

ZAKLJUČNO POROČILO
O REZULTATIH OPRAVLJENEGA RAZISKOVALNEGA DELA
NA PROJEKTU V OKVIRU CILJNEGA RAZISKOVALNEGA
PROGRAMA (CRP) »KONKURENČNOST SLOVENIJE 2006 – 2013«

I. Predstavitev osnovnih podatkov raziskovalnega projekta

1. Naziv težišča v okviru CRP:

Povezovanje ukrepov za doseganje trajnostnega razvoja

2. Šifra projekta:

V2-0554

3. Naslov projekta:

Konstruktivne lastnosti betonov in pronicanje vode skozi betonske strukture

3. Naslov projekta

3.1. Naslov projekta v slovenskem jeziku:

Konstruktivne lastnosti betonov in pronicanje vode skozi betonske strukture

3.2. Naslov projekta v angleškem jeziku:

Constructional properties of concrete and water leakage through concrete structure

4. Ključne besede projekta

4.1. Ključne besede projekta v slovenskem jeziku:

sestava betona, lastnosti svežega betona, mehanske lastnosti strjenega betona, prepustnost za vodo, vpliv napak, vpliv poškodb, vpliv nege, hladni stiki

4.2. Ključne besede projekta v angleškem jeziku:

concrete composition, fresh concrete properties, hardened concrete mechanical properties, water permeability, influence of defects, influence of curing, cold joints

5. Naziv nosilne raziskovalne organizacije:

ZVD Zavod za varstvo pri delu d.d., Ljubljana

5.1. Seznam sodelujočih raziskovalnih organizacij (RO):

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Institut "Jožef Stefan", Ljubljana

6. Sofinancer/sofinancerji:

Ministrstvo za okolje in prostor, Uprava RS za jedrsko varnost

7. Šifra ter ime in priimek vodje projekta:

21540

Marko Giacomelli

Datum: _____

Podpis vodje projekta:

Podpis in žig izvajalca:

II. Vsebinska struktura zaključnega poročila o rezultatih raziskovalnega projekta v okviru CRP

1. Cilji projekta:

1.1. Ali so bili cilji projekta doseženi?

- a) v celoti
 b) delno
 c) ne

Če b) in c), je potrebna utemeljitev.

Preiskave na reaktorju TRIGA Mark II v Podgorici so pokazale, da na preskušancih, ki še dovolj realno predstavljajo betonski material (debelina preskušanca 10 cm), z nevtronskim slikanjem ni mogoče ugotoviti globino prodora vode in vodni profil na preskušancih, ki so bili predhodno 72 ur izpostavljeni vodi pod pritiskom 5 barov. Se pa je globina prodora vode in oblika srednjega profila določala na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, z metodo razcepa preskušanca in fotografiranja preloma.

1.2. Ali so se cilji projekta med raziskavo spremenili?

- a) da
 b) ne

Če so se, je potrebna utemeljitev:

2. Vsebinsko poročilo o realizaciji predloženega programa dela¹:

Poročilo o rezultatih preiskav na UL FGG

Namen preiskav opravljenih na UL FGG je bil določiti bistvene mehanske karakteristike 5 sestav betonskih mešanic, ki bi, glede na dosegljive podatke iz tuje literature, lahko bile primerne za armiranobetonske silose in vsebnike odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov v Vrbini pri Krškem. Poleg tega smo želeli ugotoviti, kako različne napake, šibka mesta, neoptimalni pogoji okolja in razpoke, ki jih zaradi tehnologije gradnje armiranobetonskih elementov odlagališča lahko realno pričakujemo, vplivajo na spremembo (predvsem poslabšanje) odpornosti betona proti prodoru vode pod pritiskom 5 barov. Preiskave so potekale v skladu z veljavnimi slovenskimi standardi – skupina standardov SIST EN 12350, skupina standardov SIST EN 12390 ter standard SIST 1026, kjer smo pri preiskavi zmrzovanja/tajanja število ciklov povečali na 550 (namesto običajnih 100 do 150 ciklov).

Potek in rezultati opravljenih preiskav so obsežno opisani v treh diplomskih nalogah s področja raziskovalnega projekta:

KUZMANOVIČ, Slaviša. Vpliv šibkih mest v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode. Diplomaska naloga, UL FGG, oktober 2009 (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Čepon, F.)

BIRK, Igor. Odpornost proti prodoru vode za lahkogradljiv beton iz drobljenega apnenčevega agregata. Diplomaska naloga, UL FGG, april 2010 (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Čepon, F.)

KOŽELJ, Gašper. Odpornost proti prodoru vode za lahkogradljiv beton iz savskega proda iz krške doline. Diplomaska naloga, UL FGG, april 2010 (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Čepon, F.)

V nadaljevanju podajamo le bistvene rezultate in ugotovitve za 5 različnih betonskih mešanic. Predstavljeni rezultati so povprečne vrednosti karakteristik, ki so bile določene na vsaj 3 preskušancih.

MEŠANICA 1 - primerjalna

Sestava: 400 kg CEM II/A-M(LL-S) 42,5R proizvajalca Salomit Anhovo, apnenčev agregat Laže, vodo-cementno razmerje 0,55

Lastnosti sveže mešanice: posed 170 mm, razlez s posedom 300 mm, razlez 520 mm, stopnja zgoščenosti 1,04, delež zraka 1,9%

Lastnosti strjenega betona: tlačna trdnost po 7 dneh 39 MPa, tlačna trdnost po 28 dneh 50 MPa, cepilna natezna trdnost po 28 dneh 5,7 MPa, globina prodora vode 42,5 mm (stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-I), koeficient prepustnosti za vodo $K=2,13 \cdot 10^{-10}$ m/s.

MEŠANICA 2 – referenčna

Sestava: 400 kg CEM II/A-M(LL-S) 42,5R proizvajalca Salomit Anhovo, apnenčev agregat Laže, vodo-cementno razmerje 0,4 – dodan superplastifikator

Lastnosti sveže mešanice: posed 216 mm, razlez s posedom 473 mm, razlez 602 mm,

¹ Potrebno je napisati vsebinsko raziskovalno poročilo, kjer mora biti na kratko predstavljen program dela z raziskovalno hipotezo in metodološko-teoretičen opis raziskovanja pri njenem preverjanju ali zavračanju vključno s pridobljenimi rezultati projekta.

stopnja zgoščenosti 1,04, delež zraka 1,8%

Lastnosti strjenega betona: tlačna trdnost po 7 dneh 62 MPa, tlačna trdnost po 28 dneh 72 MPa, upogibna trdnost po 28 dneh 7 MPa, cepilna natezna trdnost po 28 dneh 5,8 MPa, modul elastičnosti po 28 dneh 46 GPa, Poissonov koeficient po 28 dneh 0,25, prostorninska masa 2440 kg/m³, globina prodora vode 22 mm (stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-II), koeficient prepustnosti za vodo $K=5,42 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Povečanje globine prodora vode in koeficienta prepustnosti zaradi napak, šibkih mest ali neoptimalne nege (faktor povečanja ali zmanjšanja glede na idealne razmere – glede na koeficient prepustnosti $K=5,42 \cdot 10^{-11}$ m/s – je naveden na koncu):

Segregacija - globina prodora vode 53,2 mm; $K=2,18 \cdot 10^{-10}$ m/s; faktor 2,4.

Zračni žepi - globina prodora vode 32,6 mm; $K=8,18 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 1,5.

Hladni stiki - globina prodora vode 87,9 mm; $K=5,96 \cdot 10^{-10}$ m/s; faktor 4,0.

Gnezda - globina prodora vode 50 mm; $K=1,93 \cdot 10^{-10}$ m/s; faktor 3,6.

2,3% armiranje - armatura FI8 - globina prodora vode 63 mm; $K=3,06 \cdot 10^{-10}$ m/s; faktor 5,7.

2,7% armiranje - armatura FI20 - globina prodora vode 60 mm; $K=2,78 \cdot 10^{-10}$ m/s; faktor 5,1.

Nizka temperatura (0C)* - globina prodora vode 18 mm; $K=2,5 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 0,5.

Povišana temperatura (40C) - globina prodora vode 31,3 mm; $K=7,56 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 1,4.

550 ciklov zmrzovanje/tajanje - globina prodora vode 15 mm; $K=1,74 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 0,3

*Pri negi vzorcev pri nizkih temperaturah le te nismo sušili v sušilnici preden smo jih izpostavili vodi pod pritiskom. Zato so dobljeni rezultati lahko posledica relativno velike vlažnosti vzorcev pred preiskavo.

MEŠANICA 2 a– primerjalna

Sestava: 330 kg CEM II/A-M(LL-S) 42,5R proizvajalca Salonit Anhovo, 170 kg elektrofiltrskega pepela Trbovlje, apnenčev agregat Laže, vodo-vezivno razmerje 0,4 – dodan superplastifikator

Lastnosti sveže mešanice: posed 238 mm, razlez s posedom 527 mm, razlez 606 mm, stopnja zgoščenosti 1,02, delež zraka 2,7%

Lastnosti strjenega betona: tlačna trdnost po 7 dneh 76 MPa, tlačna trdnost po 28 dneh 85 MPa, cepilna natezna trdnost po 28 dneh 5,8 MPa, modul elastičnosti po 28 dneh 46 GPa, Poissonov koeficient po 28 dneh 0,25, globina prodora vode 14 mm (stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-III), koeficient prepustnosti za vodo $K=1,98 \cdot 10^{-11}$ m/s.

MEŠANICA 4– osnovna

Sestava: 400 kg CEM I 42,5R proizvajalca Cementarna Trbovlje - Lafarge, agregat savski prod iz krške kotline, vodo-cementno razmerje 0,4 – dodan superplastifikator

Lastnosti sveže mešanice: posed 208 mm, razlez s posedom 497 mm, razlez 620 mm, stopnja zgoščenosti 1,03, delež zraka 1,7%

Lastnosti strjenega betona: tlačna trdnost po 28 dneh 68 MPa, cepilna natezna trdnost po 28 dneh 4,2 MPa, modul elastičnosti po 28 dneh 34 GPa, Poissonov koeficient po 28 dneh 0,21, globina prodora vode 20 mm (stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-III), koeficient prepustnosti za vodo $K=3,08 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Povečanje globine prodora vode in koeficienta prepustnosti zaradi napak, šibkih mest ali neoptimalne nege (faktor povečanja ali zmanjšanja glede na idealne razmere – glede na koeficient prepustnosti $K=3,08 \cdot 10^{-11}$ m/s – je naveden na koncu):

Segregacija - globina prodora vode 22,8 mm; $K=4,01 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 1,3.
Zračni žepi - globina prodora vode 28,0 mm; $K=6,05 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 2,0.
Hladni stiki - preskušanci so se zaradi pritiska vode 5 barov razcepili - preiskave nismo mogli opraviti
Gnezda - globina prodora vode 60 mm; $K=2,78 \cdot 10^{-10}$ m/s; faktor 9,0.
2,3% armiranje - armatura FI8 - globina prodora vode 26 mm; $K=5,22 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 1,7.
2,7% armiranje - armatura FI20 - globina prodora vode 22,5 mm; $K=3,91 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 1,27.
Nizke temperature* - globina prodora vode 12,7 mm; $K=1,24 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 0,4.
Visoke temperature - globina prodora vode 33,3 mm; $K=8,56 \cdot 10^{-11}$ m/s; faktor 2,77.
550 ciklov zmrzovanje/tajanje - globina prodora vode 95 mm; $K=6,96 \cdot 10^{-10}$ m/s; faktor 22,6.
*Pri negi vzorcev pri nizkih temperaturah le te nismo sušili v sušilnici preden smo jih izpostavili vodi pod pritiskom. Zato so dobljeni rezultati lahko posledica relativno velike vlažnosti vzorcev pred preiskavo.

MEŠANICA 5 – primerjalna

Sestava: 400 kg CEM II/B-M(W-L) 42,5N proizvajalca Cementarna Trbovlje - Lafarge, agregat savski prod iz krške kotline, vodo-cementno razmerje 0,4 – dodan superplastifikator

Lastnosti sveže mešanice: posed 225 mm, razlez s posedom 460 mm, razlez 660 mm, stopnja zgoščenosti 1,01, delež zraka 1,6%

Lastnosti strjenega betona: tlačna trdnost po 28 dneh 57 MPa, cepilna natezna trdnost po 28 dneh 4,1 MPa, globina prodora vode 29 mm (stopnja odpornosti proti prodoru vode PV-II), koeficient prepustnosti za vodo $K=6,49 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Na podlagi primerjave rezultatov med osnovnima mešanicama MEŠANICA 2 (drobljen agregat) in MEŠANICA 4 (savski prod) bi lahko na prvi pogled zaključili, da je beton iz savskega proda manj prepusten od betona iz drobljenega agregata. Razlog je bistveno bolj neprepustno cementno vezivo pri betonu iz proda, ker je bil pri MEŠANICI 4 uporabljen čisti portland cement. V bistvu pa je varnost betonske pregrade v odlagališču večja, če uporabimo MEŠANICO 2 iz drobljenega agregata. Pri tem betonu smo namreč dosegli dovolj veliko odpornost proti prodoru vode tudi čez hladne stike, med tem ko so se preskušanci s savskim prodom razcepili samo zaradi delovanja pritiska vode 5 barov. Poleg tega beton MEŠANICE 2 celo po 550 ciklih zmrzovanja/tajanja ni utrpel poškodb, pri betonu MEŠANICE 4 pa so se poškodbe že oblikovale, kar kaže skoraj 23x večji koeficient propustnosti, v primerjavi z referenčno vrednostjo dobljeno na nepoškodovanem primerjalnem preskušancu.

3. Izkoriščanje dobljenih rezultatov:

3.1. Kakšen je potencialni pomen² rezultatov vašega raziskovalnega projekta za:

- a) odkritje novih znanstvenih spoznanj;
- b) izpopolnitev oziroma razširitev metodološkega instrumentarija;
- c) razvoj svojega temeljnega raziskovanja;
- d) razvoj drugih temeljnih znanosti;
- e) razvoj novih tehnologij in drugih razvojnih raziskav.

3.2. Označite s katerimi družbeno-ekonomskimi cilji (po metodologiji OECD-ja) sovpadajo rezultati vašega raziskovalnega projekta:

- a) razvoj kmetijstva, gozdarstva in ribolova - Vključuje RR, ki je v osnovi namenjen razvoju in podpori teh dejavnosti;
- b) pospeševanje industrijskega razvoja - vključuje RR, ki v osnovi podpira razvoj industrije, vključno s proizvodnjo, gradbeništvom, prodajo na debelo in drobno, restavracijami in hoteli, bančništvom, zavarovalnicami in drugimi gospodarskimi dejavnostmi;
- c) proizvodnja in racionalna izraba energije - vključuje RR-dejavnosti, ki so v funkciji dobave, proizvodnje, hranjenja in distribucije vseh oblik energije. V to skupino je treba vključiti tudi RR vodnih virov in nuklearne energije;
- d) razvoj infrastrukture - Ta skupina vključuje dve podskupini:
 - transport in telekomunikacije - Vključen je RR, ki je usmerjen v izboljšavo in povečanje varnosti prometnih sistemov, vključno z varnostjo v prometu;
 - prostorsko planiranje mest in podeželja - Vključen je RR, ki se nanaša na skupno načrtovanje mest in podeželja, boljše pogoje bivanja in izboljšave v okolju;
- e) nadzor in skrb za okolje - Vključuje RR, ki je usmerjen v ohranjanje fizičnega okolja. Zajema onesnaževanje zraka, voda, zemlje in spodnjih slojev, onesnaženje zaradi hrupa, odlaganja trdnih odpadkov in sevanja. Razdeljen je v dve skupini:
- f) zdravstveno varstvo (z izjemo onesnaževanja) - Vključuje RR - programe, ki so usmerjeni v varstvo in izboljšanje človekovega zdravja;
- g) družbeni razvoj in storitve - Vključuje RR, ki se nanaša na družbene in kulturne probleme;
- h) splošni napredek znanja - Ta skupina zajema RR, ki prispeva k splošnemu napredku znanja in ga ne moremo pripisati določenim ciljem;
- i) obramba - Vključuje RR, ki se v osnovi izvaja v vojaške namene, ne glede na njegovo vsebino, ali na možnost posredne civilne uporabe. Vključuje tudi varstvo (obrambo) pred naravnimi nesrečami.

² Označite lahko več odgovorov.

3.3. Kateri so **neposredni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

Opravljenе preiskave vpliva različnih napak, šibkih mest ali neoptimalne nege betona so, glede na dosegljive podatke v literaturi, skoraj zagotovo prve tovrstne preiskave na betonih iz domačih materialov. Poleg tega tudi v dostopni tuji literaturi nismo zasledili rezultatov podobnih preiskav. Opravljenе preiskave so razkrile tudi nekaj pomanjkljivosti pri zasnovi preiskav armiranobetonskih elementov. Pokazalo se je, da bi bilo potrebno do oblikovanja razpok obremeniti večje (realnejše) upogibne elemente tipa plošča in iz njih izvrtati valje za preskus vpliva velikosti razpok na prepustnost betona za vodo pod pritiskom. Poleg tega je potrebno tovrstne preiskave opraviti na večjem številu preskušancev. Rezultati kažejo, da so hladni stiki posebej kritični pri betonu iz rečnega proda, zato se tovrstni beton v primerih, kjer se zahteva izolativna vloga betonske inženirske pregrade (odlagališča, rezervoarji, čistilne naprave, ...) naj ne bi uporabljal.

Rezultati opravljenih preiskav so vsekakor zanimivi za gradbeno prakso, saj kažejo, kako napake, šibka mesta ali neoptimalna nega vplivajo na prepustnost betonske inženirske pregrade. Tovrstne pregrade se veliko uporabljajo tudi za izboljšave v okolju (čistilne naprave) ter pri skrbi za okolje in zdravje ljudi (odlagališče radioaktivnih odpadkov, konstrukcija nuklearne elektrarne, ...). Rezultati pa so uporabni tudi za optimalno načrtovanje določenih inženirskih vojaških objektov.

3.4. Kakšni so lahko **dolgoročni rezultati** vašega raziskovalnega projekta glede na zgoraj označen potencialni pomen in razvojne cilje?

Rezultati opravljenih preiskav so pokazali, da so rezultati preskušanja betonov v skladu z zahtevami veljavnih standardov velikokrat preoptimistični in ne odražajo dejanskega stanja betona vgrajenega v objekte. Zato bi bilo smiselno spremeniti standardizacijo tako, da se bistvene preiskave opravljajo na preskušancih odvzetih iz realnih objektov, kjer je to iz varnostnega vidika možno. Tako bi dobili realno oceno o kvaliteti betona v konstrukciji in se s tem lahko izognili tudi prehitrim poškodbam pomembne javne infrastrukture grajene iz armiranega betona.

3.5. Kje obstaja verjetnost, da bodo vaša znanstvena spoznanja deležna zaznavnega odziva?

- a) v domačih znanstvenih krogih;
- b) v mednarodnih znanstvenih krogih;
- c) pri domačih uporabnikih;
- d) pri mednarodnih uporabnikih.

3.6. Kdo (poleg sofinancerjev) že izraža interes po vaših spoznanjih oziroma rezultatih?

ARAO, IBE

3.7. Število diplomantov, magistrov in doktorjev, ki so zaključili študij z vključenostjo v raziskovalni projekt?

3

4. Sodelovanje z tujimi partnerji:

4.1. Navedite število in obliko formalnega raziskovalnega sodelovanja s tujimi raziskovalnimi inštitucijami.

4.2. Kakšni so rezultati tovrstnega sodelovanja?

5. Bibliografski rezultati³ :

Za vodjo projekta in ostale raziskovalce v projektni skupini priložite bibliografske izpise za obdobje zadnjih treh let iz COBISS-a) oz. za medicinske vede iz Inštituta za biomedicinsko informatiko. Na bibliografskih izpisih označite tista dela, ki so nastala v okviru pričujočega projekta.

³ Bibliografijo raziskovalcev si lahko natisnete sami iz spletne strani: <http://www.izum.si/>

6. Druge reference⁴ vodje projekta in ostalih raziskovalcev, ki izhajajo iz raziskovalnega projekta:

BOKAN-BOSILJKOV, Violeta. Priprava podatkov o prepustnosti betonov za vodo za projektno nalogo:

»Analiza obstojnosti in puščanja umetnih pregrad ter identifikacija ključnih parametrov migracije radionuklidov v poroznih snoveh in njihov vpliv na varnost odlagališč radioaktivnih odpadkov«.

PRILOGE:

- BOKAN-BOSILJKOV, Violeta, ŽARNIČ, Roko, COTIČ, Zvonko, KOGLOT, Karmen. Experience with mixing, casting and testing : SCC in Slovenia. *Concr. plant int.* (Print), april 2009, št. 2, str. 176-182, ilustr. [COBISS.SI-ID 4582241]
- BOKAN-BOSILJKOV, Violeta. Materiali s cementnim vezivom in betonski elementi v odlagališču radioaktivnih odpadkov. V: Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije, 2009, str. 106-116, ilustr. [COBISS.SI-ID 4580193]
- BOKAN-BOSILJKOV, Violeta, KODELJA, Matej, MRZLIKAR, Metod, VUK, Tomaž. Vpliv različnih superplastifikatorjev na lastnosti lahkovgradljivih betonov. V: Konferenca Beton 21. stoletja, Lipica, marec 2010. Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije, 2010, str. 40-47, ilustr. [COBISS.SI-ID 34022405]
- HOČEVAR, Andraž, BOKAN-BOSILJKOV, Violeta, KAVČIČ, Franci. Uporabna vrednost meritev reoloških lastnosti svežega betona. V: Konferenca Beton 21. stoletja, Lipica, marec 2010. Zbornik referatov. Ljubljana: ZBS, Združenje za beton Slovenije, 2010, str. 95-103, ilustr. [COBISS.SI-ID 34030597]
- BOKAN-BOSILJKOV, Violeta. Zahteve za betone za odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov = Requirements regarding cement based materials in repositories for low and intermediate level radioactive wastes. V: ZAJC, Andrej (ur.). *Betoni za ekološke gradnje : zbornik gradiv in referatov.* Ljubljana: IRMA, Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije, 2009, str. 53-61, ilustr. [COBISS.SI-ID 4770657]
- TURK, Goran, BOKAN-BOSILJKOV, Violeta, RUNOVČ, Franc. Analiza obstojnosti in puščanja umetnih pregrad ter identifikacija ključnih parametrov migracije radionuklidov v poroznih snoveh in njihov vpliv na varnost odlagališč radioaktivnih odpadkov. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: Naravoslovno-tehniška fakulteta, [2009]. IV, 155 str., ilustr. [COBISS.SI-ID 559344]
- KUZMANOVIČ, Slaviša. Vpliv šibkih mest v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode : diplomska naloga = Influence of weak parts in concrete structure on resistance of concrete of water penetration : graduation thesis. Ljubljana: [S. Kuzmanović], 2009. XIII, 123 str., ilustr. 1 optični disk (CD ROM), 12 cm. [COBISS.SI-ID 4759905]
- BIRK, Igor. Odpornost proti prodoru vode za lahkovgradljiv beton iz drobljenega apnenčevega agregata : diplomska naloga = Resistance of highly flowable concrete made from crushed limestone aggregate : graduation thesis. Ljubljana: [I. Birk], 2010. XIII, 79 str., pril., ilustr. 1 optični disk (CD ROM), 12 cm. [COBISS.SI-ID 5002337]
- KOŽELJ, Gašper. Odpornost proti prodoru vode za lahkovgradljiv beton iz savskega proda iz Krške doline : diplomska naloga = Resistance of highly flowable concrete made

⁴ Navedite tudi druge raziskovalne rezultate iz obdobja financiranja vašega projekta, ki niso zajeti v bibliografske izpise, zlasti pa tiste, ki se nanašajo na prenos znanja in tehnologije.

Navedite tudi podatke o vseh javnih in drugih predstavitev projekta in njegovih rezultatov vključno s predstavitvami, ki so bile organizirane izključno za naročnika/naročnike projekta.

from river Sava gravel from the Krško basin : graduation thesis. Ljubljana: [G. Koželj], 2010. X, 67 str., ilustr. 1 optični disk (CD ROM), 12 cm. [COBISS.SI-ID 5090913]

- ŠELIH, Jana, ŽARNIČ, Roko. Sustainable concrete production. V: FULLANA, Pere (ur.). Life Cycle : Assessment applications : results from COST Action 530 : a joint effort by COST Action 530 : Life-Cycle Inventories for Environmentally-Conscious manufacturing Processes. Madrid: AENOR-Asociacion Espanola de Normalizacion y Certificacion-Ediciones; Emerald Group Publishing, 2009, str. 149-157, ilustr. [COBISS.SI-ID 4647009]

MATERIALI S CEMENTNIM VEZIVOM IN BETONSKI ELEMENTI V ODLAGALIŠČU RADIOAKTIVNIH ODPADKOV

Violeta Bokan Bosiljkov¹,

Povzetek:

Članek obravnava različne izvedbe pripovršinskih odlagališč za nizko in srednje radioaktivne odpadke. Poudarek je na zahtevah glede lastnosti inženirskih pregrad s cementnim vezivom v teh odlagališčih. Podlaga za članek je poročilo "Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov" [1] in informacije pridobljene na enotedenskem tečaju z naslovom "Cement in cementni materiali v geoloških odlagališčih radioaktivnih odpadkov", ki je potekal od 15. do 19. decembra 2008 v Švici.

Cement based materials and concrete elements at repositories for radioactive waste

Abstract:

Paper presents different designs of near surface repositories for low and intermediate level wastes. Emphasis is on demands regarding properties of cement based engineering barriers in the repositories. The paper is based on report "Safety evaluation methodology of engineering barriers at repository for low and intermediate level radioactive waste" [1] and information obtained during one week course "Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste" in Switzerland, from 15th to 19th December 2008.

1. UVOD

Osnovni princip odlaganja radioaktivnih odpadkov je izolacija radioaktivnih snovi od človeškega, živalskega in rastlinskega okolja, kar s skupnim imenom poimenujemo biosfera. Osnovni namen odlagališč je preprečiti migracijo radionuklidov v okolje z vrsto zaporednih naravnih in umetnih pregrad. Zasnovano mora biti kot kompleksna tehnološka celota z vsemi objekti in sistemi, potrebnimi za varno in samostojno delo.

Koncept modernega odlagališča za radioaktivne odpadke temelji na več zaporednih pregradah, ki poleg inženirskih pregrad vključujejo praviloma tudi geosfero. Naloga geosfere je, da ščiti inženirske pregrade pred nenadnimi in pomembnimi spremembami in zagotavlja okolje, ki omogoča dolgotrajno vzdrževanje optimalnih lastnosti inženirskih pregrad.

Izbira izvedbe odlagališča je odvisna predvsem od vrste radioaktivnih odpadkov, ki jih je potrebno skladiščiti. Radioaktivne odpadke delimo najprej glede na količino z radioaktivnim razpadom sproščene energije. Odpadki, ki so tako radioaktivni, da se pri razpadu segrevajo, so visoko radioaktivni odpadki (VRAO). Zanje je značilno, da bodo upadli pod aktivnost naravnega ozadja po več sto tisoč do milijon letih. Vsi drugi RAO so nizko in srednje radioaktivni odpadki (NSRAO). Te odpadke delimo na kratkožive, katerih razpolovna doba je ≤ 30 let, in dolgožive. Po 10 razpolovnih dobah upade radioaktivnost RAO pod aktivnost naravnega okolja. Za kratkožive NSRAO torej velja, da po 300 letih niso več radioaktivni. Dolgoživi NSRAO pa so lahko aktivni več deset tisoč let, zato

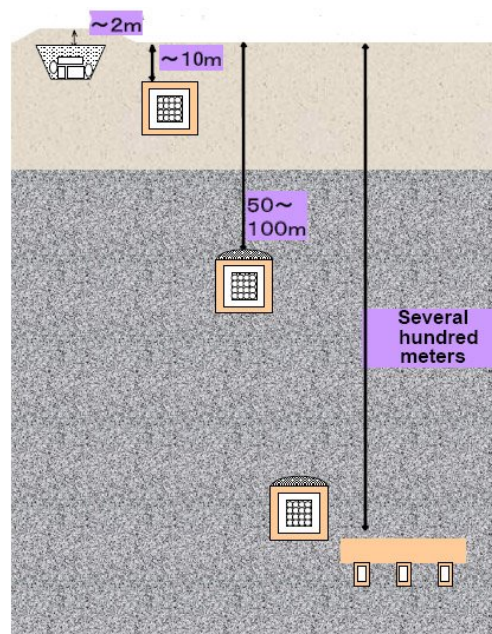
¹ doc.dr., univ.dipl.inž.grad., UL-FGG, Jamova 2, Ljubljana, vbokan@fgg.uni-lj.si

zahtevajo drugačno ravnanje. V skladu z zgoraj povedanim razvršča IAEA RAO v ustrezne razrede (preglednica 1).

Preglednica 1: Razredi RAO, kot jih definira IAEA [2].

Razred RAO	Tipične lastnosti	Možni načini odlaganja
Izsvzeti odpadki – tudi zelo nizko radioaktivni odpadki.	Nivo aktivnosti blizu ali pod aktivnostjo naravnega okolja.	Ni radioloških omejitev - zakopano v zemlji.
Kratkoživi NSRAO - <i>razpolovna doba ≤ 30 let - po 300 letih niso več radioaktivni</i>	Omejena koncentracija dolgoživih radionuklidov (400 Bq/g povprečno za celotno odlagališče in 4000 Bq/g povprečno za posamični paket radioaktivnih odpadkov).	Pripovršinsko ali geološko odlagališče.
Dolgoživi NSRAO - <i>aktivni so lahko več deset tisoč let</i>	Koncentracije dolgoživih radionuklidov so večje od mej za kratkožive radionuklide.	Geološko odlagališče.
Visokoradioaktivni odpadki - <i>pod aktivnost naravnega okolja padejo po več sto tisoč do milijon letih</i>	Toplotna moč večja od 2kW/m^3 in koncentracije dolgoživih radionuklidov večje od mej za kratkožive radionuklide.	Geološko odlagališče.

Glede na razdaljo od zemeljske površine delimo izvedbe odlagališč na pripovršinska in geološka (slika 1). Pripovršinska odlagališča so lahko površinska (nahajajo se na zemeljski površini) ali podzemna. Podzemna odlagališča so lahko na majhni globini do nekaj 10 m ali pa na srednji globini do približno 100 m pod zemeljsko površino. Geološka odlagališča so odlagališča na velikih globinah, od nekaj 100 m do nekaj 1000 m pod zemeljsko površino. Pripovršinska odlagališča so namenjena odlaganju nizko radioaktivnih in kratkoživih srednje radioaktivnih odpadkov. Zanje je po zaprtju odlagališča praviloma predpisan aktivni nadzor, ki naj bi trajal vsaj 100 do največ 300 let. Geološka odlagališča so namenjena odlaganju dolgoživih sredneradioaktivnih odpadkov in visoko radioaktivnih odpadkov. V članku se bom omejila na pripovršinska odlagališča za NSRAO, v katerih prevladujejo inženirske pregrade iz materialov s cementnim vezivom. Takšna zasnova odlagališča se načrtuje tudi v Sloveniji.



Slika 1: Različne izvedbe odlagališč [3].

2. ODLAGANJE NSRAO V PRIPOVRŠINSKIH ODLAGALIŠČIH

Varnostni koncept po zaprtju pripovršinskega odlagališča NSRAO temelji na naslednjih elementih:

- Zadržanje radionuklidov v bližnji okolici odlagališča: bližnja okolica (suha dvoranska skladišča z imobiliziranimi odpadki, odlagalnimi vsebniki, polnilnimi materiali in okoliško kamnino) oblikuje

»rezervoar« z največjo možno kapaciteto zadržanja radionuklidov in tako omogoči, da večina radionuklidov razpade znotraj odlagališča.

- Zmanjšanje koncentracije radionuklidov zaradi razpadanja (odvisno od transportnega časa) in njihovo dispergiranje med transportom iz bližnje okolice skozi geosfero v biosfero; na celotni transportni čas do biosfere vplivajo:
 - o čas sprostitve iz bližnje okolice (odvisen je od sorpcije in se giblje med nekaj let in nekaj tisoč let) in
 - o transportni čas skozi geosfero.

Sposobnost zadrževanja za radionuklide v bližnji okolici je določena s številnimi vplivnimi parametri:

- Količina poroznega materiala v bližnji okolici, v katerega se sprostijo radionuklidi iz sodov ali vsebnikov. Ta porozni material je praviloma cementna malta v sodih, predvsem pa porozna polnilna malta na bazi cementnega veziva, ki je porazdeljena čim bolj enakomerno okrog sodov in/ali vsebnikov. Čim večja je količina poroznega materiala, tem manjša je koncentracija radionuklidov v sistemu por poroznega materiala. Redukcija v koncentraciji je še dodatno povečana z vplivom sorpcije.
- Da bi bil celoten polnilni material na razpolago za zadržanje radionuklidov, je potrebno z ustrezno izbiro materialov in tehnologijo njihovega vgrajevanja zagotoviti, da se ne oblikujejo »bližnjice« za transport radionuklidov v obliki mikrorazpok, razpok, gnezd, lunkejev, ...
- Zaradi nizke topnosti večine radionuklidov v hiperalkalni vodi bo zelo visok pH porne vode v cementni matrici (na začetku več kot 13, pozneje manj, pri čemer je časovno spreminjanje pH vrednosti zelo odvisno od vplivov okolja na cementni kamen; slika 2) deloval tako, da bo minimiziral sproščanje radionuklidov iz odpadkov.
- Zaradi sorpcije radionuklidov v drugi fazi bo zagotovljena nizka koncentracija radionuklidov v porni vodi v bližnji okolici.
- Da se zagotovi visoka stopnja sorpcije, so zaželene ugodne in stabilne kemijske lastnosti bližnje okolice. Zagotovimo jih z zadosti veliko prostornino materialov s cementnim vezivom in majhnim pretokom vode skozi bližnjo okolico.
- Ker lahko produkti propadanja organskih materialov (predvsem celuloze) in ostalih kompleksnejših snovi znižajo sorpcijo in povečajo topnost radionuklidov, je potrebno odpadke, ki vsebujejo relativno veliko koncentracijo tovrstnih snovi, ločiti od ostalih odpadkov.
- Tečenje vode skozi bližnjo okolico bistveno vpliva na čas in obseg sproščanja porne vode, ki vsebuje radionuklide, v geosfero:
 - o Vodni tok v odlagališču je odvisen od prepustnosti okoliške kamnine/zemljine, lokalnih gradientov, hidravličnih lastnosti umetnih pregrad odlagališča in motenj v okolici odlagališča, ki so posledice izkopa, od načina zapečatenja odlagališča in možnih sprememb v hidravličnih gradientih zaradi pritiskov, ki so posledica oblikovanja plinov v bližnji okolici odlagališča.
- Vpliv oblikovanja plinov na sproščanje radionuklidov iz bližnje okolice lahko minimiziramo tako, da zagotovimo, da povezani »kanali« (na primer zaradi oblikovanja razpok) ne oblikujejo prednostnih poti sproščanja porne vode v bližnji okolici. Izbira porozne malte, kot polnilnega materiala, zagotavlja kontrolirano sproščanje plina iz odlagališča.

Glavna funkcija geosfere je, da zagotovi majhen pretok vode skozi dvorane odlagališča in na ta način zagotavlja, da bližnja okolica deluje kot zelo učinkovita pregrada.



Slika 2: Spreminjanje pH vrednosti porne vode v cementnem kamnu [3].

2.1. Vrste pripovršinskih odlagališč NSRAO

Kot sem že omenila, se za skladiščenje kratkoživih NSRAO največkrat uporablja pripovršinski tip odlagališča. Projektirana življenska doba tovrstnega odlagališča se giblje od 300 do 500 let. Pri površinski izvedbi odlagališča odlagamo RAO v armiranobetonske odlagalne enote (škatlaste celice), pri podzemni izvedbi pa v silose, rove ali kaverne.

Površinska izvedba odlagališča



Slika 3: Napolnjeni in z AB ploščo zaprti moduli.



Slika 4: Polnjenje modula z AB vsebniki.



Slika 5: Polaganje armature krovne AB plošče.



Slika 6: Vlaganje sodov z odpadki v vsebnik.

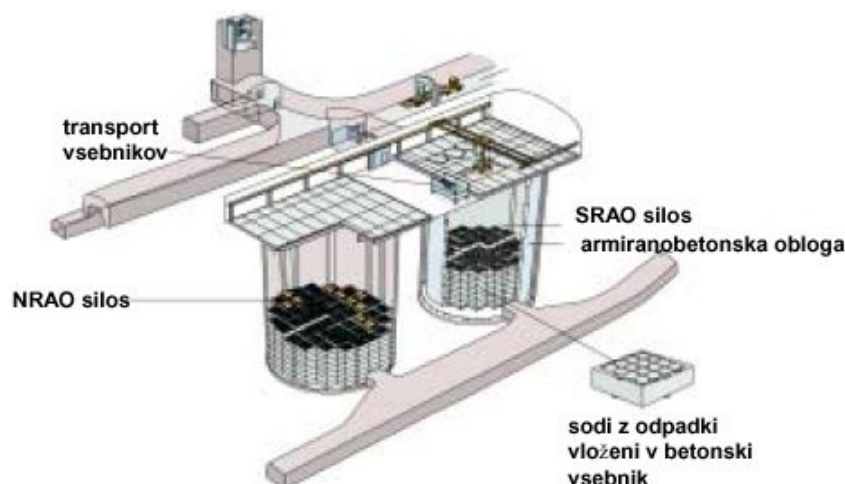
Izmed obstoječih izvedb površinskih odlagališč bom obravnavala zadnje čase v Evropi največkrat priporočan sistem zaporednih in komplementarnih umetnih in naravnih pregrad/zaščit med odloženimi odpadki in človekom. Primera tovrstnega odlagališča sta Centre de l'Aube v Franciji in El Cabril v Španiji (slika 3), načrtujejo pa ga še v Romuniji in Belgiji [4].

Pri obravnavani izvedbi površinskega odlagališča odpadke zapakirane v jeklenih sodih položimo v modularne armiranobetonske vsebnike (dimenzij 2m x 2m x 2m za El Cabril - slika 6), prostore med sodi pa zapolnimo z injekcijsko maso ali malto. Vsak armiranobetonski vsebnik lahko gledamo kot mini-odlagalno enoto. Modularni armiranobetonski vsebniki so potem položeni v armiranobetonske odlagalne enote – module (slika 4), ki imajo tudi vlogo nosilne konstrukcije. Če se opravlja transport vsebnikov do odlagalnih enot z vozili, potem so odlagalne enote zasnovane tako, da je dovoljen omejen dostop do posameznih enot (kot skozi vrata – primer Centre de l'Aube). Če pa se opravlja transport in polnjenje z mostnim dvigalom, so odlagalne enote izvedene kot »škatle brez pokrova« (El Cabril). Ko se odlagalna enota napolni z vsebniki, se prostori med njimi zalijejo s cementno injekcijsko maso ali malto, nakar se izvede armiranobetonska plošča (slika 5), ki modul zapre. Pozneje se nad armiranobetonsko ploščo izvede še prekriv, sestavljen iz izmenjajočih se neprepustnih (glina, bitumen, asfalt, ...) in prepustnih (peščeni prod, drobljen agregat, ...) plasti. Vključitev večih betonskih inženjerskih pregrad: armiranobetonskih vsebnikov in armiranobetonskih odlagalnih enot, v kombinaciji s cementnimi polnili ter ustrezno izdelanim zemeljskim prekrivom poveča sposobnost odlagališča da:

- omeji infiltracijo vode do odpadkov
- prepreči vdor ljudi, živali ali rastlin v odlagališče
- zmanjša stopnjo izpostavljenosti gama žarkom na površini.

Podzemne izvedbe odlagališča

Tudi pri podzemnih izvedbah odlagališča se uveljavlja sistem zaporednih in komplementarnih umetnih in naravnih pregrad/zaščit med odloženimi odpadki in človekom.



Slika 7: Odlagalni silosi za skladiščenje NSRAO v Olkiluoto na Finskem [3].

Najprej bom predstavila izvedbe podzemnega odlagališča v obliki silosov, kamor se betonski vsebniki s sodi z radioaktivnimi odpadki odlagajo s pomočjo mostnih dvigal. Odlagalna silosa za skladiščenje NSRAO uporablja Finska, v Olkiluotu (slika 7). Silosa sta v kristalni magmatski kamnini - tonalitu. Nahajata se na globini 70 do 100 m pod površino. Njun premer je 24 m, višina pa 34 m. En silos je namenjen srednje radioaktivnim (SRAO) odpadkom, ki so zaliti z bitumnom, drug pa nizko radioaktivnim odpadkom (NRAO). Silos za SRAO je debelostenski betonski silos, znotraj silosa v kamnini, silos za NRAO pa je silos v kamnini, pri katerem je površina zaščitena s tankim slojem

brizganega betona. Vsi odpadki so vloženi v betonske vsebnike, v katere gre 16 sodov. Po končanem obratovanju bo odlagališče zapečateno. Kontrola odlagališča po zaprtju (zapečatenju) naj ne bi bila potrebna. Podzemna silosa uporablja tudi Švedska, za skladiščenje srednje radioaktivnih odpadkov. Odlagališče v bližini Forsmark-a je locirano 60 m pod Baltskim morjem, v masivni (kristalni) metamorfni kamnini. Silosa imata premer 25 m in sta 50 m visoka. Med silosom in okoliško kamnino je plast bentonita. Polnilo med odloženimi odpadki je beton.

Odlaganje NSRAO v podzemnih silosih je načrtovala tudi Belgija, na lokaciji Fleurus-Farciennes, vendar je, glede na zadnje informacije [4], od načrta odstopila in se odločila za površinsko izvedbo odlagališča. Tudi Švicarji so preučevali možnost odlaganja NSRAO v podzemne silose, vendar se nazadnje za to varianto odlagališča niso odločili. Najpomembnejši argument proti so bile relativno obsežne poškodbe že vloženi AB vsebnikov pri padcu AB vsebnika med transportom v silos (padec z velike višine) v primeru okvare dvigala, ki so jih ugotovili v okviru predhodnih eksperimentalnih preiskav [4].

Po zadnjih informacijah [5] je bila tudi v Sloveniji zaenkrat izbrana varianta odlaganja v podzemne silose armiranobetonske konstrukcije notranjega premera 25,6 m in višine 33 m. Odlagalni del silosa je v melju, dostopni del pa v protipoplavnem nasipu in v vodonosnemrodu. Dno silosa je na globini približno 55 m pod zgornjo koto protipoplavnega nasipa. Predlagana tehnologija izvedbe silosov je podobna tehnologiji "nove avstrijske metode" za gradnjo predorov.



Slika 8: Primer izvedbe rova za odlaganje RAO.



Slika 9: Primer polnjenja rova z AB vsebniki.

Pogosto načrtovana izvedba podzemnih odlagališč za NSRAO (in tudi za VRAO) je izvedba odlagališča z rovi (sliki 8 in 9). Tehnologija gradnje je enaka tehnologiji gradnje zahtevnih predorov, projektirana življenska doba tovrstnega odlagališča pa je največkrat 500 let. Odlagališče je praviloma predvideno na globini več kot 50 m pod zemeljskim površjem. Podzemni del odlagališča sestavljajo pristopni in odlagalni rovi. Velikost teh objektov in njihova razporeditev je odvisna od količine in oblike odpadkov, predvidene tehnologije odlaganja in značilnosti lokacije. Odlagalni rovi so razporejeni na predpisani minimalni medosni razdalji, na eni ali obeh straneh pristopnega rova, ki povezuje podzemni del odlagališča s površino. Polnjenje odlagalnih rovoev se začne v najbolj oddaljenem rovu. V posamezen odlagalni rov najprej postavimo pregradne stene iz armiranega betona, s katerimi ustvarimo prekate (celice) ustrezne velikosti, kamor odlagamo končno pakirane odpadke. Medprostor zapolnimo praviloma z injekcijsko maso s cementnim ali apneno-cementnim vezivom. Po dokončani zapolnitvi prekata izdelamo čep iz armiranega betona. Polnjenje se nato nadaljuje v naslednjem prekatu, ki je bližje dostopnemu rovu. Transport odpadkov do odlagalnih rovoev je predviden s cestnimi ali železniškimi transportnimi vozili, odlaganje odpadkov v rove pa lahko poteka tudi z mostnim dvigalom. Po zapolnitvi celotnega rova z odpadki in odstranitvi transportne opreme se v celoten rov iniciira dodatno polnilo (praviloma cementni beton, malta ali injekcijska masa), ki

odlagalni rov povsem zapolni. Po zapolnitvi odlagalnih in dela dostopnega rova ostanejo nezapolnjeni le sistemi za odvodnjavanje, ki se zapolnijo po preteku aktivnega nadzora nad odlagališčem. S popolno zapolnitvijo in zatesnitvijo odlagališča je vzpostavljena dodatna umetna pregrada, ki naj bi omejevala prehajanje radionuklidov v okolico, obenem pa je zagotovljena kompaktnost in spojenost odlagališča z okolno hribino.

Izvedbo podzemnih odlagališč z rovi so izbrali na primer Švicarji (Wallenberg), Finci (Loviisa) in Japonci (Rokkasho).

2.2. Funkcije in zahtevane lastnosti inženirskih pregrad s cementnim vezivom v odlagališču NSRAO

Inženirske pregrade so elementi odlagališča, ki jih izdelata ali spremeni/prilagodi človek med gradnjo, obratovanjem in zapiranjem odlagališča. Prispevale naj bi k izolaciji okolja (biosfere) pred radionuklidi v radioaktivnih odpadkih in k izolaciji odpadkov pred agresivnim delovanjem vode in drugih škodljivih snovi v celotni življenski dobi odlagališča. Sistem učinkovitih in večkratnih inženirskih pregrad je potreben predvsem v površinskem tipu odlagališča, zaradi odsotnosti geološke formacije nad odlagališčem, ki predstavlja naravno pregrado.

V nasprotju z naravnimi pregradami je obnašanje inženirskih pregrad in njihovih delov možno optimirati in nadzorovati. Kot inženirske pregrade v odlagališčih imajo posebno vlogo pregrade s cementnim vezivom, saj poleg fizikalne izolacije omogočajo tudi kemijsko izolacijo, predvsem zaradi visoke pH vrednosti porne vode v materialu. Če si pogledamo najprej fizikalno izolacijo pregrad iz materialov s cementnim vezivom ugotovimo, da omogoča izbira ustrezne vrste cementa, v/c razmerja in agregata z ustreznimi lastnostmi veliko fleksibilnost glede lastnosti, ki določajo sposobnost prenosa snovi skozi material. V idealnih razmerah velja, da se kapilarne pore v cementnem kamnu oblikujejo, če je v/c razmerje večje od 0,38. Njihov delež je tem večji (in s tem prepustnost cementnega kamna), čim večje je v/c razmerje. To pomeni, da lahko z izbiro ustrezne sestave materiala s cementnim vezivom izdelamo inženirsko pregrado, ki bo omejila (kontrolirala) vdor vode v odlagališče (izberemo nizko v/c razmerje) ali olajšala sproščanje plinov, ki bi lahko nastali v odlagališču, v okolico (izberemo visoko v/c razmerje).

Materiali s cementnim vezivom se uporabljajo za injekcijske mase za imobilizacijo NSRAO, za kontejnerje, v katere se odlagajo odpadki, za armiranobetonske vsebnike, v katere odlagamo pakirane odpadke, za armiranobetonske konstrukcijske elemente odlagalnih enot (objekti) ter seveda za polnila, ki imobilizirajo pakirane odpadke v vsebnikih in vsebnike v odlagalnih enotah (modulih). Odlagalne enote in armiranobetonski vsebniki morajo imeti zahtevano mehansko odpornost in stabilnost, poleg tega pa je zaželeno, da je beton v njih neprepusten, saj imajo v tem primeru tudi vlogo pregrade (izolativno vlogo). Vsekakor je potrebno zahtevati, da ima izolativno vlogo vsaj armiranobetonski vsebnik, pri konstrukcijskih elementih pa izolativne vloge ni možno vedno zagotoviti. Vloga polnil je, da zagotovijo ustrezno stabilnost vsebnika in odlagalne enote, istočasno pa lahko predstavljajo tudi dodatno slabo prepustno plast v sistemu (nizko v/c razmerje), ali pa z ustrezno veliko poroznostjo (visoko v/c razmerje) omogočajo sproščanje plinov iz bližine pakiranih odpadkov skozi oddušnike v okolico. Pri polnilih je v primeru, da se zahteva relativno visoka poroznost zaradi plinov, ki se oblikujejo, istočasno pa učinkovita kemijska imobilizacija, smiselno uporabiti kot vezivo mešanico cementa in apna. Še posebej v primeru, ko se predpostavi, da bi bodoče generacije zaradi razvoja znanosti in tehnologij želele posegati v odlagališče (na primer zaradi želje po zmanjšanju prostornine odpadkov). Polnilo s cementno-apnenim vezivom ima namreč relativno nizko trdnost, kar omogoča odstranitev polnila brez poškodb vsebnikov ali odlagalnih enot.

