovnim zamikom enega dne.

a) Vpliv hladnih stikov na vodotesnost betona

Pri gradnji betonskih objektov, kjer ni mogoče vsega betona vgraditi naenkrat, beton vgrajujemo po slojih. Pogosto se sprašujemo, kakšno nosilnost in trajnost imajo ti sloji. Zato nas je zanimalo, kako se bo beton odzval na stiku dveh slojev pri preskusu vodotesnosti, saj pri delovanju vode na objekt voda lahko prodre v objekt ravno na stiku dveh slojev betona.

Pri eksperimentalnem delu v okviru naših raziskav smo izdelali opaž za betonsko steno, v katerega smo vgrajevali beton. Beton smo vgrajevali tako, da smo najprej vgradili eno plast, nato pa z zamikom enega dne drugo in tako naprej. S tem smo ustvarili hladne stike, saj je bila vsaka prejšnja plast že strjena, ko smo vgradili naslednjo. Ko smo vgradili zadnjo, četrto plast, smo beton pustili v opažu 7 dni, nato pa smo steno razopažali in izvrtali valje s premerom 150mm. Valji so bili izvrtani na tak način, da je šel stik dveh slojev čez polovico valja. Valje smo nato negovali 14 dni v vodi in 14 na zraku. Potem smo valje vstavili v napravo za preskušanje vodotesnosti .

Rezultat preizkusa je bil, da valji niso vzdržali pritiska 5 barov, s katerim je voda prodirala vanje. Takoj po vstavitvi v napravo in odprtju ventilov za vodo je vseh 9 valjev razklalo na dva dela in to točno na mestih stikov.



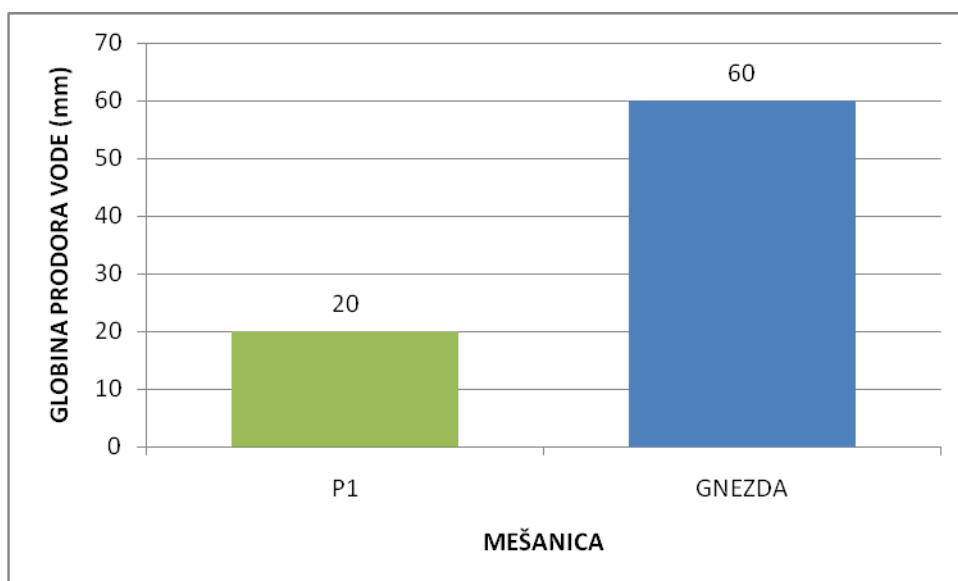
Slika 26: Primer razklanega valja po površini hladnega stika

Iz tega lahko sklepamo, da je pri gradnji betonskih objektov treba posvetiti veliko pozornost stikom med betonskimi plastmi. Najbolje je, da je hladnih stikov čim manj ali pa, da jih sploh ni. Hladni betonski stiki so zelo ranljivi, zato lahko vplivajo zelo negativno na objekte in njihovo okolico, kjer se zahteva vodotesnost zaradi prodora vode.

b) Vpliv gnezd na vodotesnost betona

Problem pri vgradnji betona je lahko nepravilno zgoščevanje betona. Zaradi malomarnosti in neizkušenosti delavcev se lahko pojavi problem, da se agregatna zrna med vibriranjem neenakomerno razporedijo po elementu. Zato se pojavijo gnezda grobozrnatega agregata, kar pa na vodotesnost lahko vpliva zelo negativno.