Armiranobetonske inženirske pregrade v odlagališčih NSRAO (objekti in vsebniki) je potrebno projektirati tako, da izpolnijo zahtevano funkcijo: mehansko odpornost in stabilnost ter izolacijsko sposobnost. Projektiranje teh pregrad poteka podobno, kot projektiranje drugih pomembnih objektov, ob upoštevanju posebnih kriterijev, kot je projektna življenska doba 300-500 let in zagotavljanje izolativnih lastnosti v življenski dobi (to praviloma pomeni prilagoditev kvalitete in debeline zaščitne plasti betona, upoštevanje ustreznih temperaturnih gradientov, nižjo dovoljeno prepustnost, ustrezno

izbiro projektnega potresa, ...). Armiranobetonske inženirske pregrade morajo prevzeti vse ocenjene vplive, ki lahko nastopijo v življenski dobi objekta brez stalnih deformacij (ne sme biti ogrožena njihova izolativna funkcija) in brez zmanjšanja sposobnosti, da prenesejo te vplive tudi v prihodnje. To pomeni, da morajo ostati v elastičnem območju in da je širina razpok, ki se lahko oblikuje zaradi delovanja omenjenih vplivov, zelo omejena (ne več kot 0,1 mm, bolje 0,05 mm). Končni rezultat projektiranja konstrukcije so podatki o določenih karakteristikah betona, dimenzijah armiranobetonskih elementov, potrebni armaturi, njeni porazdelitvi po prerezu in načinu izvedbe konstrukcijskih stikov in ostalih relevantnih detajlov.

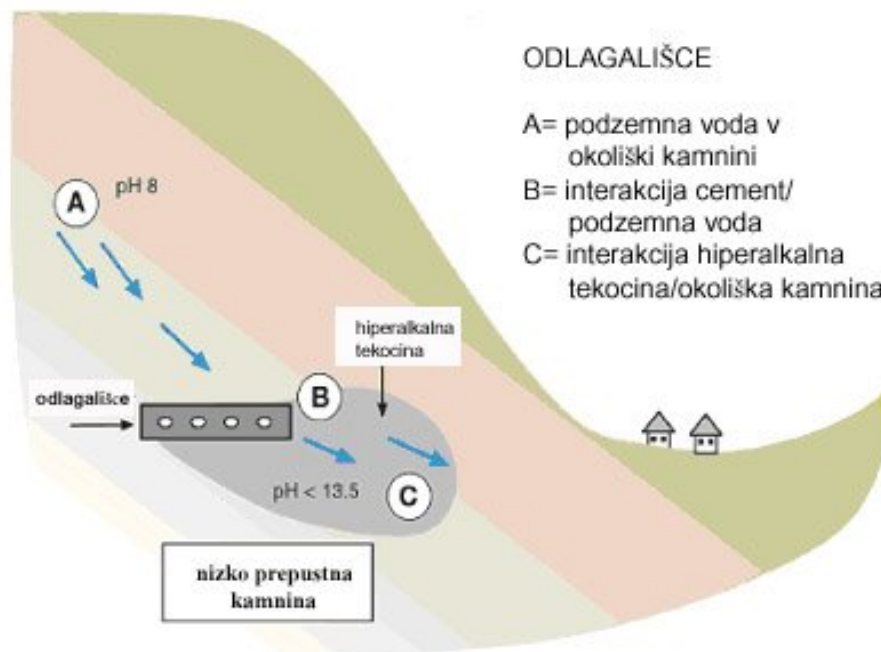
Zaradi visoke stopnje negotovosti pri varnostni oceni odlagališča NSRAO, ki je povezana predvsem z zahtevano dolgo življensko dobo objekta in možnimi spremembami lastnosti okolice (podnebne spremembe, spremembe v prisotnosti agresivnih substanc, nihanje podtalnice, ...), je zato potrebno zagotoviti čim večjo obstojnost materialov s cementnim vezivom ob predpostavki večje stopnje agresivnosti okolja, kot bodo to pokazale terenske preiskave na lokaciji odlagališča in laboratorijske preiskave materialov odvzetih na lokaciji odlagališča. Ustrezno visoko obstojnost materialov s cementnim vezivom dosežemo s pravilno izbiro osnovnih materialov, z njihovim ustreznim vgrajevanjem in nego. Pri armiranobetonskih elementih pa še s pravilno izbiro armature, porazdelitvijo armaturnih palic in ustrezno debelino in kvaliteto zaščitnega sloja betona ter s pravilno izvedbo detajlov ter konstrukcijskih in ostalih stikov. V nadaljevanju zato podajamo predlog pristopa, ki naj bi zagotovil ustrezno obstojnost materialov s cementnim vezivom v odlagališču NSRAO.

Glede na podatke v literaturi in lastne izkušnje z novimi materiali menim, da je pri izbiri osnovnih materialov za beton, malto in/ali injekcijsko maso potrebno izhajati iz naslednjih zahtev:

- Uporabijo naj se tradicionalno uporabljani in kontinuirno preverjeni osnovni materiali (kameni agregat, cement, potencialno tudi mineralni dodatki), za katere obstajajo podatki o kontroli kvalitete za dovolj dolgo časovno obdobje (na primer za zadnjih 25 let).
- Izmed cementov, ki izpolnjujejo te zahteve se izberejo cementi, ki imajo srednjo toploto hidratacije (praviloma relativno velike dimenzije AB elementov, od 40 cm do več kot 100 cm) in so po svoji sestavi čim bolj odporni na možne agresivne vplive iz okolja (za podzemne objekte so to velikokrat cementi odporni na delovanje sulfatov).
- Izmed kamenih agregatov, ki izpolnjujejo te zahteve se izberejo tisti, ki ne vsebujejo potencialno reaktivnih snovi in/ali škodljivih snovi in ki v objektih v podobnem okolju, kot bo odlagališče, niso bili izvor poškodb betona (v našem okolju je to verjetno odprašen drobljen apnenčev agregat z visoko tlačno trdnostjo).
- Mineralni dodatki tipa mleta glanurirana plavžna žindra in elektrofiltrski pepel naj se uporabijo predvsem za polnila; če se zahteva visoka stopnja kemijske izolacije in/ali večja prepustnost polnila, pa se kot del veziva za polnilo lahko uporabi tudi hidratizirano apno.
- Kemijski dodatek tipa superplastifikator, ki je edin kemijski dodatek, ki se lahko uporabi (brez njega težko dosežemo tekočo konsistenco in istočasno visoko neprepustnost), naj se izbere na podlagi opravljenih analiz kompatibilnosti različnih superplastifikatorjev z izbranimi osnovnimi materiali ter njihovega vpliva na izolacijski potencial cementnega kamna za radioaktivne odpadke.
- Ne nazadnje je potrebno zagotoviti čim manjše krčenje materialov s cementnim vezivom. To dosežemo predvsem z izbiro ustrezne vrste kamenega agregata (čim večji modul elastičnosti agregata) in čim večjega prostorninskega deleža agregata v materialu (ustrezna zrnavostna sestava in oblika zrn).

Ker je omejevanje oblikovanja in širjenja razpok pri inženirskih betonskih pregradah v odlagališču NSRAO bistvenega pomena, se pri armiranobetonskih elementih priporoča izbira večjega števila armaturnih palic manjšega prereza, ki so položene na najmanjši možni medsebojni razdalji, ki še omogoča učinkovito vgraditev in zgostitev betona v konstrukcijskem elementu. Da se zagotovi ustrezna zaščita armature pred korozijo, pa je potrebno določiti ustrezno debelino zaščitnega sloja betona nad armaturo, pri čemer naj se upoštevajo najostrejši možni pogoji okolja.

Posebno pozornost je potrebno posvetiti gradnji odlagališča in izdelavi armiranobetonskih vsebnikov. Gradnja naj ne poteka na lokaciji, kjer so prisotni blodeči istosmerni tokovi ali potencialno močno agresivne snovi (na primer pirit). Dela naj se izvajajo v optimalni gradbeniški sezoni, kar se tiče temperatur (najnižja nočna temperatura naj bo višja od 10°C). Nosilni elementi odlagališča (konstrukcija) naj bodo monolitno izvedeni (betoniranje na kraju samem). Lokalno povečanje vodocementnega razmerja zaradi padavin (dežja) je potrebno preprečiti. Dela naj se izvajajo čim bolj kontinuirno, brez hladnih stikov (stik med dvema slojema betona, če je bil vrhnji sloj vgrajen s časovnim zamikom) in s čim manj konstrukcijskih stikov. Posebno pozornost je potrebno posvetiti pravilnemu vgrajevanju in zgoščevanju (brez defektov, kot so lunckerji in gnezda) ter ustrezni negi in zaglajevanju (predvsem horizontalnih površin), da ne pride do oblikovanja površinskih razpok. V bistvu je potrebno z ustreznim izvajanjem del preprečiti ali vsaj maksimalno omejiti nastanek šibkih mest v pregradah, kjer bi lahko potekal transport snovi skozi pregrade manj ovirano, kot se zahteva. Armiranobetonski vsebniki naj se izdelajo v obratu za izdelavo prefabrikatov, ki omogoča vzdrževanje ustreznih pogojev okolja – pogoji v takšnem obratu zagotavljajo večjo kvaliteto vgrajenega betona, istočasno pa omogočajo izvajanje optimalne kontrole vsake faze izdelave. V primeru odločitve za nego prefabriciranih vsebnikov s paro pri povišani temperaturi (tovrstno nego odsvetujem), je potrebno omejiti temperaturo pare na 50°C, da se prepreči možnost pojava zapoznelega oblikovanja etringita. Vsak vsebnik naj se pred prevzemom pregleda, njegova kvaliteta pa naj se preveri s pomočjo neporušnih preiskav.



Slika 10: Izluževanje materiala s cementnim vezivom povzroči oblikovanje hiperalkalne tekočine - povzeto po [3].

Kljub mnogim pozitivnim lastnostim materialov s cementnim vezivom, ki omogočajo učinkovito kemijsko in fizikalno izolacijo radionuklidov, pa ima hiperalkalna tekočina, ki je posledica izluževanja cementnega ali apneno-cementnega veziva (slika 10), v stiku z določenimi materiali lahko tudi zelo negativne vplive. Zaradi prisotnosti hiperalkalne tekočine se lahko:

- zelo poveča hitrost razpadanja stekel (dramatično poveča topnost SiO_2),
- v veliki meri pospeši hidroliza celuloznih (in ostalih organskih) materialov,
- spremenijo lastnosti bentonita in glinenih materialov, ki zapolnjujejo razpoke v kamnini (bentonit več ne nabreka in razpoka),

- raztapljajo zaščitni sloji nekaterih kovin, posledica česar je hitrejša korozija (na primer pri aluminiju; ta vidik je še posebej pomemben zaradi oblikovanja plinov)

Zato je smiselno kontaminirane materiale, ki v prisotnosti hiperalkalne tekočine niso obstojni, ločiti od ostalih ter za njihovo imobilizacijo v sodih uporabiti materiale z nizko pH vrednostjo. Istočasno se v odlagališčih NSRAO ne priporoča uporaba bentonita ter glinenih materialov, ki v stiku s hiperalkalno tekočino izgubijo lastnosti tesnenja.

Drugače pa je v odlagališčih VRAO, kjer je bentonit bistvena pregrada, brez armiranobetonskih objektov, ki zagotavljajo varnost med obratovanjem in zapiranjem odlagališča pa prav tako ne gre. Zato za uporabo v tovrstnih odlagališčih v svetu razvijajo nizkoalkalne cemente, ki naj bi bili primerni tudi za brizgane betone. Poleg tega pa se priporoča, da se direktnemu stiku bentonita in betonskih elementov izognemo s pomočjo vmesnih pregrad (na primer nasutje iz lomljenega kamna).

ZAHVALA

Zahvaljujem se Upravi Republike Slovenije za jedrsko varnost, ki je financirala projektno nalogo z naslovom "Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov" po pogodbi številka 2513-05-397023 ter mi, skupaj z IAEA, omogočila udeležbo na enotedenskem tečaju "Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste", ki je potekal od 15. do 19. decembra 2008 v Švici.

LITERATURA

- [1] Bokan Bosiljkov, V., Žarnić, R., Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov : izdelek 3. faze projektne naloge : končno poročilo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij, 2006. 129 strani, 28 strani prilog.
- [2] Alexander, W.R., L/ILW disposal design, Cement in the geological disposal of radioactive waste, Workshop, ITC School, Switzerland, June 2008.
- [3] Alexander, W.R., L/ILW disposal design - shallow and deep repositories, Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste course, ITC School, Switzerland, December 2008.
- [4] Informacije pridobljene med pogovorom s predavatelji in udeleženci tečaja "Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste", ki je potekal od 15. do 19. decembra 2008 v Švici.
- [5] Poročilo o ustreznosti dokumentacije in v njej predlaganih rešitev, ARAO, www.arao.si.

ZAHTEVE ZA BETONE ZA ODLAGALIŠČA NIZKO IN SREDNJE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV

Violeta Bokan Bosiljkov¹,

Povzetek:

V članku obravnavam zahteve za betone v odlagališčih nizko in srednje radioaktivnih odpadkov (NSRAO). Po krajši predstavitvi razredov radioaktivnih odpadkov in načinov njihovega odlaganja se v nadaljevanju omejim na koncept odlaganja NSRAO v pripovršinskih odlagališčih. Pri tem prikažem tudi vrste tovrstnih odlagališč, osredotočim pa se na zahteve glede lastnosti inženirskih pregrad s cementnim vezivom v teh odlagališčih.

Requirements regarding cement based materials in repositories for low and intermediate level radioactive wastes

Abstract:

The paper deals with requirements regarding cement based materials in repositories for low and intermediate level radioactive wastes (LILW). After short introduction to classification of radioactive wastes and disposal designs, the paper continues with the description of repository concepts for the disposal of LILW on near surface sites. Focus is on requirements regarding properties of engineered barriers with cement binder, although, different designs of near surface LILW repositories are also briefly presented.

1. UVOD

Osnovni princip odlaganja radioaktivnih odpadkov je izolacija radioaktivnih snovi od človeškega, živalskega in rastlinskega okolja, kar s skupnim imenom poimenujemo biosfera. Osnovni namen odlagališč je preprečiti migracijo radionuklidov v okolje z vrsto zaporednih naravnih in umetnih pregrad. Zasnovano mora biti kot kompleksna tehnološka celota z vsemi objekti in sistemi, potrebnimi za varno in samostojno delo.

Koncept modernega odlagališča za radioaktivne odpadke temelji na več zaporednih pregradah, ki poleg inženirskih pregrad vključujejo praviloma tudi geosfero. V odlagališčih nizko in srednje radioaktivnih odpadkov je zelo primeren material za izdelavo inženirskih pregrad beton, zaradi svojih lastnosti kot so dostopnost, relativno nizka cena ter ustrezna nosilnost, obstojnost in neprepustnost.

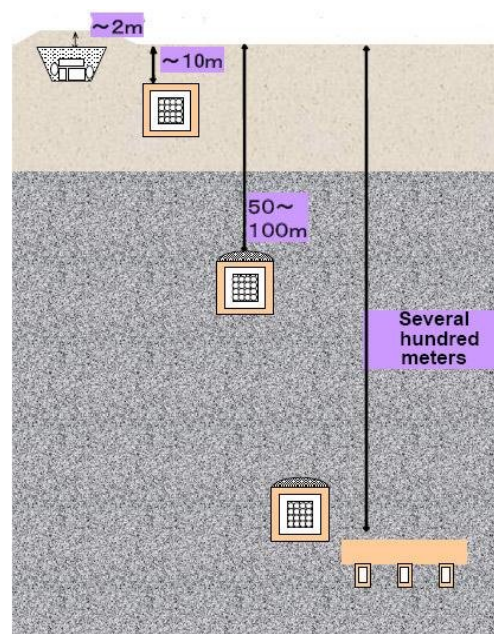
Izbira izvedbe odlagališča je odvisna predvsem od vrste radioaktivnih odpadkov, ki jih je potrebno skladiščiti. Radioaktivne odpadke delimo najprej glede na količino z radioaktivnim razpadom sproščene energije. Odpadki, ki so tako radioaktivni, da se pri razpadu segrevajo, so visoko radioaktivni odpadki, vsi drugi radioaktivni odpadki (RAO) pa so nizko in srednje radioaktivni odpadki (NSRAO). Te odpadke delimo na kratkožive, katerih razpolovna doba je ≤ 30 let, in dolgožive. Po 10 razpolovnih dobah upade radioaktivnost RAO pod aktivnost naravnega okolja. Za kratkožive NSRAO torej velja, da po 300 letih niso več radioaktivni. Dolgoživi NSRAO pa so lahko aktivni več deset tisoč let, zato zahtevajo drugačno ravnanje. V skladu z zgoraj povedanim razvršča IAEA RAO v ustrezne razrede (preglednica 1).

¹ doc.dr., univ.dipl.inž.grad., UL-FGG, Jamova 2, Ljubljana, vbokan@fgg.uni-lj.si

Preglednica 1: Razredi RAO, kot jih definira IAEA [2].

Razred RAO	Tipične lastnosti	Možni načini odlaganja
Izvezeti odpadki – tudi zelo nizko radioaktivni odpadki.	Nivo aktivnosti blizu ali pod aktivnostjo naravnega okolja.	Ni radioloških omejitev - zakopano v zemlji.
Kratkoživi NSRAO - <i>razpolovna doba ≤ 30 let - po 300 letih niso več radioaktivni</i>	Omejena koncentracija dolgoživih radionuklidov (400 Bq/g povprečno za celotno odlagališče in 4000 Bq/g povprečno za posamični paket radioaktivnih odpadkov).	Pripovršinsko ali geološko odlagališče.
Dolgoživi NSRAO <i>- aktivni so lahko več deset tisoč let</i>	Koncentracije dolgoživih radionuklidov so večje od mej za kratkožive radionuklide.	Geološko odlagališče.
Visokoradioaktivni odpadki <i>- pod aktivnost naravnega okolja padejo po več sto tisoč do milijon letih</i>	Toplotna moč večja od 2kW/m^3 in koncentracije dolgoživih radionuklidov večje od mej za kratkožive radionuklide.	Geološko odlagališče.

Glede na razdaljo od zemeljske površine delimo izvedbe odlagališč na pripovršinska in geološka (slika 1). Pripovršinska odlagališča so lahko površinska (nahajajo se na zemeljski površini) ali podzemna. Podzemna odlagališča so lahko na majhni globini do nekaj 10 m ali pa na srednji globini do približno 100 m pod zemeljsko površino. Geološka odlagališča so odlagališča na velikih globinah, od nekaj 100 m do nekaj 1000 m pod zemeljsko površino. Pripovršinska odlagališča so namenjena odlaganju nizko radioaktivnih in kratkoživih srednje radioaktivnih odpadkov. Zanje je po zaprtju odlagališča praviloma predpisan aktivni nadzor, ki naj bi trajal vsaj 100 do največ 300 let. Geološka odlagališča so namenjena odlaganju dolgoživih sredneradioaktivnih odpadkov in visoko radioaktivnih odpadkov. V članku se bom omejila na pripovršinska odlagališča za NSRAO, v katerih prevladujejo inženirske pregrade iz materialov s cementnim vezivom. Takšna zasnova odlagališča se načrtuje tudi v Sloveniji.



Slika 1: Različne izvedbe odlagališč [3].

2. ODLAGANJE NSRAO V PRIPOVRŠINSKIH ODLAGALIŠČIH

Varnostni koncept po zaprtju pripovršinskega odlagališča NSRAO temelji na naslednjih elementih:

- Zadržanje radionuklidov v bližnji okolici odlagališča: bližnja okolica (suha dvoranska skladišča z imobiliziranimi odpadki, odlagalnimi vsebniki, polnilnimi materiali in okoliško kamnino) oblikuje »rezervoar« z največjo možno kapaciteto zadržanja radionuklidov in tako omogoči, da večina radionuklidov razpade znotraj odlagališča.

- Zmanjšanje koncentracije radionuklidov zaradi razpadanja (odvisno od transportnega časa) in njihovo dispergiranje med transportom iz bližnje okolice skozi geosfero v biosfero; na celotni transportni čas do biosfere vplivajo:
 - o čas sprostitve iz bližnje okolice (odvisen je od sorpcije in se giblje med nekaj let in nekaj tisoč let) in
 - o transportni čas skozi geosfero.

Sposobnost zadrževanja za radionuklide v bližnji okolici je določena s številnimi vplivnimi parametri:

- Količina poroznega materiala v bližnji okolici, v katerega se sprostijo radionuklidi iz sodov ali vsebnikov. Ta porozni material je praviloma cementna malta v sodih, predvsem pa porozna polnilna malta na bazi cementnega veziva, ki je porazdeljena čim bolj enakomerno okrog sodov in/ali vsebnikov. Čim večja je količina poroznega materiala, tem manjša je koncentracija radionuklidov v sistemu por poroznega materiala. Redukcija v koncentraciji je še dodatno povečana z vplivom sorpcije.
- Da bi bil celoten polnilni material na razpolago za zadržanje radionuklidov, je potrebno z ustrezno izbiro materialov in tehnologijo njihovega vgrajevanja zagotoviti, da se ne oblikujejo »bližnjice« za transport radionuklidov v obliki mikrorazpok, razpok, gnezd, lunkejev, ...
- Zaradi nizke topnosti večine radionuklidov v hiperalkalni vodi bo zelo visok pH porne vode v cementni matrici (na začetku več kot 13, pozneje manj, pri čemer je časovno spreminjanje pH vrednosti zelo odvisno od vplivov okolja na cementni kamen; slika 2) deloval tako, da bo minimiziral sproščanje radionuklidov iz odpadkov.
- Zaradi sorpcije radionuklidov v drugi fazi bo zagotovljena nizka koncentracija radionuklidov v porni vodi v bližnji okolici.
- Da se zagotovi visoka stopnja sorpcije, so zaželeno ugodne in stabilne kemijske lastnosti bližnje okolice. Zagotovimo jih z zadosti veliko prostornino materialov s cementnim vezivom in majhnim pretokom vode skozi bližnjo okolico.
- Ker lahko produkti propadanja organskih materialov (predvsem celuloze) in ostalih kompleksnejših snovi znižajo sorpcijo in povečajo topnost radionuklidov, je potrebno odpadke, ki vsebujejo relativno veliko koncentracijo tovrstnih snovi, ločiti od ostalih odpadkov.
- Tečenje vode skozi bližnjo okolico bistveno vpliva na čas in obseg sproščanja porne vode, ki vsebuje radionuklide, v geosfero:
 - o Vodni tok v odlagališču je odvisen od prepustnosti okoliške kamnine/zemljine, lokalnih gradientov, hidravličnih lastnosti umetnih pregrad odlagališča in motenj v okolici odlagališča, ki so posledice izkopa, od načina zapečatenja odlagališča in možnih sprememb v hidravličnih gradientih zaradi pritiskov, ki so posledica oblikovanja plinov v bližnji okolici odlagališča.
- Vpliv oblikovanja plinov na sproščanje radionuklidov iz bližnje okolice lahko minimiziramo tako, da zagotovimo, da povezani »kanali« (na primer zaradi oblikovanja razpok) ne oblikujejo prednostnih poti sproščanja porne vode v bližnji okolici. Izbira porozne malte, kot polnilnega materiala, zagotavlja kontrolirano sproščanje plina iz odlagališča.

Glavna funkcija geosfere je, da zagotovi majhen pretok vode skozi dvorane odlagališča in na ta način zagotavlja, da bližnja okolica deluje kot zelo učinkovita pregrada.



Slika 2: Spreminjanje pH vrednosti porne vode v cementnem kamnu [3].

2.1. Vrste pripovršinskih odlagališč NSRAO

Kot sem že omenila, se za skladiščenje kratkoživih NSRAO največkrat uporablja pripovršinski tip odlagališča. Projektirana življenska doba tovrstnega odlagališča se giblje od 300 do 500 let. Pri površinski izvedbi odlagališča odlagamo RAO v armiranobetonske odlagalne enote (škatlaste celice), pri podzemni izvedbi pa v silose, rove ali kaverne.

Površinska izvedba odlagališča



Slika 3: Napoljeni in z AB ploščo zaprti moduli.



Slika 4: Polnjenje modula z AB vsebniki.



Slika 5: Polaganje armature krovne AB plošče.



Slika 6: Vlaganje sodov z odpadki v vsebnik.

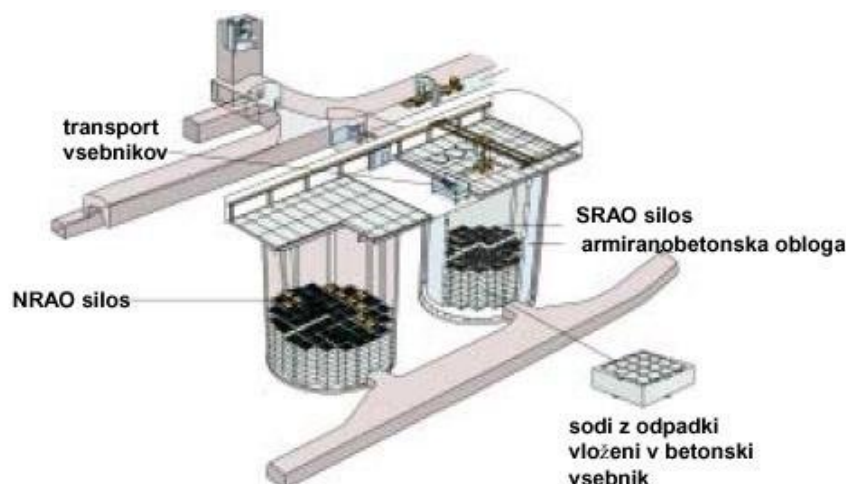
Izmed obstoječih izvedb površinskih odlagališč bom obravnavala zadnje čase v Evropi največkrat priporočan sistem zaporednih in komplementarnih umetnih in naravnih pregrad/zaščit med odloženimi odpadki in človekom. Primera tovrstnega odlagališča sta Centre de l'Aube v Franciji in El Cabril v Španiji (slika 3), načrtujejo pa ga še v Romuniji in Belgiji [4].

Pri obravnavani izvedbi površinskega odlagališča odpadke zapakirane v jeklenih sodih položimo v modularne armiranobetonske vsebnike (dimenzij 2m x 2m x 2m za El Cabril - slika 6), prostore med sodi pa zapolnimo z injekcijsko maso ali malto. Vsak armiranobetonski vsebnik lahko gledamo kot mini-odlagalno enoto. Modularni armiranobetonski vsebniki so potem položeni v armiranobetonske odlagalne enote – module (slika 4), ki imajo tudi vlogo nosilne konstrukcije. Če se opravlja transport vsebnikov do odlagalnih enot z vozili, potem so odlagalne enote zasnovane tako, da je dovoljen omejen dostop do posameznih enot (kot skozi vrata – primer Centre de l'Aube). Če pa se opravlja transport in polnjenje z mostnim dvigalom, so odlagalne enote izvedene kot »škatle brez pokrova« (El Cabril). Ko se odlagalna enota napolni z vsebniki, se prostori med njimi zalijejo s cementno injekcijsko maso ali malto, nakar se izvede armiranobetonska plošča (slika 5), ki modul zapre. Pozneje se nad armiranobetonsko ploščo izvede še prekriv, sestavljen iz izmenjajočih se neprepustnih (glina, bitumen, asfalt, ...) in prepustnih (peščeni prod, drobljen agregat, ...) plasti. Vključitev večih betonskih inženjerskih pregrad: armiranobetonskih vsebnikov in armiranobetonskih odlagalnih enot, v kombinaciji s cementnimi polnili ter ustrezno izdelanim zemeljskim prekrivom poveča sposobnost odlagališča da:

- omeji infiltracijo vode do odpadkov,
- prepreči vdor ljudi, živali ali rastlin v odlagališče in
- zmanjša stopnjo izpostavljenosti gama žarkom na površini.

Podzemne izvedbe odlagališča

Tudi pri podzemnih izvedbah odlagališča se uveljavlja sistem zaporednih in komplementarnih umetnih in naravnih pregrad/zaščit med odloženimi odpadki in človekom.



Slika 7: Odlagalni silosi za skladiščenje NSRAO v Olkiluoto na Finskem [3].

Najprej bom predstavila izvedbe podzemnega odlagališča v obliki silosov, kamor se betonski vsebniki s sodi z radioaktivnimi odpadki odlagajo s pomočjo mostnih dvigal. Odlagalna silosa za skladiščenje NSRAO uporablja Finska, v Olkiluotu (slika 7). Silosa sta v kristalni magmatski kamnini - tonalitu. Nahajata se na globini 70 do 100 m pod površino. Njun premer je 24 m, višina pa 34 m. En silos je namenjen srednje radioaktivnim (SRAO) odpadkom, ki so zaliti z bitumnom, drug pa nizko radioaktivnim odpadkom (NRAO). Silos za SRAO je debelostenski betonski silos, znotraj silosa v kamnini, silos za NRAO pa je silos v kamnini, pri katerem je površina zaščitena s tankim slojem

brizganega betona. Vsi odpadki so vloženi v betonske vsebnike, v katere gre 16 sodov. Po končanem obratovanju bo odlagališče zapečateno. Kontrola odlagališča po zaprtju (zapečatenju) naj ne bi bila potrebna. Podzemna silosa uporablja tudi Švedska, za skladiščenje srednje radioaktivnih odpadkov. Odlagališče v bližini Forsmark-a je locirano 60 m pod Baltskim morjem, v masivni (kristalni) metamorfni kamnini. Silosa imata premer 25 m in sta 50 m visoka. Med silosom in okoliško kamnino je plast bentonita. Polnilo med odloženimi odpadki je beton.

Po zadnjih informacijah [5] je bila tudi v Sloveniji zaenkrat izbrana varianta odlaganja v podzemne silose armiranobetonske konstrukcije notranjega premera 25,6 m in višine 33 m. Odlagalni del silosa je v melju, dostopni del pa v protipoplavnem nasipu in v vodonosnemrodu. Dno silosa je na globini približno 55 m pod zgornjo koto protipoplavnega nasipa. Predlagana tehnologija izvedbe silosov je podobna tehnologiji "nove avstrijske metode" za gradnjo predorov.



Slika 8: Primer izvedbe rova za odlaganje RAO.



Slika 9: Primer polnjenja rova z AB vsebniki.

Pogosto načrtovana izvedba podzemnih odlagališč za NSRAO je izvedba odlagališča z rovi (sliki 8 in 9). Tehnologija gradnje je enaka tehnologiji gradnje zahtevnih predorov, projektirana življenska doba tovrstnega odlagališča pa je največkrat 500 let. Odlagališče je praviloma predvideno na globini več kot 50 m pod zemeljskim površjem. Podzemni del odlagališča sestavljajo pristopni in odlagalni rovi. Velikost teh objektov in njihova razporeditev je odvisna od količine in oblike odpadkov, predvidene tehnologije odlaganja in značilnosti lokacije. Odlagalni rovi so razporejeni na predpisani minimalni medosni razdalji, na eni ali obeh straneh pristopnega rova, ki povezuje podzemni del odlagališča s površino. Polnjenje odlagalnih rogov se začne v najbolj oddaljenem rovu. V posamezen odlagalni rov najprej postavimo pregradne stene iz armiranega betona, s katerimi ustvarimo prekate (celice) ustrezne velikosti, kamor odlagamo končno pakirane odpadke. Medprostor zapolnimo praviloma z injekcijsko maso s cementnim ali apneno-cementnim vezivom. Po dokončani zapolnitvi prekata izdelamo čep iz armiranega betona. Polnjenje se nato nadaljuje v naslednjem prekatu, ki je bližje dostopnemu rovu. Transport odpadkov do odlagalnih rogov je predviden s cestnimi ali železniškimi transportnimi vozili, odlaganje odpadkov v rove pa lahko poteka tudi z mostnim dvigalom. Po zapolnitvi celotnega rova z odpadki in odstranitvi transportne opreme se v celoten rov iniciira dodatno polnilo (praviloma cementni beton, malta ali injekcijska masa), ki odlagalni rov povsem zapolni. Po zapolnitvi odlagalnih in dela dostopnega rova ostanejo nezapolnjeni le sistemi za odvodnjavanje, ki se zapolnijo po preteku aktivnega nadzora nad odlagališčem. S popolno zapolnitvijo in zatesnitvijo odlagališča je vzpostavljena dodatna umetna pregrada, ki naj bi omejevala prehajanje radionuklidov v okolico, obenem pa je zagotovljena kompaktnost in spojenost odlagališča z okolno hribino.

Izvedbo podzemnih odlagališč z rovi so izbrali na primer Švicarji (Wallenberg), Finci (Loviisa) in Japonci (Rokkasho).

2.2. Funkcije in zahtevane lastnosti inženirskih pregrad s cementnim vezivom v odlagališču NSRAO

Inženirske pregrade so elementi odlagališča, ki jih izdelata ali spremeni/prilagodi človek med gradnjo, obratovanjem in zapiranjem odlagališča. Prispevale naj bi k izolaciji okolja (biosfere) pred radionuklidi v radioaktivnih odpadkih in k izolaciji odpadkov pred agresivnim delovanjem vode in drugih škodljivih snovi v celotni življenski dobi odlagališča. Sistem učinkovitih in večkratnih inženirskih pregrad je potreben predvsem v površinskem tipu odlagališča, zaradi odsotnosti geološke formacije nad odlagališčem, ki predstavlja naravno pregrado.

V nasprotju z naravnimi pregradami je obnašanje inženirskih pregrad in njihovih delov možno optimirati in nadzorovati. Kot inženirske pregrade v odlagališčih imajo posebno vlogo pregrade s cementnim vezivom, saj poleg fizikalne izolacije omogočajo tudi kemijsko izolacijo, predvsem zaradi visoke pH vrednosti porne vode v materialu. Če si pogledamo najprej fizikalno izolacijo pregrad iz materialov s cementnim vezivom ugotovimo, da omogoča izbira ustrezne vrste cementa, v/c razmerja in agregata z ustreznimi lastnostmi veliko fleksibilnost glede lastnosti, ki določajo sposobnost prenosa snovi skozi material. V idealnih razmerah velja, da se kapilarne pore v cementnem kamnu oblikujejo, če je v/c razmerje večje od 0,38. Njihov delež je tem večji (in s tem prepustnost cementnega kamna), čim večje je v/c razmerje. To pomeni, da lahko z izbiro ustrezne sestave materiala s cementnim vezivom izdelamo inženirsko pregrado, ki bo omejila (kontrolirala) vdor vode v odlagališče (izberemo nizko v/c razmerje) ali olajšala sproščanje plinov, ki bi lahko nastali v odlagališču, v okolico (izberemo visoko v/c razmerje).

Materiali s cementnim vezivom se uporabljajo za injekcijske mase za imobilizacijo NSRAO, za kontejnerje, v katere se odlagajo odpadki, za armiranobetonske vsebnike, v katere odlagamo pakirane odpadke, za armiranobetonske konstrukcijske elemente odlagalnih enot (objekti) ter seveda za polnila, ki imobilizirajo pakirane odpadke v vsebnikih in vsebnike v odlagalnih enotah (modulih). Odlagalne enote in armiranobetonski vsebniki morajo imeti zahtevano mehansko odpornost in stabilnost, poleg tega pa je zaželeno, da je beton v njih neprepusten, saj imajo v tem primeru tudi vlogo pregrade (izolativno vlogo). Vsekakor je potrebno zahtevati, da ima izolativno vlogo vsaj armiranobetonski vsebnik, pri konstrukcijskih elementih pa izolativne vloge ni možno vedno zagotoviti. Vloga polnil je, da zagotovijo ustrezno stabilnost vsebnika in odlagalne enote, istočasno pa lahko predstavljajo tudi dodatno slabo prepustno plast v sistemu (nizko v/c razmerje), ali pa z ustrezno veliko poroznostjo (visoko v/c razmerje) omogočajo sproščanje plinov iz bližine pakiranih odpadkov skozi oddušnike v okolico. Pri polnilih je v primeru, da se zahteva relativno visoka poroznost zaradi plinov, ki se oblikujejo, istočasno pa učinkovita kemijska imobilizacija, smiselno uporabiti kot vezivo mešanico cementa in apna. Še posebej v primeru, ko se predpostavi, da bi bodoče generacije zaradi razvoja znanosti in tehnologij želele posegati v odlagališče (na primer zaradi želje po zmanjšanju prostornine odpadkov). Polnilo s cementno-apnenim vezivom ima namreč relativno nizko trdnost, kar omogoča odstranitev polnila brez poškodb vsebnikov ali odlagalnih enot.

Armiranobetonske inženirske pregrade v odlagališčih NSRAO (objekti in vsebniki) je potrebno projektirati tako, da izpolnijo zahtevano funkcijo: mehansko odpornost in stabilnost ter izolacijsko sposobnost. Projektiranje teh pregrad poteka podobno, kot projektiranje drugih pomembnih objektov, ob upoštevanju posebnih kriterijev, kot je projektna življenska doba 300-500 let in zagotavljanje izolativnih lastnosti v življenski dobi (to praviloma pomeni prilagoditev kvalitete in debeline zaščitne plasti betona, upoštevanje ustreznih temperaturnih gradientov, nižjo dovoljeno prepustnost, ustrezno izbiro projektnega potresa, ...). Armiranobetonske inženirske pregrade morajo prevzeti vse ocenjene vplive, ki lahko nastopijo v življenski dobi objekta brez stalnih deformacij (ne sme biti ogrožena njihova izolativna funkcija) in brez zmanjšanja sposobnosti, da prenesejo te vplive tudi v prihodnje. To pomeni, da morajo ostati v elastičnem območju in da je širina razpok, ki se lahko oblikuje zaradi delovanja omenjenih vplivov, zelo omejena (ne več kot 0,1 mm, bolje 0,05 mm). Končni rezultat projektiranja konstrukcije so podatki o določenih karakteristikah betona, dimenzijah armiranobetonskih elementov, potrebni armaturi, njeni porazdelitvi po prerezu in načinu izvedbe konstrukcijskih stikov in ostalih relevantnih detajlov.

Zaradi visoke stopnje negotovosti pri varnostni oceni odlagališča NSRAO, ki je povezana predvsem z zahtevano dolgo življensko dobo objekta in možnimi spremembami lastnosti okolice (podnebne spremembe, spremembe v prisotnosti agresivnih substanc, nihanje podtalnice, ...), je zato potrebno zagotoviti čim večjo obstojnost materialov s cementnim vezivom ob predpostavki večje stopnje agresivnosti okolja, kot bodo to pokazale terenske preiskave na lokaciji odlagališča in laboratorijske preiskave materialov odvzetih na lokaciji odlagališča. Ustrezno visoko obstojnost materialov s cementnim vezivom dosežemo s pravilno izbiro osnovnih materialov, z njihovim ustreznim vgrajevanjem in nego. Pri armiranobetonskih elementih pa še s pravilno izbiro armature, porazdelitvijo armaturnih palic in ustrezno debelino in kvaliteto zaščitnega sloja betona ter s pravilno izvedbo detajlov ter konstrukcijskih in ostalih stikov. V nadaljevanju zato podajam predlog pristopa, ki naj bi zagotovil ustrezno obstojnost materialov s cementnim vezivom v odlagališču NSRAO.

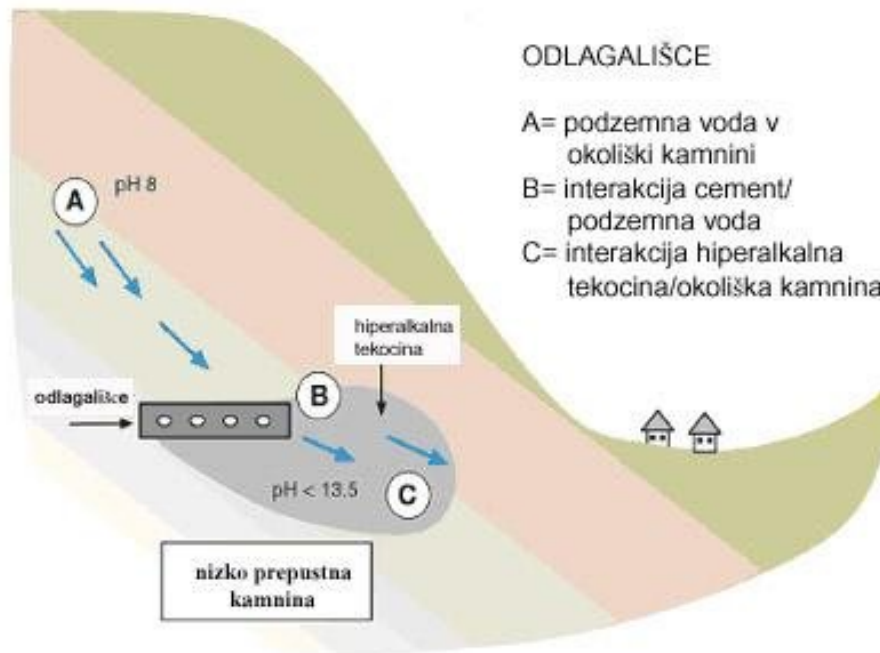
Glede na podatke v literaturi in lastne izkušnje z novimi materiali menim, da je pri izbiri osnovnih materialov za beton, malto in/ali injekcijsko maso potrebno izhajati iz naslednjih zahtev:

- Uporabijo naj se tradicionalno uporabljani in kontinuirno preverjeni osnovni materiali (kameni agregat, cement, potencialno tudi mineralni dodatki), za katere obstajajo podatki o kontroli kvalitete za dovolj dolgo časovno obdobje (na primer za zadnjih 25 let).
- Izmed cementov, ki izpolnjujejo te zahteve se izberejo cementi, ki imajo srednjo toploto hidratacije (praviloma relativno velike dimenzije AB elementov, od 40 cm do več kot 100 cm) in so po svoji sestavi čim bolj odporni na možne agresivne vplive iz okolja (za podzemne objekte so to velikokrat cementi odporni na delovanje sulfatov).
- Izmed kamenih agregatov, ki izpolnjujejo te zahteve se izberejo tisti, ki ne vsebujejo potencialno reaktivnih snovi in/ali škodljivih snovi in ki v objektih v podobnem okolju, kot bo odlagališče, niso bili izvor poškodb betona (v našem okolju je to verjetno odprašen drobljen apnenčev agregat z visoko tlačno trdnostjo).
- Mineralni dodatki tipa mleta glanurirana plavžna žindra in elektrofiltrski pepel naj se uporabijo predvsem za polnila; če se zahteva visoka stopnja kemijske izolacije in/ali večja prepustnost polnila, pa se kot del veziva za polnilo lahko uporabi tudi hidratizirano apno.
- Kemijski dodatek tipa superplastifikator, ki je edin kemijski dodatek, ki se lahko uporabi (brez njega težko dosežemo tekočo konsistenco in istočasno visoko neprepustnost), naj se izbere na podlagi opravljenih analiz kompatibilnosti različnih superplastifikatorjev z izbranimi osnovnimi materiali ter njihovega vpliva na izolacijski potencial cementnega kamna za radioaktivne odpadke.
- Ne nazadnje je potrebno zagotoviti čim manjše krčenje materialov s cementnim vezivom. To dosežemo predvsem z izbiro ustrezne vrste kamenega agregata (čim večji modul elastičnosti agregata) in čim večjega prostorninskega deleža agregata v materialu (ustrezna zrnavostna sestava in oblika zrn).

Ker je omejevanje oblikovanja in širjenja razpok pri inženirskih betonskih pregradah v odlagališču NSRAO bistvenega pomena, se pri armiranobetonskih elementih priporoča izbira večjega števila armaturnih palic manjšega prereza, ki so položene na najmanjši možni medsebojni razdalji, ki še omogoča učinkovito vgraditev in zgostitev betona v konstrukcijskem elementu. Da se zagotovi ustrezna zaščita armature pred korozijo, pa je potrebno določiti ustrezno debelino zaščitnega sloja betona nad armaturo, pri čemer naj se upoštevajo najostrejši možni pogoji okolja.

Posebno pozornost je potrebno posvetiti gradnji odlagališča in izdelavi armiranobetonskih vsebnikov. Gradnja naj ne poteka na lokaciji, kjer so prisotni blodeči istosmerni tokovi ali potencialno močno agresivne snovi (na primer pirit). Dela naj se izvajajo v optimalni gradbeniški sezoni, kar se tiče temperatur (najnižja nočna temperatura naj bo višja od 10°C). Nosilni elementi odlagališča (konstrukcija) naj bodo monolitno izvedeni (betoniranje na kraju samem). Lokalno povečanje vodocementnega razmerja zaradi padavin (dežja) je potrebno preprečiti. Dela naj se izvajajo čim bolj kontinuirno, brez hladnih stikov (stik med dvema slojema betona, če je bil vrhnji sloj vgrajen s časovnim zamikom) in s čim manj konstrukcijskih stikov. Posebno pozornost je potrebno posvetiti pravilnemu vgrajevanju in zgoščevanju (brez defektov, kot so lunke in gnezda) ter ustrezni negi in

zaglajevanju (predvsem horizontalnih površin), da ne pride do oblikovanja površinskih razpok. V bistvu je potrebno z ustreznim izvajanjem del preprečiti ali vsaj maksimalno omejiti nastanek šibkih mest v pregradah, kjer bi lahko potekal transport snovi skozi pregrade manj ovirano, kot se zahteva. Armiranobetonski vsebniki naj se izdelajo v obratu za izdelavo prefabrikatov, ki omogoča vzdrževanje ustreznih pogojev okolja – pogoji v takšnem obratu zagotavljajo večjo kvaliteto vgrajenega betona, istočasno pa omogočajo izvajanje optimalne kontrole vsake faze izdelave. V primeru odločitve za nego prefabriciranih vsebnikov s paro pri povišani temperaturi (tovrstno nego odsvetujem), je potrebno omejiti temperaturo pare na 50°C, da se prepreči možnost pojava zapoznelega oblikovanja etringita. Vsak vsebnik naj se pred prevzemom pregleda, njegova kvaliteta pa naj se preveri s pomočjo neporušnih preiskav.



Slika 10: Izluževanje materiala s cementnim vezivom povzroči oblikovanje hiperalkalne tekočine - povzeto po [3].

Kljub mnogim pozitivnim lastnostim materialov s cementnim vezivom, ki omogočajo učinkovito kemijsko in fizikalno izolacijo radionuklidov, pa ima hiperalkalna tekočina, ki je posledica izluževanja cementnega ali apneno-cementnega veziva (slika 10), v stiku z določenimi materiali lahko tudi zelo negativne vplive. Zaradi prisotnosti hiperalkalne tekočine se lahko:

- zelo poveča hitrost razpadanja stekel (dramatično poveča topnost SiO_2),
- v veliki meri pospeši hidroliza celuloznih (in ostalih organskih) materialov,
- spremenijo lastnosti bentonita in glinenih materialov, ki zapolnjujejo razpoke v kamnini (bentonit več ne nabreka in razpoka),
- raztapljajo zaščitni sloji nekaterih kovin, posledica česar je hitrejša korozija (na primer pri aluminiju; ta vidik je še posebej pomemben zaradi oblikovanja plinov)

Zato je smiselno kontaminirane materiale, ki v prisotnosti hiperalkalne tekočine niso obstojni, ločiti od ostalih ter za njihovo imobilizacijo v sodih uporabiti materiale z nizko pH vrednostjo. Istočasno se v odlagališčih NSRAO ne priporoča uporaba bentonita ter glinenih materialov, ki v stiku s hiperalkalno tekočino izgubijo lastnosti tesnenja.

ZAHVALA

Zahvaljujem se Upravi Republike Slovenije za jedrsko varnost, ki je financirala projektno nalogo z naslovom "Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov" po pogodbi številka 2513-05-397023 ter mi, skupaj z IAEA, omogočila udeležbo na enotedenskem tečaju "Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste", ki je potekal od 15. do 19. decembra 2008 v Švici.

LITERATURA

- [1] Bokan Bosiljkov, V., Žarnić, R., Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov : izdelek 3. faze projektne naloge : končno poročilo. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij, 2006. 129 strani, 28 strani prilog.
- [2] Alexander, W.R., L/ILW disposal design, Cement in the geological disposal of radioactive waste, Workshop, ITC School, Switzerland, June 2008.
- [3] Alexander, W.R., L/ILW disposal design - shallow and deep repositories, Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste course, ITC School, Switzerland, December 2008.
- [4] Informacije pridobljene med pogovorom s predavatelji in udeleženci tečaja "Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste", ki je potekal od 15. do 19. decembra 2008 v Švici.
- [5] Poročilo o ustreznosti dokumentacije in v njej predlaganih rešitev, ARAO, www.arao.si.

VPLIV RAZLIČNIH SUPERPLASTIFIKATORJEV NA LASTNOSTI LAHKOVGRADLJIVIH BETONOV

Violeta Bokan Bosiljkov¹, Matej Kodelja², Metod Mrzlikar³, Tomaž Vuk⁴

Ključne besede: lahkogradljiv beton, svež beton, reološke lastnosti, preskusna metoda, vpliv superplastifikatorjev

Povzetek: Zahteve glede lastnosti sodobnega, visokozmogljivega betona težko izpolnimo brez uporabe enega ali več kemijskih dodatkov. Zato je bila v betonarni Rokava opravljena obsežna študija vpliva različnih superplastifikatorjev na lastnosti lahkogradljivih betonskih mešanic v svežem in strjenem stanju. V okviru študije je bilo analiziranih 59 različnih receptur betona izdelanih z 11 različnimi superplastifikatorji. Pri večini mešanic so bile opravljene meritve konsistence takoj po zamešanju betona ter pol ure in uro zatem. Tlačne trdnosti betona so bile določene pri starostih 1, 3, 7 ter 28 dni. V članku so prikazani rezultati za 4 izbrane superplastifikatorje, s katerimi smo z razpoložljivimi osnovnimi materiali za izdelavo betona dobili najboljše rezultate.

Keywords: highly-flowable concrete, fresh concrete, reological properties, testing method, influence of superplasticizers

Abstract: Demands regarding properties of contemporary highly-flowable concrete mixtures are hard to fulfil without chemical admixtures. Therefore comprehensive study of influence of different superplasticizers on the properties of highly-flowable concrete mixtures in fresh and hardened state was carried out in the concrete plant Rokava. In the study 59 different mix proportions, with 11 different superplasticizers, were analysed. Consistency of fresh mixtures was tested immediately after mixing and half and one hour after that. Compressive strength was determined at concrete age of 1, 3, 7 and 28 days. The paper presents test results of concrete mixtures made by 4 selected superplasticizers giving best properties of concrete mixtures made by available basic materials.

¹izr.prof. dr., univ.dipl.inž.grad., UL FGG, Jamova 2, Ljubljana, violeta.bokan-bosiljkov@fgg.uni-lj.si

²diplomant UL FGG, matej.kodelja@gmail.com

³dipl.inž.grad., ROKAVA d.o.o., Dekani 3/c, Dekani, metod.mrzlikar@rokava.si

⁴dr., univ.dipl.inž.kem., SALONIT ANHOVO, Vojkova 1, Anhovo, tomaz.vuk@salonit.si

1.0 UVOD

Tudi v slovenski gradbeni praksi se za gradnjo armiranobetonskih konstrukcij in/ali konstrukcijskih elementov z relativno velikim deležem armature vedno pogosteje uporabljajo lahkovgradljivi betoni, ki omogočajo učinkovito in kvalitetno izvajanje tovrstnih del ob minimalnem potrebnem zgoščevanju z vibriranjem. Konsistenčna stopnja lahkovgradljivih betonov določena s posedom je S5 v skladu s SIST EN 206-1. Pri tej konsistenčni stopnji se uporaba metode s posedom več ne priporoča, saj beton, ki se posede za več kot 210 mm, težko zadrži sled svoje originalne oblike (oblike prisekanega stožca). Za samozgoščevalne betonske mešanice, katerih sposobnost tečenja je bistveno večja kot pri lahkovgradljivih betonih, imamo na razpolago končni osnutek slovenskega standarda za oceno njihove konsistence z metodo razleza s posedom (kSIST prEN 12350-8) in kriterije za določitev konsistenčne stopnje (oSIST prEN 206-9). Iz tega sledi, da obstaja območje konsistence med posedom 210 mm in razlezom s posedom 550 mm, za katerega kriteriji ne obstajajo.

Zato je bil v okviru Slovenske gradbene tehnološke platforme prijavljen in sprejet projekt z naslovom "Kriteriji za oceno konsistence lahkovgradljivih betonov". Namen projekta je določitev kriterijev za konsistenčne stopnje lahkovgradljivih betonov, ki bodo uporabni za celoten spekter lahkovgradljivih betonov v Sloveniji. Partnerji pri projektu so Primorje d.d. (prijavitelj), UL FGG (vodja projekta), ZAG, IGMAT, SALONIT Anhovo, TKK Srpenica in VARIS Lendava. V nadaljevanju so prikazani rezultati študije, ki je bila opravljena v okviru projekta na betonarni Rokava skupine SALONIT. Rezultati študije so detajlno predstavljeni in analizirani v okviru diplomske naloge z naslovom "Študija učinkovitosti superplastifikatorjev za zagotavljanje obstojnosti črpnih betonov" [1]. V nadaljevanju predstavljamo le rezultate preiskav, ki prikazujejo vpliv 4 izbranih superplastifikatorjev na lastnosti betonskih mešanic v svežem in strjenem stanju.

2.0 IZBIRA SESTAVE IN LASTNOSTI SVEŽIH BETONSKIH MEŠANIC

V okviru študije je bilo uporabljenih 11 različnih vrst superplastifikatorjev. Samo 4 med njimi so omogočili izpolnjevanje vseh postavljenih zahtev:

- razred tlačne trdnosti: C25/30,
- ostale značilnosti: XC4, XD2, XS2, Dmax16, S5, PV-II,
- vodocementno razmerje manjše ali enako 0,45,
- od proizvodnje do vgradnje se konsistenca betona ne sme bistveno spremeniti.

Vsi štirje izbrani superplastifikatorji so bili superplastifikatorji polikarboksilatnega tipa. V Preglednici 1 so podane karakteristike izbranih superplastifikatorjev povzete po tehničnih listih proizvajalcev.

Preglednica 1: Podatki o izbranih superplastifikatorjih.

	dodatek A	dodatek B	dodatek C	dodatek D
izgled	tekočina	tekočina	tekočina	tekočina
barva	rumeno-rjava	rumeno-rjava	amber	svetlo rjava
gostota, 20°C (kg/dm³)	1,08 ± 0,02	1,10 ± 0,02	1,07 ± 0,02	1,11 ± 0,03
vsebnost suhe snovi (%)	40 ± 2	35,0 ± 1,7	26 ± 1,3	40 ± 2
pH vrednost		7,5 ± 1	ni podatka	7 ± 1
priporočena dozacija (na težo cementa v %)		0,6 - 1,4	0,5 - 2	0,2 - 1

Vsak izmed štirih izbranih superplastifikatorjev je bil uporabljen za izdelavo od 5 do 10 različnih betonskih mešanic, ki so se razlikovale predvsem po količini cementa in količini kamene moke. Količina cementa je bila med 340 in 400 kg, količina kamene moke pa med 0 in 100 kg. Skupna količina cementa in moke je bila največ 480 kg. Pri izbranem vodocementnem razmerju 0,45 je bila količina agregata določena z izračunom.

Preglednica 2: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanicah z dodatkom A (A1 do A3).

oznaka vzorca	A1			A2			A3		
čas (h)	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
Temp. zraka (°C)	11	11	11	7	8	8	3	4	5
Temp. betona (°C)	20,9	17	14,8	17,5	13,9	12,1	16,8	12,7	10,3
posed (mm)	250	245	240	235	220	210	235	225	220
razlez (mm)	560	530	450	470	400	350	470	430	390
čas razleza (s)	26	24	19	24,2	21,1	15,6	24,4	22,3	18,3
pore (%)	2,7	2,5	2,5	2,6	2,5	2,8	2,1	1,9	2,3
V/C	0,48	0,46	0,46	0,52	0,5	0,5	0,44	0,43	0,43
Gostota (kg/m ³)	2387	2393	2396	2392	2390	2383	2412	2416	2410
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	671 / 671			556 / 557			671 / 675		

Preglednica 3: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanicah z dodatkom A (A4 do A6).

oznaka vzorca	A4			A5			A6		
čas (h)	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
Temp. zraka (°C)	0,6	1	1,5	5	6	6	10	10	11
Temp. betona (°C)	17,8	14,1	11,7	20,2	17	13,9	18,9	16,1	14,7
posed (mm)	240	235	220	235	235	210	240	225	220
razlez (mm)	480	430	380	490	460	370	470	400	350
čas razleza (s)	22,5	18,5	15	30,2	24,1	15	18,4	15	8,7
pore (%)	2,3	2,5	2,7	1,9	2,1	3,1	2,7	3	2,7
V/C	0,49	0,46	0,46	0,46	0,46	0,44	0,47	0,44	0,43
Gostota (kg/m ³)	2404	2402	2401	2422	2419	2405	2391	2384	2391
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	665 / 665			655 / 656			607 / 610		

Rezultati preiskav opravljeni na svežem betonu so za superplastifikator A podani v preglednicah 2 do 4, za superplastifikator B v preglednicah 5 do 7, za superplastifikator C v preglednicah 8 in 9 ter za superplastifikator D v preglednici 10. Določitev razleza in časa razleza je potekala tako, da je bil opravljen preskus poseda po SIST EN 12350-2, vendar smo poleg poseda izmerili še razlez betonske mase v dveh pravokotnih smereh (D1 in D2) ter določili razlez s posedom kot povprečje obeh meritev. Poleg tega smo merili še čas od dviga Abramsovega stožca do umiritve preskušanca. V preglednicah 2 do 10 je razlez s posedom poimenovan "razlez", takoj za njim pa je naveden čas razleza. V zadnji vrstici posamezne preglednice je navedena skupna količina finih delcev, to je skupna količina cementa, kamene moke in praškastih delcev v agregatu. Pri posameznih sestavah so preiskave svežega betona potekale takoj po zamešanju in pol ter eno uro zatem.

Preglednica 4: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanicah z dodatkom A (A7 do A9).

oznaka vzorca	A7			A8	A9
čas (h)	0	0,5	1	0	0
Temp. zraka (°C)	0	0	1	8	6
Temp. betona (°C)	19,4	12,1	8,8	21,9	17,6
posed (mm)	240	225	215	240	240
razlez (mm)	500	400	350	500	460
čas razleza (s)	24,1	16,1	11,1	24,1	24,2
pore (%)	2	2,6	2,5	2,2	2,2
V/C	0,47	0,44	0,44	0,47	0,45
Gostota (kg/m ³)	2413	2402	2396	2395	2398
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	607 / 610			671 / 671	671 / 673

Preglednica 5: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanicah z dodatkom B (B1 do B4).

oznaka vzorca	B1		B2		B3		B4		
čas (h)	0		0		0	0,5	0	0,5	1
Temp. zraka (°C)	15,0		12,0		7,0	8	10,0	11	11
Temp. betona (°C)	14,9		16,4		14,3	11,5	20,0	16,5	15,3
posed (mm)	190		220		255	255	205	155	85
razlez (mm)	340		420		520	490	330	280	240
čas razleza (s)	/		/		11	10	5,9	4,8	3,2
pore (%)	3,9		3,6		2,2	1,9	5	5,3	4,7
V/C	0,54		0,48		0,63	0,56	0,51	0,49	0,48
Gostota (kg/m ³)	2361		2396		2364	2385	2336	2323	2372
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	566 / 549		566 / 556		639 / 626		662 / 659		

Preglednica 6: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanicah z dodatkom B (B5 do B8).

oznaka vzorca	B5			B6			B7	B8
čas (h)	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0
Temp. zraka (°C)	9,0	10	10	12,0	12	12	12,0	12,0
Temp. betona (°C)	20,6	16,3	14,3	21,4	18	16,3	20,3	21,4
posed (mm)	225	230	210	235	230	205	240	250
razlez (mm)	480	430	335	440	380	330	405	510
čas razleza (s)	13,5	8,6	9,1	13,4	9,9	8,8	14	14,1
pore (%)	1,6	2,2	3,5	2,3	2,9	2,9	2,1	2
V/C	0,5	0,49	0,47	0,48	0,48	0,46	0,49	0,47
Gostota (kg/m ³)	2396	2394	2390	2398	2381	2396	2407	2406
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	658 / 654			665 / 665			658 / 656	688 / 689

Preglednica 7: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanich z dodatkom B (B9 do B10).

oznaka vzorca	B9			B10
	0	0,5	1	0
čas (h)	11,0	11	12	7,0
Temp. zraka (°C)	19,2	16	13,8	19,1
Temp. betona (°C)	265	245	240	240
posed (mm)	575	470	450	470
razlez (mm)	16,4	14,7	11,7	19,8
čas razleza (s)	1,4	1,8	2,4	2
pore (%)	0,45	0,45	0,44	0,43
V/C	2406	2411	2409	2427
Gostota (kg/m ³)	671 / 674			671 / 676
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)				

Preglednica 8: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanich z dodatkom C (C1 do C3).

oznaka vzorca	C1			C2			C3	
	0	0,5	1	0	0,5	1	0	1
čas (h)	10,0	10	11	9,0	10	10	10,0	10
Temp. zraka (°C)	21,7	18,5	16,8	19,9	16,2	14,6	18,9	15,6
Temp. betona (°C)	220	205	120	225	180	105	255	240
posed (mm)	400	330	240	430	310	230	550	420
razlez (mm)	9,8	6,8	3,3	12,6	8	3	18,1	9,1
čas razleza (s)	2,9	3,4	3,7	2,5	3,3	3,3	2,7	3,3
pore (%)	0,46	0,44	0,43	0,49	0,5	0,48	0,47	0,43
V/C	2390	2381	2379	2407	2393	2389	2399	2392
Gostota (kg/m ³)	671 / 672			625 / 621			673 / 674	
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)								

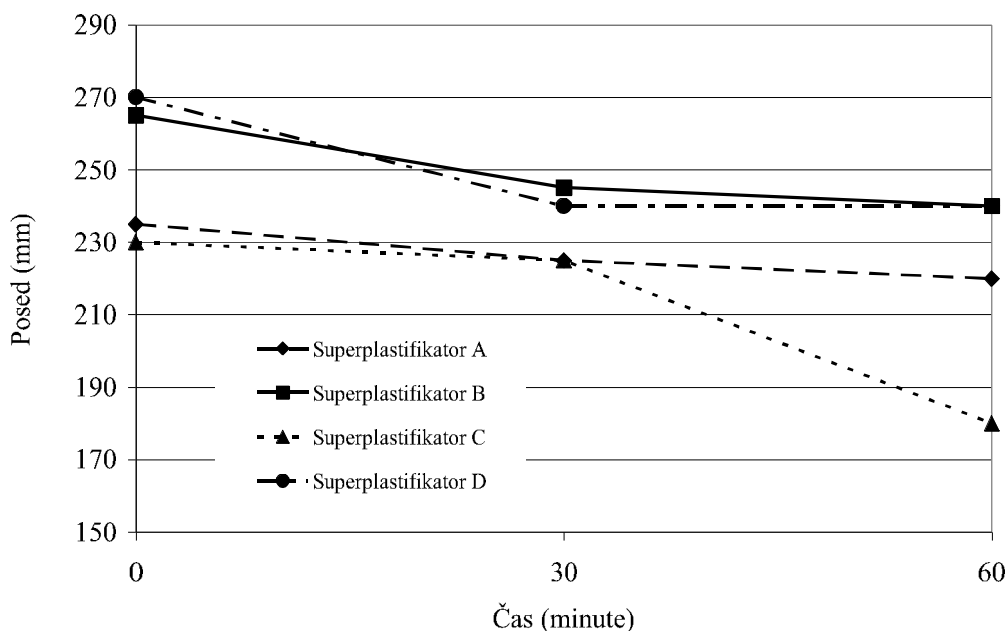
Preglednica 9: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanich z dodatkom C (C4 do C6).

oznaka vzorca	C4			C5			C6
	0	0,5	1	0	0,5	1	0
čas (h)	1,6	2	2,3	10,0	11	11	10,0
Temp. zraka (°C)	15,7	12,5	10,8	19,4	16,8	15,1	19,5
Temp. betona (°C)	245	225	205	230	225	180	240
posed (mm)	530	400	330	410	350	280	540
razlez (mm)	18,7	13	9,8	16,4	11	8	22,3
čas razleza (s)	3,2	2,8	3,4	2,4	3,5	3,6	1,9
pore (%)	0,45	0,43	0,44	0,44	0,43	0,42	0,45
V/C	2394	2408	2406	2418	2391	2392	2409
Gostota (kg/m ³)	673 / 673			663 / 665			663 / 666
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)							

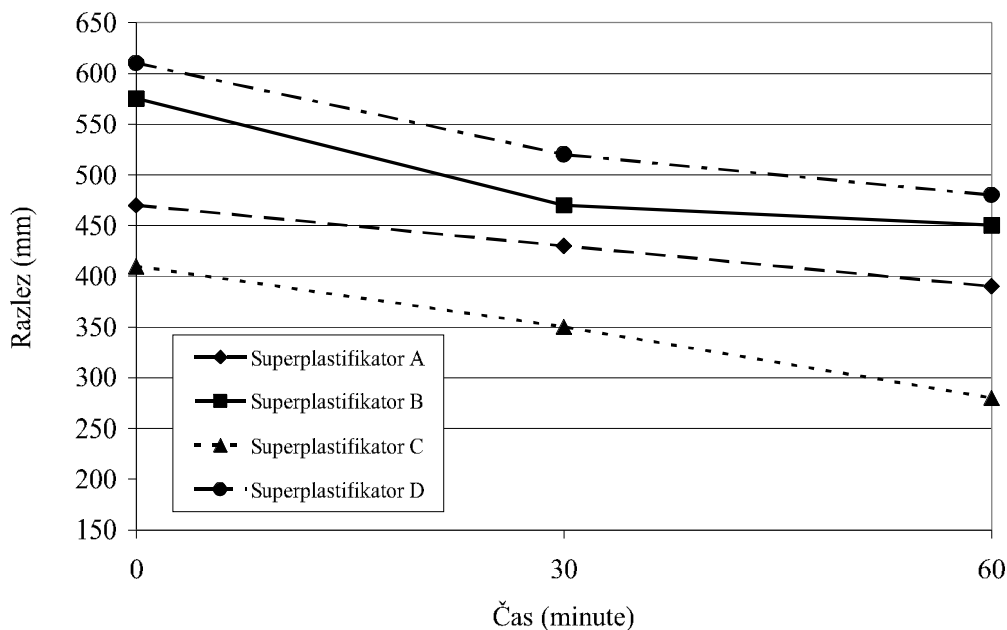
Preglednica 10: Rezultati preiskav na svežih betonskih mešanica z dodatkom D (D1 do D5).

oznaka vzorca	D1	D2		D3			D4	D5
čas (h)	0	0	0,5	0	0,5	1	0	0
Temp. zraka (°C)	13,0	5,0	5	12,0	12	12	10,0	12,0
Temp. betona (°C)	19,0	18,3	13,4	20,0	16,7	14,8	19,2	19,1
posed (mm)	115	240	230	270	240	240	245	230
razlez (mm)	230	470	410	610	520	480	580	480
čas razleza (s)	/	10,3	10,4	21	14,8	12,5	22,1	20,9
pore (%)	3,6	4,5	5,5	4	5,4	6	3,3	3,3
V/C	0,48	0,51	0,51	0,43	0,43	0,41	0,43	0,42
Gostota (kg/m ³)	2354	2323	2347	2346	2330	2333	2409	2411
vsebnost delcev (receptura / dejansko) (kg/m ³)	557 / 549	639 / 629		671 / 666			671 / 672	671 / 673

Na podlagi rezultatov preiskav konsistence svežih betonskih mešanica in njihovega v/c razmerja (SIST 1028:2008) takoj po zamešanju in pol ter eno uro zatem ter na podlagi kvalitativne ocene glede njihove obdelavnosti je bila za vsako izbrano vrsto superplastifikatorja izbrana najbolj optimalna sestava betona, ki je v preglednicah označena s sivo podlago. Pri superplastifikatorju A je to mešanica A3, pri superplastifikatorju B mešanica B9, pri superplastifikatorju C mešanica C5 in pri superplastifikatorju D mešanica D3. Zadna mešanica za posamezno vrsto superplastifikatorja je ponovitev izbrane optimalne sestave. Iz te mešanice so bili izdelani preskušanci za preiskave na stujenem betonu. Vse optimalne sestave imajo količino cementa enako 400 kg, razen mešanice C5 s 390 kg cementa, in količino kamene moke enako 80 kg. Dodana količina superplastifikatorja je 0,7% ali 0,8% glede na maso cementa. To pomeni, da je učinkovitost izbranih superplastifikatorjev direktno



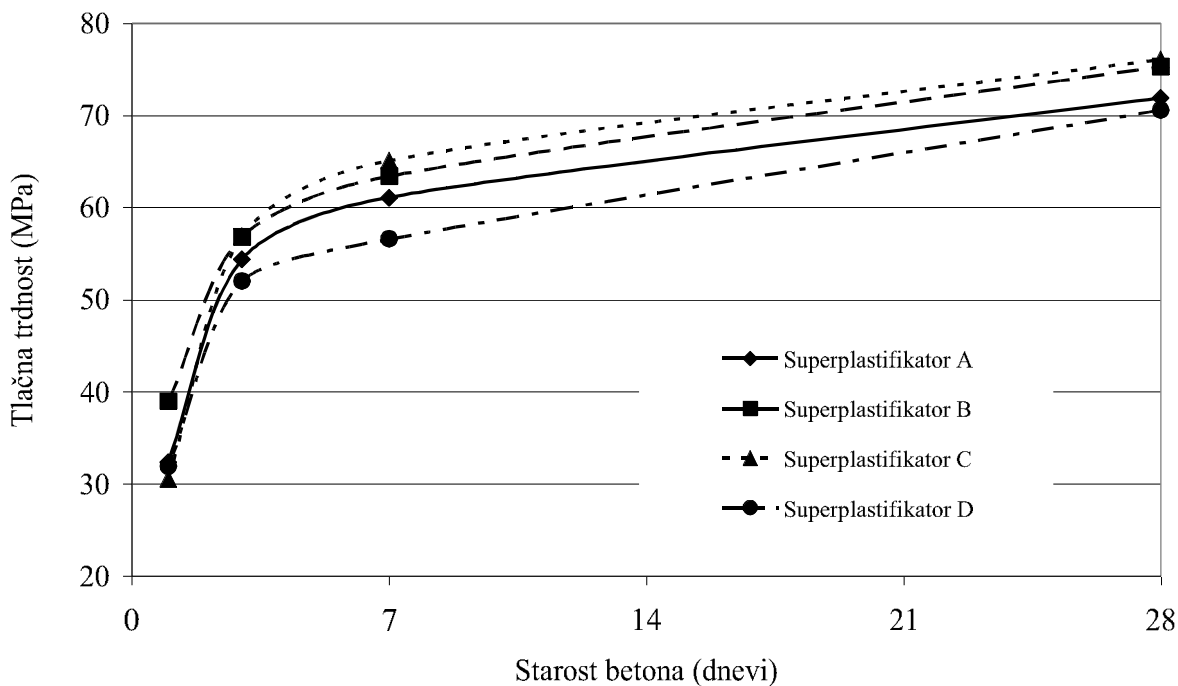
Slika 1: Vpliv izbranih superplastifikatorjev na spreminjanje poseda s časom.



Slika 2: Vpliv izbranih superplastifikatorjev na spreminjanje razleza s posedom s časom.

Iz rezultatov preiskav optimalnih in primerljivih svežih betonskih mešanic prikazanih na slikah 1 in 2 lahko ugotovimo, da je s časom konsistenco najmanj izgubljal beton s superplastifikatorjem A, obnašanje betonov s superplastifikatorjema B in D je nekoliko slabše, vendar primerljivo, najslabše pa se je odrezal superplastifikator C.

3. VPLIV SUPERPLASTIFIKATORJEV



Slika 3: Vpliv izbranih superplastifikatorjev na razvoj tlačne trdnosti s časom.

Slika 3 prikazuje razvoj tlačne trdnosti optimalnih betonskih mešanic s časom v odvisnosti od vrste izbranega superplastifikatorja. V primeru tlačne trdnosti smo dosegli najpočasnejše naraščanje tlačne trdnosti tekom prvih 7 dni in najmanjšo 28-dnevno tlačno trdnost s superplastifikatorjem D. Sledi beton s superplastifikatorjem A, kjer je tlačna trdnost prvih 7 dni naraščala relativno hitro, do 28-dnevne starosti pa je bil nato prirastek tlačne trdnosti najmanjši med vsemi superplastifikatorji. Rezultati naraščanja tlačne trdnosti s časom so primerljivi za superplastifikatorja B in C, pri čemer pa je enodnevna tlačna trdnost betona s superplastifikatorjem B približno 10 MPa višja kot pri superplastifikatorju C in preostalih dveh superplastifikatorjih. Glede na vse povedano lahko ugotovimo, da se je pri tlačni trdnosti betona najbolje izkazal superplastifikator B.

4. SKLEP

Rezultati preiskav prikazani v članku kažejo, da nobeden superplastifikator ni najboljši v vseh pogledih. Tega tudi nismo pričakovali. Vsak superplastifikator ima svoje prednosti in pomanjkljivosti. Kot smo ugotovili v poglavju 2, je superplastifikator A najboljši, če nas zanima le konsistenca sveže betonske mešanice. Rezultati prikazani v poglavju 3 pa kažejo, da dosežemo najhitrejše naraščanje tlačne trdnosti in istočasno največjo 28-dnevno tlačno trdnost s superplastifikatorjem B. Ob istočasnem upoštevanju lastnosti betona v svežem in stjenem stanju se zdi najboljša izbira superplastifikator B, ob predpostavki, da je cena izbranih superplastifikatorjev enaka.

Na koncu je potrebno poudariti, da veljajo predstavljene ugotovitve le za kombinacijo osnovnih materialov: cementa, kamene moke in agregata, iz katerih so bile betonske mešanice izdelane. Pri drugi kombinaciji osnovnih materialov je lahko vpliv izbranih superplastifikatorjev na lastnosti betonske mešanice v svežem in/stjenem stanju bistveno drugačen.

Literatura

- [1] Kodelja, M., Študija Učinkovitosti superplastifikatorjev za zagotavljanje obstojnosti črpnih betonov. Diplomaska naloga, UL FGG, junij 2009, 109 strani.

EXPERIENCES WITH SCC IN SLOVENIA

Violeta Bokan Bosiljkov and Roko Žarnić
University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering

Zvonko Cotič and Karmen Koglot
Primorje Group, Primorje Inc.

INTRODUCTION

In Slovenia intensive laboratory research in SCC mixes prepared using typical locally available materials started in year 2001, when applied research project "SCC for structures on Slovene motorways" was granted to our research group at University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, by Motorway Company in the Republic of Slovenia. Major Slovenian construction company Primorje Group was invited to cooperate in the project. The company is a specialist in the construction of demanding engineering structures such as tunnels, viaducts, bridges, hydroelectric power stations and purification plants, as well as leading manufacturer of precast elements in the state. At the time they already had first experiences with SCC made using rounded gravel aggregate, for precast elements. The SCC mix was designed by manufacturer of chemical admixtures. Its price was relatively high, due to high content of cement (420 kg) and minor content of limestone filler (50 kg), used chemical admixtures (superplasticizer and viscosity agent) and also higher price of rounded gravel aggregate, compared to the crushed one. However, benefits of using SCC, due to elimination of noise caused by the vibration process and improved productivity, still prevailed over higher price of the concrete. This type of SCC made by white cement was used for casting specially designed precast elements for Millennium Bridge fence in Podgorica, Montenegro (Fig. 1 and Fig. 2). The elements were cast in Slovenia and transported to Montenegro.



Figure 1: Fence elements.



Figure 2: Detail of fence element.

The Primorje Group was chosen as partner in the project due to good references and ownership of quarry Laže, where crushed limestone aggregate of high quality is produced, with by-product of limestone dust (Fig. 3 and Fig. 4). In Slovenia crushed aggregate is much cheaper than rounded gravel, and limestone dust is waste product that has to be stored in silos. Successful utilization of the limestone dust in SCC mixes would thus lower the cost of SCCs and at the same time provide a solution regarding the disposal and environmental problems connected with this very fine material. Our hypothesis was that with the combination of the crushed aggregate and limestone dust as additional powdered material (limestone filler), and with the use of the most compatible polycarboxylate-based superplasticizer the most economical Slovenian SCC with adequate properties in hardened state for precast and civil applications can be produced.



Figure 3: Quarry Laže.



Figure 4: Separation plant with several silos for limestone filler.

In order to confirm the hypothesis, extensive tests on fresh and hardened properties of various SCCs, produced using typical locally available materials (crushed and gravel aggregate, different limestone fillers, siliceous filler, chemical admixtures) were carried out in laboratory of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering. The company Primorje Group provided crushed aggregate and limestone filler from the Laže quarry, as well as precast plant for trial castings of precast concrete elements using SCC. In this way we wanted to confirm adequate robustness of fresh SCC, selected between different laboratory mixes as the optimal one, in real scale.

PROPORTIONS AND PROPERTIES OF ECONOMICAL SCC MIXES

Result of the laboratory tests was that SCCs made using crushed aggregate and limestone dust from Laže quarry were not only the most economical, but possessed also the best properties in hardened state, such as high early and 28th day strength, excellent resistance to salt-frost scaling (even without air entraining agent), adequate resistance to sulphate attack, etc. At the same time air entrainment of the mix was carried out without problems and with higher efficiency than at control vibrated mixes. Very dense concrete matrix, presence of limestone filler, more uniform distribution of air bubbles in aerated mixes and much higher homogeneity of the SCCs with dense transition zones (Fig. 5), compared to control vibrated mixes, were the main reasons for excellent properties.

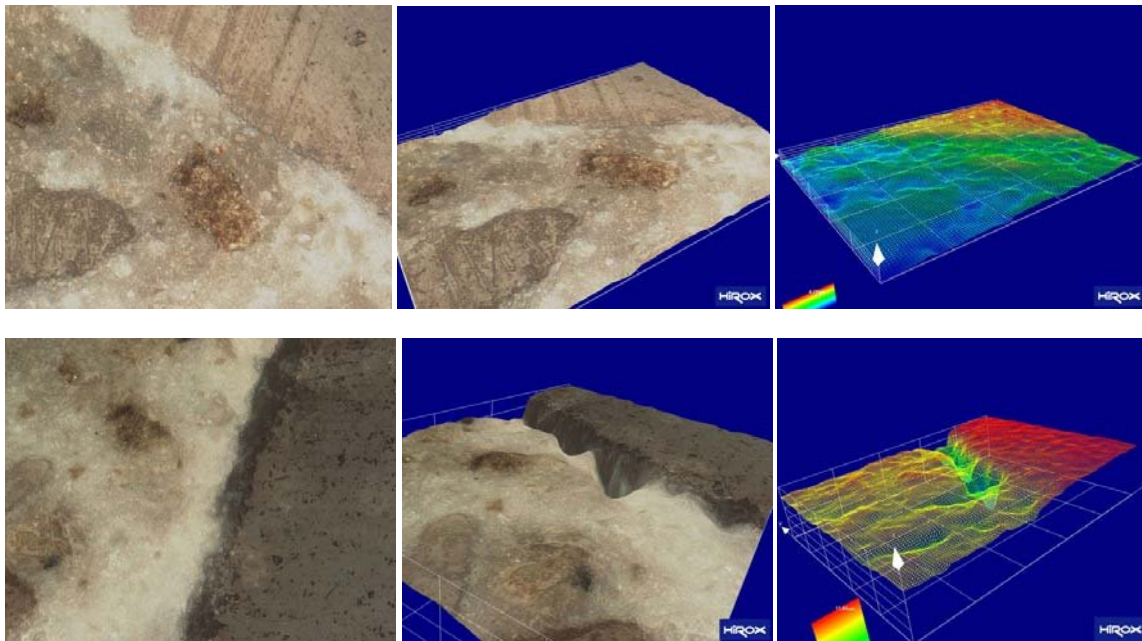


Figure 5: Transition zones between bulk cement paste and aggregate of SCC (upper) and control vibrated concrete (bottom). Photomicrographs and digital images (on the right) are the results of topographic microscopical analysis patented by HIROX in 2002 [1].

Economical SCC mixes designed in the Faculty's laboratory were the starting-point for the design of concrete plant SCCs that are used by the Primorje Group for different applications. Properties of typical laboratory and concrete plant SCCs as well as of control vibrated mixes are given in Tab. 1.

All economical SCC mixes were prepared using coarse (8-16 mm and 4-8 mm fractions) and fine (combination of 0-2 mm and 0-4 mm fractions) crushed limestone aggregate and limestone filler (type I addition according to SIST EN 206-1) from the Laže quarry, and Portland cement designed as CEM II/A-S 42.5R (SIST EN 197-1) with up to 15% of GGBS.

The test methods used for the evaluation of the workability of the SCC mixes were slump flow test (oSIST prEN 12350-8:2007) and L-box test (oSIST prEN 12350-10:2007). The adopted criteria for satisfactory self-compacting behaviour were: slump-flow between 660 and 750 mm (class SF2 according to oSIST prEN 206-9:2007), time t_{500} between 3 and 6 s (class VS2 according to oSIST prEN 206-9:2007) and L-box ratio higher than or equal to 0.8 (Fig. 6, class PL2 according to oSIST prEN 206-9:2007).

	Laboratory SCC		Laboratory CONTROL		Concrete plant SCC	
	SCC-LN	SCC-LA	VIB-N	VIB-A	SCC-civil	SCC-precast
Cement CEM II/A-S 42,5R [kg]	400	400	400	410	380	400
Limestone filler [kg]	250	250	-	-	160	200
Water [kg]	170	160	170	160	150	177
Aggregate [kg]	1620	1470	1820	1700	1740	1663
Water/cement ratio	0.43	0.39	0.43	0.39	0.39	0.44
Air content	2%	8.5%	2.5%	8%	4%	1%
Slump flow [mm]	740	650	-	-	694	746
Slump [mm]	-	-	80	165	-	-
Compressive strength ¹⁾ [MPa]					dem. C25/30	dem. C45/55
after 1 day	40	30	28	25		
after 28 days	70	57	58	48	55	67
Resistance to water penetration ²⁾	n.d	n.d	n.d	n.d	5 mm demand PV-III	0.3 mm demand PV-II
Freezing/thawing resistance after 100 cycles ³⁾	n.d.	0%	n.d.	0%	1.8%	n.d.
Salt frost scaling ⁴⁾ [mg/mm ²]						
after 25 cycles	0.01	0.01	n.d.	0.11	0.019	n.d.
after 50 cycles	0.07	0.02		0.20	n.d.	
after 100 cycles	0.69	0.06		n.d.	n.d.	

1) According to SIST EN 12390-3, compressive strength class according to SIST EN 206-1.

2) According to SIST EN 12390-8, limit value for PV-I is 50 mm, for PV-II 30 mm and for PV-III 20 mm.

3) According to SIST 1026, determined as drop of dynamical modulus of elasticity, limit value is equal to 25%

4) According to SIST 1026, limit value is equal to 0.20 and 0.40 mg/mm² after 25 and 50 cycles, respectively, for exposure class XF4

Table 1: Proportions and properties of economical SCCs and control vibrated mixes.



Figure 6: L-box test.



Figure 7: Casting of element in the Laže precast plant.

The 28 day compressive strength was for all economical SCC mixes much higher than demanded and about 10 MPa higher than compressive strength of control vibrated concrete. The difference is especially big for the SCC-civil, where demands regarding fresh properties and durability were leading parameters for proportioning the SCC. Even higher relative increase in compressive

strength was obtained for 1 day old specimens, where the strength of non-aerated SCCs (SCC-LN and SCC-precast) was about 40% higher than for control mix.

Also properties related to durability of concrete, such as resistance to water penetration and freezing/thawing and salt-frost scaling resistance, are in the case of the SCC mixes superior compared to those of vibrated mixes. From the results in Tab. 1 it is obvious that the depth of penetration of water under pressure was for the concrete plant SCCs much lower than demanded and for the SCC-precast it was even close to zero. This is most probably due to very tight and homogeneous microstructure of the SCCs, with the SCC-precast having the tightest microstructure due to the highest content of the limestone filler. Adequate resistance of concrete plant SCCs to the freezing/thawing cycles without presence of de-icing salts (exposure class XF3 according to SIST EN 206-1) was demanded only for the SCC-civil. At the same time resistance of the same concrete to salt-frost scaling was determined (exposure class XF4 according to SIST EN 206-1) in order to obtain additional information about durability of the SCC-civil. The obtained results show (Tab 1) that after 100 freezing/thawing cycles the dynamical modulus of elasticity was lower only by 2% compared to the initial one, which means that almost no deterioration of the concrete structure occurred. Also salt frost scaling of the SCC-civil was very low, after 25 cycles it was 10-times lower than the upper limit value.

PRECAST APPLICATIONS OF ECONOMICAL SCC

High early strength of economical SCC with limestone filler was ideal for precast applications in the company Primorje, where adequate early strength of vibrated concrete elements is attained by steam curing. Therefore, new precast plant has been built recently near the Laže quarry, where only economical SCC is used for the production of precast elements. Beside the reduction of noise and increased productivity, mainly because of faster de-moulding due to considerably increased early compressive strength of the SCC as result of limestone filler incorporation (1-day compressive strength about 40 MPa), also improved surface properties of precast elements that fulfil demands regarding visible concrete surface were the main arguments for the new plant (Fig. 7). However, also in others precast plants owned by the company economical SCC is increasingly used. A variety of precast elements was and is produced using SCC, such as prestressed and reinforced concrete beams and roof slabs (Fig. 8), longitudinal and transverse (Fig. 9) elements and hollow caps for steel piles (Fig. 10) for the construction of piers in Port of Koper, elements of New Jersey concrete barriers (Fig. 11), staircase elements of Primorje Group main office building (Fig. 12), etc.



Figure 8: Roof slabs.



Figure 9: Elements for the construction of piers.



Figure 10: Hollow caps for steel piles.



Figure 11: Elements of new Jersey concrete barriers.

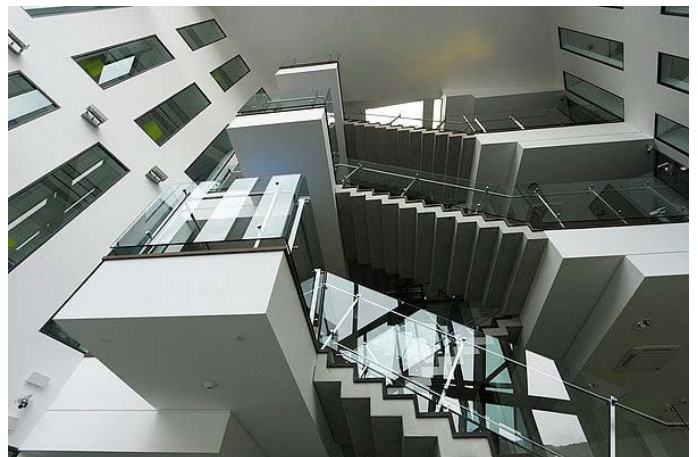


Figure 12: Staircase elements.

READY MIXED APPLICATIONS OF ECONOMICAL SCC

Usage of ready mixed economical SCC for the field applications is for the moment limited to the casting of thin-walled elements (Fig. 13), elements with congested reinforcement (Fig. 14), with uncommon geometry and with several openings, and for piles and strengthening applications. These are applications, where consolidation of concrete with vibrations seldom leads to adequate homogeneity of construction elements and thus adequate durability. In SCC mix used for housing elements technologists of the company replaced limestone filler by fly ash, in order to reduce cement content and the total amount of powdered material and at the same time attained excellent surface properties of visible concrete.



Figure 13: Casting of slender walls by pumping of SCC bottom up.



Fig. 14: Heavily reinforced cut-and-cover tunnel on the motorway Razdrto-Vipava.

EXPERIENCES WITH MIXING, CASTING AND TESTING OF SCC

During the design and use of different concrete plant SCCs we have acquired several practical experiences that have been used as arguments for accepted decisions. Thus, SCC mixes in Primorje Group are prepared only in the concrete plants with forced pan mixer and large enough number and capacity of silos for the basic materials (aggregate fractions, cement and additional powdered materials). Due to increased mixing time needed to obtain homogeneous SCC mix with adequate workability, lower capacity of concrete plant during the production of SCC mix has to be considered.

The price of the SCC mix highly depends on the needed amount and the price of used superplasticizer. According to our experiences it is worthwhile to try different polycarboxylate-based superplasticizers available on the market in combination with particular cement and additional powder material, in order to select the one with the highest efficiency/price ratio.

Casting of SCC concrete is carried out by pumping (civil and housing applications) or by dropping the concrete from buckets (precast applications). In case of the Primorje Group office building, built in 2007, we were for the first time using the method of pumping SCC bottom up (Fig. 13). The pump was connected via a special connector piece with slide valves into the formwork. Vertical

spacing of the pumping points, which depend on the maximum pressure that the formwork can take, was clarified with the formwork supplier. The end result was satisfactory, especially considering the lack of earlier experiences with this pumping method.

Adequate and long enough curing of exposed surfaces is in the case of SCC mixes even more important than for vibrated concrete, due to faster water evaporation noticed during on-site construction works where SCC was used. However, maintenance of satisfactory moisture conditions and temperature for adequate period of time is very important also for precast elements, especially for those exposed to severe environment, such as New Jersey concrete barriers.

When testing key properties of SCC in the fresh state, during initial tests, production control and conformity control, we are using several guidelines available for testing SCC mixes, such as RILEM Report 23 [2], TESTING-SCC [3], etc. For the time being, we are using slump-flow test and L-box test (Fig. 6) for the evaluation of the workability of the SCC mixes. Since the production team has enough experiences with this type of concrete, these two methods are working well for the moment. However, we miss clear instructions about the most optimal combination of testing methods for satisfactory estimation of all key properties of SCC mixes, which could be performed also by less skilled workers. Recently, draft European Standards, five testing standards and standard that gives the rules for SCC, have been submitted to CEN members for enquiry, among them also to Slovenian Institute for Standardization. We are very interested that these standards become European Standards as soon as possible, since the absence of them is clearly a hindering factor for the wider application of SCC in construction practice.

CONCLUSIONS

We are convinced that technical potential of SCC is very high, which is why the share of SCC mixes in total production of the Primorje concrete plants has been growing from year to year. However, despite several very positive practical applications we are still facing problems that arise from lack of knowledge about properties of SCC in fresh state in civil engineering practice in Slovenia and lack of standard specifications. We hope that due to availability of the draft European standards on SCC, which are dating from November 2007, agreement about relevant combination of testing methods and adequate specifications will be accepted in near future, at least in Slovenia, if not in Europe as a whole.

References

- [1] Duh, D., Self-Compacting and Vibrated Concretes with Limestone Powder, Doctoral thesis (supervised by Bokan Bosiljkov, V), University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, 2008, 200 p.
- [2] Self-Compacting Concrete, State-of-the Art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, Å. Skarendahl and Ö. Petersson (Editors), RILEM Report 23, 2000.
- [3] Guidelines for testing fresh self-compacting concrete, G.DE SHUTTER (principal author), TESTING-SCC, Growth Contract No. GRD2-2000-30024, September 2005.

Short biographies of authors



Dr Violeta Bokan Bosiljkov, is Assistant Professor in Building Materials at the University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Slovenia, teaching undergraduate courses on Building Materials and postgraduate course on Concrete Technology. Her main research interests are concrete and mortars technologies, with emphasis on SCC mixes, polymer-modified mixes, cement-based barriers in radioactive waste isolation and lime mortars from traditionally produced limes.



Dr Roko Žarnić, is Associated Professor at the University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Slovenia, teaching undergraduate courses on Building Materials and Experimental Analysis of Structures, and postgraduate course on Decay of Materials. He leads the Chair of Research in Materials and Structure. Lately, his main research has been oriented towards concrete, wood and FRP materials and structural elements. He is also leading one of the focus areas in the European Construction Technology Platform.



Zvonko Cotič, Civil Engineer with diploma, is quality manager of Primorje Group. He is responsible for internal quality control in the company and is principal coordinator of applied research projects about new concrete technologies, advanced asphalt mixes and geotechnical solutions, financed by the Primorje Group. He is also supervising transfer of new technologies and materials to construction and production practice.



Karmen Koglot, B.Sc. in Chemical Technology, is leading technologist and manager of Concrete Laboratory of Primorje Group. She is specialist in technology of ordinary and special concrete mixes, such as SCC, and responsible for concrete mixes design and their application in precast plants and on construction sites.

UPORABNA VREDNOST MERITEV REOLOŠKIH LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA

Andraž Hočevar¹, Violeta Bokan-Bosiljkov², Franci Kavčič³

Ključne besede: reologija, svež beton, reometri, napetost na meji tečenja, plastična viskoznost

Povzetek: V članku je na kratko predstavljen pojem reologije svežega betona in način merjenja reoloških lastnosti svežega betona. Za svež beton se praviloma predpostavi, da se obnaša kot Binghamova tekočina. Zato je v nadaljevanju predstavljen fizikalni pomen osnovnih parametrov Binghamovega modela, strižne napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti svežega betona. Sledi kratka predstavitev različnih izvedb reometrov in primerov njihove uporabe v svetu in pri nas.

Keywords: reology, fresh concrete, rheometers, yield value, plastic viscosity

Abstract: In the paper concept of fresh concrete rheology and way of measurement of its rheological properties is briefly presented. Flow and deformation properties of fresh concrete mixes are usually described by Bingham model. Thus in the paper physical meaning of the Bingham constants, yield value and plastic viscosity, is explained. Subsequently, different types of concrete rheometers and examples of their practical use around the world and in Slovenia are presented.

¹ univ.dipl.inž.grad., IGMAT d.d., Polje 351c, Ljubljana, andraz.hocevar@igmat.eu

² izr.prof. dr., univ.dipl.inž.grad., UL-FGG, Jamova 2, Ljubljana, violeta.bokan-bosiljkov@fgg.uni-lj.si

³ mag., univ.dipl.inž.grad., IGMAT d.d., Polje 351c, Ljubljana, franci.kavcic@igmat.eu

1.0 UVOD

Po desetletjih osredotočanja na izboljšanje lastnosti betona v stijenem stanju, so se raziskave na področju betona pred kratkim močno usmerile na področje proizvodnje betonov z zahtevanimi lastnostmi ter načina njihovega transporta in učinkovite vgradnje, z namenom zagotoviti izdelavo trajnih, čim bolj ekološko sprejemljivih in ekonomičnih konstrukcij. Ker proizvodnja, rokovanje, vgradnja in zgoščevanje svežega betona močno vplivajo na lastnosti stijenega betona, je potrebno najprej specificirati ustrezne lastnosti sveže betonske mešanice in potem doseganje zahtevanih lastnosti preveriti z ustreznimi preskusnimi metodami. Najbolj učinkovite preskusne metode in postopki za preskušanje svežega betona so se ohranile do danes in jih poznamo pod imeni posed, razlez, zgoščevanje pri vibriranju, Ve-be ipd.

Novi materiali in tehnologije na področju betona pa seveda vzpodbujajo razvoj novih preskusnih metod in opreme, bolj zmogljivih in/ali primernih za natančnejše ovrednotenje posebnih lastnosti svežega betona. Pri samozgoščevalnih betonih so to razlez s posedom, iztekanje iz V-lijaka, preskus z L-zabojem, J-obroč...

Čeprav so preskusne metode za ovrednotenje obdelavnosti svežih betonov, ki jih uporabljamo v laboratoriju in/ali na terenu, relativno enostavne, pa je za učinkovito ovrednotenje zahtevanih lastnosti betona v svežem stanju velikokrat potrebno uporabiti kombinacijo večih preskusnih metod. To velja predvsem za betone s posebnimi lastnostmi v svežem stanju (lahkovgradljivi, samozgoščevalni), ki se jih zaradi mnogih prednosti (hitrejša gradnja, manjša poraba energije, prijaznejše delovno okolje, ...) v praksi vse več uporablja. Trend, ki se pojavlja v svetu je, da se nadomesti omenjene metode z eno samo, vendar istočasno dovolj učinkovito preskusno metodo. Razvoj poteka v smeri merjenja reoloških parametrov sveže betonske mešanice, to je napetosti na meji tečenja in plastične viskoznosti, z reometrom za beton.

2.0 REOLOGIJA SVEŽEGA BETONA

Reologija je v splošnem veda, ki preučuje deformiranje in tečenje snovi. Obravnava povezavo med silo, deformacijo in časom. Snov je v tem primeru lahko karkoli od trdnega (elastičnega) materiala do tekočine. Kot podskupina reologije nastopa viskometrija, ki preučuje povezavo med silo in prirastkom deformacije. Viskoznost definiramo kot upor proti tečenju oz. upor tekočine proti deformiranju [4].