Preizkušance z gnezdi smo naredili tako, da smo v kalup postavili cev in prostor okrog cevi zapolnili z betonsko mešanico P1. V cev smo vgradili beton iz grobozrnatega agregata do približno $\frac{3}{4}$ višine kalupa, preostanek pa smo zapolnili z betonsko mešanico P1. Preizkušance smo nato negovali 14 dni v vodi in 14 na zraku. Pri starost 28 dni smo jih vstavili v napravo za preskušanje vodotesnosti. Preizkus poteka tako, da voda pod pritiskom 5-ih barov prodira v strjen beton 72ur. Nato z cepilnim nateznim preskusom preizkušanece razcepimo na dva dela in odčitamo globino vode, ki je vanj prodrla. Dobljene rezultate smo primerjali z rezultati na homogenih preizkušancih iz mešanice betona P1, saj smo preskuse šibkih mest v betonu izvajali z betonom mešanice P1.



Slika 27: Globina prodora vode zaradi gnezd

Rezultati kažejo, da je zaradi gnezd voda prodrla veliko globlje ko pri betonu brez njih. Iz tega lahko sklepamo, da je pri gradnji betonskih objektov treba posvetiti veliko pozornost kvaliteti vgradnje betona in usposobljenosti ljudi, ki opravljajo to delo. Najbolje je, da je gnezd čim manj ali pa, da jih sploh ni. Mesta z gnezdi so zelo ranljiva, zato lahko vplivajo zelo negativno na objekte in njihovo okolico, kjer se zahteva vodotesnost zaradi prodora vode.

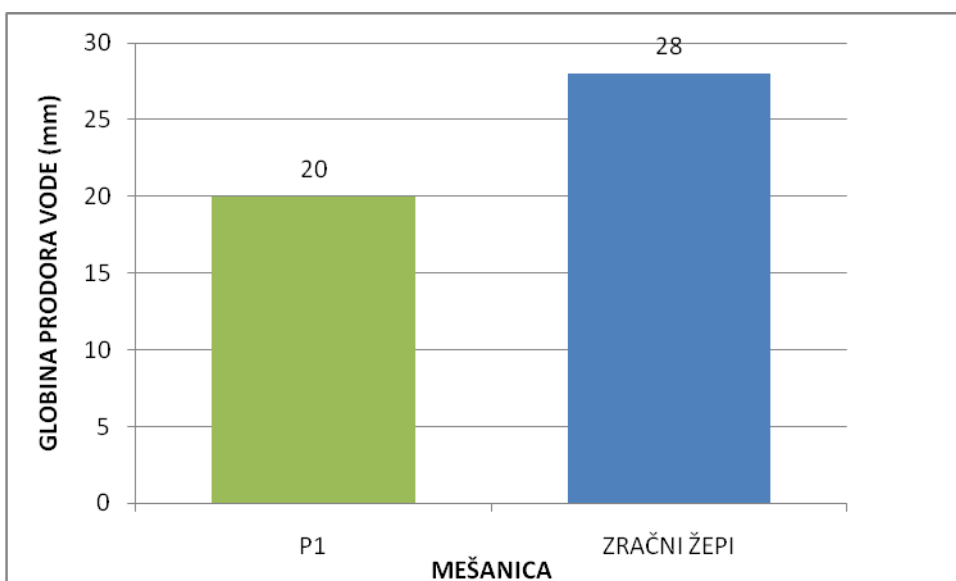
c) Vpliv zračnih žepov na vodotesnost betona

Zračne pore v betonu so ponavadi kroglaste oblike in negativno vplivajo predvsem na trdnost betona. Pore v betonu lahko nastanejo zaradi zajema zraka med mešanjem betonske mešanice in so velike okrog 3mm. V okviru naših preiskav smo hoteli povečati poroznost betona na tak način, da smo v kalup z mešanico vpihovali zrak pod pritiskom.



Slika 28: Vpihovanje zraka za nastanek zračnih žepov

Preizkušance smo negovali 14 dni v vodi in 14 na zraku. Pri starost 28 dni smo jih vstavili v napravo za preskušanje vodotesnosti. Preizkus poteka tako, da voda pod pritiskom 5-ih barov prodira v strjen beton 72ur. Nato s cepilnim nateznim preskusom preskušanec razcepimo na dva dela in odčitamo globino vode, ki je vanj prodrla. Dobljene rezultate smo primerjali z rezultati na preizkušancih iz homogene mešanice betona P1, saj smo preskuse šibkih mest v betonu izvajali z betonom mešanice P1.



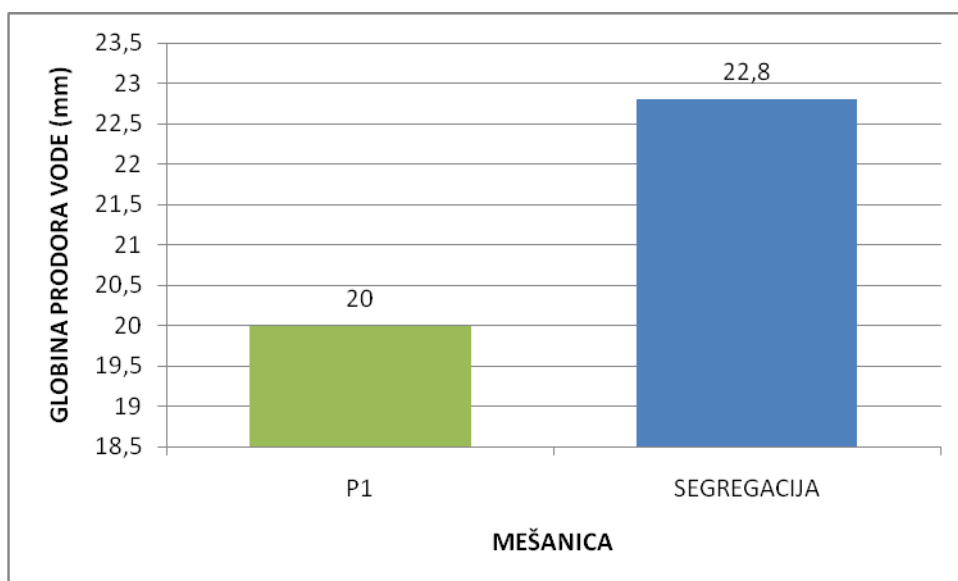
Slika 29: Globina prodora vode zaradi zračnih žepov

Rezultati kažejo, da so zračne pore v betonu vplivale na višji prodor vode v preizkušanece. Rezultat prodora vode v preizkušancih s povečanim številom zračnih por spada v razred PV-II, s tem pa ne izpolnjuje pogojev za betone zahtevnih objektov. Iz tega lahko sklepamo, da je pri gradnji betonskih objektov treba posvetiti veliko pozornost kvaliteti vgradnje betona. Najbolje je, da je zračnih žepov čim manj ali pa, da jih sploh ni. Mesta z zračnimi žepi lahko vplivajo zelo negativno na objekte in njihovo okolico, kjer se zahteva vodotesnost zaradi prodora vode.

d) Vpliv segregacije betona na njegovo vodotesnost

Segregacija je problem, ki se pojavi predvsem pri betonih, ki so preveč vibrirani ali pa vsebujejo preveliko količino vode in/ali superplastifikatorja.

V okviru naših preiskav smo izdelali ploščo oziroma steno, v katero smo beton vgradili namenoma na tak način, da je segregiral. Daljša stranica plošče je bila obrnjena pravokotno na tla tako, da je plošča stala pokonci. Beton v spodnjem delu plošče je tako vseboval veli delež grobega agregata, zgornji del plošče pa je vseboval večji del finega agregata. Ko smo ploščo razopazali smo iz nje izvrtali valje premera 150mm in višine 100mm. Valje smo nato negovali 14 dni v vodi in 14 na zraku. Potem smo valje vstavili v napravo za preskušanje vodotesnosti. Dobljene rezultate smo primerjali z rezultati na preizkušancih iz homogene mešanice betona P1, saj smo preizkuse šibkih mest v betonu izvajali z betonom mešanice P1.