Poleg tega, da bi taka meritev lahko nadomestila več drugih meritev z eno samo, ima izvajanje reoloških meritev še nekaj drugih praktičnih prednosti in lastnosti [4]:

- Reologija nam pomaga razumeti interakcije med posameznimi sestavinami in nam omogoča vpogled v strukturo betona. Obstaja namreč povezava med velikostjo in obliko delcev ter viskoznostjo betona.
- Reološki testi nam omogočajo kontrolo kakovosti.
- Služijo kot pomoč pri dimenzioniranju gradbiščne opreme uporabljene v procesu vgradnje betona, kot recimo črpalke, katerih učinkovitost je pogojena z reološkimi lastnostmi svežega betona.
- Omogočajo tudi način testiranja ustreznosti novih produktov na trgu.

Vsi reometri, ki so trenutno dostopni na trgu pri določitvi reoloških parametrov predpostavljajo, da je beton ne-Newtonska tekočina in upoštevajo Binghamov model tekočine, ki dovolj dobro opiše tečenje svežega betona. Binghamov model upošteva napetost na meji tečenja (τ_0) in

ohranja linearno odvisnost med strižno napetostjo svežega betona (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$), ki sta povezani s koeficientom μ , ki ga imenujemo plastična viskoznost. Model opišemo z enačbo:

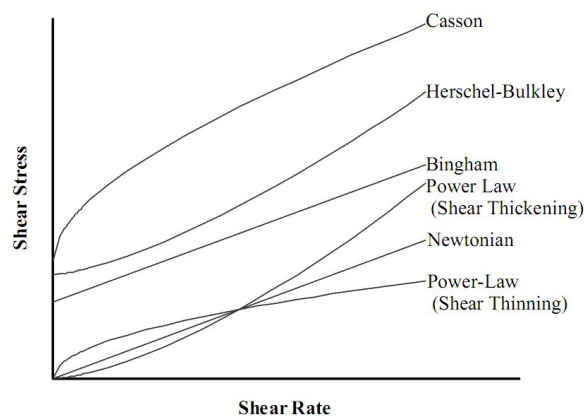
$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Rezultat preiskave reoloških parametrov svežega betona z reometrom je največkrat podan v obliki:

$$T = Y + VN \quad (2.2)$$

V enačbi (2.2) T predstavlja navor (upor proti striženju), N je hitrost vrtenja, V je mera za odpornost betona proti naraščajoči hitrosti gibanja (koeficient viskoznosti) in Y je mera za silo, ki je potrebna za začetek gibanja betona (navor na meji tečenja). V tem primeru je to dinamični navor na meji tečenja, saj meritev poteka od največje hitrosti vrtenja proti najmanjši. Y nam predstavlja presečišče premice z navpično osjo. V kolikor meritev poteka le pri eni hitrosti vrtenja dobimo statično odpornost proti tečenju, ki jo določa največji izmerjeni navor. Kalibrirani reometri omogočajo preračun vrednosti Y in N na osnovne Binghamove parametre τ_0 in μ (napetost na meji tečenja in plastična viskoznost).

Na sliki 1 je prikazan Binghamov model tekočine. Prikazan je tudi fenomen spreminjanja viskoznosti s strižno hitrostjo (shear thickening in shear thinning) in ostali modeli opisa ne-Newtonске tekočine.



Slika 1: Modeli za opis tekočin [5].

3.0 PREGLED REOMETROV

3.1 Vrste reometrov

Reometer je naprava, ki meri strižno napetost pri različnih hitrostih striženja materiala. Ker reometri razviti za izvajanje meritev na polimerih in enakomernih tekočinah niso primerni za merjenje na betonih, ker beton vsebuje velike in trdne delce agregata, so raziskovalci razvili veliko različnih tipov reometrov za preiskave svežih betonov. Reometri so razdeljeni na tri osnovne tipe [2]:

- koaksialni valjasti reometer,
- reometer z vzporednimi ploščami in

- mešalni reometer z rotorjem.

Koaksilani valjasti reometri delujejo na principu vrtenja zunanjega ali notranjega valja, medtem ko drugi valj miruje. Površini obeh valjev sta narebreni, da preprečujeta zdrs materiala. Najbolj znani so [2]:

- ConTec BML Viscometer 3 je tipični predstavnik koaksialnih valjastih reometrov, ki je sestavljen iz dveh valjev, vrti pa se zunanji. Ima to slabost, da je prevelik in zato primeren le za delo v laboratoriju (slika 2). Nadomestil ga bo aparat ConTec Viscometer 5.
- CEMAGREF-IMG reometer je velik (500 litrov) vendar prenosen, saj je nameščen na prikolico (slika 3).

Reometri z vzporednimi ploščami [2] delujejo na principu vrtenja dveh horizontalnih plošč, ki strižeta beton med njima. Predstavnik tega tipa je BTRHEOM. Rezultati meritev s tem reometrom so sistematsko višji od rezultatov koaksialnih reometrov (slika 4). Tudi drugi proizvajalci trenutno razvijajo reometre tega tipa.

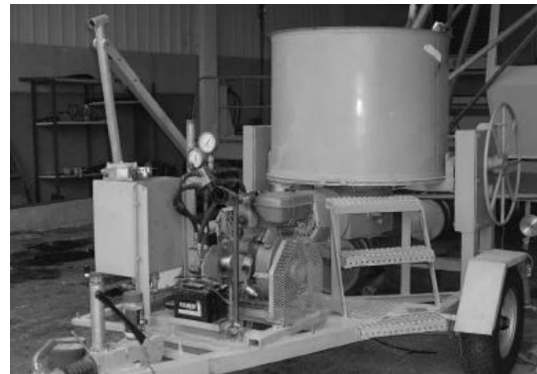
Mešalni reometri z rotorjem imajo na rotorju, ki je v navpični osi, nameščene lopatice. Ko se lopatice vrtijo v betonu se ustvarja upor, ki ga merimo. Obstaja več različnih vrst lopatic, od pravokotnih do takih v obliki kril. Tovrstni reometri so zelo primerni za delo na terenu, saj omogočajo izvedbo naprav manjših dimenzij:

- ICAR Rheometer [1] je naprava ameriške izdelave. Načrtovan je bil na podlagi omejitev obstoječih reometrov in potreb industrije. Velikost je primerna za delo na terenu. Omogoča tudi preračun v osnovne Binghamove parametre. Uporablja 4 lopatice, ki so pravokotne druga na drugo (slika 5).
- IBB rheometer uporablja lopatice v obliki črke H. Meri le vrednosti Y in N (slika 6).
- Two-point rheometer uporablja štiri nagnjena rezila (slika 7).
- ConTec Rheometer-4SCC je naprava razvita za uporabo na gradbiščih za kontrolo kakovosti samozgoščevalnih betonov in uporablja lopatice v obliki kril. Možna je tudi modifikacija za betone običajne konsistence. Meri le vrednosti Y in N (slika 8).
- Fresh concrete Rheometer BT2 ima nameščene tri navpične palice, ki jih zapeljemo skozi beton in istočasno merimo upor. To je edina naprava med obravnavanimi, ki ni avtomatizirana (slika 9).

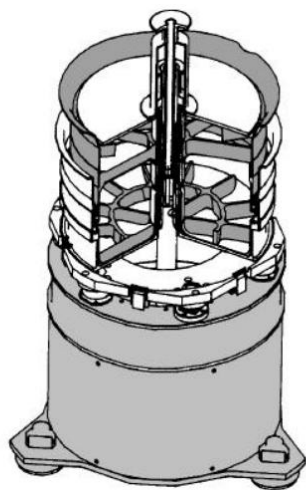
V svetu obstaja še nekaj tipov reometrov, ki sledijo predstavljenim izvedbam. Praviloma imajo drugačno obliko lopatic in/ali njihovo razporeditev ter drugačne hitrosti vrtenja.



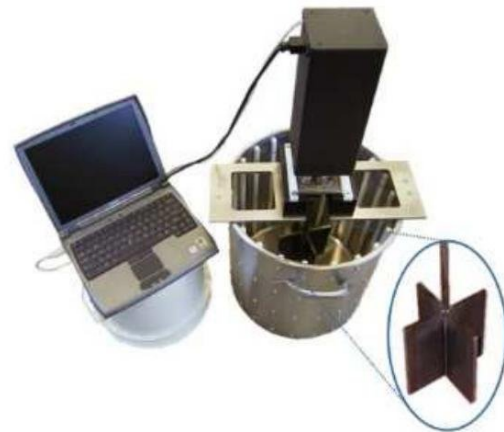
Slika 2: ConTec BML Viscometer 3



Slika 3: Cemagref IMG



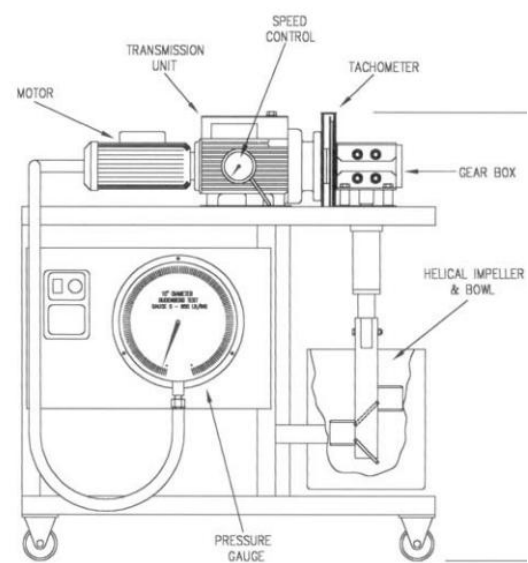
Slika 4: BTRHEOM



Slika 5: ICAR Rheometer



Slika 6: IBB Rheometer



Slika 7: Two point rheometer (Tattersall)



Slika 8: ConTec Rheometer-4SCC



Slika 9: Rheometer BT2

3.2 Primerjava reometrov

Preglednica 1: Napetost ali navor na meji tečenja (τ_0 ali Y) in viskoznost ali koeficient viskoznosti (μ ali V), izmerjeni z različnimi reometri [2].

mešanica	BML		BTRHEOM		CEMAGREF IMG		IBB		Two-point	
	τ_0	μ	τ_0	μ	τ_0	μ	Y	V	τ_0	μ
	Pa	Pa.s	Pa	Pa.s	Pa	Pa.s	N.m	N.m.s	Pa	Pa.s
1	738	114	1619	181	1832	n.d.	10,84	14,72	919	61
2	76	17,4	406	18	437	3	0,34	5,34	80	13
3	408	82,4	771	136	n.d.	n.d.	3,67	13,20	314	83
4	840	72	2139	51	2138	n.d.	7,44	11,65	1059	n.d.
5	910	108	1753	94	n.d.	n.d.	3,91	14,61	698	19
6	139	45	505	78	487	63	1,80	10,31	145	41
7	90	32,7	549	54	410	43	0,86	9,31	98	38
8	717	29	1662	67	1417	n.d.	5,71	8,84	689	22
9	125	15	624	25	504	3	0,95	6,06	159	19
10	248	35,9	740	50	535	43	1,98	8,88	253	19
11	442	29	1189	27	1034	21	3,97	6,57	516	16
12	584	39	1503	38	929	47	6,23	9,07	525	22

V svetu so bile že opravljene primerjalne preiskave nekaterih reometrov na enakih mešanicah svežega betona [2]. Rezultati teh preiskav so podani v preglednici 1. Raziskovalci so ugotovili korelacije med posameznimi reometri. Korelacija je boljša v primeru napetosti na meji tečenja kot v primeru plastične viskoznosti, vendar se rezultati tudi pri napetosti na meji tečenja, kljub dobri korelaciji, razlikujejo tudi za 100% in več. Zanimivo je, da dajeta podobne rezultate BML in Two-point ter BTRHEOM in Cemagref IMG. Tako prva dva kot druga dva ne spadata v isto skupino

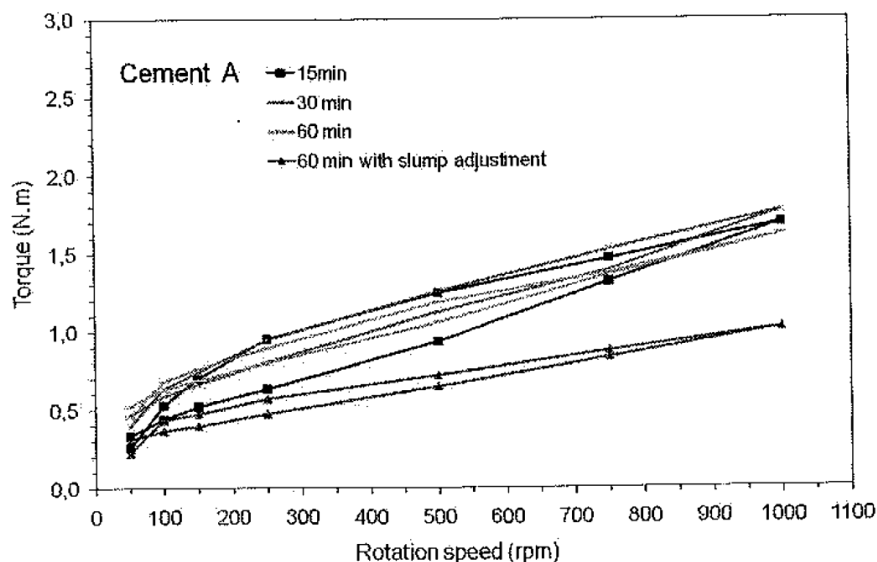
reometrov, kar je vzpodbudno za prihodnje preiskave. Pričakovali bi, da bosta podobne rezultate preiskav dala BML in Cemagref IMG. Razlike med rezultati dobljenimi z različnimi reometri so lahko posledica različnih načinov umerjanja (olje, merilna celica), različnih dimenzij naprav glede na največje zrno agregata v betonu, uhajanje betona med sestavne dele naprave in s tem povzročanja dodatnega upora ter nezadovoljivega preprečevanja zdrsa. Kljub naštetim težavam so vsi reometri sposobni opraviti meritev reoloških lastnosti dovolj dobro in so uporabni v relativnih primerjavah. Na koncu v predstavljeni študiji [2] priporočajo dodatne preiskave na samozgoščevalnih betonih, primerljivih betonih iz drobljenih in prodnatih agregatov ter primerljivih betonih z večjim razponom viskoznosti.

4.0 PRIMERI IZ PRAKSE

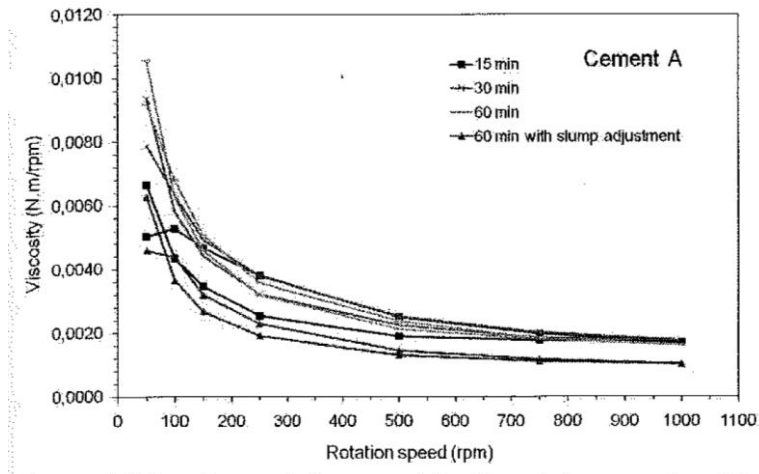
4.1 Brazilija

Raziskovalci so se ukvarjali s primerjavo dveh različnih vrst cementa. Spremljali so spremembe v svežem betonu v času ene ure. Preko določenega zaporedja hitrosti vrtenja lopatic v reometru so ugotavljali tiksotropičnost materiala in tako ocenjevali primernost za črpanje. Betonu so po eni uri dodajali vodo in kemijske dodatke in prišli do zanimivih zaključkov.

V okviru preiskave so ugotovili, da se je vrednost poseda zmanjšala, kar so tudi pričakovali. Dodatno orodje, reometer, pa jim je omogočil dodaten vpogled v dogajanje v svežem betonu. Pojavila se je razlika med cementoma, saj je bil časovni vpliv na navor na meji tečenja pri enem cementu opazen (vrednost je naraščala), pri drugem pa ni bilo časovnega vpliva. V obeh primerih je rasel tudi koeficient viskoznosti. Po dodajanju vode in kemijskega dodatka po eni uri po zamešanju sta se tako navor na meji tečenja kot koeficient viskoznosti drastično zmanjšala. Zaradi dejstva, da je nizkoviskozen samozgoščevalni beton nagnjen k segregaciji so prišli do zaključka, da je potrebno beton primerno pripraviti že na betonarni, saj korekcije na gradbišču lahko povzročijo težave med vgradnjo in zmanjšajo trdnost in obstojnost betona [3].



Slika 10: Navor na meji tečenja v odvisnosti od časa [3].



Slika 11: Koefficient viskoznosti v odvisnosti od časa [3].

4.2 Slovenija

Tudi v Sloveniji smo se lotili primerjave obnašanja treh vrst cementa. Preskušali smo vpliv cementa na lastnosti svežega in strjenega betona. Preskušali smo konsistenco, vsebnost zračnih por in prostorninsko maso svežega betona ter prostorninsko maso, tlačne trdnosti in obstojnostne karakteristike (PV, OPZT, NOZT) strjenega betona. Poleg omenjenih smo opravili še preskus vezanja cementa in betona z ultrazvočno metodo ter naredili preskus reoloških lastnosti svežega betona. Mešanice so se razlikovale samo po vrsti cementa, vse ostale sestavine so bile enake. V tem članku se osredotočamo samo na reologijo svežega betona. Rezultati meritev so podani v preglednici 2.

Preglednica 2: Rezultati reoloških meritev svežega betona.

Cement	Razlez s posedom [mm]	Statična τ_0 [Pa]	Dinamična τ_0 [Pa]	Viskoznost [Pa·s]
A ⁽¹⁾	620	183,4	72,5	56,9
A ⁽²⁾	580	127,0	46,0	24,1
B ⁽²⁾	610	138,5	45,5	26,4
C ⁽¹⁾	400	653,1	274,1	28,3

Opomba: Oznaki (1) in (2) pomenita uporabljeno šaržo frakcije 0/4 mm

Med preiskavo smo uporabljali agregat iz različnih šarž, kar se je pokazalo za relativno veliko spremembo v obnašanju svežega betona. Betoni uporabljeni za reološke meritve so se razlikovali samo v frakciji 0/4. Zaradi pomanjkanja materiala ni bilo možno opraviti meritev pri vseh kombinacijah uporabljenih cementov in obeh šarž agregata. Zato je v preglednici 2 podan rezultat za obe različici betona s cementom A.

Primerjava rezultatov pokaže:

- Da so bile z isto sestavo betona dosežene različne vrednosti razleza s posedom med cementoma C in A, medtem ko imata betona s cementoma A in B primerljiv razlez.

- Primerjava med mešanicama s cementoma A in C ter B in C pokaže, da je vpliv uporabljene vrste cementa na reologijo očiten. Tako je beton z oznako C manj koheziven, kar dokazuje manjša izmerjena plastična viskoznost. Beton je bil sicer lažji za obdelavo z ročnim orodjem, vendar ni imel velike sposobnosti tečenja, kar potrjujeta tudi izmerjeni dinamična in statična napetost na meji tečenja.
- Opazili smo pojav, da so stožci pri preskusu poseda pri betonih s cementom C (betoni uporabljeni za druge preiskave) pogosto delno razpadli, kar je znak manjše kohezivnosti.
- Iz primerjave mešanic z oznako A in B je razvidno, da uporabljeni vrsti cementa podobno vplivata na reološke lastnosti svežega betona.

Kohezivnost je bila do sedaj lastnost svežega betona, ki smo jo lahko opisali le opisno. Sedaj jo lahko s pomočjo reometrov za beton opišemo tudi številčno. Beton, ki je bolj koheziven bo imel tudi večjo plastično viskoznost. Dovolj velika viskoznost ob istočasno dovolj nizki napetosti na meji tečenja zagotavlja, da sveža betonska mešanica dosega večje razleze s posedom brez nevarnosti segregacije.

5.0 ZAKLJUČKI

Prikazana predstavitev različnih reometrov in razlike v rezultatih preiskav dobljenih z različnimi reometri na enakih betonskih mešanica kaže, da bo v prihodnosti potrebno več pozornosti nameniti primerjavam različnih reometrov na kar največ možnih načinov in med njimi vzpostaviti korelacije, na podlagi katerih bomo lahko absolutno vrednotili rezultate reoloških meritev. Zaenkrat lahko rezultate primerjamo le relativno, s pomočjo enakih mešanic v posamezni preiskavi. Prav tako bo potrebno določiti enoten način kalibracije reometrov in dimenzije opreme glede na največje zrno agregata uporabljenega v betonu.

ZAHVALA

Raziskovalno delo prikazano v članku delno financira Evropska unija in sicer iz Evropskega socialnega sklada, preko Tehnološke agencije Slovenije TIA.

LITERATURA

- [1] Koehler, E.P., Fowler, D.W. A portable rheometer for self-consolidating concrete. University of Texas at Austin: 6 str.
- [2] Banfill, P., Beaupre, D., Chapdelaine, F., de Larard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O.H., Wallevik, J.E. 2001. Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC. National institute of standards and technology: 157 str.
- [3] Sanchez, L. et al. 2009. Rheological characterization of self-compacting concrete – a critical analysis. 3rd international RILEM symposium on rheology of cement suspensions such as fresh concrete, Reykjavik, Iceland. 9 str.
- [4] Wallevik, O.H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete, ICI rheocenter course, Reykjavik, Iceland. Innovation center Iceland: 219 str.
- [5] Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2004. Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete, Research report ICAR-105-3F. University of Texas at Austin: 306 str.

Sustainable concrete production

J. Šelih & R. Žarnić

Department of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenia

ABSTRACT: Concrete is the most widely produced construction material, and large quantities of waste materials from construction as well as from other industries can be re-used in its production. The paper presents results of experimental investigations of the behavior of concrete containing crushed waste concrete (rubble) as aggregate and the behavior of concrete containing waste wash water from ready mix concrete production. The influence of different additions to concrete upon various mechanical properties as well as durability of such concrete are presented. The results show that both recycled materials investigated have a potential to be used in concrete production.

1 INTRODUCTION

Increasing environmental awareness has forced the industries and businesses to start assessing the impact of their activities upon the environment. When the concept of sustainable development (Our common future 1987) was introduced, attention was gradually being focused on issues related to natural sources depletion and environment degradation. Environmental performance has become a key issue, and many companies have begun to investigate ways to minimize the effects on the environment of their activities (EPA 2006).

Building materials production offers a wide range of possibilities for recycling of industrial waste. Waste generated in construction as well as in other industry types can be used instead of virgin raw materials required to produce construction materials. This leads to conservation of natural resources as well as to reduced need for space required to landfill the waste, and is therefore in line with the sustainable development of the natural and built environment.

One of the possibilities of recycling waste materials is to use certain types of industrial and demolition waste, such as slag, glass, crushed brick or concrete rubble, as a substitute of natural aggregate in concrete, the most widely used construction material. Another way is to re-use waste wash water that is being produced during concrete production as mixing water for concrete. Cement can be partly substituted by supplementary cementing materials that originate from secondary sources.

Using secondary materials in concrete, however, poses certain challenges. During its use in structure, concrete has to exhibit performance level which is defined in the design phase. If constituent materials, i.e. cement, aggregate, water and admixtures, are replaced by secondary raw materials, the influence of these materials has to be determined prior to the application of such concrete in practice. Each waste material that shows a potential to replace a virgin constituent material in concrete has to be carefully tested in laboratory as well as in field conditions.

The following cases have been investigated within the scope of this paper:

- behavior of concrete containing crushed waste concrete (rubble) as aggregate, and
- behavior of concrete containing waste wash water from concrete production.

Being a preliminary study, only laboratory testing was carried out.

2 SUBSTITUTION OF NATURAL AGGREGATE WITH RECYCLED RUBBLE-BASED AGGREGATE

Concrete is a composite material consisting of aggregate and binding material. Approximately 60-70% of the concrete volume is occupied by aggregate, usually of mineral origin.

Based on the source material, secondary aggregates originating from construction and demolition (C&D) waste can be distinguished as concrete aggregate, masonry aggregate, mixed aggregate and asphalt aggregate (Hendriks 2000). The aim of the work presented in this paper was to use concrete rubble-based aggregate in concrete, where all constituent materials (including rubble) originate from local sources.

Level of impurities in the source material (parent concrete) is one of the most influential factors affecting the successful use of such aggregate. Wood, sulphates originating from waste plaster, soil, aluminium, chlorides, plastic and alkali reactive stone are potentially harmful components of the source material that pose physical and chemical threat to the quality of the structure (Hendriks 2000). Further, rubble-based concrete contains larger quantities of fine particles that arise from crushing the cement paste of the parent concrete. These fine particles may affect the properties of both fresh and hardened concrete.

For the purpose of the study, the source material for rubble-based aggregate was carefully monitored so that the level of impurities was reduced to a minimum. Waste concrete was then crushed to smaller particles with the help of a jaw crusher and sieved to obtain fine (particle size range 0/4 mm) and coarse aggregate (of particle size ranges 4/8 and 8/16 mm) for concrete.

Mechanical and durability properties of concrete where only part of the aggregate was substituted by crushed waste concrete were determined and compared to properties of a) reference concrete containing only natural aggregate and b) concrete prepared with recycled aggregate only. Five concrete mixtures were prepared and labelled as

A – contains natural aggregate only (reference concrete)

B – contains recycled fine aggregate and natural coarse aggregate (both particle size ranges)

C – contains natural fine aggregate, recycled coarse aggregate (particle size range 4/8 mm) and natural coarse aggregate (particle size range 8/16 mm)

D – contains natural fine aggregate, natural coarse aggregate (particle size range 4/8 mm) and recycled coarse aggregate (particle size range 8/16 mm)

E – contains both fine and coarse recycled aggregate

Locally obtainable constituent materials were employed. Cement of CEM II/A-S 42.5R type was supplied and produced by the largest Slovenian cement producer. One of the most frequently used regional river gravels was employed as natural aggregate. All concrete types contained the same amount of cement and superplasticizer (SP). Composition of the concrete mixtures prepared is presented in Table 1.

Table 1. Composition of concrete prepared with natural and recycled aggregate.

Label	per m ³ concrete						
	Aggregate			cement	water	SP	w/c
		(kg)		(kg)	(kg)	(l)	
	fine	coarse					
		4/8 mm	8/16mm				
A	854	387	696	360	169.2	6.5	0.43
B	733	331	546	360	270.0	6.5	0.74
C	793	334	646	360	219.6	6.5	0.62
D	822	372	602	360	195.8	6.5	0.64
E	630	283	492	360	320.0	6.5	0.90

It is expected that the aggregate origin will affect more significantly the fine aggregate fraction. Sieve analysis was therefore carried out for both natural and recycled fine aggregate, and the results are presented in Figure 1. It can be seen that rubble-based fine aggregate contains a larger proportion of fine particles; it contained more particles under 0.125 mm than natural material, and less particles with size ranging between 0.25 and 2 mm.

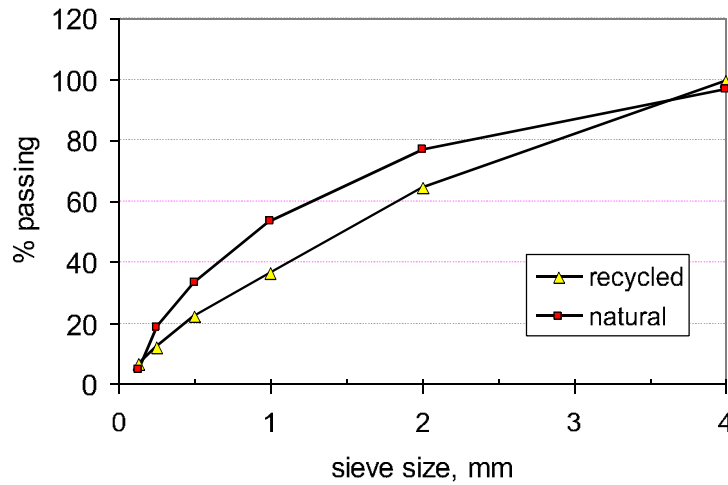


Figure 1. Sieve analysis of the fine aggregate for natural and recycled aggregate employed.

The level of water was adjusted to achieve the same level of fresh concrete consistency for all concrete types investigated. The results presented in Table 1 show that the largest amount of water was added when fine aggregate is substituted by the recycled material.

The largest differences in particle sizes between natural and recycled aggregate were observed for the fine aggregate. Figure 1 shows the sieve analysis of fine aggregate for both aggregate types.

Fresh concrete properties, slump, air content and density were measured in accordance with the standards EN 12350-2, 7 and 3. The values obtained are presented in Table 2. It can be observed that the air content increased when fine aggregate contained recycled aggregate, and density was decreased accordingly. Slump ranged between 50 and 90 mm, as designed, for all concrete mixtures prepared. Values for selected mechanical properties of hardened concrete containing recycled aggregate are presented in Table 3. Standard procedures EN 12390-3 and 11 were used to measure the compressive strength and water-tightness.

Table 2. Fresh concrete properties for different concrete mixtures containing recycled aggregate.

label	slump, mm	w/c	air content, %	unit weight, kg/m ³
A	80	0.43	1.7	2444
B	50	0.74	2.7	2275
C	90	0.62	1.9	2375
D	60	0.64	1.9	2338
E	70	0.90	3.4	2110

Table 3. Influence of recycled aggregate upon hardened concrete properties.

label	comp.strength @ 28 days, MPa	depth of water penetration, mm
A	53.3	32
B	31.1	25
C	44.9	15
D	48.8	13
E	31.3	27

Depth of water penetration is an indicator for the permeability of concrete; the larger the depth, the more permeable is the porous material. Despite a significant increase in water to cement ratio, w/c, depth of water penetration decreased for concrete containing coarse recycled aggregate. This trend was observed for both aggregate particle size ranges. Penetration depth of

concrete containing fine recycled aggregate (type B and E) was only slightly reduced when compared to the reference concrete (no recycled aggregate). This could be explained by the presence of increased quantity of fine particles in the fine recycled aggregate.

Compressive strength was significantly decreased when recycled aggregate was used. This can be predominantly attributed to the increased water to cement ratio. It is interesting to note, however, that the strength of concrete containing only recycled aggregate (E) was practically equal to the strength of concrete containing recycled fine aggregate only (B).

The obtained results show that the behavior of concrete types C and D that both contain recycled coarse aggregate of different particle size range is very similar for all properties investigated.

3 USE OF RECYCLED WATER IN CONCRETE

In the production of concrete, large amounts of water are used for washing the mixer, the mixing drums of truck mixers or agitators and other equipment in ready mix concrete plants. Typically, 100 l of wastewater is generated per cubic meter of concrete in ready-mixed production (Chini 2001). After the washing process is completed, the wash water contaminated predominantly with fine concrete particles is usually disposed. Prior to disposal, water is retained in sedimentation basins in order to reduce the level of solid particles.

Large quantities of fresh tap water are therefore used and consequently disposed of in concrete production. Fresh water resources could be preserved if this water could be re-used. Slovenia has recently imposed an increase of tax for disposing waste water, therefore several concrete mixing plants have shown interest in improving the sustainability of their production processes.

If quantities of solids are not too high, the waste wash water can replace tap water as one of the constituent materials in the concrete mixture. Ready mix concrete plants often avoid using ready-mix truck wash water in the production of fresh concrete, partly due to limited data available (Sandrolini 2001). Local source materials should be used in preliminary testing if reliable concrete production is to be ensured.

In order to investigate the possibility of re-using waste wash water, a comparative study of the influence of recycled water on the concrete properties was carried out. Concrete samples were produced in three different concrete batching plants. For each plant, properties of reference concrete (prepared with tap water) were compared to properties of concrete prepared with recycled water. In each plant, routinely used local aggregate was employed in the preparation of mixes.

The same amount of water was used in the preparation of both types of samples. Chemical analysis of waste wash water from one of the plants is presented in Table 4. Based on the recommendations of the EN 1008 and the results obtained for the density of recycled water, mass of solid material in recycled water was estimated to be 0.057 kg/l. Additional mass of solid material in the concrete resulting from the use of water recovered from processes in the concrete industry is therefore below the limitation imposed by EN 1008 (1%).

Table 4. Analysis of recycled water.

type of water	sedimentation, ml sediment / 80 ml sample	pH	Cl ⁻ , mg/l	SO ₄ ²⁻ , mg/l	density, kg/l
tap	-	7.94	10.64	22.43	1.00
recycled	37	11.42	6.91	10.70	1.03

Composition of concrete produced at the selected concrete plant is presented in Table 5. Maximum aggregate size of 32 mm was selected. Designed compressive strength and water to cement ratio were 30 MPa and 0.40, respectively. Cement type CEM I 42.5 R was employed. 2% of superplasticizer and 0.1% of the air entraining agent (with respect to the cement mass) was added to the mixture. The same type of superplasticizing agent was employed as in concrete

containing recycled aggregate. Slump, air content and fresh concrete density were measured according to the standards EN 12350-2, 7 and 3. Results for fresh concrete properties collected in Table 6 indicate that the replacement of tap water with recycled water resulted in increased consistency of fresh concrete, i.e. decreased slump, and decreased air content. This can be attributed to the increased level of fine particles contained in the water used in the preparation of concrete mixture.

Both compressive strength and watertightness, i.e. depth of water penetration, were measured according to EN 12390-3 and 11. The results are collected in Table 7. Compressive strength of both types of concrete was measured at 3, 7 and 28 days. At 28 days, the loss of strength due to the replacement of tap water with recycled wash water was 10%. Use of recycled wash water leads to significant increase of watertightness, or, in other words, depth of water penetration reduced by 38% when recycled wash water was employed. Again, this happens probably due to the presence of fine particles in waste water.

Table 5. Composition of concrete prepared with tap and recycled wash water.

type of water	aggregate, kg		cement, kg	water, kg	SP, l	AE, l
	fine	coarse				
tap	801	906	388	159	7.76	2.13
recycled	796	903	387	155	7.80	2.16

SP = superplasticizer, AE = air entraining agent

Table 6 Fresh concrete properties.

type of water	slump, mm	w/c	air content, %	unit weight, kg/m ³	water compliance with EN 1008
tap	130	0.41	7.0	2263	yes
recycled	40	0.40	4.8	2325	yes

Table 7 Properties of hardened concrete prepared with tap and recycled water.

type of water	compressive strength, MPa			water-tightness, mm
	@ 28 days			
	@ 3 days	@ 7 days	@ 28 days	
tap	28.6	34.6	42.6	25.3
recycled	34.9	40.8	47.5	15.7

4 CONCLUDING REMARKS

One of the possibilities to implement the principles of sustainable development into construction is to recycle construction materials. The largest benefit is obtained if the most widely used materials, such as concrete or its constituents, are recycled. A study dealing with the possibilities of recycling concrete rubble and waste water that results from the concrete production was therefore initiated. The obtained results show that both recycled materials investigated can be used in concrete production.

Concrete crushed into appropriate particle sizes has a potential to be used as aggregate in concrete instead of virgin stone material. However, in order to ensure the performance of concrete placed in a structure, the influence of such secondary material upon concrete properties has to be assessed prior to its use in practice. The results presented show that substitution of fine aggregate has the greatest influence on the concrete properties. This is probably due to the large content of fine particles present in recycled fine aggregate. Chemical composition of recycled aggregate, especially its hardened cement paste content, has also large influence upon concrete behaviour.

Waste wash water that would otherwise had to be disposed can be used as mixing water in the preparation of concrete. The results of the investigations show that the influence of waste water on both fresh concrete and mechanical properties is minute.

If use of waste water is to be incorporated into the concrete production technology, confidence into the waste water composition should be established by its monitoring. Maximum permissible levels of individual potentially harmful components have to be known, and chemical composition fluctuations should be kept within these pre-determined intervals. Successful use of waste wash water leads to preserving precious natural resources of drinking water, therefore the producers should be encouraged to recycle their waste wash water in several ways.

5 REFERENCES

- Chini, A. R. et al. 2001. Reuse of wastewater generated at concrete plants in Florida in the production of fresh concrete. *Magazine of concrete research*, 53: 311-319.
- EPA 2006. U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation. LCAccess – LCA 101 (available at <http://www.epa.gov/nrmrl/lcaccess/>)
- Hendriks, C.F. & Pietersen, H.S. 2000. Sustainable raw materials: construction and demolition waste, State of the art report of RILEM TC 165-SRM, No.22
- Our common future* 1987. Oxford Press
- Samarin, A. 1999. Wastes in Concrete: Converting liabilities into assets, In: Proceedings of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, GB, Thomas Telford, pp.1-21
- Sandrolini, F. & Franzoni, E. 2001. Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cement and concrete research*, 31: 485-489.
- Šelih, J. et al. 2004. The use of waste materials in building and civil engineering. *Materials and technologies*, 38: 79-86.

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **IGOR BIRK** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»ODPORNOST PROTI PRODORU VODE ZA LAHKOVGRADLJIV BETON IZ
DROBLJENEGA APNENČEVEGA AGREGATA«.**

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.

Prikrnica, 06.04.2010

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 961.32(043.2)

Avtor: Igor Birk

Mentor: izr. prof.dr. Violeta Bokan Bosiljkov

Naslov: Odpornost proti prodoru vode za lahko vgradljiv beton iz drobljenega apnenčevega agregata

Obseg in oprema: 65 str., 20 pregl., 43 sl.

Ključne besede: struktura betona, odpornost betona, vodotesnost betona

Izvodček:

V diplomski nalogi smo najprej ugotavljali odpornost betona izdelanega iz drobljenega apnenčevega agregata in cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5R (beton L2) na njegovo odpornost proti prodoru vode pod pritiskom. Poleg tega smo preskušali tudi njegove lastnosti v svežem stanju ter njegovo tlačno in cepilno natezno trdnost v strjenem stanju. Zanimal nas je vpliv nizkih in povišanih temperatur v času vezanja in strjevanja betona na obravnavane lastnosti. Poleg tega pa smo 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 in hladnih stikov v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode. Na koncu smo naredili primerjavo med obravnavanimi lastnostmi betona L2 in betona izdelanega iz savskega proda in cementa CEM I 42,5R

BIBLIOGRAPHY AND DOCUMENTARY PAGE WITH EXTRACT

UDC: 961.32(043.2)
Author: Igor Birk
Mentor: Violeta Bokan Bosiljkov, PhD, Associate Professor
Title: Resistance of highly flowable concrete made from crushed limestone aggregate
Volume and equipment: 65 pages, 20 inspections, 43 pictures
Key words: concrete structure, concrete resistance, water penetration resistance of concrete

Abstract:

The diploma thesis deals with the resistance of concrete made by crushed limestone aggregate, tap water and cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R (concrete L2) against penetration of water under pressure. Beside this, fresh concrete properties were determined and compressive and splitting tensile tests were carried on hardened concrete. 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. Further on, study of influence of honeycombs, bug holes and cold joints on the resistance of the concrete against penetration of water under pressure was carried out. At the end comparison between properties of concrete L2 and the same properties of concrete made by gravel from river Sava and cement CEM I 42,5R was carried out.

ZAHVALA

Zahvaljujem se izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov, univ. dipl. ing. grad. za strokovno pomoč pri nastajanju diplomske naloge. Zahvala velja tudi somentorju g. Franciju Čeponu dipl. ing. grad. in kolektivu Katedre za preizkušanje materiala in konstrukcij, ker so mi omogočili in pomagali s svojimi izkušnjami pri moji nalogi.

Izredna zahvala gre moji družini za vso podporo, pomoč in razumevanje skozi vsa leta študija.

KAZALO:

1	UVOD.....	1
2	OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONOV.....	2
2.1	AGREGAT.....	2
2.2	VODA.....	4
2.3	CEMENT.....	6
2.3.1	GLAVNE SESTAVINE.....	8
2.3.2	HIDRATACIJA CEMENTA.....	10
2.3.3	VRSTE CEMENTA.....	13
2.3.4	MEHANSKE ZAHTEVE.....	14
2.4	KEMIJSKI DODATKI BETONU.....	15
2.4.1	SUPERPLASTIFIKATORJI.....	15
3	BETON.....	16
3.1	LASTNOSTI BETONSKIH MEŠANIC.....	16
3.2	MEŠANJE BETONA.....	16
3.3	KONSISTENCA BETONSKE MEŠANICE.....	17
3.4	VGRADLJIVOST.....	18
3.5	IZCEJANJE VODE.....	19
3.6	ZGOŠČEVANJE BETONA.....	19
3.7	VEZANJE IN STRJEVANJE BETONA.....	20
3.8	STRJEN BETON.....	21
3.8.1	NEGA BETONA.....	21
4	METODE PREISKAV SVEŽE BETONSKE MEŠANICE IN ZAHTEVE STANDARDA SIST EN 206-1.....	22
4.1	METODA S POSEDOM; SIST EN 12350-2.....	22
4.2	METODA Z RAZLEZOM; SIST EN 21350-5.....	24
4.3	METODA Z ZGOŠČEVANJEM PRI VIBRIRANJU; SIST EN 12350- 4 25	
4.4	DOLOČANJE VSEBNOSTI ZRAKA V SVEŽEM BETONU; SIST EN 12350-7 27	
5	METODE PREISKAV STRJENEGA BETONA IN ZAHTEVE STANDARDA SIST EN 2006-1.....	29
5.1	TLAČNA TRDNOST; SIST EN 12390-3.....	29

5.2	RAZRED TLAČNE TRDNOSTI BETONA	30
5.3	RAZCEPNA NATEZNA TRDNOST; SIST EN 12390-6.....	31
5.4	GLOBINA PRODORA VODE POD PRITISKOM; SIST EN 12390-8	32
5.5	MODUL ELASTIČNOSTI; JUS U.M1.025	33
6	LASTNE PREISKAVE.....	36
6.1	UVOD.....	36
6.2	OSNOVNI MATERIALI	37
6.2.1	AGREGAT	37
6.2.2	VODA.....	38
6.2.3	CEMENT.....	38
6.2.4	KEMIJSKI DODATEK – SUPERPLASTIFIKATOR	39
6.3	SESTAVA BETONSKE MEŠANICE L2	40
6.4	PREISKAVE SVEŽIH BETONSKIH MEŠANIC	41
6.4.1	PRESKUS Z RAZLEZOM; SIST EN 12350-5	42
6.4.2	PREIZKUS POSEDA Z RAZLEZOM	43
6.4.3	PREIZKUS VSEBNOSTI ZRAKA; SIST EN 12350-7	45
6.4.4	POVZETEK REZULTATOV NA SVEŽIH MEŠANICAH	46
6.5	PREISKAVE STRJENEGA BETONA	47
6.5.1	NEGA PREIZKUŠANCEV	47
6.5.2	TLAČNA TRDNOST BETONA	47
6.5.3	CEPILNA NATEZNA TRDNOST	50
6.5.4	GLOBINA PRODORA VODE POD PRITISKOM; SIST EN 12390-8	51
7	SKLEP.....	64
	VIRI.....	65

KAZALO SLIK:

<i>Slika 1 : Shematski prikaz sejar,ja agregata in pcjasnilo pcjmov.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2: Mejne krivulje območja primernosti agregata po SIST 1026:2008</i>	<i>3</i>
<i>Slika 3: Stopnje količine vlage v agregatu: a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago, (a) moker.....</i>	<i>4</i>
<i>Slika 4: Shema proizvodnje cementa.....</i>	<i>7</i>
<i>Slika 5: Faze hidratacije cementnega kamna.....</i>	<i>12</i>
<i>Slika 6: Vibrator za beton.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 7: Vibriranje betona</i>	<i>20</i>
<i>Slika 8: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona</i>	<i>22</i>
<i>Slika 9: Posed betonskega stožca.</i>	<i>23</i>
<i>Slika 10: Razlezna miza.</i>	<i>23</i>
<i>Slika 11 : Pravilen in nepravilen posed stožca.</i>	<i>24</i>
<i>Slika 12: Postopek določanja konsistence betona z metodo z razlezom.....</i>	<i>25</i>
<i>Slika 13: Kalup za zgoščevanje po SIST EN 12350-4.</i>	<i>27</i>
<i>Slika 14: Shema Porozimetra</i>	<i>28</i>
<i>Slika 15: Porozimeter za beton.....</i>	<i>28</i>
<i>Slika 16: Shematski prikaz cepljenja vaj in kocke.....</i>	<i>31</i>
<i>Slika 17: Shema naprave za preskus vodotesnosti po SIST EN 12390-8.</i>	<i>33</i>
<i>Slika 18: Določanje statičnega modula elastičnosti</i>	<i>34</i>
<i>Slika 19: Grafični prikaz cikličnega obremenjevanja in razbremenjevanja</i>	<i>35</i>
<i>Slika 20: Graf primerjave konsistence mešanic s preskusom razleza.</i>	<i>42</i>
<i>Slika 21: Merjenje poseda na lahkovgradljivi betonski mešanici.</i>	<i>43</i>
<i>Slika 22: Graf primerjave konsistence mešanic s preizkusom poseda.</i>	<i>44</i>
<i>Slika 23: Graf primerjave časa razleza mešanic s preizkusom razleza s posedom.</i>	<i>45</i>
<i>Slika 24: Porozimeter</i>	<i>46</i>
<i>Slika 25: Preizkus tlačne trdnosti betona</i>	<i>48</i>
<i>Slika 26: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni (nizke temperature)</i>	<i>48</i>
<i>Slika 27: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni (sušilnica)</i>	<i>49</i>
<i>Slika 28: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni (28 dni v vodi)</i>	<i>50</i>
<i>Slika 29: Povprečna cepilna natezna trdnost betona pri starosti 28 dni (100% R.V., T=20±2°C).</i>	<i>51</i>

<i>Slika 30: Naprava za vodotesnost</i>	<i>52</i>
<i>Slika 31: Globina prodora vode v strjen beton L2 in P1</i>	<i>53</i>
<i>Slika 32: Prodor vode skozi preizkušanece</i>	<i>55</i>
<i>Slika 33: Globina prodora vode v beton z vgrajenimi gnezdi</i>	<i>55</i>
<i>Slika 34: Hladni stik dveh plasti betona</i>	<i>56</i>
<i>Slika 35: Globina prodora vode v beton z zračnimi žepi</i>	<i>57</i>
<i>Slika 36: Cpaž za betonsko ploščo z armaturo premera 8mm</i>	<i>59</i>
<i>Slika 37: Cpaž za betonsko ploščo z armaturo premera 20 mm</i>	<i>59</i>
<i>Slika 38: Vrtače vačjev</i>	<i>60</i>
<i>Slika 39: Globina prodora vode v beton z vgrajeno armaturo premera 8 mm</i>	<i>60</i>
<i>Slika 40: Globina prodora vode v beton z vgrajeno armaturo premera 20 mm</i>	<i>61</i>
<i>Slika 41 : Primerjava globine prodora vode v odvisnosti od nege (nizke temperature)</i>	<i>62</i>
<i>Slika 42: Primerjava globine prodora vode v odvisnosti od nege (28 dni visoke temperature)</i>	<i>62</i>
<i>Slika 43 : Primerjava globine prodora vode v odvisnosti od nege (14 dni voda+14 dni sušilnica).....</i>	<i>63</i>

KAZALO PREGLEDNIC:

<i>Preglednica 1: Kemijska sestava čistega portland cementa CEM I.....</i>	<i>7</i>
<i>Preglednica 2: Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti.....</i>	<i>8</i>
<i>Preglednica 3: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1.....</i>	<i>13</i>
<i>Preglednica 4: Trdnostni razredi cementov po standardu SIST EN 197-1.....</i>	<i>14</i>
<i>Preglednica 5: Klasifikacija konsistence po DIN standardih, z opisom konsistence</i>	<i>18</i>
<i>Preglednica 6: Stopnje konsistence za metodo preskusa s posedom stožca po SIST EN 206-123</i>	<i>23</i>
<i>Preglednica 7: Stopnje konsistence v odvisnosti od razleza po standardu SIST EN 206-1</i>	<i>24</i>
<i>Preglednica 8: Stopnje konsistence v odvisnosti od mere zgoščenosti po standardu SIST EN 206-1</i>	<i>26</i>
<i>Preglednica 9: Razredi tlačne trdnosti za normalno težek in težak beton po standardu SIST EN 206-1</i>	<i>29</i>
<i>Preglednica 10: Dovoljene vrednosti prodora vode po standardu SIST EN 206-1 pri starosti betona najmanj 28 dni</i>	<i>32</i>
<i>Preglednica 11: Lastnosti uporabljenega drobljenega apnenčevega agregata.</i>	<i>37</i>
<i>Preglednica 12: Izbrana zrnavostna sestava drobljenega apnenčevega agregata (Laže).....</i>	<i>38</i>
<i>Preglednica 13: Lastnosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R v primerjavi s standardom SIST EN 197-1.....</i>	<i>39</i>
<i>Preglednica 14: Sestava mešanice L2.....</i>	<i>40</i>
<i>Preglednica 15: Prikaz povprečnega razleza betonskih mešanic L2 in P1.</i>	<i>42</i>
<i>Preglednica 16: Prikaz rezultatov poseda betonskih mešanic L2 in P1.....</i>	<i>43</i>
<i>Preglednica 17: Čas potreben za končen razlez betonskih mešanic.....</i>	<i>44</i>
<i>Preglednica 18: Prikaz rezultatov razleza betonskih mešanic s posedom.....</i>	<i>45</i>
<i>Preglednica 19: Povprečna poroznost betonov L2 in P1.</i>	<i>46</i>
<i>Preglednica 20: Količina absorbirane vode preizkušancev mešanic L2 in P1.....</i>	<i>53</i>

1 UVOD

Odpornost betona proti prodoru vode je ena izmed najpomembnejših lastnosti betona, ki jo največkrat povežemo z betonskimi konstrukcijami, pri katerih se zahteva vodotesnost. Praviloma so to betonski objekti oziroma njegovi deli, pri katerih bi prodor vode ali drugih tekočin pustil posledice na objektu ali v njihovi okolici. V to skupino konstrukcijskih elementov ali konstrukcij spadajo temelji in temeljne plošče, čistilne naprave, bazeni za shranjevanje tekočin, skladišča plinov, odlagališča jedrskih odpadkov, itd. Obstojnost betona in posledično tudi konstrukcije je močno povezana z njegovo odpornostjo proti prodoru vode. Zato Slovenski nacionalni standard SIST 1026:2008 podaja zahteve glede dovoljenih vrednosti prodora vode s preizkusom po SIST EN 12390-8 za različne stopnje izpostavljenosti po SIST EN 206-1, saj se ravno v agresivnih okoljih zahteva visoka kakovost zaščitne plasti betona nad armaturo.