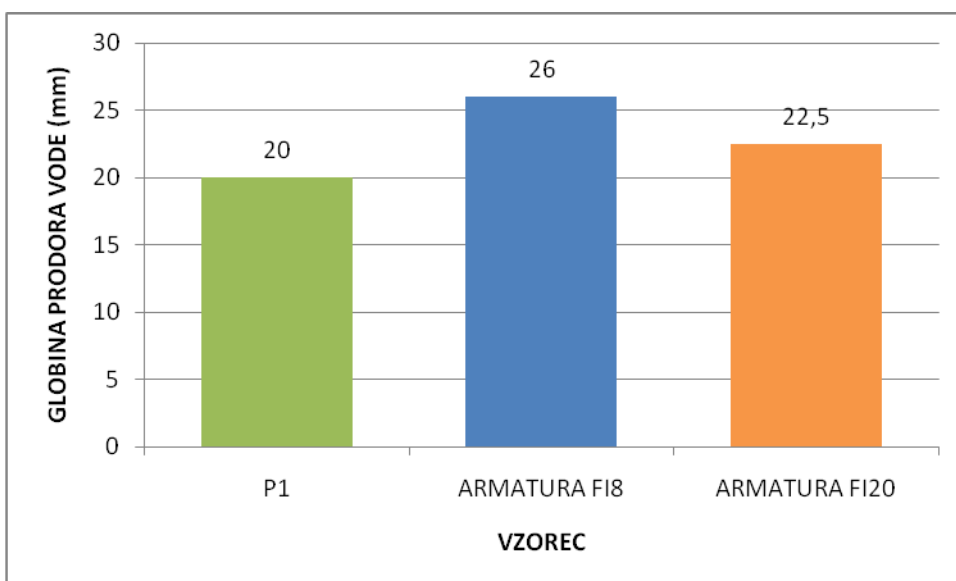


Slika 30: Globina prodora vode zaradi segregacije

Rezultati kažejo, da segregacija betona vpliva na višji prodor vode v preizkušanece. Rezultat prodora vode v segregiranih preizkušancih pade v razred PV-II, s tem pa ne izpolnjuje pogojev za betone zahtevnih objektov. Iz tega lahko sklepamo, da je pri gradnji betonskih objektov treba posvetiti veliko pozornost kvaliteti vgradnje betona. Najbolje je, da je segregacije sploh ni. Vendar pa tega z gotovostjo ne moremo trditi, saj je razlika zelo majhna, rezultati preizkušancev in mešanice, ki ni bila segregirana, pa so ravno na meji razreda PV-I. Verjetno bi morali izvesti večje število poskusov, da bi lahko z gotovostjo trdili, kako se segregiran beton upira prodoru vode.

e) Vpliv razpok na vodotesnost betona

Vpliv razpok na vodotesnost betona smo preizkušali na valjih višine 100mm in premera 150mm. Valji so bili izvrtani iz plošče v katero smo v enem primeru položili armaturo ϕ 8mm, v drugem pa armaturo ϕ 20mm (odstotek armature je bil v obeh primerih enak). Plošči sta bili dimenzij d/š/v 600/350/100mm, izdelani pa sta bili iz mešanice P1. Obe plošči smo po 7-ih dneh upogibno obremenili do sile 70kN, in iz njih izvrtali valje. Valji so bili izvrtani na mestu upogibne obremenitve. Valje smo po končani negi, ki je opisana v poglavju 6.5.1, vstavili v napravo za preizkušanje vodotesnosti betona in dobili naslednje rezultate, ki smo jih primerjali za homogeno mešanico P1 brez napak:



Slika 31: Vpliv razpok na vodotesnost valjev v primerjavi z mešanico P1, ki je bila brez napak

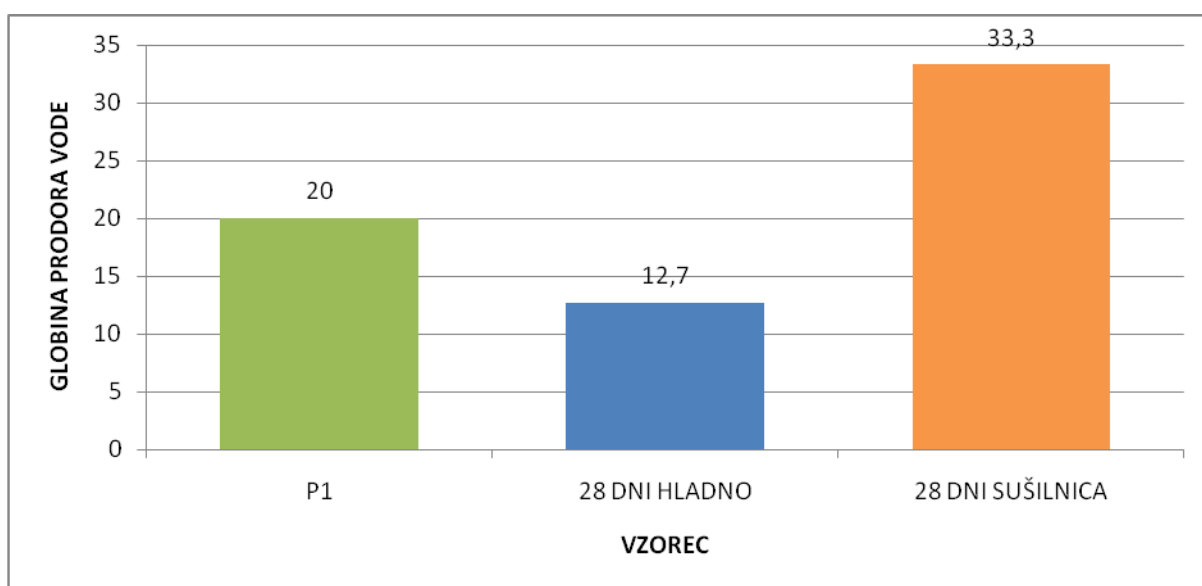
Rezultati kažejo, da pri valjih, ki so vsebovali manjšo armaturo, voda prodre veliko višje. Ne smemo pa zanemariti dejstva, da so se v primeru armature $\phi 20\text{mm}$ pojavile vidne razpoke, ki so segale do polovice debeline plošče, ko smo jo upogibno obremenili. Pri plošči, ki je vsebovala armaturo $\phi 8\text{mm}$ pa vidnih razpok sploh ni bilo. To dejstvo bi se dalo razložiti s tem, da so imeli vzorci z armaturo $\phi 8\text{mm}$ veliko več mikro razpok kot vzorci z armaturo $\phi 20\text{mm}$.



Slika 32: Upogibna obremenitev plošče iz katere smo izvrtali valje

f) Vpliv nege na vodotesnost vzorcev

Nega je pomemben faktor, ki vpliva na vodotesnost betona, zato smo preizkusili tudi to opcijo. Rezultati preiskave kažejo, da so preizkušanci, ki so bili izpostavljeni nizkim temperaturam (okrog 0°C) in relativni zračni vlažnosti okrog 80% veliko bolj odporni proti prodoru vode, kot pa tisti, ki so bili negovani 14 dni v vodi in nato osušeni do konstantne mase, ostalo dobo pa so odležali na zraku do starosti 28 dni. Rezultati so prikazani na sliki 26:



Slika 33: Primerjava globine prodora vode v odvisnosti od nege

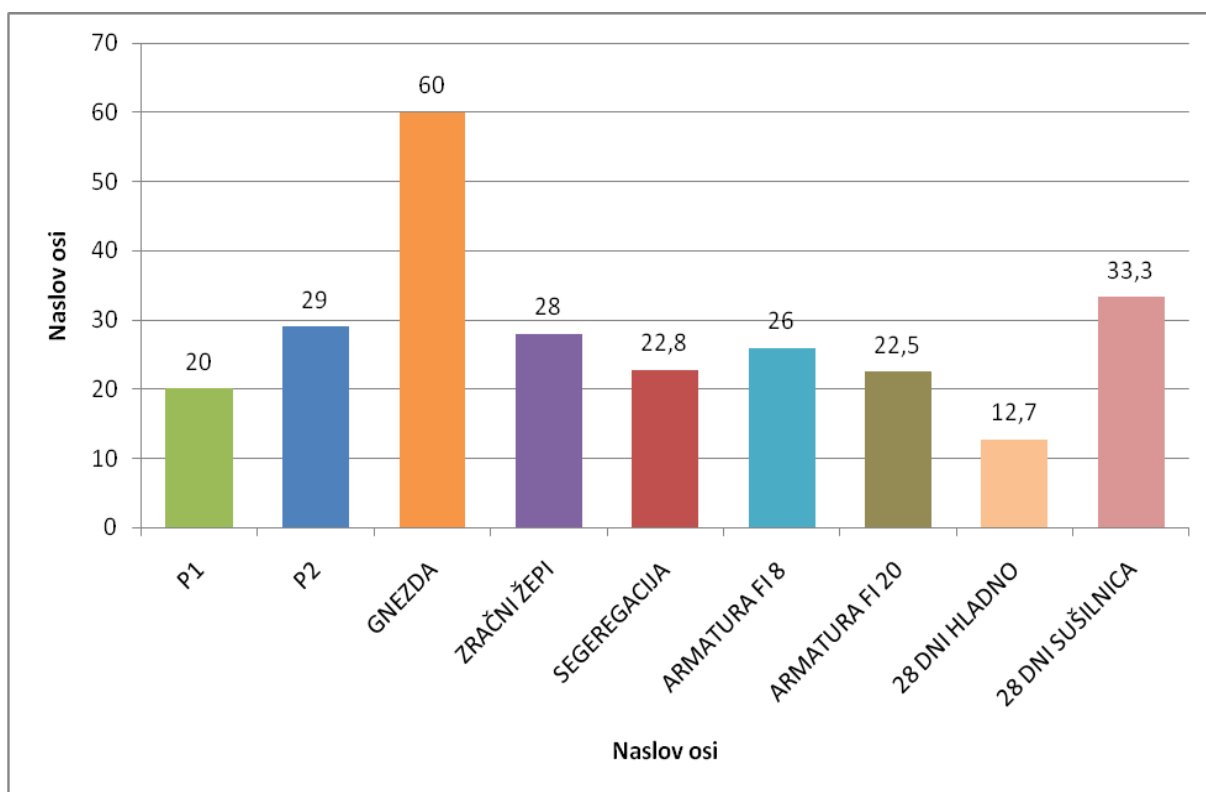
Pričakovali smo, da bo prodor vode pri preizkušancih, ki so odležali pri 0°C večji, kot pri primerjalnih preizkušancih P1, saj je pri nizkih temperaturah potek hidratacije cementa upočasnjena. Ker pa samo ti preizkušanci pred preskusom vodotesnosti niso bili osušeni do konstantne mase, bi lahko bila razlog za dobljene rezultate voda, ki je bila že prisotna v preizkušancih.