Na odpornost betona proti prodoru vode imajo največji vpliv osnovni materiali v betonski mešanici, vodocementno razmerje, dodatki in postopek vgrajevanja v opaže ter nenazadnje tudi nega betona. Nepravilna nega betona lahko povzroči nastanek površinskih razpok, ki poslabšajo vodotesnost betona.

Zato smo v diplomski nalogi analizirali različne vplive na vodotesnost betona. Betonske mešanice smo izpostavljali različnim zunanjim vplivom (nizke/visoke temperature, visoka/nizka vlažnost), študirali smo vpliv gnezd iz zračnih žepov ter hladnih stikov in velikost armaturnih palic pri predpisanem odstotku armiranja konstrukcijskega elementa.. Poleg tega smo na svežih betonskih mešanicah preizkušali razlez, posed, razlez s posedom, stopnjo zgoščenosti in vsebnost zraka, na strjenem betonu pa tlačno ter cepilno natezno trdnost.

2 OSNOVNE SESTAVINE ZA IZDELAVO BETONOV

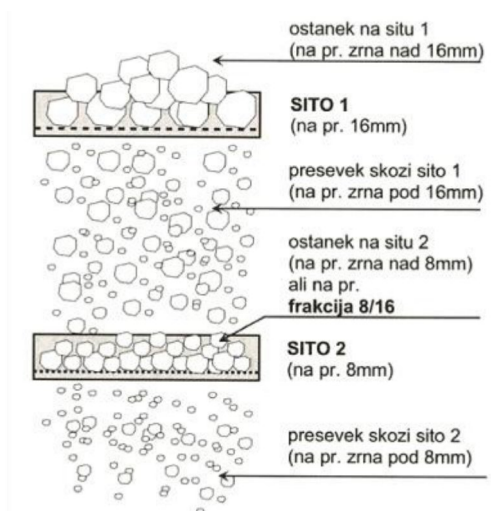
2.1 AGREGAT

Agregat predstavlja največji delež materiala v eni prostorninski enoti betona. V običajnih betonih tvori okoli 75% njihove prostornine, pri betonih nizke trdnosti pa tudi do 85% prostornine. Agregate razvrščamo v dve skupini, in sicer po načinu njihovega pridobivanja: na drobljence (lomljen agregat) in gramoze aluvialnega izvora (prod). Drobljenec pridobivamo v kamnolomih z drobljenjem večjih kamnitih blokov, njegova značilnost pa je, da ima ostre robove in bolj homogeno mineralno sestavo. Zaradi ostrorobih zrn se le-ta pri vgrajevanju medsebojno zaklinijo, kar rezultira v izboljšanju mehanskih karakteristik, še posebej je povečana natezna trdnost betona. Gramoz pa pridobivamo iz rečnih nanosov, zato ima lepo zaobljena zrna in je raznolike mineralne sestave. Prednost gramoznih agregatov je prav v zaobljenih zrnih, kar nam omogoča boljšo oziroma lažjo vgradljivost betonov.

Agregat delimo na droben in grob. Droben agregat ima premer zrn do 4mm, grob agregat pa ima premer zrn večji od 4mm. Droben agregat se uporablja predvsem za izdelavo različnih vrst malt, kombinacija drobnega in grobega agregata pa za izdelavo betonov.

Agregat zapolni velik del prostornine malt in betonov. Votline med posameznimi zrnji se tako le pri ustrezni zrnovostni sestavi agregata optimalno zapolnijo. Pri izbiri zrnovostne sestave smo omejeni tudi z največjim premerom zrna oziroma z velikostjo maksimalnega zrna. Ta ne sme presegati 25% minimalne izmere konstrukcije in mora biti manjša od najmanjše svetle razdalje med vzporednimi armaturnimi palicami. Zato moramo biti izredno pazljivi pri močno armiranih konstrukcijskih elementih.

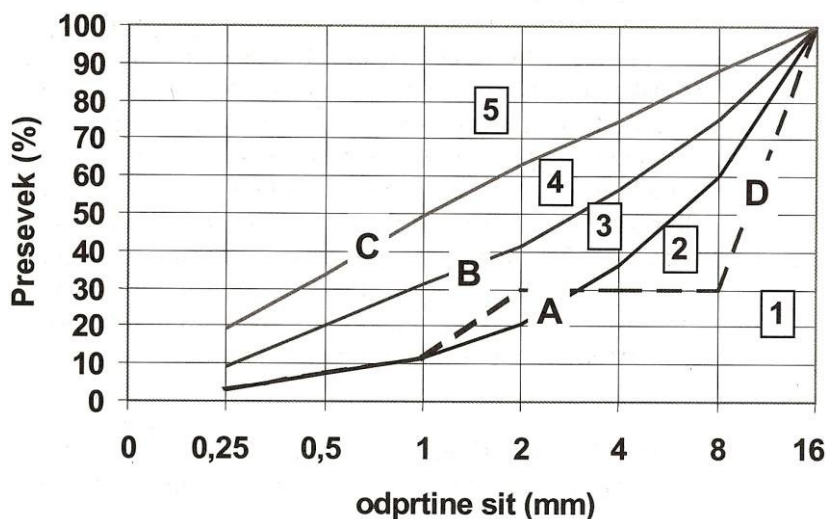
S kombinacijo različnih frakcij agregata dobimo ustrezno zrnovostno sestavo agregata, ki jo kasneje uporabimo za pripravo sveže betonske mešanice. Posamezne frakcije agregata dobimo s sejanjem na sitih kvadratnih odprtih (sito z največjo odprtino na vrhu ter z najmanjšo odprtino na dnu sistema sit).



Slika 1 : Shematski prikaz sejarja agregata in pcjasnilo pcjmov [R. Žarnić, 2005]

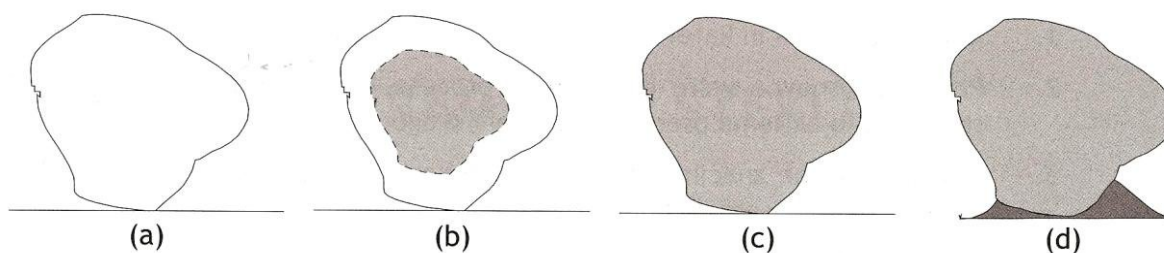
Zrnovostno sestavo agregata preverjamo s sejanjem na laboratorijskih sitih v skladu z zahtevami standarda SIST EN 933-1.

Pri sestavljanju agregata ustrezne zrnovostne sestave so nam lahko v pomoč priporočene mejne krivulje zrnivosti agregata, ki jih podaja SIST 1026:2008. V splošnem velja za primerno zrnovostno sestavo agregata območje med krivuljama A in B.



Slika 2: Mejne krivulje območja primernosti agregata po SIST 1026:2008.

Agregati, ki se nahajajo v naravi, vsebujejo določeno količino vlage. Pri vsaki uporabi agregata za betonske mešanice je potrebno ugotoviti, v kolikšni meri ta vlaga vpliva na masno razmerje med vodo in cementom (v/c razmerje). Glede na količino vlage v agregatu ločimo štiri stanja, ki so shematsko prikazana na sliki 3.



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

2.2 VODA

Voda predstavlja pomembno komponento vsake mešanice s cementnim vezivom, saj povzroči, da se cement spremeni v vezivo in povzroči hidratacijo (vezavo) cementa. Voda v svežem betonu deluje kot komponenta za doseganje potrebne obdelovalnosti betonske mešanice. Za izdelavo betonske mešanice je na splošno primerna pitna voda, saj ni potrebna dodatna analiza vode. Če uporabljamo vodo iz drugih virov (površinske vode, industrijske vode, itd), moramo opraviti dodatne analize po SIST EN 1008, da se dokaže njena primernost, saj so v vodi lahko škodljive snovi, ki bi škodovale betonu. Posebno škodljive snovi, ki jih voda ne sme vsebovati so:

- organske primesi (zemlja, humus, masti, itd),
- sulfati (soli, ki med kristalizacijo povečajo volumen),
- kloridi (soli, ki povzročijo korozijo armature),
- mulj.

Za nearmirane betone smemo uporabiti tudi vode iz drugih virov, vendar moramo njihovo primernost preveriti s pomočjo primerjalnih preizkusov:

- čas vezanja in
- tlačno trdnost betona.

Za primerjalno analizo najprej naredimo betonsko mešanico z destilirano vodo in nato še s predvideno vodo. Če se izkaže, da časovna razlika med začetkom in koncem vezanja ni večja od 30 minut in da je razlika med tlačnimi trdnostmi manjša kot 10%, se predvidena voda lahko uporabi za izdelavo betona. Za nearmirane betone se lahko uporabi tudi morska voda, vendar pa vsebnost soli v vodi ne sme presegati meje 5g soli na liter vode.

V betonu moramo zagotoviti vsaj toliko vode, kolikor je potrebno za hidratacijo cementa.

V primeru, da je vode premalo, bo del cementa ostal nehidratiziran, če pa je vode preveč, bo začela odvečna voda izhlapevati in se bodo v betonu začele izoblikovati kapilarne pore.

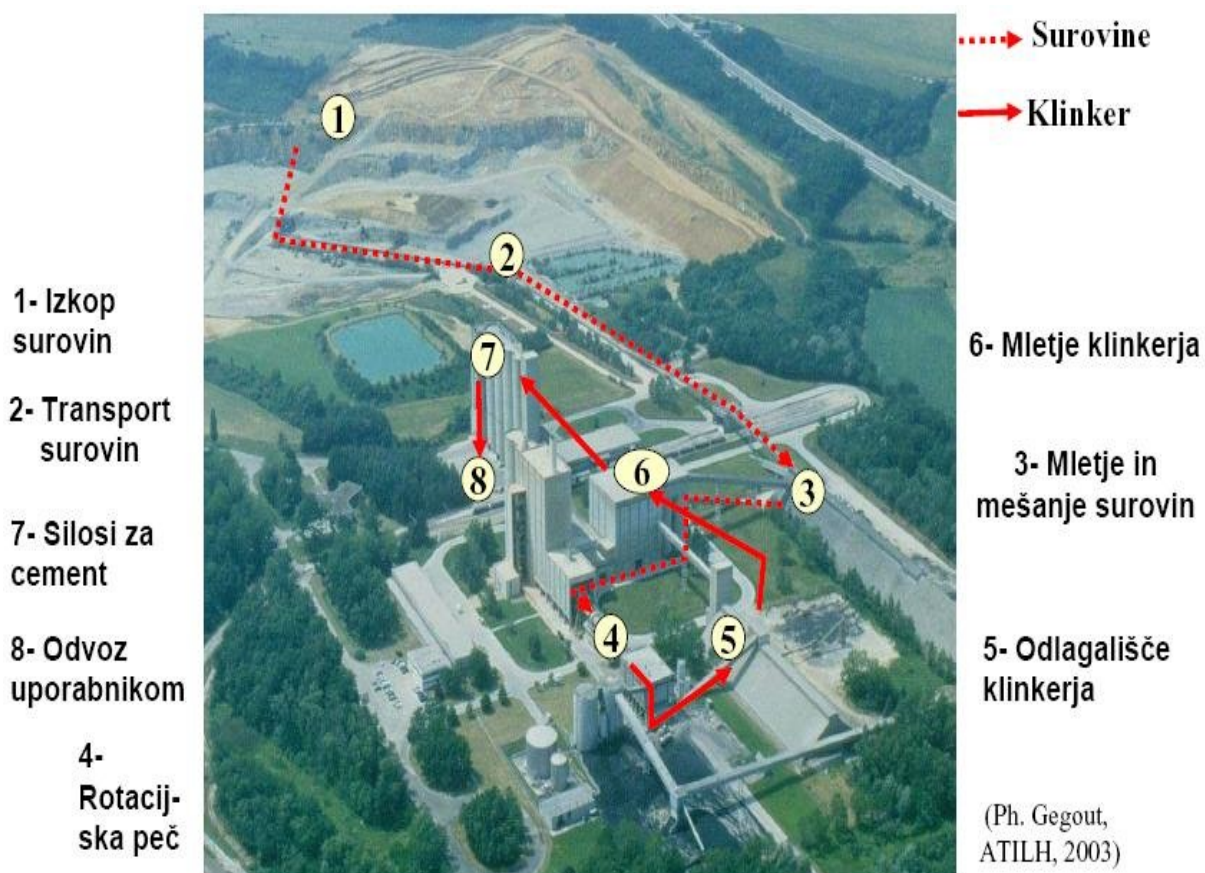
Neprimernost uporabljene vode se kasneje lahko pokaže s pojavi kot so:

- eflorescenca,
- prostorninska nestabilnost cementnega kamna,
- sprememba časovnega poteka hidratacije cementa,
- barvna sprememba veziva,
- različne vrste korozije.

2.3 CEMENT

Cement je silikatno hidravlično vezivo, ki, ko dodamo vodo, veže in se strdi v trden cementi kamen, ki lahko prenaša visoke tlačne obremenitve. Hidravlična veziva so veziva, ki vežejo in strjujejo na zraku in v vodi.

Osnovne surovine za proizvodnjo cementa so apnenec, lapor in glina. Ker v Sloveniji primanjkuje laporja, se mešanice, ki morajo vsebovati od 75 do 78% kalcijevega karbonata (CaCO_3), pripravljajo iz apnenca in gline. Mešanice apnenca in gline se zmeljejo v vertikalnih mlinih, da nastane moka, ki se žge v rotacijski peči. Minerali, ki so v apnencih in glinah, pri 100°C oddajajo prosto vodo in pri 600°C se izloča kristalno vezana voda. Pri 800°C se stali 30-40% CaO in SiO_2 , pri 900°C se stali še 90-95% CaO in SiO_2 . Med 1200°C in 1300°C nastane talina, v kateri se tvori mineral C_2S in pri temperaturi 1450°C (temperatura sintriranja) se tvori mineral C_3S . Tako dobimo zmes, ki je podobna pepelu in ima granule, ki v premer merijo 3cm, in je močno porozna. To zmes imenujemo cementni klinker. Klinker nato zelo hitro ohladimo, da ohranimo ustrezno mineraloško sestavo in v krogelnih mlinih zmeljemo v fini prah – portland cement. Klinkerju se lahko med mletjem dodaja tudi različne snovi (sadra, pucolan, žlindro, elektrofiltrski pepel, itd.), kar daje končne lastnosti različnim vrstam cementa.



Slika 4: Shema proizvodnje cementa

Osnovne spojine, ki tvorijo cementni klinker so:

Preglednica 1: Kemijska sestava čistega portland cementa CEM I [Kuzmanović S., 2009]

SPOJINA	DELEŽ
CaO (komponenta C)	62 - 67%
SiO ₂ (komponenta S)	19 - 25%
Al ₂ O ₃ (komponenta A)	2 - 8%
Fe ₂ O ₃ (komponenta F)	1 - 5%
SO ₃ (komponenta S)II	max. 3,5 - 4,5%
CaO (nevezan)	max. 2%
MgO	max. 5%
Na ₂ in K ₂ O	0,5 - 1,3%

Preglednica 2: *Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti* [Kuzmanović S., 2009]

OZNAKA	IME	DELEŽ	LASTNOSTI
C₃S	Trikalcijev silikat – alit	45 – 60 %	Najpomembnejši, pospešuje proces hidratacije, povzroča visoke trdnosti
C₂S	Dikalcijski silikat – belit	20 – 30 %	Zavira in podaljšuje proces hidratacije in strjevanja
C₃A	Trikalcijev aluminat	4 – 12 %	Pospešuje strjevanje in razvijanje hidratacijske toplote
C₄AF	Tetrakalcijev aluminoforit	10 – 20 %	Zavira strjevanje, odporen na sulfatno korozijo

2.3.1 GLAVNE SESTAVINE

Portland cementni klinker

Portland cementni klinker je proizveden s sintranjem predpisane mešanice surovin, ki vsebujejo elemente, običajno izražene v obliki oksidov CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ in majhne količine drugih snovi. Je hidravlični material, ki mora vsebovati najmanj 66% mase kalcijevih silikatov, ostanek pa sestoji iz klinkerjevih faz, ki vsebujejo aluminij in železo, ter druge spojine. Masno razmerje CaO/SiO₂ ne sme biti manjše od 2,0.

Žindra

Granulirana plavžna žindra se pridobiva s hitrim ohlajevanjem žlindre taline, ki nastaja ob taljenju železove rude. Je latentno hidravlično vezivo. Da sprožimo hidravlične lastnosti, ji moramo dodati alkalije. Kot delna zamenjava čistega portland cementa se uporablja že več kot sto let.

Pucolani

Pucolani so naravne snovi, silikatne ali silikatno-aluminatne sestave. Standard SIST EN 197 loči naravne pucolane, ki so vulkanskega izvora ali pa sedimentne kamnine, s primerno kemično in mineraloško sestavo, in naravne kalcinirane pucolane, ki so snovi vulkanskega izvora, gline, skrilavci ali sedimentne kamnine, aktivirani s termično obdelavo.

Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski pepel se pridobiva z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči, ki so kurjene z uprašenim premogom. Njegova sestava je odvisna od uporabljenega premoga in temperaturnega režima, ki mu je izpostavljen. Elektrofiltrski pepel, ki se uporablja kot zamenjava cementnega klinkerja, mora izpolnjevati zahteve standarda SIST EN 450.

Žgani skrilavci

Žgani skrilavci se proizvajajo v posebnih pečeh pri temperaturi 800°C. Zaradi sestave naravnega materiala in proizvodnega procesa vsebuje faze klinkerja in večji delež pucolansko aktivnih oksidov. Zato ima v primeru, ko je fino mlet, hidravlične lastnosti kot portland cement in poleg teh tudi pucolanske lastnosti.

Apnenec

Apnenec, ki se uporablja kot mineralni dodatek v cementih mora izpolnjevati zahteve podane v SIST EN 197-1.

Mikrosilika

Mikrosilika nastane v proizvodnji silicijevih in ferosilicijevih zlitin v elektropečeh pri redukciji zelo čistega kremenca s premogom. Običajno mikrosilika vsebuje več kot 90% SiO₂ v steklasti obliki. Premer zrn je izjemno majhen, saj je manjši od 1 nm. Ker pa ima mikrosilika zelo veliko specifično površino (200.000 cm²/g po Blain-u), je zelo reaktivna. Z mikrosiliko lahko praviloma zamenjamo do 10% cementnega klinkerja.

Dodatki cementu

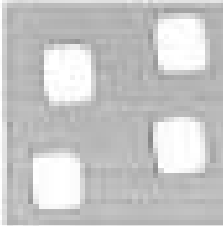
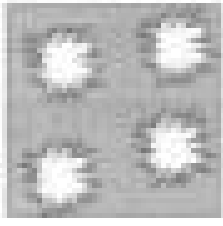
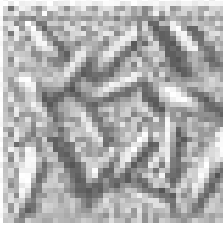
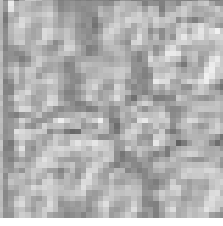
Razne dodatke cementu dodajamo zato, da bi izboljšali proces proizvodnje ali pa lastnosti cementa. Praviloma količina dodatkov ne sme presegati 1% mase celotnega cementa (razen v primeru pigmentov). Če pa so dodatki organskega izvora, količina ne sme presegati 0,5% mase cementa. Dodatki, ki jih dodajamo cementu, ne smejo pospeševati korozije armature ali poslabšati lastnosti cementa, betona ali malte.

2.3.2 HIDRATACIJA CEMENTA

Hidratacija cementa je kemijsko-fizikalen proces vezanja cementa in vode. To je kompleksna serija reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevega sulfata in vode. Na samem začetku je proces hidratacije odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih mineralov in kalcijevega sulfata. Nato postane proces bolj kontroliran s kontrolo rasti kristalov hidratijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in z raztapljanjem ionov. Spreminjanje cementne paste v cementni kamen, povezano z naraščanjem trdnosti veziva

imenujemo proces strjevanja, ki lahko traja več let. Če opazujemo proces hidratacije glede na razvoj trdnosti cementnega kamna, ga 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).

Faza	Shema	Opis dogajanja
1.		Pred-indukcijsko obdobje (traja nekaj minut). Po mešanju cementa in vode se v vodi hitro raztapljajo spojine in začne se hidratacija mineralov klinkerja. Proces sta ekzotermna in ju zato spremlja velik toplotni tok. Na tej stopnji reagira le 2 do 10% C ₃ S. Mineral C ₃ A se v deležu med 5 in 25% raztaplja in reagira s sulfatnimi ioni. Ob tem nastaja etringit, ki se izloča v obliki igličastih kosmičev na cementnih delcih. Mineral C ₄ AF reagira podobno kot C ₃ A, delež reagiranega C ₃ S pa je zelo majhen.
2.		Indukcijsko obdobje-relativno mirovanje (traja nekaj ur) Po začetni hitri hidrataciji se reakcijska hitrost zelo zmanjša. To zmanjšanje se razlaga na dva načina: <ul style="list-style-type: none"> • po teoriji začetne plasti se hidratacijski produkti obdajo z zaščitno plastjo že v pred-indukcijskem obdobju. Zaradi tega se hidratacija upočasni. Zaščitna plast se počasi spreminja in postane propustna, kar omogoči nadaljevanje procesa hidratacije • po teoriji kristalizacijskih jeder, nadaljevanje hidratacije ovirajo nastale nasičene raztopine kalcijevega hidroksida. S pojavom hidratacijskih jeder se iz raztopine izločajo mineralni kosmiči, koncentracija kalcijevih ionov se zniža in hidratacijski proces ponovno steče.
3.		Obdobje pospešene hidratacije (tretja do dvanajste ure procesa) Nasičena otopine z novo nastalimi kristali preide iz faze sola v fazo cementnega gela, ki je gosto tekoča masa z enakomerno razporejenimi zrnji. Hitrost hidratacije C ₃ S in C ₂ S narašča in doseže maksimalne vrednosti.
4.		Obdobje pojemajoče hidratacije (do konca hidratacije) Hitrost reakcij se zmanjšuje in je odvisna od difuzije ionov skozi plasti hidratacijskih produktov, ki tvorijo opno okoli nehidratiziranih jeder cementnih delcev. Nastaja C-S-H gel kot posledica hidratacije C ₃ S in C ₂ S. Na začetku nastali etringit reagira s nehidratiziranim C ₃ A in C ₄ AF in nastane monosulfat. V nadaljevanju hidratizirani material zori. Nastajajo nove spojine, iz gela se tvori cementni kamen, gel se prepleta z novo nastajajočimi kristali, ti rastejo in tvorijo mrežo.

Slika 5: Faze hidratacije cementnega kamna [R. Žarnić, 2005]

Bistven vpliv na stopnjo hidratacije ima masno razmerje med vodo in cementom (t.i. vodocementno razmerje v/c). Hidratacija poteka optimalno pri vrednostih vodocementnega razmerja od 0,38 do 0,42. V tem območju naj bi teoretično hidratizirala celotna količina cementa, vendar pa so raziskave pokazale, da v praksi hidratizira od 80 do 90% cementa, kar pa nima bistvenega vpliva na lastnosti cementnega kamna. Če pa je vodocementno razmerje preveliko, se oblikujejo pore večjega premera, ki znižujejo trdnost betona in zmanjšujejo njegovo vodoneprepnost.

2.3.3 VRSTE CEMENTA

Poznamo 27 proizvodov iz vrst običajnih cementov. Standard SIST EN 197-1 običajne cemente razvršča v pet glavnih vrst cementov:

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

Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1:

Preglednica 3: 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	0%
CEM II	portlandski cement z mineralnimi dodatki	klinker, granulirana plavžna žindra (S), pucolan (P, Q), elektrofiltrski pepel (V, W), žgani skrilavec (T), apnenec (L), mešani mineralni dodatek (M)	II/A (S,,P,Q,V,W,T,L) 6-20%
			II/B (S,,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), ko je mineralni dodatek mikrosilika (D) je lahko njen delež v cementu največ 10%, pucolan (P, Q)	IV/A (D,P,Q,V) 11-35%
		elektrofiltrski pepel (V)	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%

2.3.4 MEHANSKE ZAHTEVE

Po SIST EN 197-1 je standardna trdnost cementa tlačna trdnost standardne cementne malte po 28-ih dneh. Vključeni so trije razredi standardne trdnosti, in sicer 32.5, 42.5 in 52.5. Zgodnja trdnost cementa je tlačna trdnost po dveh ali sedmih dneh. Za vsak razred standardne trdnosti cementa obstajata dva razreda zgodnjih trdnosti, in sicer razred z običajno zgodnjo trdnostjo, ki se označuje z N (normal), in razred z visoko zgodnjo trdnostjo, ki se označuje z R (rapid). Trdnostni razredi cementov in pripadajoče zahteve so podani v preglednici 4.

Preglednica 4: 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	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10			
42,5 N	≥ 10		≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20			
52,5 N	≥ 20		≥ 52,5	-
52,5 R	≥ 30			

2.4 KEMIJSKI DODATKI BETONU

Kemijski dodatki betonom so snovi, ki s svojim kemijskim delovanjem vplivajo na nekatere lastnosti sveže ali strjene betonske mešanice. Ti kemijski dodatki so lahko v tekočem ali praškastem stanju. Dodajajo se betonskim mešanicom pred mešanjem ali med mešanjem v majhnih količinah. Te količine so izražene v odstotkih in se nanašajo na maso cementa v mešanici. Osnovne skupine kemijskih dodatkov so:

- plastifikatorji,
- superplastifikatorji (povečajo plastičnost sveže betonske mešanice),
- aeranti (izboljšajo odpornost na zmrzovanje oz. tajanje),
- pospeševalci vezanja (pospešijo hidratacijo cementa),
- zaviralci vezanja (zavirajo hidratacijo cementa),
- gostilci (povečajo vodotesnost betona),
- dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah,
- sredstva za kontrolo viskoznosti.

2.4.1 SUPERPLASTIFIKATORJI

Superplastifikator kot kemijski dodatek sveži betonski mešanici pomembno vpliva na reološke lastnosti mešanice, kot sta razlez in posed. Razlike v delovanju različnih superplastifikatorjev so posledica njihove kemične sestave. Superplastifikator nam omogoča:

- zmanjšanje količine zamesne vode,
- izboljšanje obdelovalnosti mešanice,
- počasnejši padec obdelovalnosti mešanice,
- izboljšanje zmrzinske odpornosti in
- izboljšanje vodotesnosti

ob nespremenjeni količini zamesne vode.

Glede na kemijsko sestavo superplastifikatorje razvrščamo v štiri skupine:

- sufonirani melamin-formaldehidni kondenzati (SMF),
- sufonirani naftalen-formaldehidni kondenzat (SNF),
- modificirani lignin-sulfonati (MLS),
- modificirani polikarboksilati.

3 BETON

3.1 LASTNOSTI BETONSKIH MEŠANIC

Beton je eden od temeljnih materialov v gradbeništvu. Sestavljen je iz mešanice agregata (drobljenca ali proda), vode in cementa, ki deluje kot vezivo. Izbira teh materialov je bistvenega pomena, saj mora beton zadostiti strogim zahtevam glede trdnosti in obstojnosti. Posebno pozornost je potrebno posvetiti tudi sami proizvodnji in tehnološkim operacijam, ki jim je beton izpostavljen pri zgodnji starosti. Zgodnja starost je definirana kot obdobje prvih treh dni po proizvodnji betona, saj se beton v teh dneh meša, transportira na gradbišče, vgrajuje v opaže, zaključno obdeluje in neguje.

3.2 MEŠANJE BETONA

Osnovne sestavine betona, kot so agregat, voda, cement, zrak in dodatki, se morajo pazljivo zmešati v homogeno celoto. Odločilno pri tem je zaporedje dodajanja posameznih sestavin. Najprej dodamo v mešalec potrebno količino suhega agregata ter cementa in šele čez čas, ko se agregat in cement dobro premešata dodamo vodo. Pomembno je, da dodamo vodo v suho mešanico ob pravem času in ob primerni hitrosti obračanja bobna mešalca. Pomembna je tudi količina mešanice glede na kapaciteto mešalca, čas polnjenja glede na čas mešanja, oblika bobna in njegovih lopatic. Bobni dobrih mešalcev omogočajo izmenjavo materiala z enega

konca na drugega s kotaljenjem, pregibanjem in gnetenjem. Dodatki betonu se v večini primerov dodajajo v obliki vodne raztopine (npr. superplastifikator).

3.3 KONSISTENCA BETONSKE MEŠANICE

Parameter, ki določa plastičnost betona, imenujemo konsistenca betona. Konsistenca je skupek lastnosti sveže betonske mešanice, ki vplivajo na njegovo:

- obdelovalnost,
- vgradljivost in
- zgostitev.

Standardi, ki predpisujejo metode določevanja konsistence sveže betonske mešanice, so:

- SIST EN 12350-2 (s postopkom poseda),
- SIST EN 12350-3 (z aparatom Vebe),
- SIST EN 12350-4 (s postopkom zgoščevanja pri vibriranju),
- SIST EN 12350-5 (s postopkom razleza).

Izbira konsistence sveže betonske mešanice je odvisna od pomembnosti konstrukcije, sredstev za vgrajevanje in zgoščevanje ter od odstotka armature v armiranobetonskih elementih. V splošnem pa velja, da naj bo mešanica betona takšna, da se jo lahko obdeluje z rokami.

Glede na posamezne kriterije ločimo štiri opisne stopnje konsistence:

- trdoplastična,
- srednjeplastična,
- mehkoplastična,
- tekoča.

Izbrana konsistenca betona se ne sme spreminjati od betonarne do gradbišča (do vgradnje betonske mešanice). Sicer se lahko dopusti omejen padec konsistence, vendar pa mora biti v naprej znan.

Preglednica 5: *Klasifikacija konsistence po DIN standardih, z opisom konsistence [R. Žarnić, V. 2016]*

OPIS (MEJE) KONSISTENCE	POSED [mm]	RAZLEZ [mm]	POSED PRI VIBRIRANJU [mm]
Zemeljsko vlažna	-	-	≥ 1,46
Trdoplastična	10 – 40	≤ 340	1,45 – 1,26
Srednjeplastična	50 – 90	350 – 410	1,25 – 1,11
Mehkoplastična	100 - 150	420 – 480	1,10 – 1,04
Zelo mehkoplastična	-	490 – 550	-
Tekoča	160 - 210	560 – 620	-
Zelo tekoča	≥ 220	≥ 630	-

3.4 VGRADLJIVOST

Stopnjo vgradljivosti betona določajo enostavnost vgrajevanja, zgoščevanje sveže betonske mešanice in zaključna obdelava. Pri transportu in vgradnji morajo biti zrna v plastični mešanici enakomerno razporejena, tako da ne pride do pojava segregacije (posedanje večjih zrn) in prekomernega izcejanja vode. Homogenost je lastnost, ki jo mora beton ohraniti ves čas vgrajevanja in strjevanja, saj le tako beton doseže zahtevane karakteristike (tlačna trdnost, natezna trdnost, vodoneprepustnost, itd). Beton je potrebno pripravljati kar se da blizu mesta vgradnje, saj se mu hitro spreminja konsistenca. Zrak, ki je vnešen v beton z aeranti, zmanjšuje pojav segregacije in zmanjša izcejanje vode.

3.5 IZCEJANJE VODE

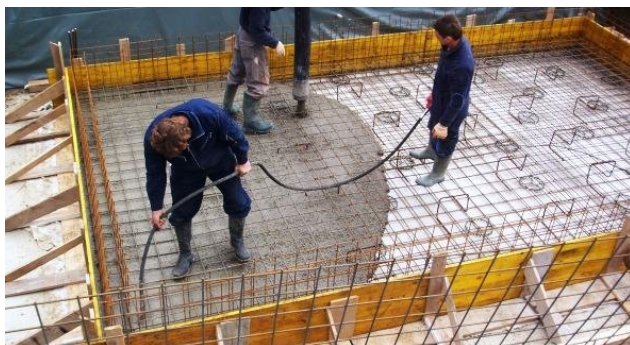
Izcejanje vode je pojav, pri katerem na vrhu sveže betonske mešanice nastane plast vode. Pojav je posledica sedimentacije trdnih delcev in potovanja vode znotraj mešanice proti površju. Pri tem nastaja vrhnja plast betona z višjim vodocementnim razmerjem. Ta plast ima slabe mehanske lastnosti, je neobstojna in ima nizko odpornost na zunanje vplive. V najslabšem primeru se lahko na površini ustvarijo žepi in večje odprte pore kraterske oblike. Vpliv in obseg izcejanja vode je možno zmanjšati z ustrezno zrnastostno sestavo agregata, raznimi kemijskimi dodatki, aeriranjem in z izbiro bolj fino mletih cementov. Zmanjševanje izcejanja je pomembno pri betonih, ki jih uporabljamo za zalivanje votlin, podpor in izdelavo neprepustnih plasti.

3.6 ZGOŠČEVANJE BETONA

Pri vgradnji betona z delovanjem energije (vibratorji, nabijala, vibracijske mize) se delci svežega betona spravijo v gibanje, s čimer se zmanjša trenje med delci, mešanica pa pri tem prehaja v stanje gostega fluida. Zato nam vibriranje omogoča uporabo mešanice, ki vsebuje večja zrna, pri kateri je potrebna manjša količina cementne paste ter posledično tudi manjša količina vode. Na splošno velja, da vibriramo betone, ki jih ne moremo kvalitetno ročno vgraditi. Pri ročno vgradljivem betonu vibriranje lahko povzroči segregacijo. Za zgoščevanje betona navadno uporabljamo vibratorje, ki so pritrjeni na opaž in pa vibracijske igle. Slednje uporabljamo za vibriranje betonov, ki jih neposredno vgrajujemo v konstrukcijo.



Slika 6: Vibrator za beton



Slika 7: Vibriranje betona

3.7 VEZANJE IN STRJEVANJE BETONA

Proces spreminjanja sveže betonske mešanice v strjen beton je posledica prehoda cementne paste v trd cementni kamen. Poroznost sveže betonske mešanice ima velik vpliv na mehanske in tehnološke lastnosti. Trdnejši betoni imajo manj odprtih in zaprtih por. Posebno pozornost moramo posvetiti hidratacijski toploti. Pri nizkih temperaturah hidratacijska toplota delno ščiti beton pred zmrzovanjem. Pri masivnih konstrukcijah pa hidratacijska toplota povzroča notranje lokalne obremenitve, saj se ne more enakomerno odvajati. Cementi za vsakdanjo uporabo razvijejo v treh dneh približno polovico hidratacijske toplote.

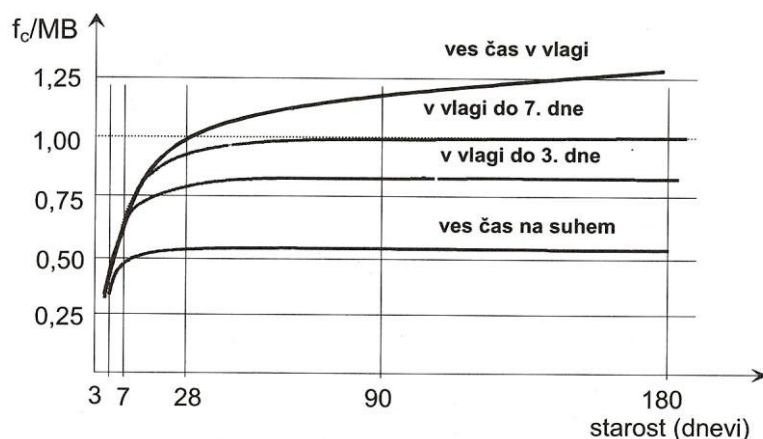
3.8 STRJEN BETON

3.8.1 NEGA BETONA

Končna trdnost betona je odvisna od nege betona v času strjevanja in od vlažnosti okolja, v katerem se beton nahaja. Trdnost betona narašča, dokler so v cementni pasti še nehidratizirana zrnca cementa. Tako proces strjevanja poteka nemoteno, če je relativna vlažnost okolja nad 80 % in če je temperatura okolja dovolj visoka. Zato je nujna nega betona z zagotavljanjem ustrezne vlažnosti okolja, vsaj v prvem mesecu starosti betona.

Sušenje betona ne prispeva k njegovi trdnosti, ker proces hidratizacije, za katerega smo prej omenili, da zagotavlja trdnost betona, potrebuje vlago. Zato osušeni beton nima vedno ustrezne in predvidene stopnje trdnosti, saj so določeni delci cementa lahko ostali nehidratizirani. Prehitro sušenje betona povzroča razlike med lastnostmi zunanjega betona in betona v notranjosti in lahko povzroči njegovo krčenje in pikanje. Ploskovni betonski elementi, ki imajo razmeroma veliko odprto površino, kot so npr. stene in plošče, se sušijo veliko hitreje kot linijski betonski elementi kot so npr. stebri. Beton lahko negujemo na različne načine:

- ga polivamo z vodo,
- pokrijemo z mokrimi tkaninami,
- prekrijemo s plastično folijo,
- vlažimo z razprševanjem vode
- na površino razpršimo kemijska sredstva za nego.



Slika 8: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona [R. Žarnić, 2005]

4 METODE PREISKAV SVEŽE BETONSKE MEŠANICE IN ZAHTEVE STANDARDA SIST EN 206-1

4.1 METODA S POSEDOM; SIST EN 12350-2

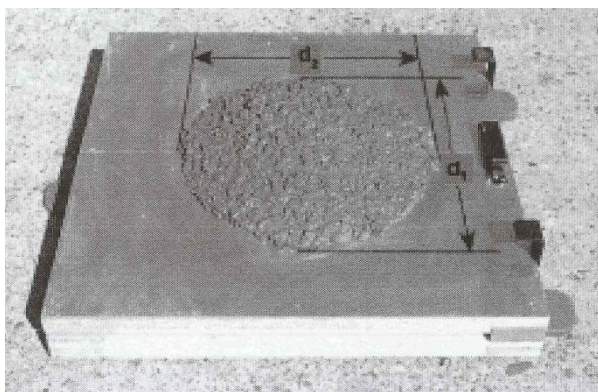
Metoda s posedom je najbolj preprosta metoda za določanje konsistence tekočih in srednje ter mehko plastičnih svežih betonskih mešanic in je zasnovana na merjenju deformacije zgoščenega betonskega prisekanega stožca, ki se posede zaradi lastne teže. Rezultat preiskave je razlika med prvotno višino stožca v kalupu in višino stožca po posedu. Kovinski stožec višine 300mm ter zgornjega premera $\Phi 100\text{mm}$ in spodnjega premera $\Phi 200\text{mm}$ polnimo z zidarsko žlico. Vsakič napolnimo tretjino stožca. Nato vsako plast zgostimo s 25 udarci s standardno kovinsko palico, ki je na koncu zaobljena. Prvo plast prebadamo po celoti, medtem ko vsako nadaljnjo plast prebadamo samo do spodaj ležeče plasti. Po koncu zgostitve zadnje plasti presežek betona odstranimo in ga poravnamo z vrhom stožca. Nato počasi dvignemo stožec in ga postavimo ob betonski stožec. Standardno palico postavimo na vrh stožca tako, da seže nad betonski stožec in nato izmerimo razliko v višinah, ki je lahko minimalno 10mm.

Preglednica 6: *Stopnje konsistence za metodo preskusa s posedom stožca po SIST EN 206-1*

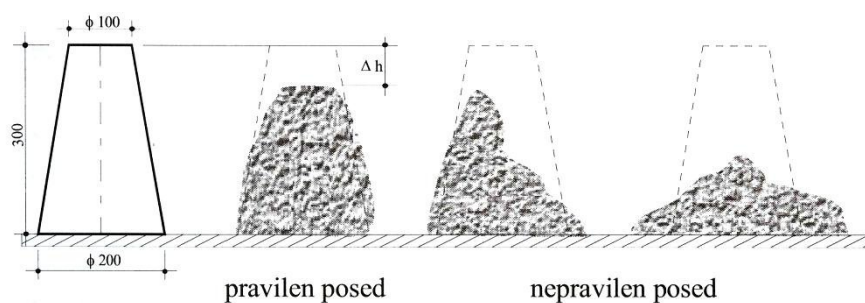
STOPNJA	POSED [mm]
S1	10 – 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	≥ 220



Slika 9: *Posed betonskega stožca.*



Slika 10: *Razlezna miza.*



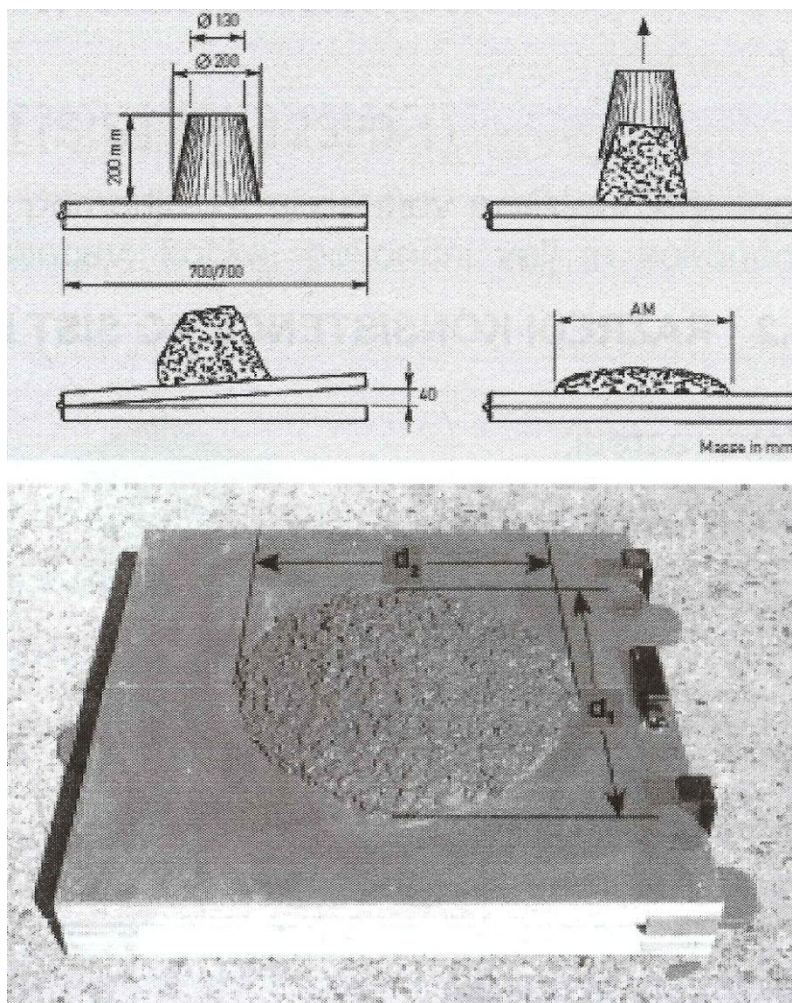
Slika 11 : Pravilen in nepravilen posed stožca. [R. Žarnić, 2005]

4.2 METODA Z RAZLEZOM; SIST EN 21350-5

Metoda z razlezom je zasnovana na merjenju deformacij zbitega betonskega konusa. Je enostavna metoda, ki se uporablja za plastične in tekoče mešanice. Na stresalno mizico postavimo kovinski konus višine 200mm in ga napolnimo v dveh približno enakih plasteh. Nato vsako plast posebej nabijemo z desetimi udarci z lesenim nabijačem prereza 40 x 40mm. Po nabijanju odstranimo presežek betona z vrha konusa s pomočjo zidarske žlice. Po 30-ih sekundah odstranimo kovinski konus. Stopimo na nožico spodnje plošče stresalne mizice, dvignemo zgornjo ploščo za 4cm in jo spustimo, da prosto pade. Postopek moramo ponoviti 15-krat. V tem času se betonska mešanica razleze po stresalni mizici in izmerimo dva medsebojno pravokotna premera razlezene betonske mešanice. Mera konsistence je povprečje dveh premerov razlezene betonske mešanice (d) zaokroženo na 10mm.

Preglednica 7: Stopnje konsistence v odvisnosti od razleza po standardu SIST EN 206-1.

STOPNJA	PREMER 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 določanja konsistence betona z metodo z razlezom.

4.3 METODA Z ZGOŠČEVANJEM PRI VIBRIRANJU; SIST EN 12350-4

Metoda z zgoščevanjem daje dobre kvantitativne rezultate pri definiranju konsistence trdih in srednjeplastičnih mešanic. Stopnjo zgoščenosti določimo z razmerjem višin pred in po vibriranju v kovinskem kalupu standardnih dimenzij (20 x 20 x 40cm). Standardni kalup napolnimo s svežo betonsko mešanico do vrha. Ko napolnimo kalup z zidarsko žlico, odstranimo presežek betona ter poravnamo z zgornjo površino. Betonsko mešanico vibriramo ravno tako, kot pri vgrajevanju betona na gradbišču. Za vibriranje uporabimo vibracijsko iglo

ali vibracijsko mizo. Po končanem vibriranju izmerimo višino od površine zgoščenega betona do vrha kalupa v vseh štirih vogalih kalupa in izračunamo merodajno višino.

Indeks ali mera zgoščenosti C:

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

kjer je;

h_1 ...notranja višina kalupa

h_2 ... višina zgoščenega betona

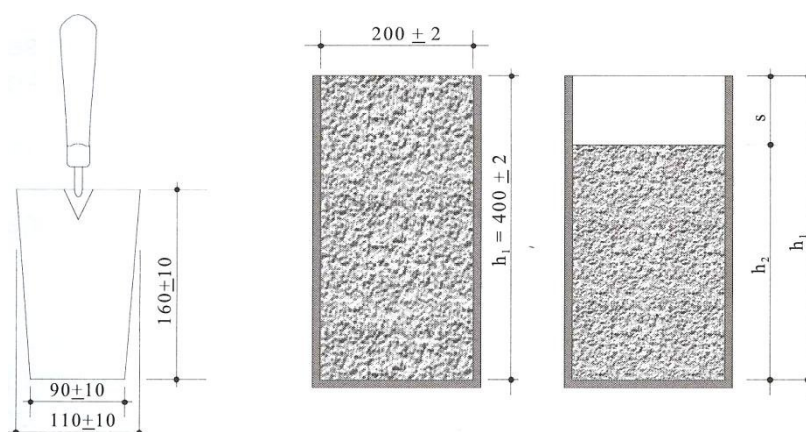
s ... povprečna oddaljenost površine zgoščenega betona od zgornjega roba kalupa

C... mera zgoščenosti

Po metodi zgoščevanja pri vibriranju je mera konsistence razmerje med začetno višino betona in višino betona po vibriranju.