7 SKLEP

Betonska mešanica P1 je imela tekočo konsistenco (stopnja razleza F5), mešanica P2 pa je imela zelo tekočo konsistenco (stopnja razleza F6). Med lahkovgradljive betone lahko uvrstimo beton iz mešanice P2, saj je njegov posed znaša 225mm.

Pri preiskavah tlačne trdnosti je manjše vrednosti dosegel beton iz mešanice P2, zaradi uporabljene vrste cementa. Povprečna tlačna trdnost betona iz mešanice P2 je bila manjša za 16,5%. Prav tako je beton iz mešanice P1 dosegal boljše natezne trdnosti, saj so bile vrednosti višje za 2%. Vendar pa je 2 % tako majhna vrednost, da težko sodimo o tem, katera mešanica je v tem primeru boljša.

Rezultati preizkusa vodotesnosti pa so pokazali, da ima mešanica P1 veliko večji odpor proti prodoru vode, kot mešanica P2, razlika je kar za 45%. Problem pa se pokaže pri šibkih mestih. Vsi preizkušanci, pri katerih smo testirali šibka mesta, so bili izdelani iz mešanice P1. V primeru gnezd je bil prodor vode v preizkušance relativno velik in je znašal kar 60mm, poleg tega pa preizkušanci, ki so bili namenjeni preizkusu hladnih stikov sploh niso vzdržali pritiska vode, ki je bil potreben za izvedbo preizkusa. Nezanemarljiva odstopanja pa se pojavijo tudi pri preizkušancih, ki so vsebovali zračne žepe, saj je bila globina prodora vode večja za 40%. Bolje so se odrezali segregirani preizkušanci, pri katerih je bil prodor vode večji za 14%.V primeru preizkusa vodotesnosti v odvisnosti od nege pa se je zelo dober rezultat pokazal pri preizkušancih, ki so bili izpostavljeni nizkim temperaturam, vendar je potrebno te rezultate jemati z rezervo. Dosežene vrednosti prodora vode so prikazane na sliki 34:



Slika 34: Primerjava vodotesnosti vseh vzorcev

Če primerjamo obe mešanici med seboj vidimo, da je mešanica P1 precej boljša od mešanice P2 v vseh pogledih. K temu pa pripomore dejstvo, da smo za mešanico P1 uporabili cement, ki ga uporabljajo za najzahtevnejše inženirske objekte, cement, ki pa smo ga uporabili v mešanici P2, pa vsebuje poleg klinkerja še relativno velik delež mineralnih dodatkov.

8 VIRI

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

Žarnić R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V. 2009/2010. Gradiva vaje. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 146 str

Žnidaršič M. Vpliv konsistence, aeriranja, in trajanja mokre nege na odpornost betona z večjim deležem kamene moke proti zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli. Ljubljana , diplomska naloga, Ljubljana Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 92 str

Kuzmanović S. Vpliv šibkih mest v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode. Ljubljana, diplomska naloga Ljubljana Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 123 str

Salonit Anhovo d.d. Gradbeni materiali – Cementi,
www.salonit.si (15.3.2010)

Lafarge cement d.o.o., Izdelki v rinfuzi,
www.lafarge.si (15.3.2010)

Sika d.o.o., Slovenija, Dodatki za betone in malte,
www.sika.si (15.3.2010)