Preglednica 8: Stopnje konsistence v odvisnosti od mere zgoščenosti po standardu SIST EN 206-1.

STOPNJA	MERA ZGOŠČENOSTI
C0	$\geq 1,46$
C1	1,45 do 1,26
C2	1,25 do 1,11
C3	1,10 do 1,04



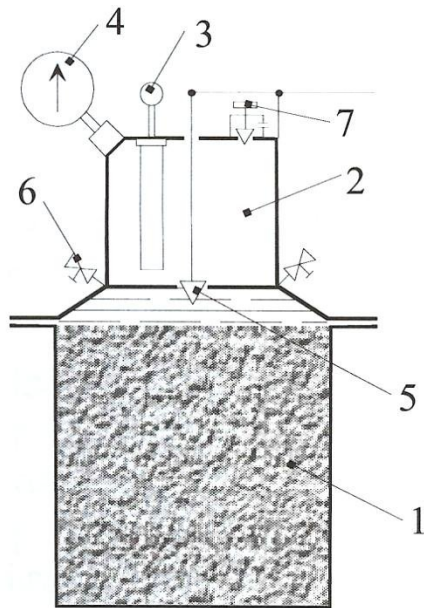
Slika 13: Kalup za zgoščevanje po SIST EN 12350-4.

4.4 DOLOČANJE VSEBNOSTI ZRAKA V SVEŽEM BETONU; SIST EN 12350-7

Vsebnost zraka v svežih betonskih mešanica določimo po standardu SIST EN 12350-7. Naprava, s katero določimo vsebnost zraka v svežem betonu, se imenuje porozimeter. Porozimeter ima kapaciteto vsaj 5l in mora zdržati pritisk 0,2 MPa. Porozimeter mora določati delež zraka od 0% do 10%. Skala prikazovanja pa mora biti natančna minimalno na 0,1% v intervalu od 0% do 3%, 0,2% v intervalu od 3% do 6% ter 0,5% v intervalu od 6% do 10%.

Osnovno posodo porozimetra napolnimo s svežo betonsko mešanico. Napolnimo ga v treh slojih, pri tem se poslužujemo enakega postopka kot pri vgrajevanju svežega betona v kalupe. Beton lahko zgostimo z vibracijsko iglo, vendar moramo paziti, da se igla ne dotika sten posode. Višek materiala odstranimo, tako da ostane površina betona gladka. Nalegajoče površine osnovne posode ter pokrova očistimo in posodo s pokrovom hermetično zapremo. Skozi odprtino v pokrovu vlivamo vodo toliko časa, da se zapolni ves prostor med površino betona in pokrovom (da iz nasprotne odprtine začne uhajati voda). Nato oba ventila zapremo, in z ročno črpalko vnesemo toliko zraka v predkomoro, da kazalec na manometru pokaže nič (takrat je zračni tlak v predkomori 98,066 kPa). V primeru, da je pritisk v predkomori previsok, odvečni zrak spustimo skozi izpustni ventil. Nato odpremo ventil med predkomoro in prostorom nad betonom, ki je zapolnjen z vodo, in na manometru odčitamo porozimetrijski

indeks. Hkrati nam porozimetrijski indeks predstavlja tudi delež zraka v odstotkih glede na celotno prostornino sveže betonske mešanice v betonu.



Slika 14: Shema Porozimetra



Slika 15: Porozimeter za beton

5 METODE PREISKAV STRJENEGA BETONA IN ZAHTEVE STANDARDA SIST EN 2006-1

5.1 TLAČNA TRDNOST; SIST EN 12390-3

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Določamo jo na standardiziranih preizkušancih v obliki valjev ali kock. Preizkušanci naj bi bili pred preiskavo ves čas v vodi ali pa v okolju z najmanj 95% vlažnostjo in pri temperaturi 20 ± 3 °C. Na osnovi znanih dimenzij in ugotovljene porušne sile določimo tlačno trdnost preizkušanca.

V preglednici so podani razredi tlačne trdnosti za betone po standardu SIST EN 206-1:2003.

Preglednica 9: Razredi tlačne trdnosti za normalno težek in težak 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 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Karakteristična tlačna trdnost betona je vrednost pod katero je za obravnavani beton je možno pričakovati največ predpisan odstotek vseh rezultatov preiskav tlačne trdnosti. Predpisan odstotek imenujemo fraktila, njegovo vrednost pa predpisuje ustrezen nacionalni ali mednarodni standard. Standard SIST EN 206-1 predpisuje 5% fraktilo.

Tlačna trdnost betona je podana z enačbo:

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

kjer je:

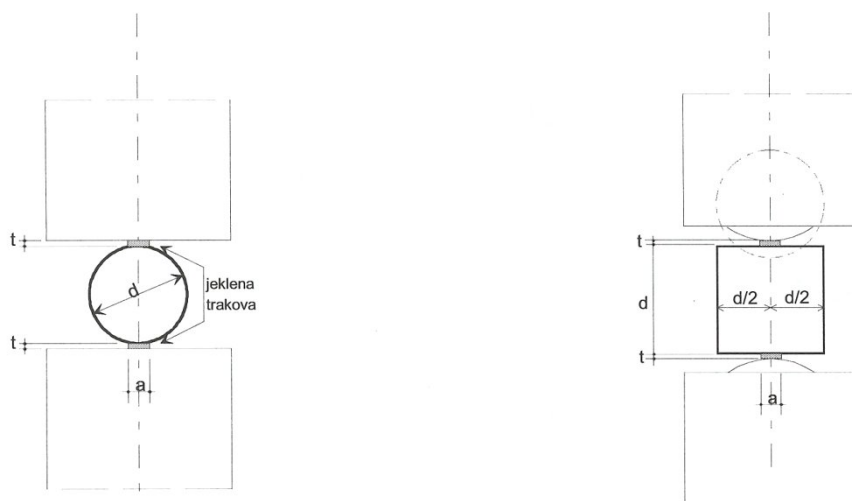
- f_c tlačna trdnost v [N/mm²],
- F maksimalna porušna sila [N],
- A_c površina vodoravnega prereza preizkušanca [mm].

5.2 RAZRED TLAČNE TRDNOSTI BETONA

Razred tlačne trdnosti betona je normirana tlačna trdnost betona izražena v [MPa], ki izhaja iz karakteristične tlačne trdnosti pri starosti betona 28 dni. Ponavadi se za nearmirane konstrukcije uporabljajo betoni tlačnih trdnosti, ki so manjše od 15 MPa, za armiranobetonske konstrukcije pa se uporabljajo betoni višjih tlačnih trdnosti (večje od 15 MPa). Običajno so to betoni, ki imajo tlačne trdnosti od 25 do 35 MPa.

5.3 RAZCEPNA NATEZNA TRDNOST; SIST EN 12390-6

Razcepna natezna trdnost (cepilna natezna trdnost) je pomembna pri oceni obremenitve, pri kateri nastanejo razpoke v betonu. Postopek določanja razcepne natezne trdnosti betona je opisan v standardu SIST EN 12390-6. Preizkuša se z zvezno linearno obremenitvijo po sredini nasprotnih ploskev kocke ali po tvorilkah valjastih prizkušancev. Njena velikost znaša približno 7% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preizkusom kock, oz. 10% tlačne trdnosti betona ugotovljene s preizkusom valja. Rezultat merjenj razcepne natezne trdnosti betona je odvisen od oblike in dimenzije prizkušanca. Betonske kocke in prizme cepimo s pomočjo ukrivljenih jeklenih plošč, medtem ko valjaste prizkušance cepimo z ravnimi ploščami.



Slika 16: Shematski prikaz cepilnega postopka pri valju in kocki

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],
- d nazivna dimenzija prečnega prereza [mm].

5.4 GLOBINA PRODORA VODE POD PRITISKOM; SIST EN 12390-8

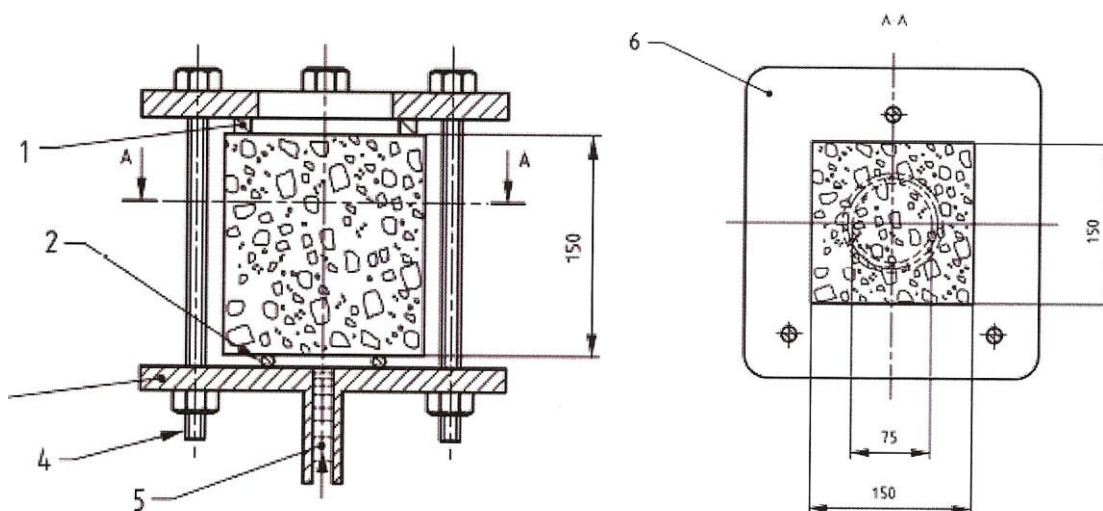
Takšen preizkus opravljamo, kadar nas zanima odpornost betona proti prodoru vode, ki se uporablja za konstrukcije, na katere lahko deluje podzemna voda ali druge tekočine. Največji problem lahko nastane pri konstrukcijah kot so: inženirske pregrade, vodotesne betonske konstrukcije, odlagališča radioaktivnih odpadkov, skladišča plinov, idr., kjer prehitel prodor tekočine s škodljivimi snovmi lahko negativno vpliva na okolico in sam objekt.

Standard SIST EN 12390-8 predpisuje, da se odpornost betona proti prodoru vode določa pri starosti betona najmanj 28 dni in največ 35 dni, na treh preizkušancih izdelanih iz svežega ali strjenega betona (izvrtani valji) iste vrste in enake starosti.

Preglednica 10: 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

Preizkus poteka tako, da voda pod konstantnim pritiskom deluje oziroma prodira v strjen beton. Preizkušane določenih dimenzij postavimo na napravo tako, da lahko voda pod zahtevanim pritiskom deluje na površino preizkušanca in da je pritisk nanj konstanten. Preizkušanci so lahko betonske kocke, valji ali prizme, pri katerih najmanjša dimenzija površine, ki bo izpostavljena vodi pod pritiskom, ne sme biti manjša od 150mm, preostali dve dimenziji pa ne smeta biti manjši od 100mm. Takoj po razkalupljanju preizkušancev moramo površino, ki bo izpostavljena vodi pod pritiskom, obrusiti z brusnim papirjem, zato da odstranimo cementno mleko s površine. Preizkušance sicer negujemo v skladu s standardom SIST EN 12390-2.

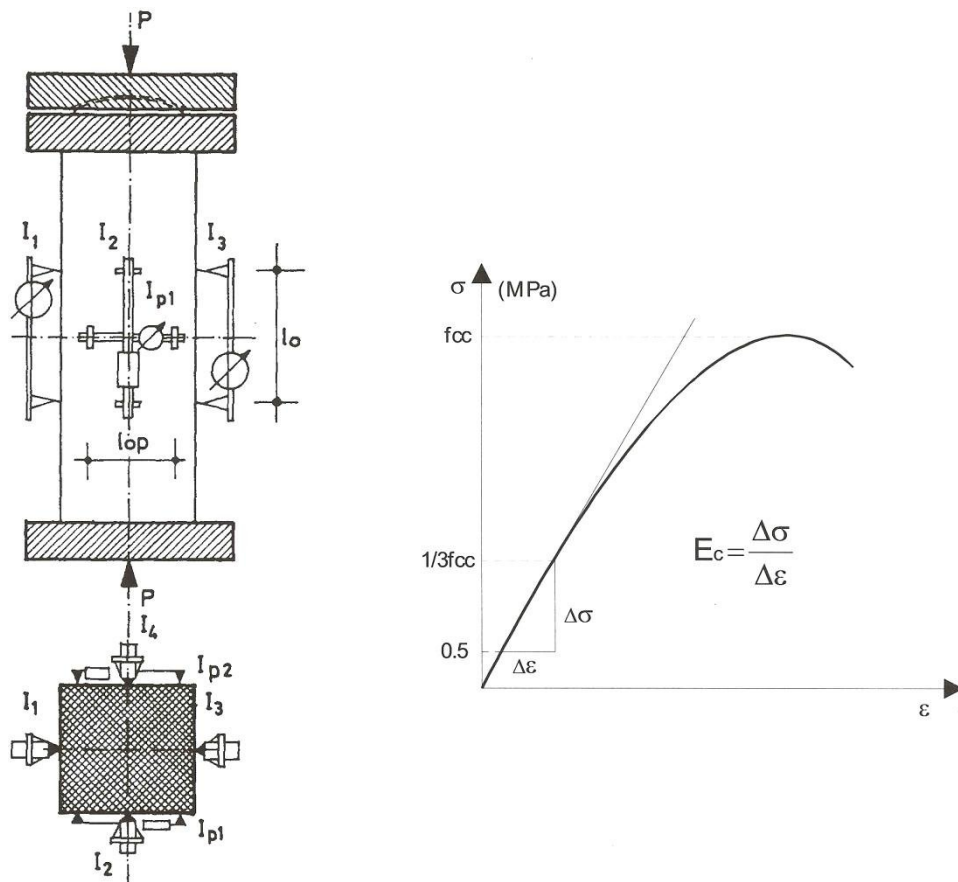


Slika 17: Shema naprave za preskus vodotesnosti po SIST EN 12390-8.

Ko preizkušanec namestimo v napravo, dovedemo vodo nanj pod tlakom 500 ± 50 kPa za časovno obdobje 72 ± 2 uri. Med preiskavo izvajamo stalne vizualne preglede v primeru, če tesnilo prepušča vodo in če je preizkušanec pravilno nameščen. Vse morebitne napake med preiskavo zabeležimo ter jih tudi smiselno upoštevamo pri obdelavi podatkov. Po končani preiskavi preizkušanec odstranimo iz naprave, ga razcepimo pravokotno na površino, ki je bila izpostavljena vodi in odčitamo maksimalno globino vode v preizkušancu v mm.

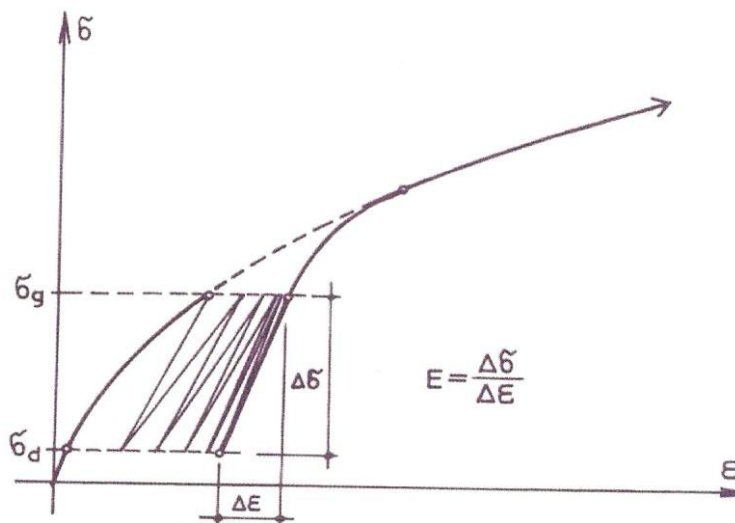
5.5 MODUL ELASTIČNOSTI; JUS U.M1.025

Modul elastičnosti betona določamo 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 % relativno vlažnostjo. Pomembno je tudi to, da mora biti dimenzija krajše stranice minimalno štirikrat večja od največjega zrna agregata v betonu. Na preizkušancih potrebujemo dve merilni mesti za prečne deformacije in dve merilni mesti za vzdolžne deformacije. Za preizkušanje potrebujemo 6 preizkušancev in sicer 3 za preizkus tlačne trdnosti in 3 za ciklično obremenjevanje.



Slika 18: Določanje statičnega modula elastičnosti

Pri preiskavah modula elastičnosti uporabljamo postopek večkratnega tlačnega obremenjevanja in razbremenjevanja preizkušancev. 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 19: Grafični prikaz cikličnega obremenjevanja in razbremenjevanja

Elastični modul je določen z enačbo:

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

kjer je:

- E modul elastičnosti [MPa],
- $\Delta\sigma$ razlika napetosti σ_g - σ_d [MPa],
- $\Delta\epsilon$ razlika pripadajočih deformacij [%].

6 LASTNE PREISKAVE

6.1 UVOD

V eksperimentalnem delu naloge smo opravili preiskave lastnosti betonov, izdelanih iz drobljenega apnenčevega agregata in cementa CEM II / A-M (LL-S) 42,5 R v svežem in strjenem stanju. Osnovni namen preiskav je bil ugotoviti vpliv različnih parametrov in napak v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode. Vplivni parametri, ki smo jih študirali so bili: prisotnost gnezd (ponovitev preiskav v okviru diplomskega dela Kuzmanović S.), vplivi nizkih in visokih temperatur okolja, vpliv velikosti razpok, vpliv zračnih žepov (ponovitev preiskav v okviru diplomskega dela Kuzmanović S.). Na koncu smo opravili primerjavo z rezultati preiskav na betonu iz savskega proda in cementa CEM I 42,5 R. Eksperimentalne preiskave so potekale v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo.

V okviru preiskav smo preizkušali lastnosti sveže betonske mešanice po standardih skupine SIST EN 12350. Konsistenco betona smo določali s preizkusi poseda, razleza, razleza s posedom (nestandardna metoda) in stopnje zgoščenosti. Za zahtevne inženirske objekte se uporabljajo lahkogradljivi betoni, zato so betonske mešanice morale izpolniti zahtevo za tekočo konsistenco po DIN klasifikaciji. Nadaljnje preiskave so potekale na strjenih betonih. Preiskave so obsegale tlačno trdnost preizkušancev, cepilno natezno trdnost preizkušancev in preizkušanje vodotesnosti. Pri preizkušanju tlačne trdnosti betonov smo primerjali vpliv temperaturne nege (nizke in povišane temperature). Nadaljevali smo s preizkušanjem cepilne natezne trdnosti betonov. Ti preizkusi so bili najbolj obsežni, saj smo z njihovo pomočjo določali globino prodora vode v beton. Nadaljevali smo še z ugotavljanjem vpliva napak v betonih in šibkih mest v strukturi betona na odpornost betona proti prodoru vode.

Odpornost proti prodoru vode nas zanima pri gradnji objektov, kjer je prisotna podzemna voda ali tam, kjer hranimo več različnih tekočin v sosednjih prekatih. Največji problem nam predstavlja prodor vode skozi ali v konstrukcijo pri inženirskih pregradah, vodotesnih betonskih konstrukcijah, čistilnih napravah, odlagališčih jedrskih odpadkov ali tam, kjer

pronicanje vode čez konstrukcijo negativno vpliva na okolico oziroma na sam objekt. Pri tovrstnih objektih je vodotesnost betona zelo pomemben parameter za obstojnost in uporabnost objekta.

6.2 OSNOVNI MATERIALI

6.2.1 AGREGAT

Za izdelavo betonskih mešanic sem uporabil drobljen apnenčev agregat, ki spada med najkvalitetnejše agregate v Sloveniji. Njegove lastnosti so podane v preglednici 11.

Preglednica 11: Lastnosti uporabljenega drobljenega apnenčevega agregata.

Frakcija	Prostorninska masa zrn [kg/m³]	Prostorninska masa agregata v zbitem stanju [kg/m³]	Vodovpojnost zrn [%]
Drobnozrnat apnenčast agregat frakcije 0/2	2703	1840	1,1
Drobnozrnat apnenčast agregat frakcije 0/4	2714	1815	1,3
Grobozrnat apnenčast agregat frakcije 4/8	2716	1485	0,4
Grobozrnat apnenčast agregat frakcije 8/16	2710	1510	0,3

Zrnavostna sestava naših mešanic se skozi celotne laboratorijske preiskave ni spreminjala in je bila takšna, kot je navedeno v preglednici 12.

Preglednica 12: Izbrana zrnavostna sestava drobljenega apnenčevega agregata (Laže)

Frakcije	Delež [%]
0/2	25
0/4	25
4/8	15
8/16	35

6.2.2 VODA

Za betonske mešanice sem uporabil vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

6.2.3 CEMENT

Uporabili smo cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R. To je portlandski mešani cement z dvema mineralnima dodatkom. Oznaka dodatka (LL) pomeni, da je v cementu apnenec, oznaka (S) pa pomeni žlindro. Cement je trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo, kar označuje oznaka R. Prostorninska masa cementa brez por in votlin je $\gamma_c = 3,01 \text{ g/cm}^3$, specifična površina cementa po Blainu pa je $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Namenjen je za najzahtevnejše konstrukcije, pri katerih se zahtevajo visoke začetne trdnosti.

Cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R je sestavljen iz:

- minimalno 80% portland cementnega klinkerja,
- 6-20% mešanega dodatka (apnenec, žindra),
- do 5% manj pomembnih sestavin, kamor spada tudi regulator vezenja (sadra),

Preglednica 13: Lastnosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R v primerjavi z zahtevami SIST EN 197-1

Kemijske zahteve	Zahteve standarda	Dosežene vrednosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R
Vsebina sulfata (kot SO ₃)	≤ 4,0%	2,7 %
Vsebnost klorida	≤ 0,1%	0,02 %
Mehanske in fizikalne zahteve	Zahteve standarda	Dosežene vrednosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R
Zgodnja Trdnost, 2 dneva	≥ 20,0 MPa	27,5 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5 – 62,5 MPa	52 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 60 min.	200 min.
Prostorninska obstojnost	≤ 10 mm	0,4 mm

6.2.4 KEMIJSKI DODATEK – SUPERPLASTIFIKATOR

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, 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 oz. čas obdelovalnosti betonov pripravljenih z uporabljenim superplastifikatorjem daljši kot pri običajnih superplastifikatorjih.

Gostota znaša 1,09 g/cm³, pH vrednost je 5,5±0,5, doziramo pa ga 0,2 -1,5% na maso cementa: odvisno od v/c razmerja in želene obdelovalnosti betona, vrste in količine cementa in vrste betona. Superplastifikator lahko dodajamo betonski mešanici razredčenega z zamesno vodo ali še bolje, koncentriranega v že pripravljeno svežo betonsko mešanico manjše

obdelavnosti. Optimalne rezultate dosežemo, če dodatek dodamo betonski mešanici potem, ko smo najprej dodali 50-70 % zamesne vode. Za optimalni izkoristek zmanjšanja potrebe po vodi se priporoča čas mokrega (ko dodamo vodo) mešanja eno minuto pri optimalnem mešanju. Končni učinek plastificiranja se doseže po 2 minutah mešanja, zato naknadno dodajanje vode lahko povzroči močno razmešanje betona.

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 SESTAVA BETONSKE MEŠANICE L2

Preiskave smo izvajali na betonu sestave, ki smo jo poimenovali L2.

Mešanica L2 je sestavljena iz drobljenega apnenčevega agregata, cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R, vode iz ljubljanskega vodovodnega omrežja in superplastifikatorja nove generacije švicarskega proizvajalca.

Sestavina betonske mešanice je podana v preglednici 14:

Preglednica 14: Sestava mešanice L2

Mešanica L2	1m ³ betona [kg]	Prostorninska masa [kg/m ³]	Volumen	43l betona [kg]
Cement	400	3010	0,13	17,20
Voda	160	1000	0,16	6,88
v/c	0,4			
Superplastifikator	6,616		Min	0,378 (2,2%)
Zrak	2,2%		2%	
Agregat	1854	2700	0,69	79,72

γ_{proj} [kg/m³]	2420		100%	
Frakcija 0/2 – 25%	464	2700	0,17	19,95
Frakcija 0/4 – 25%	463	2700	0,17	19,91
Frakcija 4/8 – 15%	278	2700	0,10	11,95
Frakcija 8/16 – 35%	649	2700	0,24	27,91

Vodocementno razmerje mešanice L2 je 0,4, prostorninska masa sveže betonske mešanice pa 2420 kg/m³.

Za mešanico L2 smo skupno zamešali 206 l betona v protitočnem laboratorijskem mešalniku, ki ima kapaciteto 50 l. Posamezna betonska mešanica je vsebovala 43 l betona. Najprej smo agregat in cement zmešali na suho, nato dodali polovico izračunane vode, nato pa še preostalo vodo s superplastifikatorjem. Čas mešanja je bil 120s. Po končanem mešanju smo začeli s preiskavami svežega betona in vgrajevanjem sveže betonske mešanice v kalupe.

V nadaljevanju so podani rezultati preiskav svežega in strjenega betona sestave L2. Rezultate smo primerjali z rezultati enakih preiskav na mešanici iz savskega proda in cementa CEM I 42,5 R sestave P1. Podatki o uporabljenih materialih in sestavi betonov z oznako P1 so podani v diplomski nalogi Gašperja Koželja.

6.4 PREISKAVE SVEŽIH BETONSKIH MEŠANIC

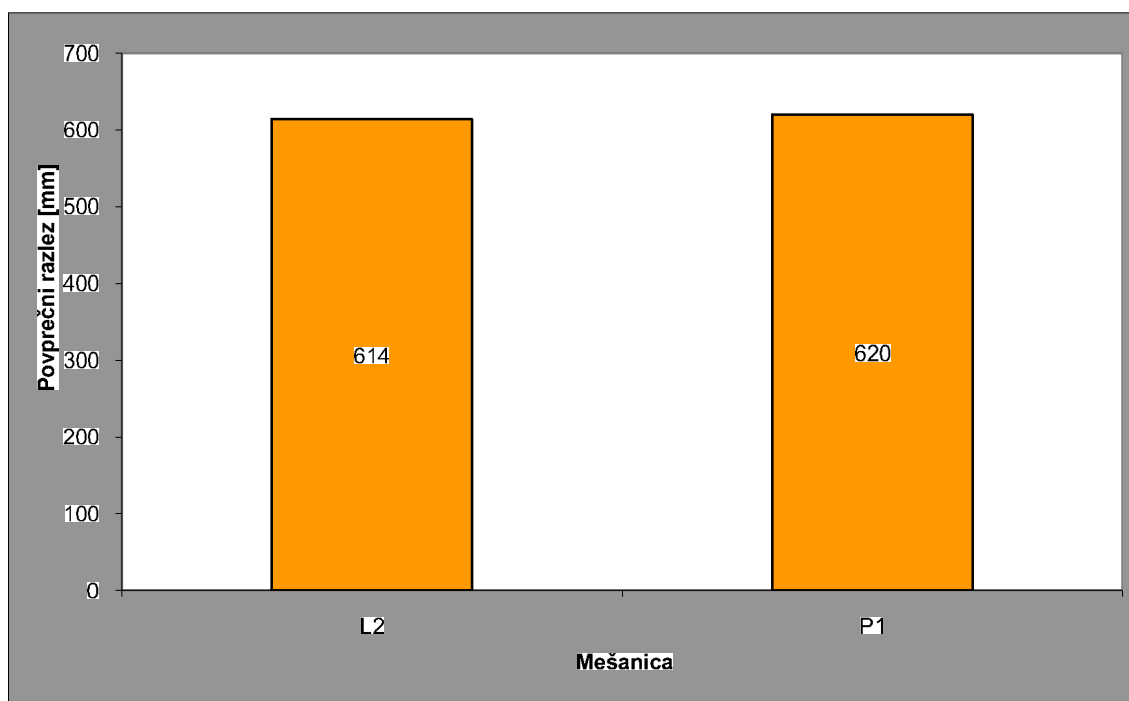
Preiskave na svežih mešanicah so temeljile predvsem na določevanju konsistence. Konsistenca je parameter, ki določa plastičnost betona. V splošnem velja, da naj bo beton take konsistence, da se ga lahko oblikuje z rokami. Konsistenco se določa s standardnimi metodami (standardi skupine SIST EN 12350) kot so metoda s posedom, metoda z razlezom in metoda z zgoščevanjem pri vibriranju., s katerimi ugotovimo stopnjo konsistence.

6.4.1 PRESKUS Z RAZLEZOM; SIST EN 12350-5

Konsistenca betona L2 mora biti tekoča ali tudi zelo tekoča, kar pomeni, da se po standardu SIST EN 206-1 giblje v stopnjah F5 in F6..

Preglednica 15: Prikaz povprečnega razleza betonskih mešanic L2 in P1.

MEŠANICA	DOSEŽEN POVPREČNI RAZLEZ (mm)	DOSEŽENA STOPNJA KONSISTENCE
L2	614	F5 (tekoča)
P1	620	F5 (tekoča)



Slika 20: Graf primerjave konsistence mešanic s preskusom razleza.

Mešanici L2 in P1 z enakim vodocementnim razmerjem imata enaki konsistenci. Obe spadata v razred konsistence F5 (tekoča konsistenca). Enaka stopnja konsistence obeh mešanic je bila dosežena z izbiro ustreznega deleža superplastifikatorja.

6.4.2 PREIZKUS POSEDA Z RAZLEZOM

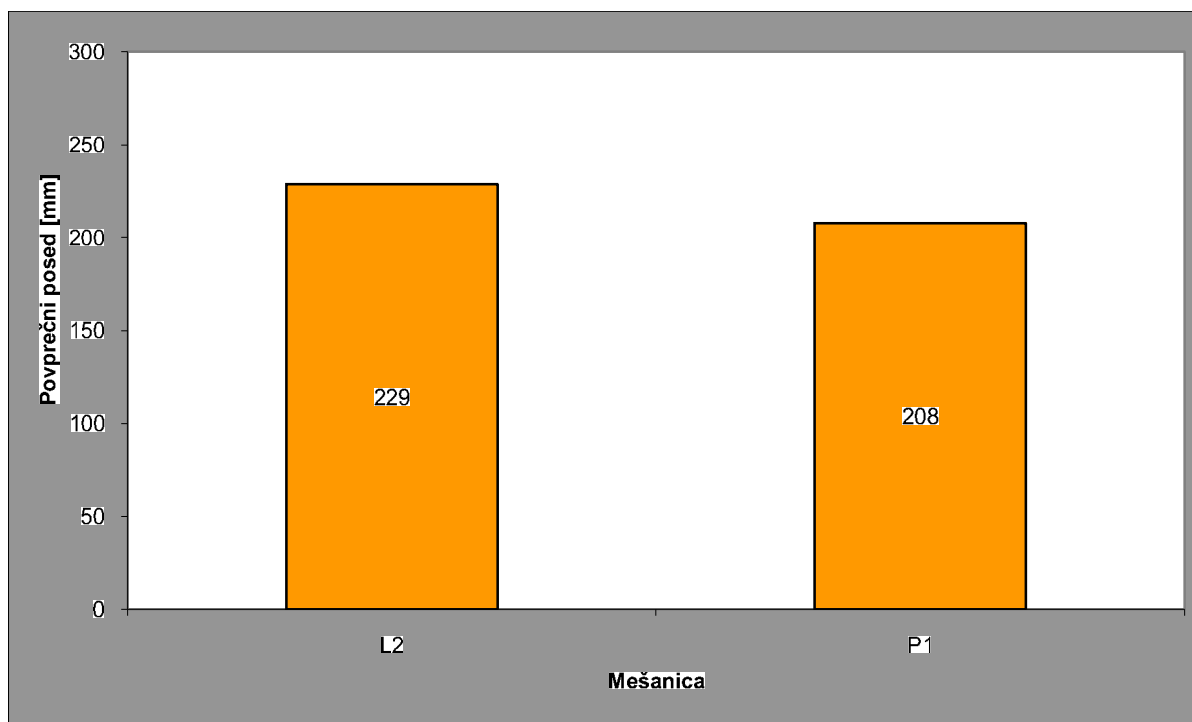
Preizkus je uporaben pri lahkogradljivih betonih. Kriteriji za preizkus poseda z razlezom še niso točno določeni. V okviru naših preiskav smo najprej merili čas od dviga Abramsovega stožca do umiritve betonskega preizkušanca, nato pa smo izmerili posed betonskega stožca in njegov razlez.



Slika 21: Merjenje poseda na lahkogradljivi betonski mešanici.

Preglednica 16: *Prikaz rezultatov poseda betonskih mešanic L2 in P1.*

MEŠANICA	DOSEŽEN POVPREČNI POSED (MM)
L2	229
P1	208

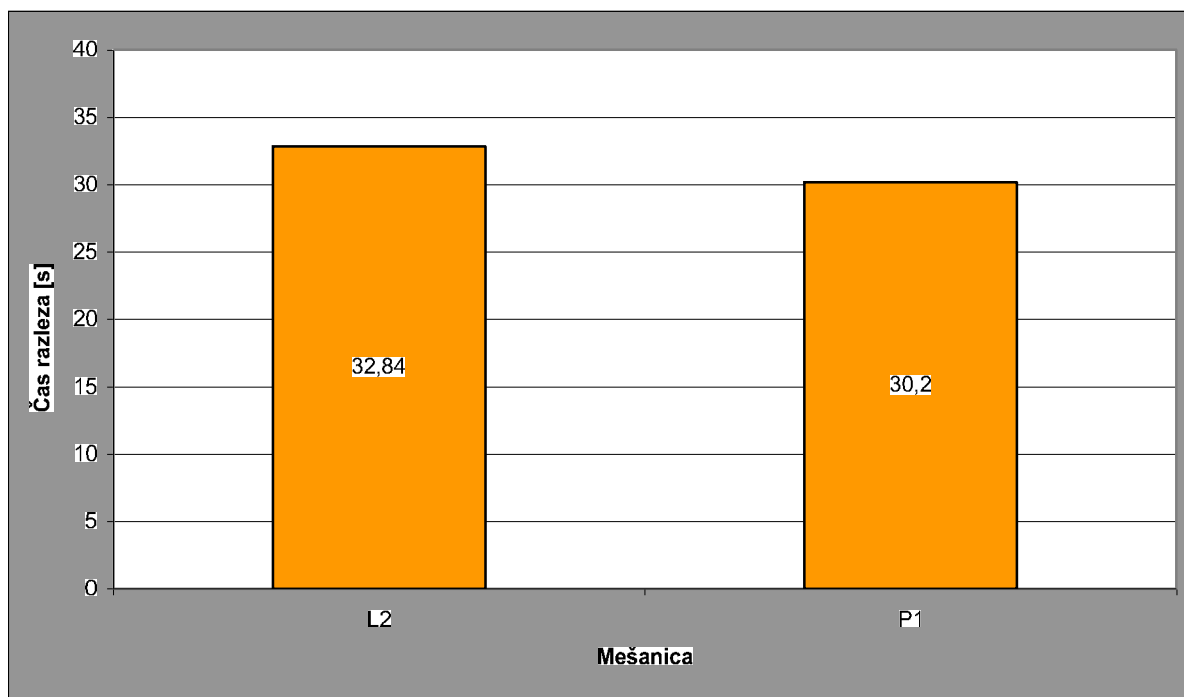


Slika 22: Graf primerjave konsistence mešanic s preizkusom poseda.

Zgornji graf prikazuje rezultate poseda za mešanici L2 in P1. Ker je posed večji (L2) ali enak (P1) posedu 210 mm, smo pri preizkusu poseda merili še čas do končnega razleza betonskega vzorca in razlez s posedom. Čas razleza je za sestavi L2 in P1 podan v preglednici 17, razlez s posedom pa na grafu 23 in preglednici 18.

Preglednica 17: Čas potreben za končen razlez betonskih mešanic

MEŠANICA	DOSEŽEN POVPREČNI ČAS (s)
L2	32,84
P1	30,20



Slika 23: Graf primerjave časa razleza mešanic s preizkusom razleza s posedom.

Preglednica 18: Prikaz rezultatov razleza betonskih mešanic s posedom

MEŠANICA	DOSEŽEN POVPREČNI RAZLEZ POSEDOM (mm) S
L2	557
P1	497

6.4.3 PREIZKUS VSEBNOSTI ZRAKA; SIST EN 12350-7

Vsaka betonska mešanica oziroma cementna pasta vsebuje določen delež zračnih por. Zračne pore v sveži betonski mešanici, katerih delež ocenjujemo s porozimetrom, so zajete zračne pore, ki jih z zgoščevanjem nismo izločili ali vnesene zračne pore, ki se oblikujejo zaradi dodatnega aeranta ali nekompatibilnosti uporabljenega superplastifikatorja in cementa ali agregata. Beton z večjim deležem zraka ima manjšo trdnost.



Slika 24: Porozimeter

V naših preiskavah smo najprej predpostavili poroznost betona (2%), da smo lahko določili njegovo sestavo. Na koncu smo dejansko poroznost svežega betona tudi izmerili.

Dobljeni rezultati so prikazani v preglednici 19.

Preglednica 19: *Povprečna poroznost betonov L2 in P1.*

MEŠANICA	PREDVIDENA POROZNOST (%)	DEJANSKA POVPREČNA POROZNOST (%)
L2	2	1,8
P1	2	1,7

6.4.4 POVZETEK REZULTATOV NA SVEŽIH MEŠANICAH

Primerjava rezultatov preiskav svežih betonov L2 in P1 pokaže, da pri enaki količini cementa in v/c razmerja ter primerljivem deležu superplastifikatorja dosega mešanica P1 nekoliko večji razlez, manjši posed, manjši čas do razleza s posedom in manjši razlez s posedom kot mešanica L2. delež zraka v obeh mešanicah je bil enak. Kljub temu so dobljene karakteristike betonov L2 in P1 dovolj blizu, da lahko izhajamo iz približno enake konsistence obeh betonskih mešanic. To pomeni, da imata oba betona poleg enake količine cementa in v/c

razmerja tudi primerljivo konsistenco, zato bodo rezultati preiskav na strjenih betonih direktno primerljivi.

6.5 PREISKAVE STRJENEGA BETONA

6.5.1 NEGA PREIZKUŠANCEV

6.5.1.1 NEGA ZA PREIZKUS TLAČNE TRDNOSTI

Preizkušance za preizkus tlačne trdnosti smo negovali na tri različne načine. Prvi sklop preizkušancev smo 28 dni izpostavili nizkim temperaturam (hranili smo jih pod stopniščem glavne stavbe FGG). Izmerjene temperature so se gibale okrog 0°C in povprečna relativna vlažnost je bila 70%. Drugi sklop preizkušancev smo za 28 dni dali v sušilnico na temperaturo 40°C, tretji sklop preizkušancev pa smo izpostavili 100% vlažnosti (voda) in temperaturi 20±2°C za 28 dni.

6.5.1.2 NEGA ZA PREIZKUS CEPILNE TRDNOSTI

Nega preizkušancev je potekala enako kot nega preizkušancev za tlačno trdnost. Preizkušance smo razdelili v tri sklope. Prvi sklop je bil izpostavljen nizkim temperaturam, drugi sklop visokim temperaturam, tretji pa visoki vlagi in temperaturi 20±2°C.

6.5.1.3 NEGA PREIZKUŠANCEV ZA PREIZKUS VODOTESNOSTI

Nega preizkušancev za preizkus vodotesnosti je potekala na identičen način kot nega preizkušancev za preizkus cepilne trdnosti, saj smo rezultate prodora vode lahko dobili le s cepilnim nateznim preizkusom.

6.5.2 TLAČNA TRDNOST BETONA

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Za njeno klasifikacijo se uporabi karakteristična tlačna trdnost ($f_{c,k}$)

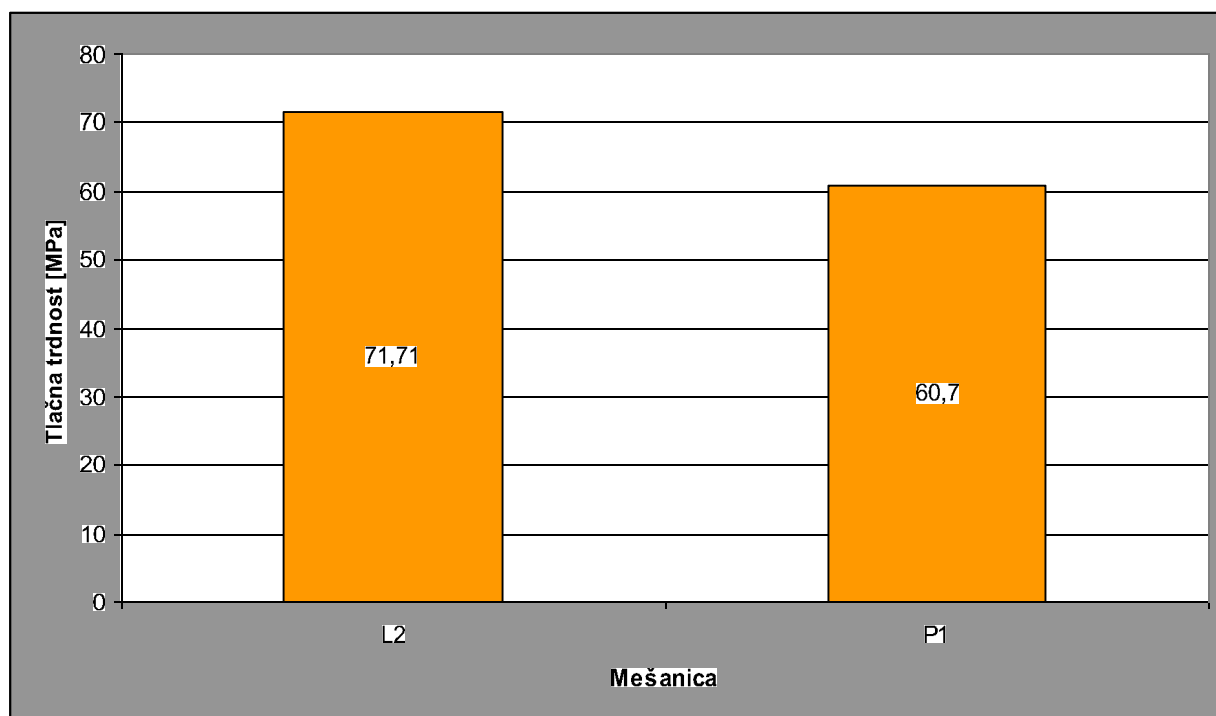
standardiziranih preizkušancev (kock) po 28 dneh. V naših preizkusih smo primerjali tlačno trdnost mešanic L2 in P1 v odvisnosti od različne nege (izpostavljanje kock nizkim in visokim temperaturam, visoka in nizka vlaga)



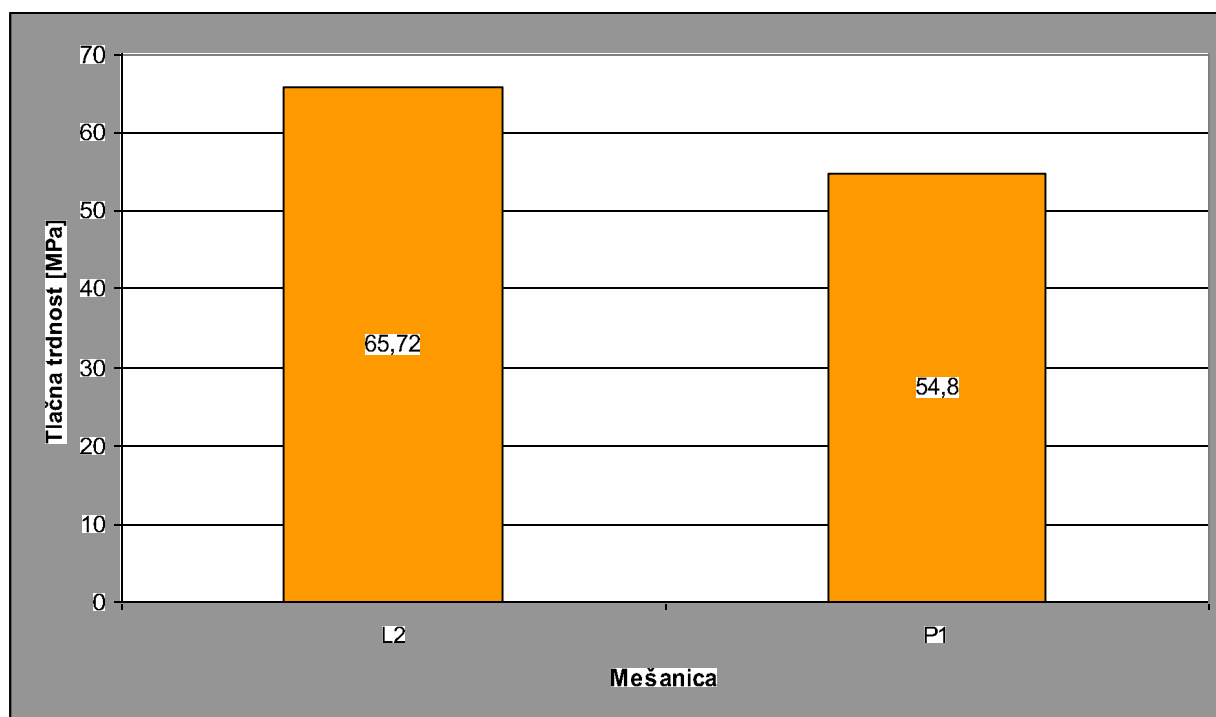
Slika 25: Preizkus tlačne trdnosti betona

6.5.2.1 PRIMERJAVA TLAČNIH TRDNOSTI MEŠANIC L2 IN P1

Rezultati preiskav tlačne trdnosti so prikazani v tabelah 26, 27 in 28.



Slika 26: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni (nizke temperature)

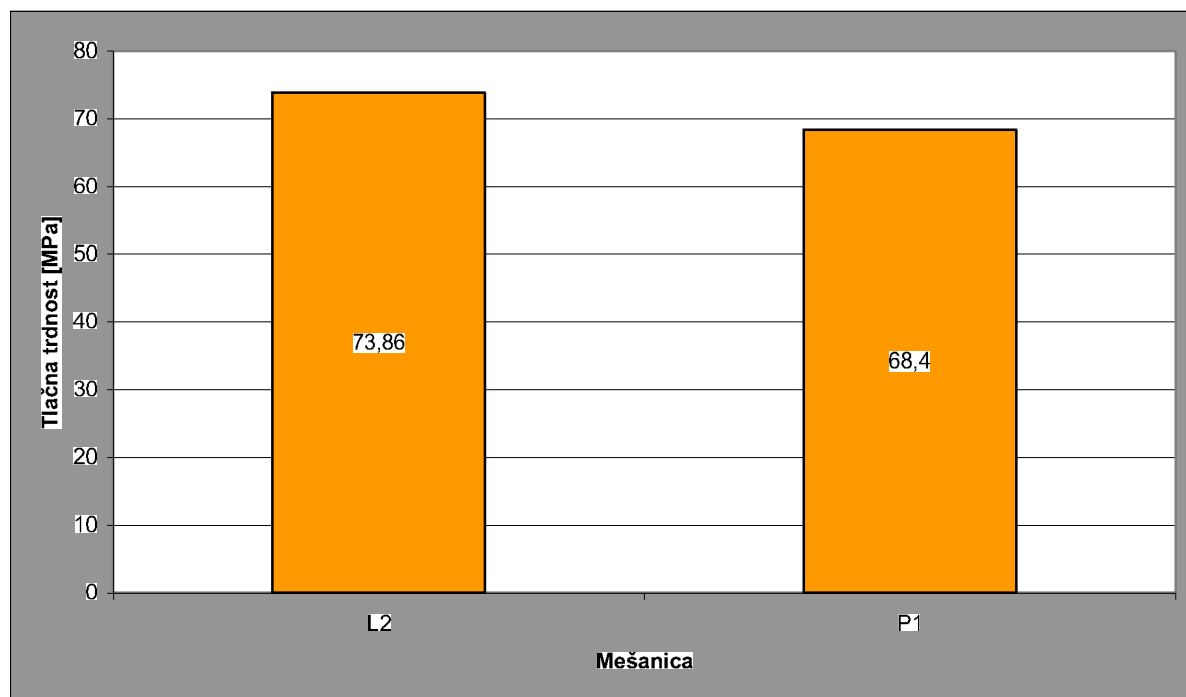


Slika 27: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni (sušilnica)

Rezultati preizkusa nam pokažejo, da imajo preizkušanci, ki so bili izpostavljeni nizkim temperaturam višje tlačne trdnosti, kot preizkušanci izpostavljeni temperaturi 40°C. Razlog za to je, kljub nižjim temperaturam, lahko višja relativna vlažnost in s tem boljša hidratacija, kot pa v sušilnici, kjer je temperatura višja in relativna vlažnost nižja. Poleg tega bi se lahko pri preizkušancih, ki so bili izpostavljeni temperaturi 40°C oblikovale mikrorazpoke v strukturi betona.

Naslednji preizkus vpliva nege je bil, da smo preizkušance 28 dni negovali v vodi.

Mešanice so bile pripravljene in vgrajene na enak način. V spodnjem diagramu so prikazani dobljeni rezultati:



Slika 28: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni (28 dni v vodi)

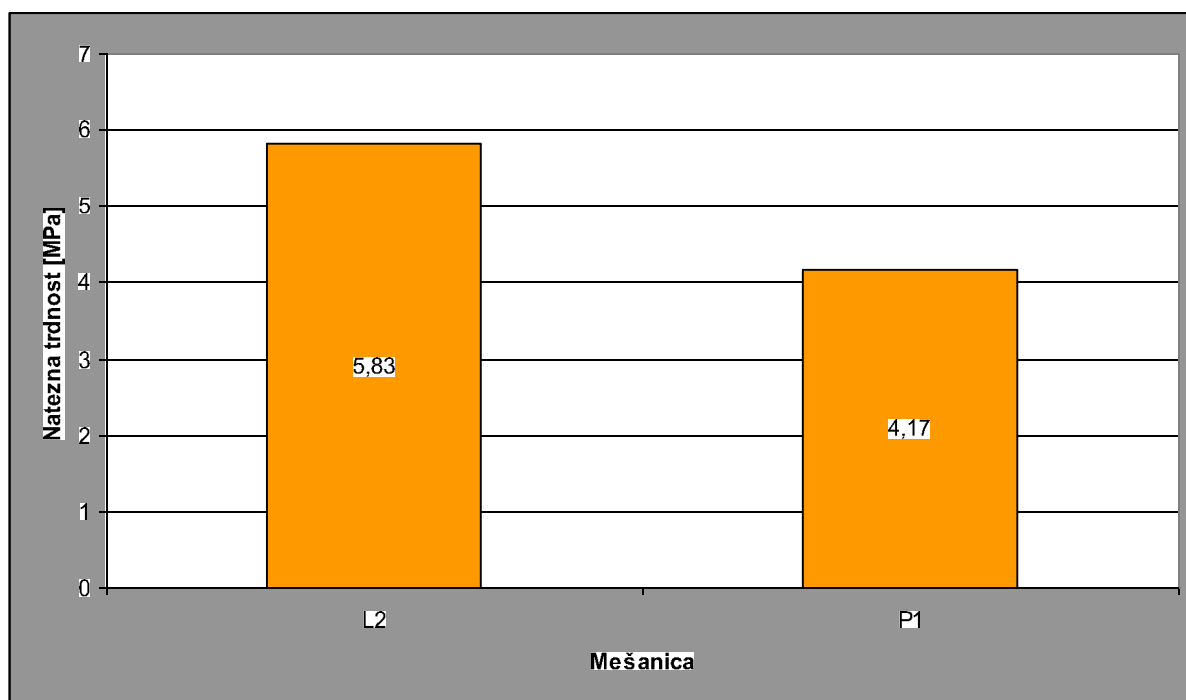
Če torej povzamemo rezultate so bile najvišje tlačne trdnosti dosežene pri 28 dnevni negi v vodi pri temperaturi $20\pm 2^{\circ}\text{C}$, tlačne trdnosti pa so bile nekoliko nižje pri temperaturi okrog 0°C in visoki relativni vlagi, najnižje pa pri temperaturi 40°C in nizki relativni vlagi v prezračevanem sušilniku. V vseh primerih pa je bila tlačna trdnost večja na betonu sestave L2 kot na betonu sestave P1. V standardnih pogojih (100% relativne vlage in temperaturi $20\pm 2^{\circ}\text{C}$) je bila tlačna trdnost betona L2 v povprečju večja za 5 MPa, pri nizki in povišani temperaturi pa kar za 10 MPa. To pomeni, da je beton iz drobljenega apnenčevega agregata in cementa CEM II /A-M (LL-S) 42,5 R manj občutljiv na nizke in povišane temperature kot beton iz savskega proda in cementa CEM I 42,5 R, če nas zanima tlačna trdnost.

6.5.3 CEPILNA NATEZNA TRDNOST

V okviru naših preiskav smo največ preiskav naredili s cepilnim nateznim preizkusom, saj smo na ta način določevali dejanski prodor vode oziroma vodotesnost betona. S cepilnim nateznim preizkusom ocenimo natezno trdnost betona. Večina betonskih konstrukcij je dimenzionirana ob predpostavki, da beton lahko prevzame le tlačne napetosti, nateznih pa ne.

Nateznih napetosti v betonu pa ne smemo popolnoma zanemariti, saj je oblikovanje in širjenje razpok v betonu posledica lokalne prekoračitve natezne trdnosti materiala. Natezna trdnost betona se giblje okrog 10% tlačne trdnosti betona.

Spodnji diagram prikazuje primerjavo cepilnih nateznih trdnosti betonov L2 in P1 pri starosti betona 28 dni, potem, ko so preizkušanci 28 dni odležavali v okolju s 100% R.V. in $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$.



Slika 29: Povprečna cepilna natezna trdnost betona pri starosti 28 dni (100% R.V., $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$).

6.5.4 GLOBINA PRODORA VODE POD PRITISKOM; SIST EN 12390-8

Osrednji del preiskav je bil preizkus globine prodora vode pod pritiskom. Preizkus poteka tako, da voda pod pritiskom 5-ih barov prodira v strjen beton 72 ur. Preiskovali smo več različnih preizkušancev z različnimi karakteristikami (kocke, valji). Preizkušanec nato razcepimo z cepilno napravo in izmerimo globino prodora vode v preizkušancu.

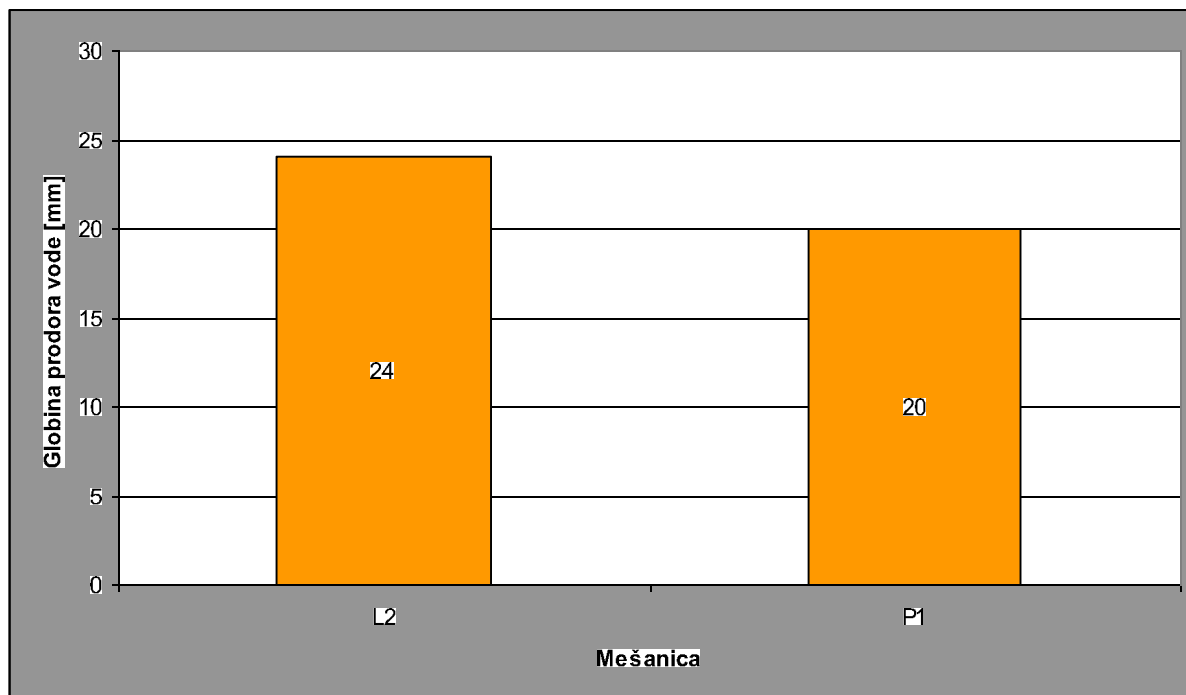
6.5.4.1 PRIMERJAVA VODOTESNOSTI PREIZKUŠANCEV PO SIST EN 12390-8

Namen preiskave je bil ugotoviti, katera betonska mešanica ima boljšo odpornost proti prodoru vode. Standard SIST EN 12390-8 pravi, da morajo biti preizkušanci standardnih dimenzij (150/150/150 mm) stari najmanj 28 do največ 35 dni. Nato jih pred preizkušanjem stehamo ter postavimo v napravo za določevanje vodotesnosti. Voda mora delovati oziroma prodirati v strjen beton pod pritiskom 5-ih barov skozi celotno trajanje preizkusa, to je 72 ur. Po 72-ih urah preizkus ustavimo. Preizkušance nato stehamo, da dobimo maso vode, ki jo je preizkušanec absorbiral. Preizkušance nato pripravimo na cepilni natezni preizkus, kjer jih razcepimo na dva enaka dela in z milimeterskim merilom odmerimo globino prodora vode.



Slika 30: Naprava za vodotesnost

Rezultati preizkusa na betonskih kockah iz betonov L2 in P1 so prikazani v diagramu 31.



Slika 31: Globina prodora vode v strjen beton L2 in P1.

Rezultati nam pokažejo, da je globina prodora vode v preizkušance pripravljene z mešanico L2 24 mm, to pomeni, da se uvrstijo v stopnjo PV-II oziroma ob upoštevanju največjega dovoljenega odklona tudi v stopnjo PV-III. Preizkušanci pripravljene iz mešanice P1 imajo povprečen prodor vode 20 mm, se pravi, da padejo v stopnjo PV-III. Za gradnjo najzahtevnejših inženirskih objektov, ki zahtevajo minimalen prodor vode v beton, se zato zdi sestava betona P1 primerljivejša od sestave betona L2.

Zgolj za informacijo podajam še količino absorbirane vode v preizkušancih za obe sestavi. Rezultati so prikazani v spodnji tabeli:

Preglednica 20: Količina absorbirane vode preizkušancev mešanic L2 in P1

VODOTESNOST	L2	P1
KOLIČINA ABSORBIRANE VODE [g]	36,6	30

6.5.4.2 VPLIV ŠIBKIH MEST NA VODOTESNOST BETONA

V betonih pri njihovi vgradnji in kasnejši negi lahko pride do napak oziroma oblikovanja šibkih mest. Zanimalo nas je, kako te napake (gnezda, zračni žepi, hladni stiki, itd) vplivajo na prodor vode. Zato smo pri naših preiskavah namerno vgradil šibka mesta v strukturo betona. Pri preizkusu hladnih stikov smo zabetonirali dve sosedni plasti betona s časovnim zamikom enega dne.

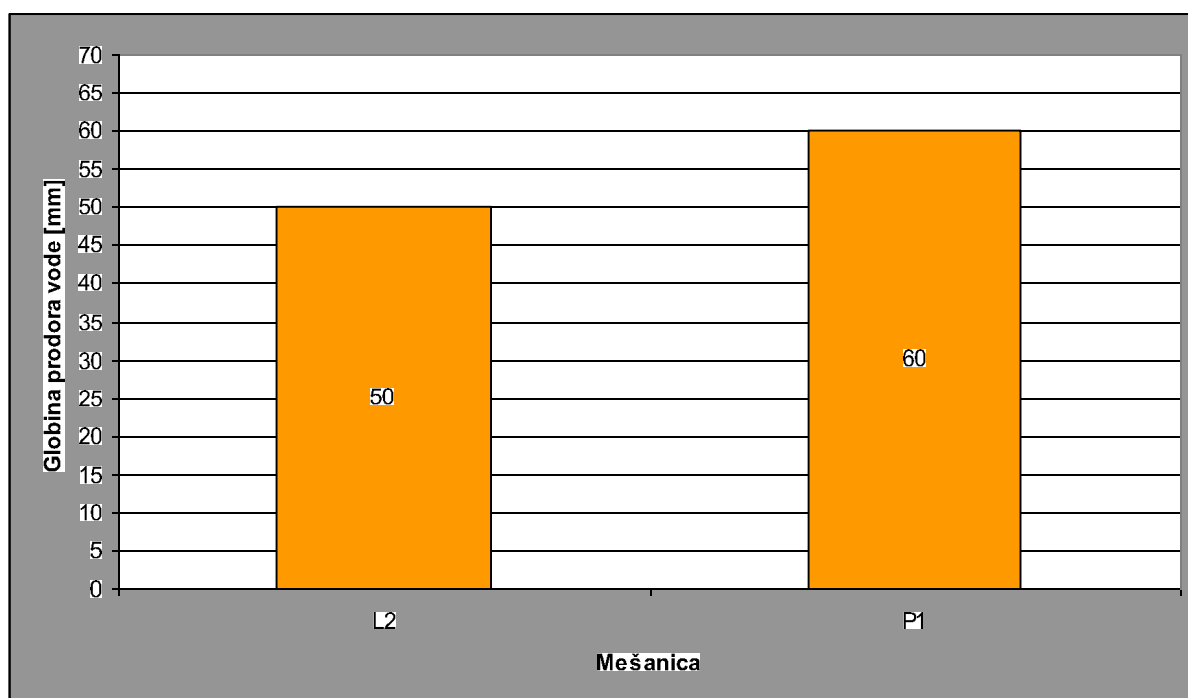
a.) Vpliv gnezd na vodotesnost betona

Pri vgradnji betonov se pogosto oblikujejo gnezda na posameznih mestih konstrukcije. Gnezda se pojavijo zaradi nepravilnega zgoščevanja. Posledica nepravilnega zgoščevanja je, da se agregatna zrna med vibriranjem nepravilno razporedijo po elementu, cementna malta pa ne zalije votlin med največjimi zrnimi agregata. Zato se pojavijo gnezda, ki so sestavljena iz agregatnih zrn večjih frakcij, kar lahko na lastnost vodotesnosti betona vpliva izredno negativno.

Betonske preizkušance smo naredili tako, da smo v kalup postavili cev ter prostor okrog cevi zapolnili z svežo betonsko mešanico. Cev smo nato približno do $\frac{3}{4}$ zapolnili z grobozrnatim agregatom, ki smo ga izločili iz betonske mešanice, ostalo pa zapolnili z osnovnim betonom. Preizkušance smo negovali tako, da so 14 dni odležavali v vodi, 14 dni pa so se sušili v sušilnici pri konstantni temperaturi 60°C. Pri starosti 28 dni smo jih nato postavili v napravo za preizkušanje vodotesnosti. Voda pod pritiskom 5-ih barov deluje na preizkušane 72 ur. Po treh dneh preizkušance razcepimo z cepilnim nateznim preizkusom na dva približno enaka dela ter odmerimo globino prodora vode. Dobljene rezultate smo primerjali na preizkušancih iz mešanic L2 ter P1.



Slika 32: Prodor vode skozi preizkušane



Slika 33: Globina prodora vode v beton z vgrajenimi gnezdi

Iz zgornjega grafa je razvidno, da betona iz mešanic L2 in P1 po standardu SIST 1026:2008 spadata v stopnjo odpornosti proti prodoru vode PV-I. To pomeni, da ob upoštevanju prisotnosti gnezd v betonu, nobena izmed obeh mešanic ni primerna za gradnjo zahtevnih objektov. Če primerjamo grafikona št. 31 in 33, opazimo veliko razliko med vrednostmi globine prodora vode, zato moramo veliko pozornosti posvetiti pravilni vgradnji betona in usposobljenosti ljudi, ki opravljajo to delo.

b.) Vpliv hladnih stikov na vodotesnost betona

Velikokrat se nam zgodi, da pri gradnji betonskih objektov ni mogoče vsega betona vgraditi naenkrat, zato vgrajujemo postopoma, po slojih. Zato me je zanimalo, kako se beton na stiku dveh slojev odziva na preizkus vodotesnosti, saj voda pri delovanju na betonsko konstrukcijo največkrat prodre ravno na območju teh stikov.

Pri eksperimentalnem delu naših raziskav smo izdelali opaž za betonsko steno, v katerega smo vgrajevali beton. Beton smo vgrajevali tako, da smo najprej vgradili eno plast, nato z zamikom enega dne drugo in tako naprej. S tem smo ustvarili hladne stike, saj je bila 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 razopazili 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 v sušilnici s temperaturo 60°C. Nato smo valje vstavili v napravo za preizkušanje vodotesnosti .

Preizkušanci iz mešanice L2 so vzdržali pritisk vode 5-ih barov (prodor vode je bil 87 mm), preizkušanci iz mešanice P1 pa so se takoj po odprtju ventilov razcepili na dva dela v predelu stikov.



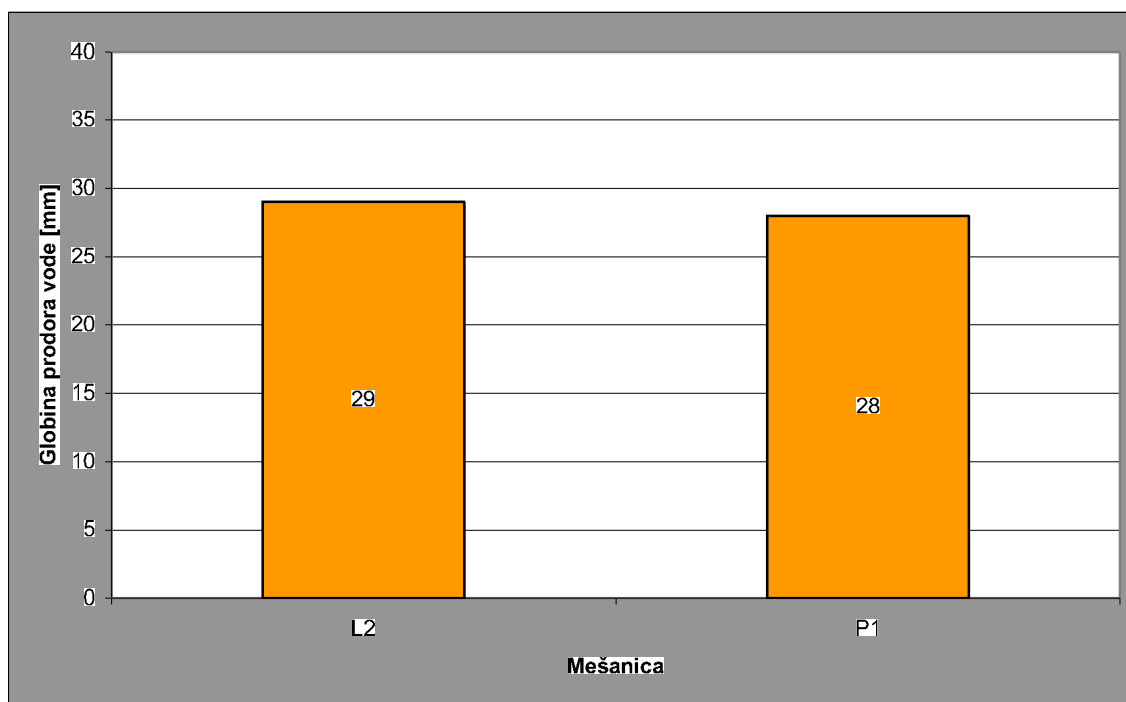
Slika 34: Hladni stik dveh plasti betona

Iz tega lahko sklepamo, da moramo pri gradnji betonskih objektov pozornost posvetiti stikom med že vgrajenim betonom in svežo betonski mešanico. Najbolje je, da je teh stikov čim manj oziroma jih sploh ni, saj so hladni stiki nekakšen šibek člen v konstrukciji. To še posebej velja za betone s prodnatim agregatom.

c.) vpliv povečane poroznosti (zračnih žepov) na vodotesnost betona

Zračne pore ponavadi nastanejo zaradi zajemanja zraka med mešanjem betonske mešanice v mešalcu in so praviloma, velike okrog 3mm, ter negativno vplivajo na trdnost betona. Z vibriranjem svežega betona se lahko te pore združujejo v večje zračne žepe. V okviru naših preiskav smo poskusili ne samo povečati poroznost betona, ampak smo hoteli še povečati že obstoječe pore v betonu in povzročiti njihovo združevanje. To smo dosegli tako, da smo med vgrajevanjem sveže betonske mešanice v kalupe mešanici pod pritiskom dovajali zrak.

Preizkušance smo nato 14 dni negovali v vodi in jih nato 14 dni sušili v sušilnici pri konstantni temperaturi 60°C. Po opravljeni negi smo jih vstavili v napravo za preizkušanje vodotesnosti. Po 72 urah smo jih razcepili na dva dela in odčitali globino prodora vode v preizkušancu. Dobljene rezultate smo primerjali med preizkušanci iz mešanic L2 in P1.



Slika 35: Globina prodora vode v beton z zračnimi žepi

Rezultati pokažejo, da bistvene razlike med obema uporabljenima betonoma ni. Po standardu SIST 1026:2008 obe betonski mešanici spadata v stopnjo PV-II in ne izpolnjujeta zahtev za betone zahtevnih objektov. Zato je potrebno posebno pozornost posvetiti betonom za zahtevne inženirske objekte, kjer prodor vode negativno vpliva na okolico ali na sam objekt, predvsem ustreznemu zgoščevanju betona, ki ne sme povzročati združevanja por.

d.) vpliv velikosti armature na velikost in lokacijo razpok

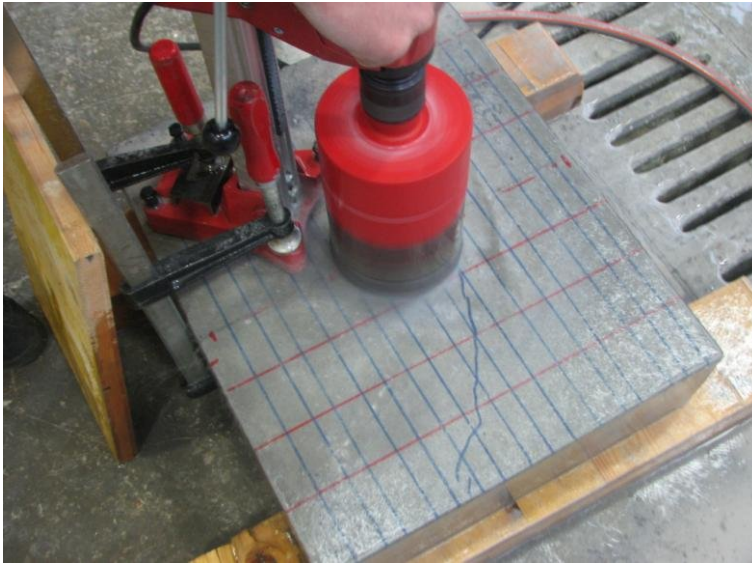
Beton ima pozitivno lastnost, da izredno dobro prenaša tlačne napetosti, po drugi strani pa slabo prenaša natezne napetosti. Zato pri gradnji betonskih konstrukcij poleg betona uporabljamo tudi armaturo, ki ima funkcijo prevzema nateznih napetosti. Potreben delež armature za zahtevano nosilnost lahko zagotovimo z izbiro večjega števila armaturnih palic manjšega prereza ali manjšega števila armaturnih palic večjega prereza. Zato smo v naših preiskavah naredili preizkus z uporabo armaturnih palic različnih prerezov pri enakem odstotku armiranja, ki smo jih vgradili v dve plošči dimenzij 600/350/100mm. Prva skupina palic je imela premer 8 mm, druga pa 20mm. Pri starosti betona v plošči 7 dni smo plošče iz betonske mešanice L2 obremenili s silo 100 kN, tako da so se začele pojavljati vidne razpoke. Višina razpok v plošči, ki je vsebovala armaturo premera 20 mm, je bila do polovice višine plošče, v plošči z armaturo premera 8 mm pa do tretjine višine plošče. Plošče iz betonske mešanice P1 pa smo obremenili s silo 70 kN. Razpoka v plošči s premerom armature 20 mm, je prav tako segala do polovice višine plošče, v plošči s premerom armature 8 mm pa vidnih razpok ni bilo (pojavile pa so se mikro razpoke). Nato smo iz vsake plošče izvrtali po dva valja na mestu upogibne obremenitve in jih sušili v sušilnici toliko časa, da so dosegli konstantno maso.



Slika 36: Cpaž za betonsko ploščo z armaturo premera 8mm

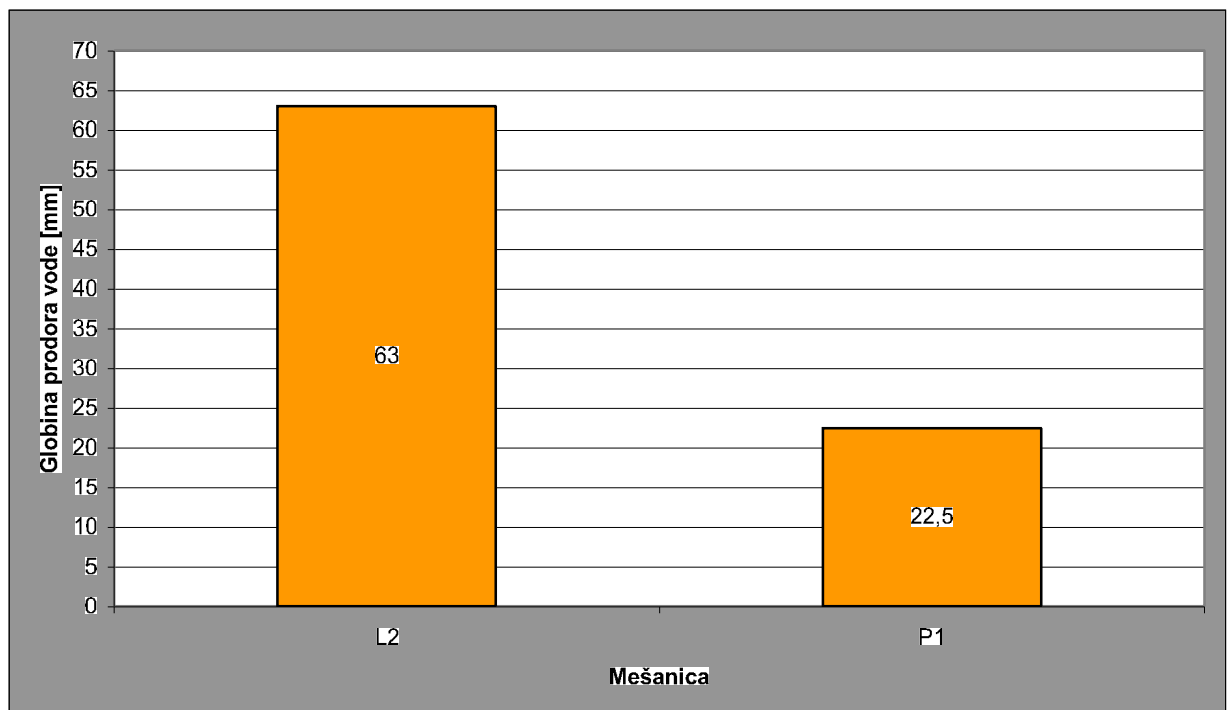


Slika 37: Cpaž za betonsko ploščo z armaturo premera 20 mm

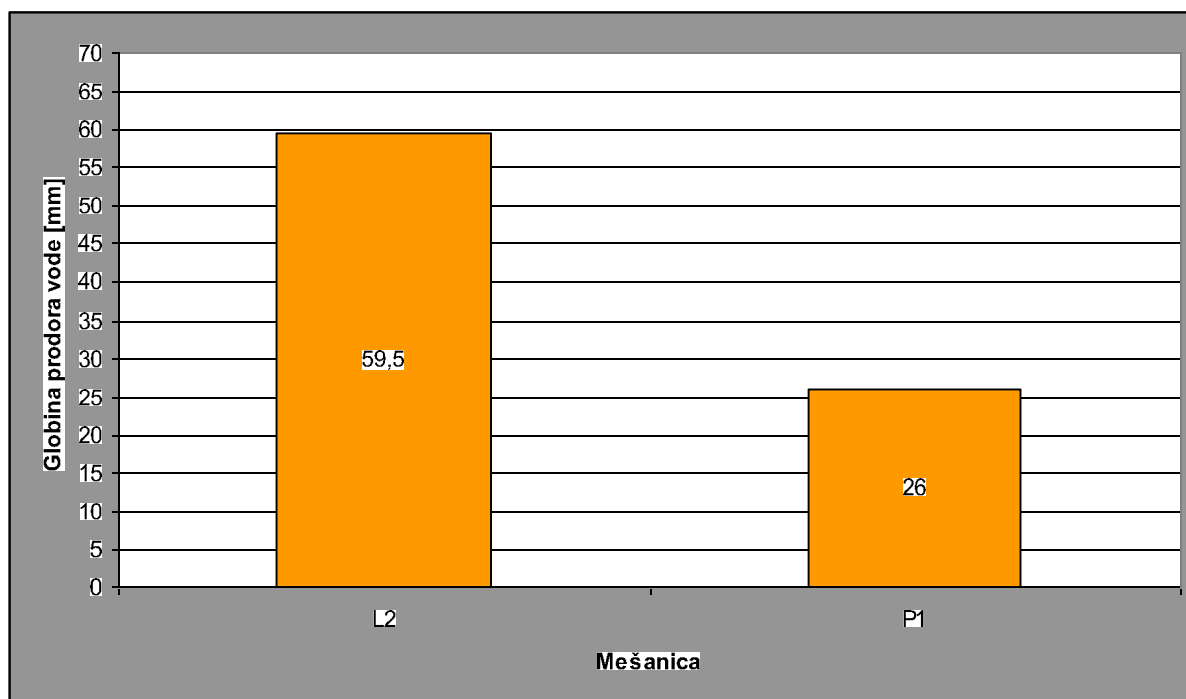


Slika 38: Vrtarje va.jev

Nato sem jih vstavil v napravo za določanje vodotesnosti. Po 72-ih urah sem jih z cepilnim nateznim preizkusom razcepil na dva dela in odčital globino prodora vode v preizkušaneec.



Slika 39: Globina prodora vode v beton z vgrajeno armaturo premera 8 mm



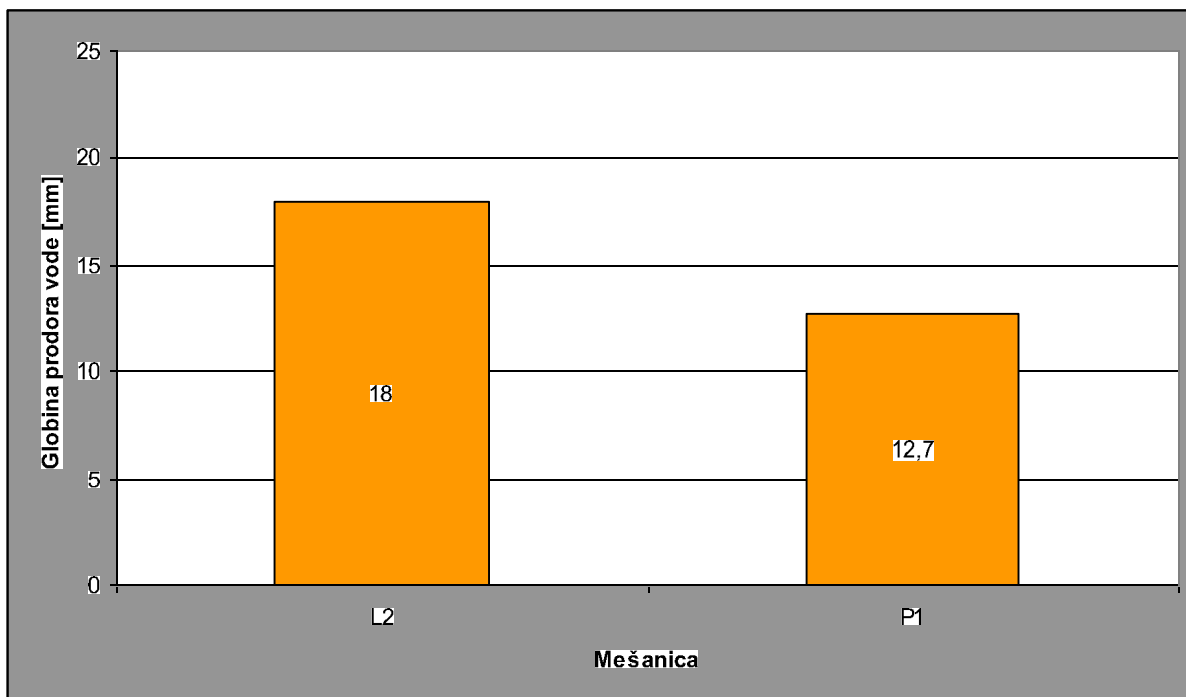
Slika 40: Globina prodora vode v beton z vgrajeno armaturo premera 20 mm

Kot je razvidno iz zgornjih dveh grafikonov, je voda bolj prodrla v preizkušance iz betonske mešanice L2. To pomeni, da so se v teh preizkušancih pojavile večje razpoke kot pa v preizkušancih iz mešanice P1. Razlog temu je najverjetneje za 30 odstotkov manjša obremenitev plošč izdelanih z betonom P1.

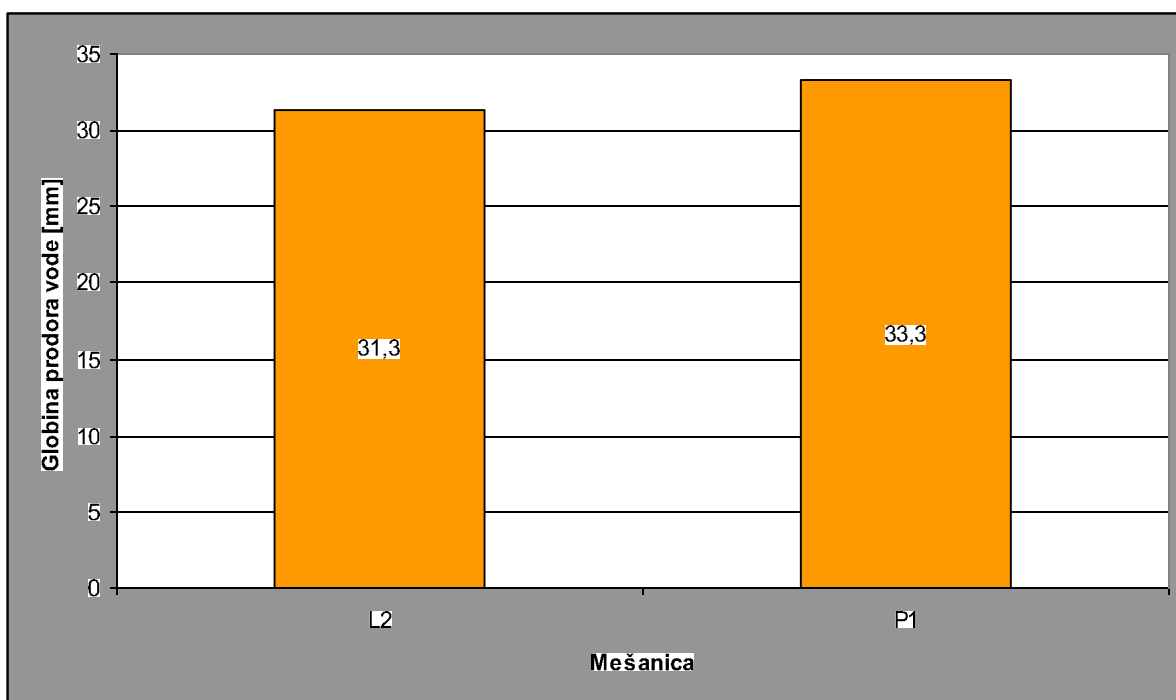
Kot zanimivost naj omenim, da smo naredili še eno serijo dveh plošč iz mešanice L2 ter jih po 7-ih dneh obremenili s silo 200kN. Pri tej sili so se razpoke po plošči razširile skoraj čez vso višino plošče. To nam je pokazal tudi preizkus vodotesnosti, saj je voda po 72-ih urah prodrla skoraj do vrha preizkušanca.

d.) vpliv nege na vodotesnost

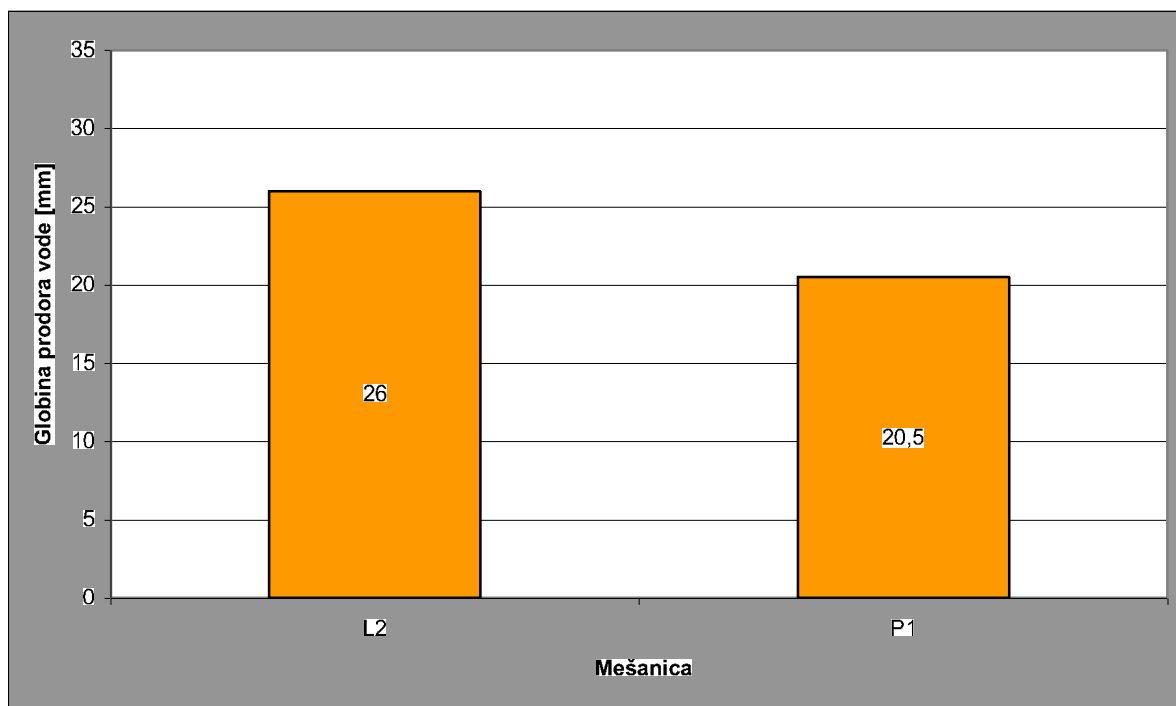
Nega strjenega betona ima lahko velik vpliv na vodotesnost betona. Tretjino preizkušancev smo izpostavljali nizkim temperaturam (0°C, RH=68%), drugo tretjino pa smo 28 dni negovali v sušilnici na konstantni temperaturi 40°C. Zadnji sklop preizkušancev smo 14 dni negovali v vodi pri temperaturi 20±2°C ter 14 dni v sušilnici pri temperaturi 40°C.



Slika 41 : Primerjava globine prodora vode v odvisnosti od nege (nizke temperature)



Slika 42: Primerjava globine prodora vode v odvisnosti od nege (28 dni visoke temperature)



Slika 43 : Primejjava globine prodora vode v odvisnosti od nege (14 dni voda+14 dni sušilnica)

Rezultati prikazani v zgornjih grafih nazorno kažejo, da so preizkušanci, ki so bili negovani na hladnem vpili najmanj vode. Največja globina prodora vode pa smo dobili pri preizkušancih izpostavljenih povišanim temperaturam, pri čemer je v betonih iz savskega proda voda prodrla nekoliko globlje kot v betonih iz drobljenega apnenčevega agregata.

7 SKLEP

Betonski mešanici L2 in P1 sta imeli tekočo konsistenco (razred poseda S3 in razred razleza F5). Med lahkogradljive betone lahko uvrstimo beton iz mešanice L2, saj je njegov posed večji od 220mm.

Pri preiskavah tlačne trdnosti je manjše vrednosti dosegel beton iz mešanice P1 zaradi uporabljenega agregata (savski prod). Povprečna tlačna trdnost betona iz mešanice P1 je bila manjša za 8,35%. Prav tako je beton iz mešanice P1 dosegal manjše natezne trdnosti, saj so bile vrednosti manjše za 1,4 MPa.

Rezultati osrednjega dela naših preiskav, preizkusa prodora vode pod pritiskom po standardu SIST EN 12390-8, so pokazali, da ima vsaka mešanica, tako L2 in P1, svoje dobre in slabe lastnosti. Beton iz mešanice L2 se je bolje izkazal v običajni vgradnji (brez napak v betonu) in pri vgradnji betona z armaturo, mešanica P1 pa se je bolje izkazala pri ostalih napakah v betonu (gnezda in zračni žepi). Po klasifikaciji se je beton iz drobljenega apnenčevega agregata uvrstil v razred PV-II (pogojno v PV-III), beton iz savskega proda pa v razred PV-III, ob predpostavki, da šibka mesta oziroma napake v betonu nimajo vpliva na sam beton. Ugotovil sem, da so napake, ki se pojavljajo v betonu, posledica nepravilne vgradnje. Zato je potrebno izredno pozornost in znanje posvetiti primerni vgradnji v opaže, saj le tako lahko preprečimo nastanek šibkih mest v betonu. Kot se je izkazalo v mojih preizkusih, je potrebno posebno pozornost posvetiti stiku dveh slojev betona, saj ima tam beton bistveno večjo prepustnost za vodo kot beton izven območja stikov. Beton iz drobljenega apnenčevega agregata je imel vodoprepustnost na stiku kar 87mm, beton iz savskega proda pa preizkus vodonepropustnosti sploh ni zdržal, saj so se preizkušanci razcepili na dva dela takoj, ko sem začeli s preiskavo. Zato se ne priporoča betoniranje v več fazah, ampak če je le mogoče, je potrebno naslednjo plast vgraditi pred začetkom vezanja predhodne plasti.

Po primerjavi obeh betonskih mešanic se je težko odločiti, katera betonska mešanica je boljša. Vsaka ima svoje prednosti in slabosti, izbira pa je odvisna od namena uporabe same konstrukcije oziroma objekta.

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

Pajk U. Vpliv različnih mlevnih dodatkov na lastnosti cementa CEM V/A (S-V-P) 42,5N LH, Ljubljana, diplomska naloga Ljubljana Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 68 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

Koželj G. Odpornost proti prodoru vode za lahkogradljiv beton iz savskega proda iz krške kotline. Ljubljana, diplomska naloga Ljubljana Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 67 str.

Salonit Anhovo d.d. Gradbeni materiali – Cementi,
www.salonit.si (20.03.2010)

Lafarge cement d.o.o., Izdelki v rinfuzi,
www.lafarge.si (20.03.2010)

TKK Srpenica d.d.
www.tkk.si (20.03.2010)

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 Krška 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>čepilne trdnosti kock v odvisnosti od nege</i>	53
Preglednica 23: <i>čepilne trdnosti kock v odvisnosti od napak v betonu</i>	53
Preglednica 24: <i>čepilne trdnosti vajev</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 dosegajo 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:

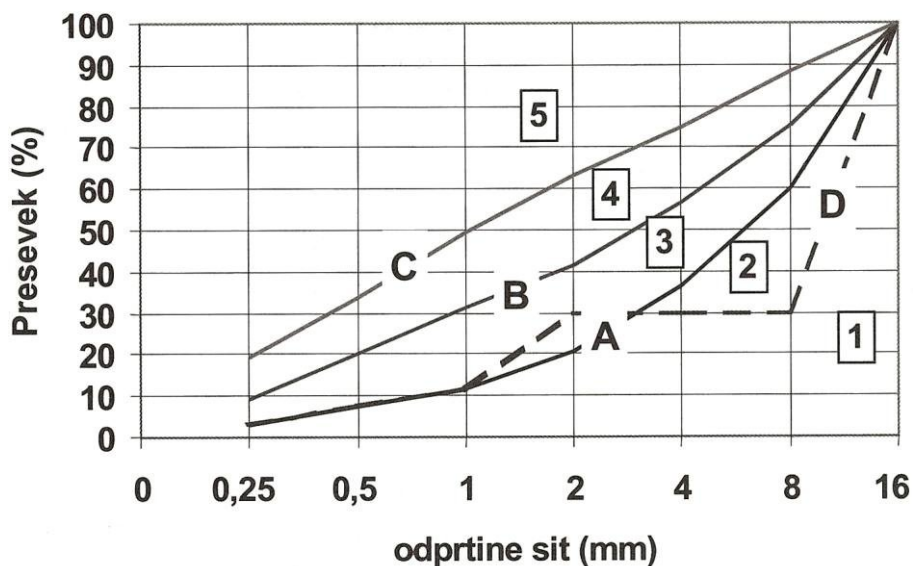
- uravnavanje površinske trdote betona, ker so večinoma bolj odporni na obruš kot cementni kamen, ki povezuje agregat,
- ustvarjanje betonske površine ali njene sposobnosti, da odbija svetlobo,
- kontrolo gostote,
- zvišanje požarne odpornosti betona.

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 razmetje 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.



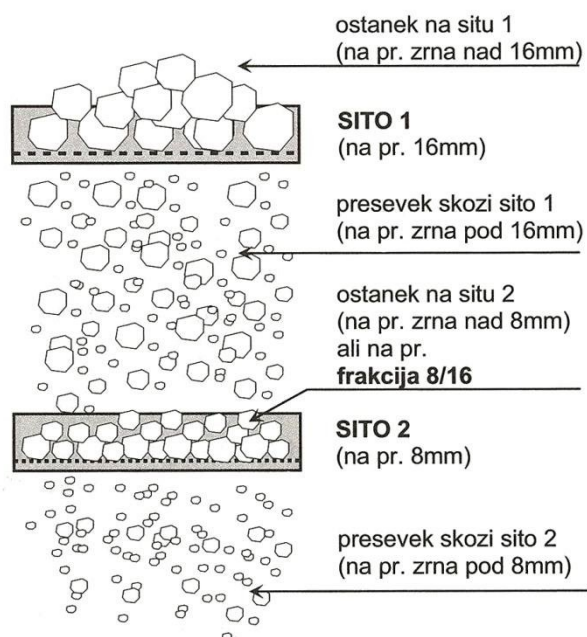
Slika 1: Priporočene mejne krivulje po SIST 1026:2008

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 sejarja 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.

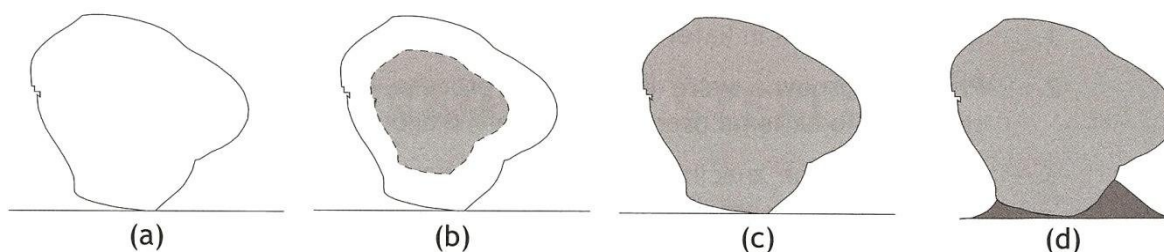
Problem predstavljajo tudi organske primesi, ker vplivajo na vezenje cementne paste in na njeno končno trdnost. Organske primesi so posledica odpadlega in odmrlega rastlinja ter živalskih izločkov, ki se pomešajo predvsem med prod v samem nahajališču.

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.



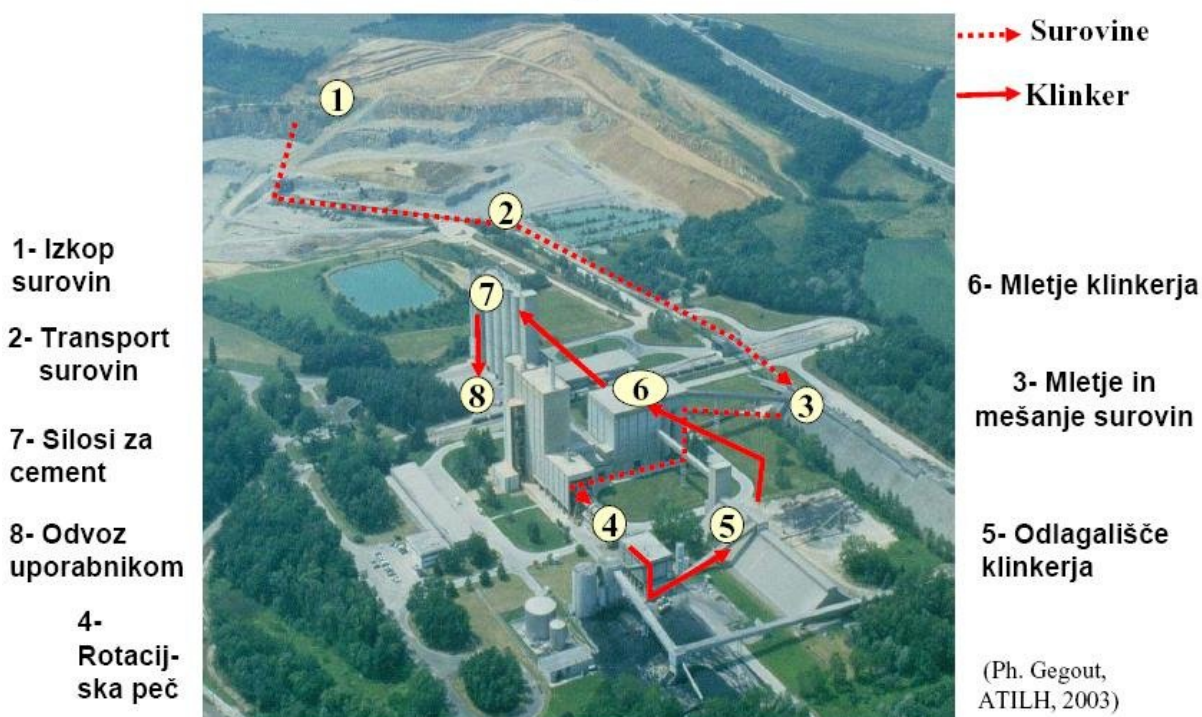
Slika 3: Stopnje količine vlage v agregatu: (a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago, (d) moker. (Žarnić R. 2005)

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.

Žlindra oziroma granulirana plavžna žlindra 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 žlindre 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)	IV/A (D,P,Q,V) 11-35%
		elektrofiltrski pepel (V)	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

Hidratacija 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 hidratacijskih 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 hidratacijo 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 hidratacijske toplote in njen vpliv na lastnosti betona. V primeru nizkih temperatur hidratacijska toplota deloma ščiti beton pred zmrzovanjem, pri masivnih konstrukcijah pa povzroča notranje obremenitve. Hitrovezočni cementi v kratkem času razvijejo veliko količino hidratacijske toplote, zato je za načrtovanje transporta in vgradnje potrebno dobro poznavanje procesa hidratacije.

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 razmetja 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

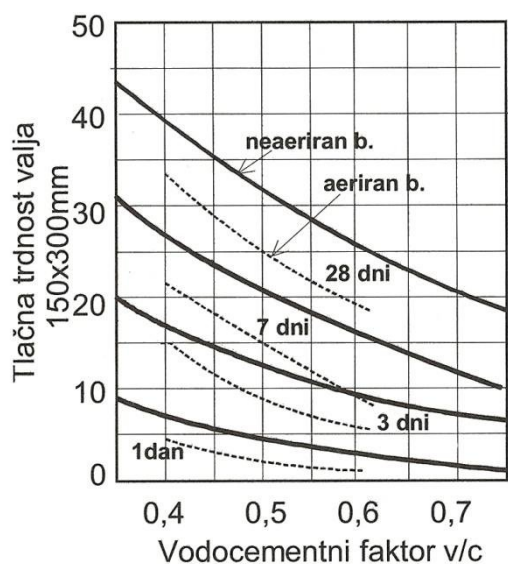
sestava in delež agregata, način nege betona med strjevanjem in stopnja hidratacije (www.nivo.si).

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

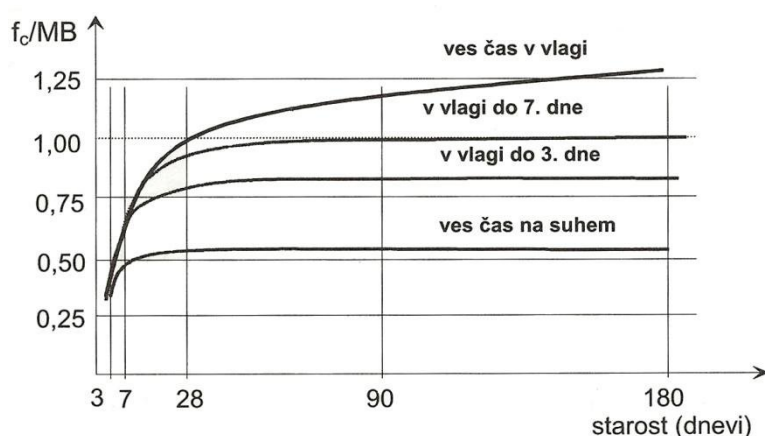
Na lastnosti strjenega betona močno vpliva njegova nega. Za trajno sprejemljivost mora biti sveži beton zavarovan predvsem pred naslednjimi vplivi:

- 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 hidratacije 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 obdela 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.

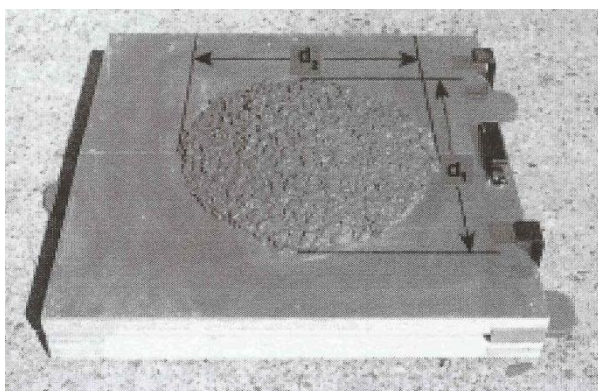
5.2.1.2 Postopek s posedom po standardu SIST EN 12350-2 z dodatnimi meritvami

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.

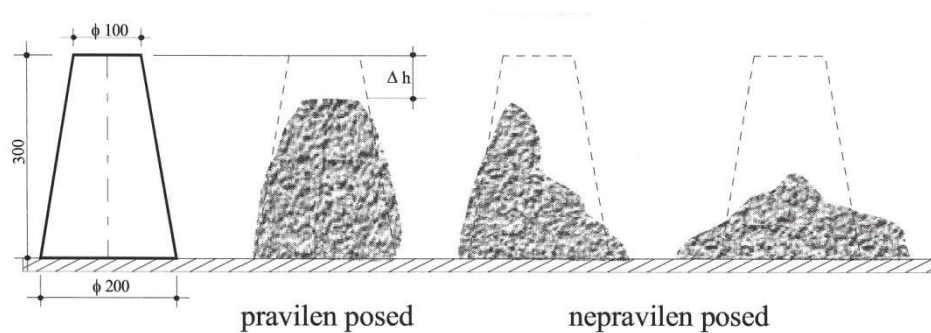
Postopek: Kovinski konus postavimo na ravno in vodoravno podlago ga polnimo z zidarsko žlico v treh plasteh približno enake višine. Vsako plast prebodemo s standardno kovinsko palico (ϕ 16, z zaobljenim vrhom dolžine 60 cm) s 25 udarci. Prvo plast prebadamo po celi višini, pri prebadanju naslednjih plasti pa mora palica prodreti do spodnje plasti. Ko zgotovimo 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 preskušanelec 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 prekinitev 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.

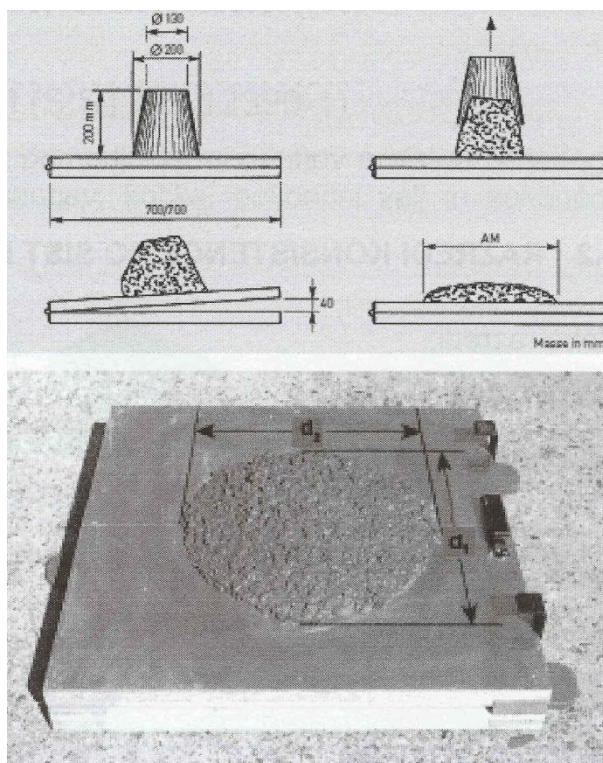
5.2.1.3 Postopek razleza po standardu SIST EN 12350-5

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,

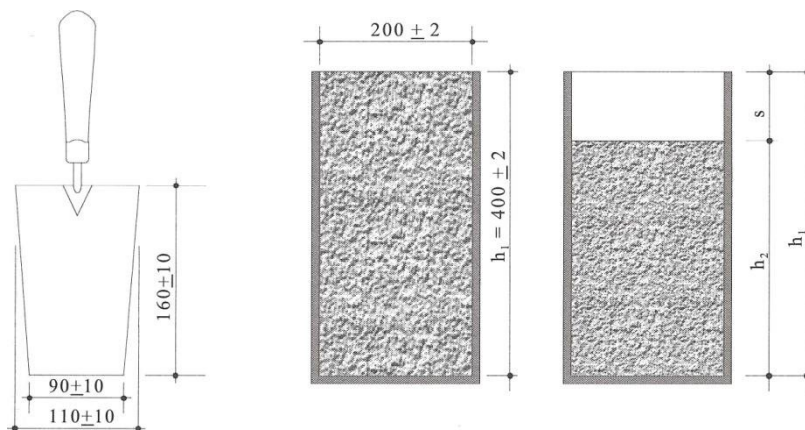
h_1 notranja višina kalupa,

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

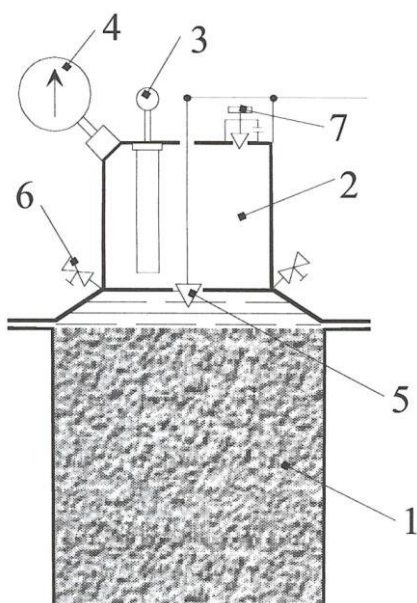


Slika 13: Kalup za zgoščevanje

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/mm²)	Minimalna karakteristična trdnost kocke $f_{ck, cube}$ (N/mm²)
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:

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

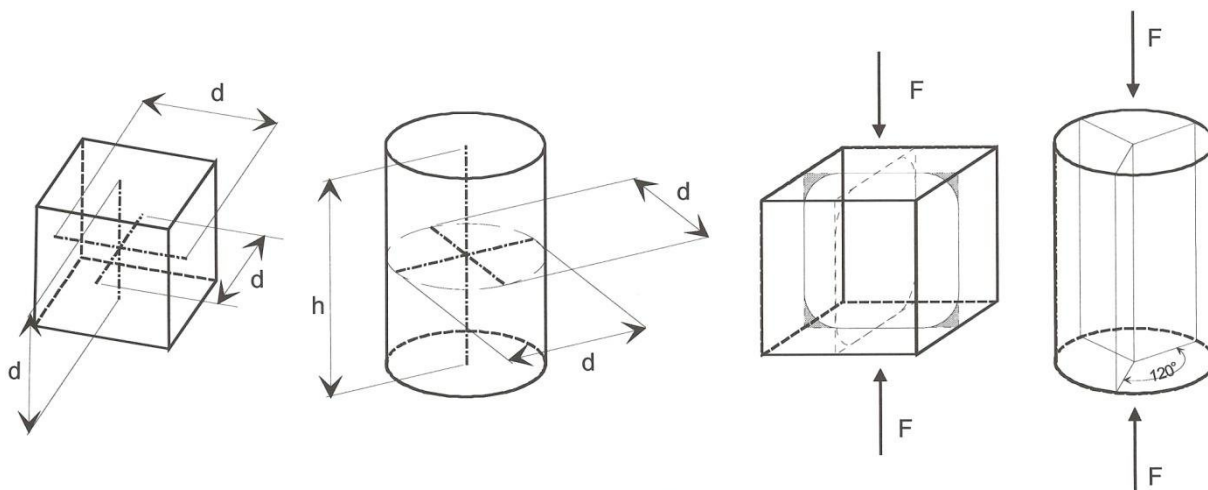
kjer je:

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.

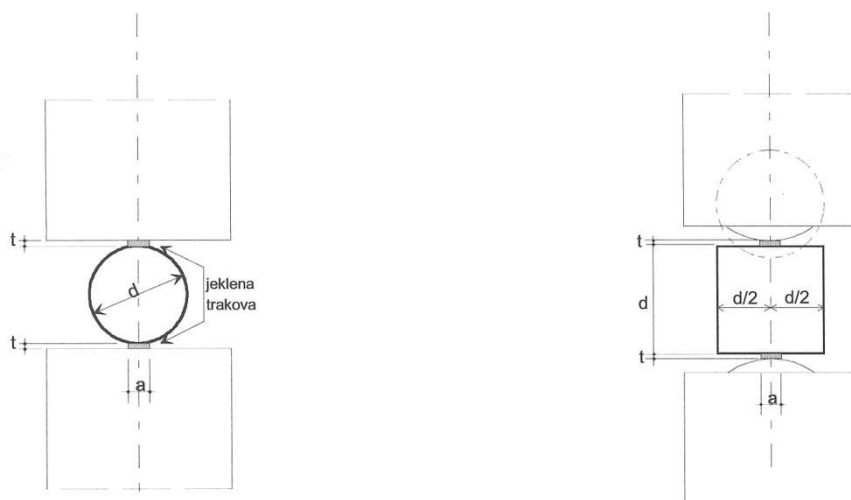


Slika 17: Shema kocke in valja za preskus tlačne trdnosti. (Žarnič R., Bosi, jkov V., Bokan Bosi, jkov V. 2009/2010)

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 cepilnega 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

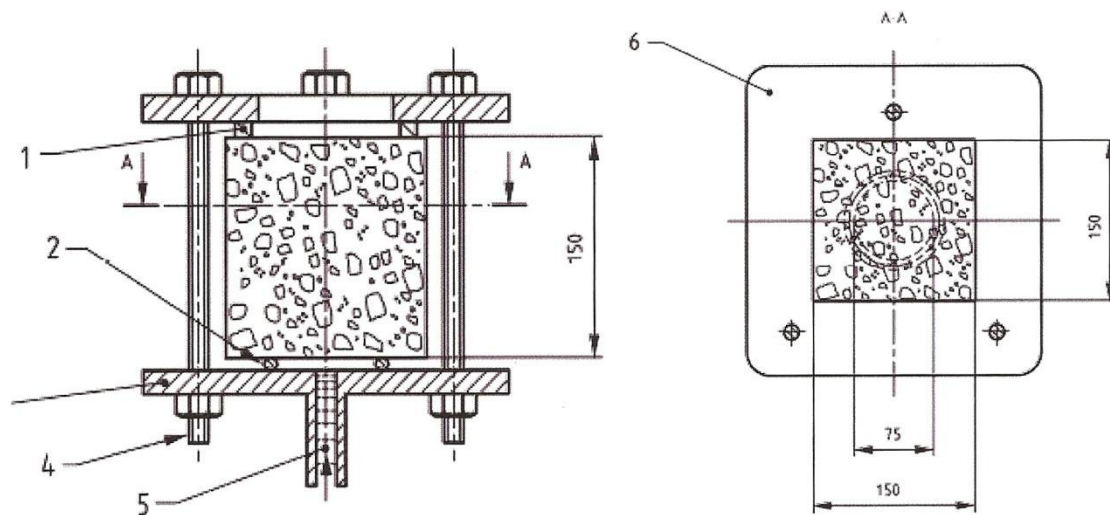
Preizkus vodotesnosti opravimo, kadar nas zanima, kako odporen je beton proti prodiranju vode ali katere druge tekočine. Zanimiv je predvsem za zahtevnejše inženirske objekte kot so: pregrade, bazeni, odlagališča jedrskih odpadkov, skladišča plinov, čistilne naprave itd., pri katerih bi vdor vode ali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

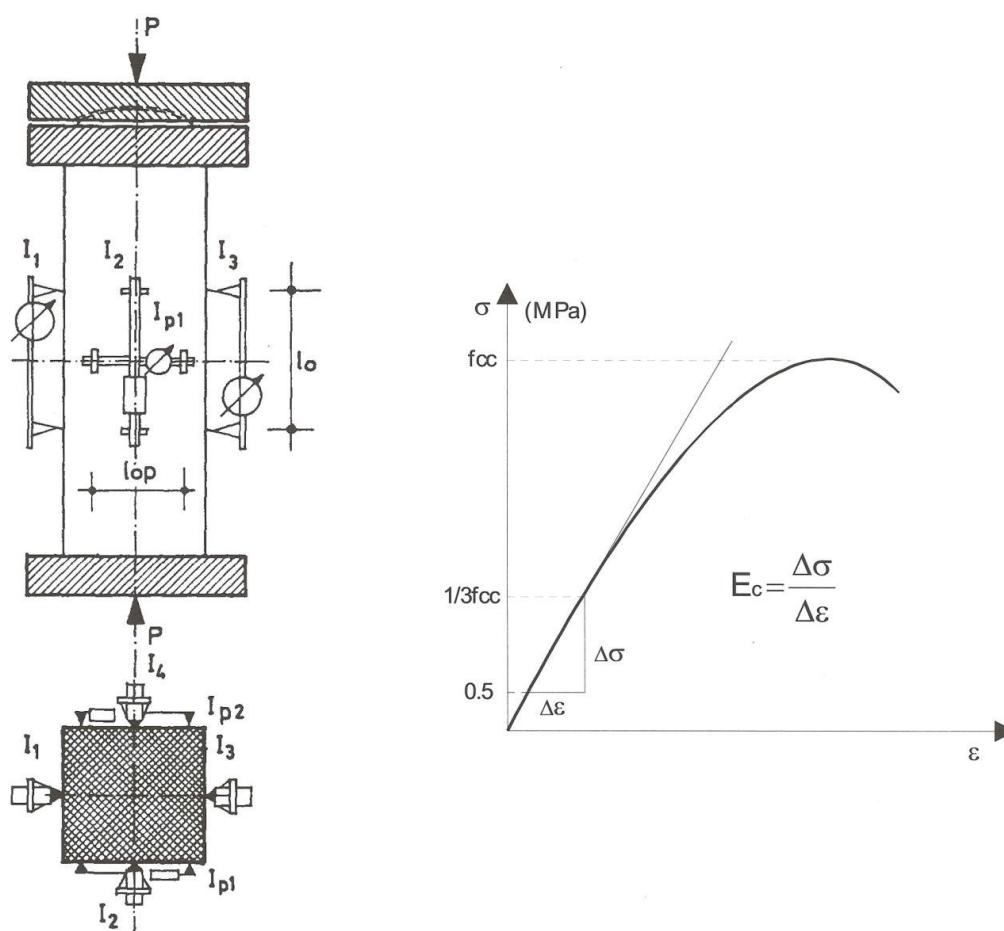
v hitrost ultrazvočnih valov [m/s],

s dolžina poti [m] in

t potovalni čas [μ s].

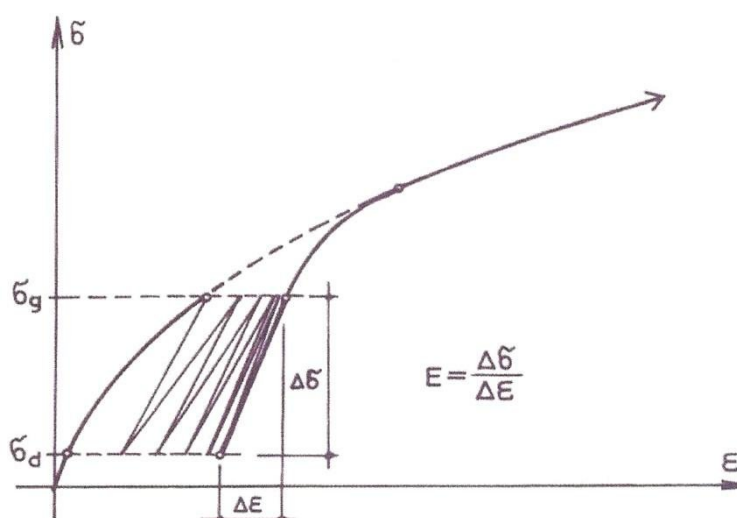
5.3.1.5 Modul elastičnosti JUS U.M1.025

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: Grafčni prikaz cikličnega obremenjevanja in razbremenjevanja

Elastični modul je določen z enačbo:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon},$$

kjer je:

- E modul elastičnosti [MPa],
- $\Delta\sigma$ razlika napetosti $\sigma_g - \sigma_d$ [MPa] in
- $\Delta\epsilon$ 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 elektrofiltrskim 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: *Kemjska 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 naprej 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 lahkogradljive 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 lahkovgradljive 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 zrni 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

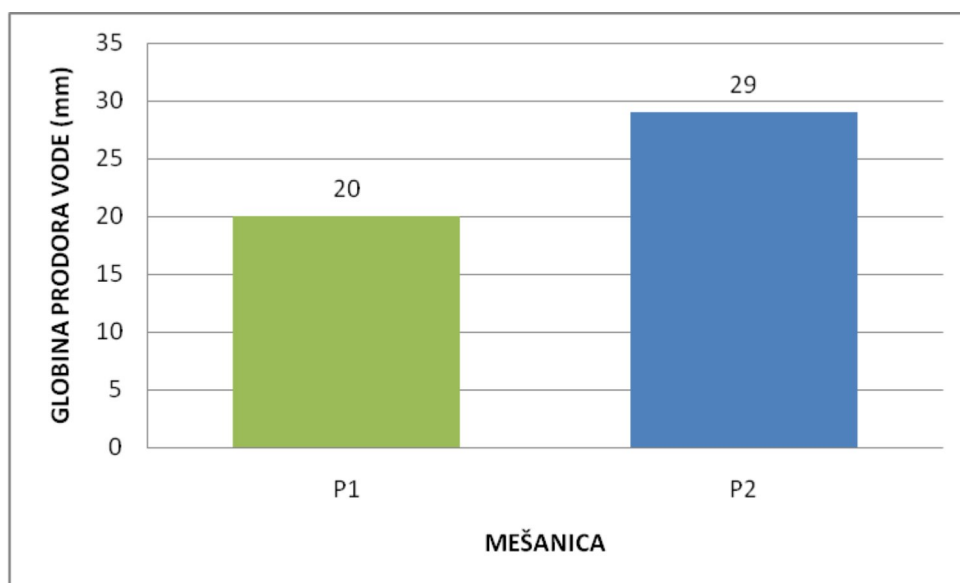
72 urah preizkušance vzamemo iz naprave in stehtamo, da ugotovimo količino absorbirane vode. Preizkušance nato razcepimo z cepilnim nateznim preskusom in izmerimo globino prodora vode.



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 razopazali 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.



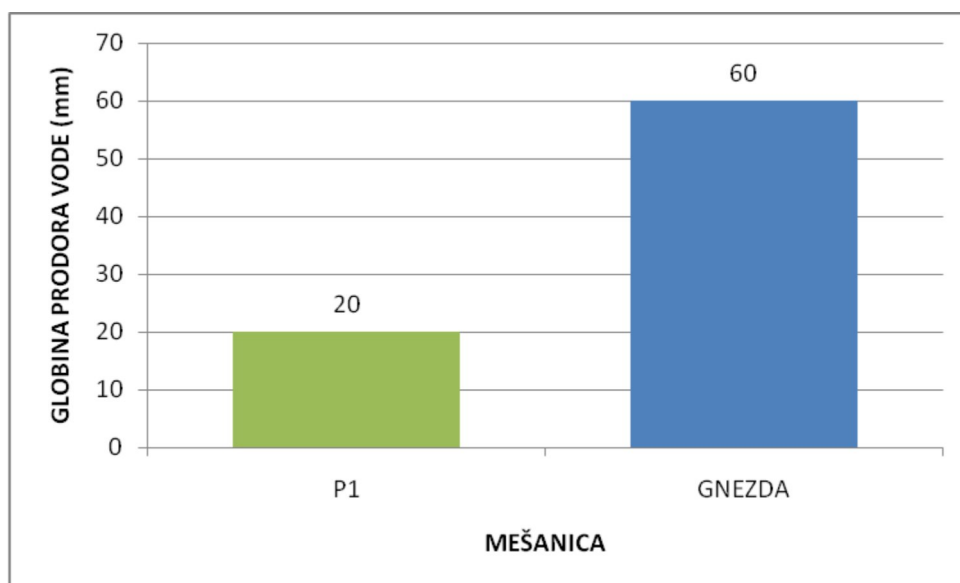
Slika 26: Primer razklanega vaĵa po površini hladnega stika

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 prodrła. 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.

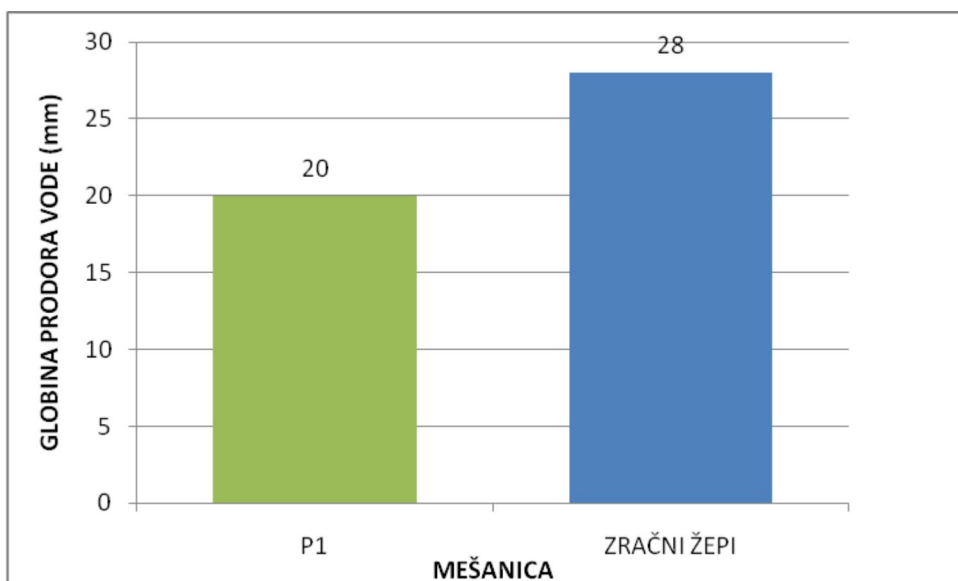
c) Vpliv zračnih žepov na vodotesnost betona

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 stijen beton 72ur. Nato s cepilnim nateznim preskusom preskušavec 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.



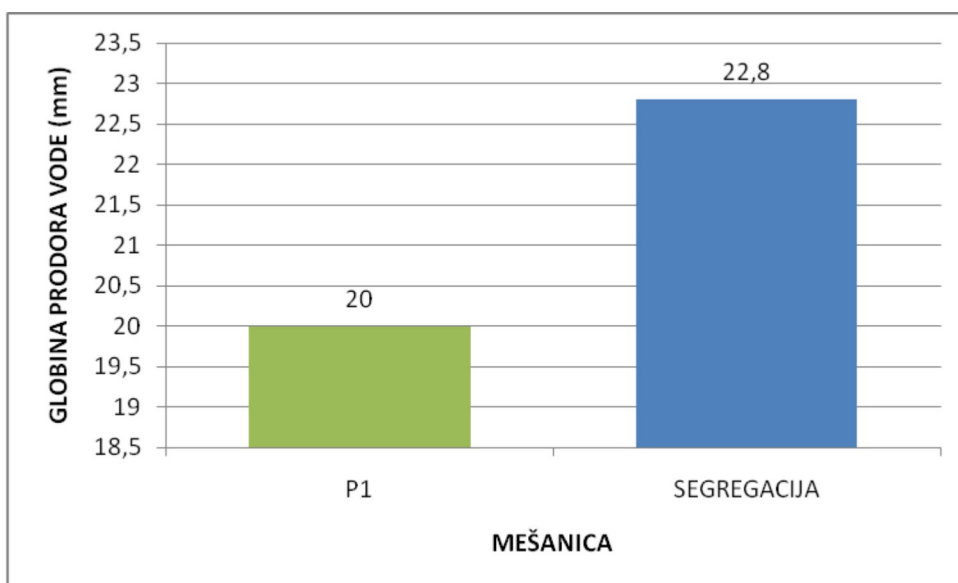
Slika 29: Globina prodora vode zaradi zračnih žepov

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.

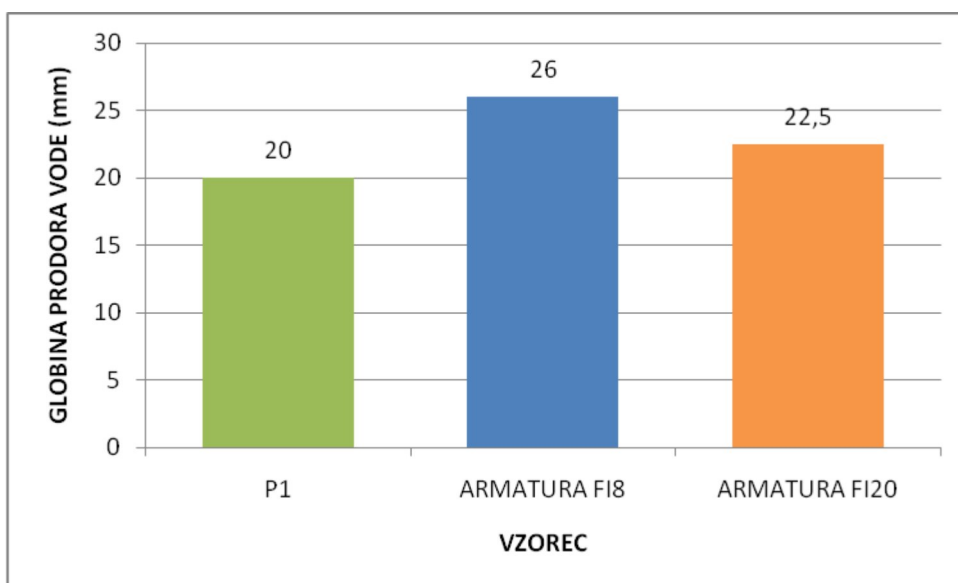


Slika 30: Globina prodora vode zaradi segregacije

Rezultati kažejo, da segregacija betona vpliva na višji prodor vode v preizkušane. 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 vaĳev v primerjavi z meĳanico P1, ki je bila brez napak

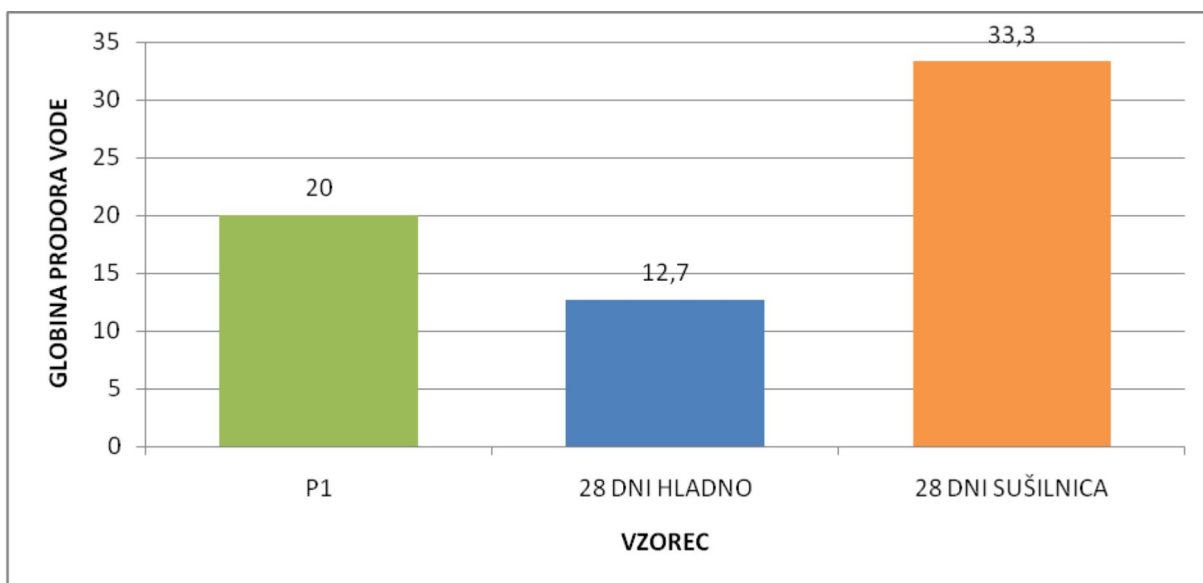
Rezultati kaĳejo, da pri valjih, ki so vsebovali manjĳo armaturo, voda prodre veliko viĳje. Ne smemo pa zanemariti dejstva, da so se v primeru armature $\phi 20\text{mm}$ pojavile vidne razpoke, ki so segale do polovice debeline ploĳe, ko smo jo upogibno obremenili. Pri ploĳi, ki je vsebovala armaturo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



Slika 32: Upogibna obremenitev ploĳe iz katere smo izvrtali vaĳje

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

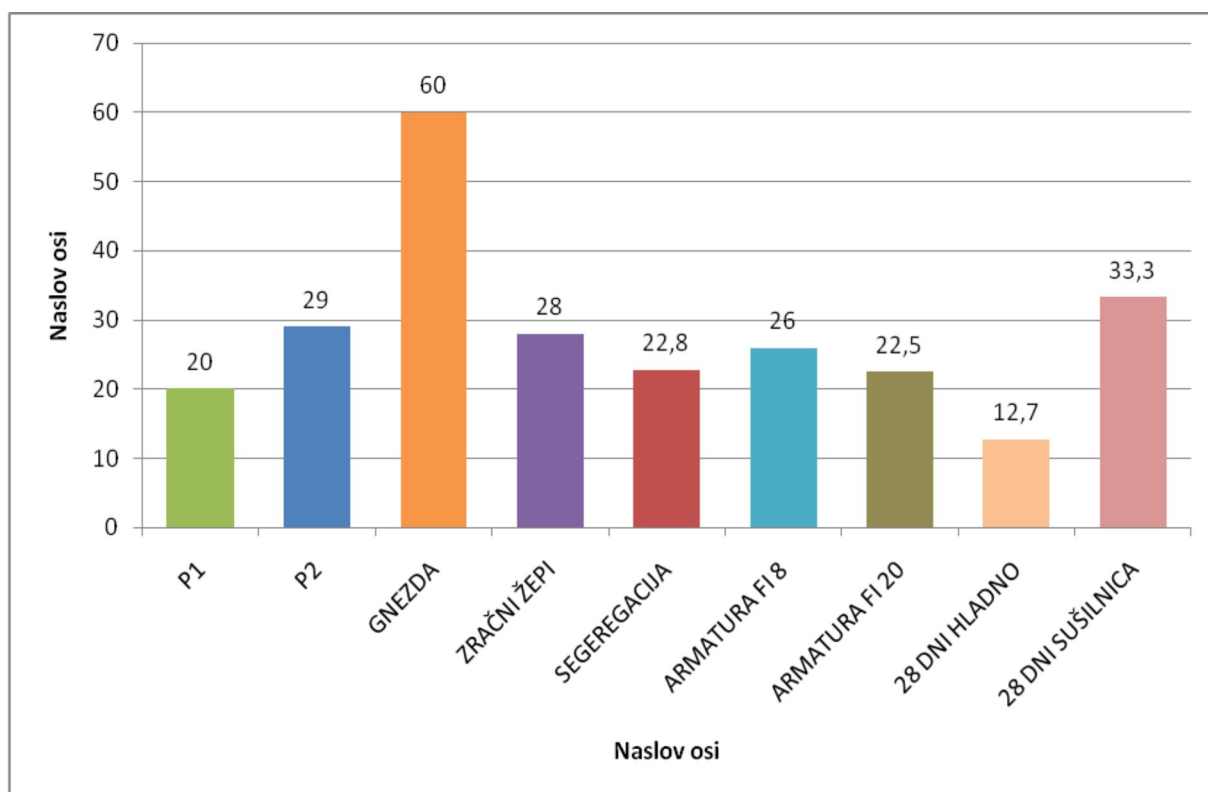
Pričakovali smo, da bo prodor vode pri preizkušancih, ki so odležali pri 0°C večji, kot pri primerjalnih preizkušancih P1, saj je pri nizkih temperaturah potek hidratacije cementa upočasnen. Ker pa samo ti preizkušanci pred preskusom vodotesnosti niso bili osušeni do konstantne mase, bi lahko bila razlog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

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **SLAVIŠA KUZMANOVIĆ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom **VPLIV ŠIBKIH MEST V STRUKTURI BETONA NA NJEGOVO ODPORNOST PROTI PRODORU VODE**.

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

Ljubljana, 11.9.2009

(podpis)

ZAHVALA

Za strokovno pomoč in voderje pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahva.jem mentorici doc. dr. Violeti Bokan Bosi.jkov.

Posebna zahvala ve.ja tudi Katedri za preskušar.je materialov in konstrukc.j, ki mi je omogočila oprav.jar.je preiskav v Konstrukc.jsko - prometnem laborator.ju in somentor.ju Franc.ju Čeponu dipl. inž. grad., ki mi je pomagal pri preiskavah v laborator.ju.

Zahvalil bi se tudi sv.jima staršema, bratu Dan.jelu in puncu Vesni za vso pod.poro, pomoč in razumevar.je skozi vsa leta štud.ja.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	OSNOVNI MATERIALI.....	2
2.1	Cement.....	2
2.1.1	Standard	4
2.1.2	Mehanske zahteve.....	6
2.1.3	Kemijske zahteve in zahteve za trajnost.....	7
2.1.4	Izbira cementa	9
2.1.5	Hidratacija cementa	11
2.1.6	Nehidratizirana cementna zrna.....	15
2.1.7	Toplota hidratacije cementa	16
2.1.8	Pore v cementnem kamnu.....	17
2.1.9	Voda v cementnem kamnu	19
2.1.10	Ph, kisló-bazične lastnosti cementnega kamna	20
2.2	Agregat	22
2.2.1	Vlažnost agregata	26
2.2.2	Obstojnost agregata.....	27
2.2.3	Kemične sestavine agregata, ki vplivajo na trajnost betona:SIST EN 12620 : 2002	29
2.3	Kemijski dodatki betonu – superplastifikator	31
2.3.1	Superplastifikatorji	31
2.3.2	Delovanje superplastifikatorja	32
2.4	Mineralni dodatki.....	35
2.4.1	Elektrofiltrski pepel.....	36
2.4.2	Uporaba elektrofiltrskega pepela po SIST EN 1026 : 2007	38
2.5	Voda	41
2.6	Stično območje med zrni agregata in cementim kamnom.....	43
2.6.1	Pomembnost stičnega območja	43
2.6.2	Mikrostruktura stičnega območja	43
2.6.3	Trdnost stičnega območja	44

2.6.4	Vpliv stičnega območja na lastnosti betona	45
3	LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA	48
3.1	Lastnosti svežih betonskih mešanic	48
3.2	Mešanje betona	48
3.2.1	Konsistenca betonske mešanice.....	48
3.3	Vgradljivost.....	49
3.4	Izcejanje vode.....	50
3.5	Zgoščevanje	50
3.6	Nega betona	51
4	METODE PREISKAV OBDELOVALNOSTI SVEŽE BETONSKE MEŠANICE IN ZAHTEVE STANDARDA	53
4.1	Preskus s posedom stožca; SIST EN 12350-2 [9]	53
4.2	Navodilo za preskus konsistence svežega lahkogradljivega betona (določitev poseda, razleza s posedom in časa preoblikovanja zaradi delovanja lastne teže) [10].....	54
4.3	Preskus z razlezom; SIST EN 12350-5	57
4.4	Vsebnost zraka – metode s pritiskom; SIST EN 12350-7 [20].....	59
4.5	Stopnja zgoščenosti; SIST EN 12350-4.....	60
5	LASTOSTI STRJENEGA BETONA	63
5.1	Lastnosti betona.....	63
5.2	Obnašanje betona pri enoosnem tlaku	63
5.3	Modul elastičnosti in Poissonov koeficient	66
5.4	Natezna trdnost betona (cepilni natezni preskus)	68
5.5	Transportni mehanizmi v materialih s cementnim vezivom	69
5.5.1	Tečenje pod tlakom	70
6	METODE PREISKAV STRJENEGA BETONA IN ZAHTEVE STANDARDOV	72
6.1	Tlačna trdnost preizkušancev; SIST EN 12390-3.....	72
6.1.1	Določevanje tlačne trdnosti betona	74
6.2	Natezna razcepna trdnost preizkušancev; SIST EN 12390-6.....	76

6.3	Globina vpijanja vode pod pritiskom; SIST EN 12390-8	79
6.4	Določevanje hitrosti prehoda ultrazvoka; SIST EN 12504-4	81
6.5	Modul elastičnosti; JUS U.M1.025 [17]	83
6.6	Vodovpojnost (The pipe-method)	86
7	LASTNE PREISKAVE.....	87
7.1	Uvod.....	87
7.2	Osnovni materiali	88
7.2.1	Agregat	88
7.2.2	Voda	89
7.2.3	Cement.....	89
7.2.4	Kemijski dodatki – superplastifikator.....	90
7.2.5	Mineralni dodatki – elektrofiltrski pepel	91
7.3	Predstavitev betonskih mešanic	92
7.3.1	Mešanica L1	92
7.3.2	Mešanica L2	93
7.3.3	Mešanica L3	94
7.4	Preiskave svežih betonskih mešanic.....	96
7.4.1	Določitev konsistence.....	96
7.4.1.1	Preskus s posedom stožca; SIST EN 12350-2.....	96
7.4.1.2	Preskus z razlezom;SIST EN 12350-5	98
7.4.1.3	Stopnja zgoščenosti; SIST EN 12350-4.....	99
7.4.1.4	Preskus konsistence svežega lahkovgradljivega betona (določitev poseda, razleza s posedom in časa preoblikovanja zaradi delovanja lastne teže).....	101
7.4.1.5	Vsebnost zraka – metode s pritiskom; SIST EN 12350-7	102
7.5	Preiskave strjenega betona	103
7.5.1	Tlačna trdnost.....	103
7.5.1.1	Primerjava tlačnih trdnosti mešanic L1, L2 in L3	103
7.5.1.2	Primerjava tlačnih trdnosti betonov v odvisnosti od vrste opaža	105
7.5.1.3	Primerjava tlačnih trdnosti v odvisnosti od nege betona.....	107
7.5.2	Cepilna natezna trdnost	108
7.5.2.1	Primerjava nateznih trdnosti naših mešanic L1,L2 in L3	108

7.5.3	Globina prodora vode pod pritiskom; SIST EN 12390-8	110
7.5.3.1	Primerjava preskusa vodotesnosti med JUS U.M1 015 standardom in SIST EN 12390-8	110
7.5.3.2	Primerjava preskusa vodotesnosti betonov L1, L2 in L3	113
7.5.3.3	Vpliv šibkih mest v betonu na njegovo vodotesnost.....	114
7.6	Sklep.....	120
VIRI	122

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 691.32(043.2)

Avtor: Slaviša Kuzmanović

Mentor: doc.dr. Violeta Bokan Bosiljkov

Naslov: Vpliv šibkih mest v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode

Obseg in oprema: 123 str., 33 pregl., 84 sl., 10 en.

Ključne besede: struktura betona, odpornost betona, vodotesnost betona

Izvleček:

V diplomski nalogi smo najprej ugotavljali odpornost treh različnih betonov proti prodoru vode pod pritiskom. Vodovozivno razmerje prve mešanice je bilo 0,55, ostalih dveh mešanic pa 0,4. Za izdelavo mešanic smo uporabili drobljen apnenčev agregat, vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja in cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R. Druga in tretja mešanica sta vsebovali tudi superplastifikator polikarboksilatnega tipa, pri tretji mešanici pa smo del cementa zamenjali z elektrofilitrskim pepelom. Poleg odpornosti betona proti prodoru vode smo preskušali tudi lastnosti betonov v svežem stanju ter njihovo tlačno in cepilno natezno trdnost. Pri tlačni trdnosti nas je, poleg razlik med različnimi sestavami, zanimal tudi vpliv nege in vrste opaža na doseženo tlačno trdnost betona. Sledile so preiskave vpliva šibkih mest v strukturi betona na njegovo odpornost proti prodoru vode. Šibka mesta, ki so bila predmet preiskav, so gnezda, hladni stiki in prisotnost zračnih žepov.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 691.32(043.2)
Author: Slaviša Kuzmanović
Supervisor: doc.dr. Violeta Bokan Bosiljkov
Title: Influence of weak parts in concrete structure on resistance of concrete to water penetration
Notes: 123 p., 33 tab., 84 fig., 10 eq.
Key words: concrete structure, resistance of concrete, concrete water penetration

Abstract:

The diploma thesis deals with the resistance of three different concretes against penetration of water under pressure. Water-binder ratio of first concrete mix was 0.55 and of second and third mix it was 0.40. The concrete mixes were made using crushed limestone aggregate, tap water and cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R. The second and the third mix incorporated polycarboxylate type of superplasticizer and in the third mix cement was partially replaced by fly ash. On fresh concrete mixes different consistency tests were carried out and air content was determined, and on hardened concrete mixes compressive and splitting tensile tests were carried out. In case of compressive strength the influence of curing and the type of mould material were tested as well. At the end the influence of weak parts in the concrete structure on the resistance against penetration of water under pressure were studied. The studied weak parts were honeycombs, bug holes and cold joints.

KAZALO SLIK

Slika 1:	Rotacijska peč in cementni grad [1]	2
Slika 2:	Cementni klinker [1].....	2
Slika 3:	Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1 [3].....	5
Slika 4:	Faze hidratacije portland cementa [2]	11
Slika 5:	Shematični prikaz oblikovanja produktov hidratacije cementa s časom in njihovimi prostorninskimi deleži v odvisnosti od stopnje hidratacije [2] ..	12
Slika 6:	C-S-H (I) [1]	13
Slika 7:	C-S-H (II) [1].....	13
Slika 8:	C-S-H (III) [1]	13
Slika 9:	Kalcijev hidroksid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [1].....	13
Slika 10:	Etringit [1]	14
Slika 11:	Monosulfat hidrat [1].....	14
Slika 12:	Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov portland cementnega klinkerja [2]	16
Slika 13:	Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementne paste [3]	17
Slika 14:	Porazdelitev trdnih delcev in por v hidratiziranem cementnem kamnu po velikosti [2].....	18
Slika 15:	Porazdelitev por po velikosti v cementnem kamnu, v odvisnosti od v/c razmerja [2].....	19
Slika 16:	Shematičen model vrst vode povezanih s C-S-H fazo [2].....	20
Slika 17:	Spreminjanje pH v cementnem kamnu in sprememba kemijskih specij s časom [2]	21
Slika 18:	Prodnat in drobljen grob agregat (levo) ter droben agregat (desno) [2].....	22
Slika 19:	Frakcije agregata [2].....	23

Slika 20:	Sejalna analiza agregata [2].....	23
Slika 21:	Mejne krivulje območij primernosti agregata z $D_{max}=16\text{mm}$ po SIST 1026 [2]	24
Slika 22:	a) Shematični prikaz izcejanja vode iz cementne paste v svežem betonu, .26 b) Strižna porušitev stika v betonskem vzorcu po enoosnem tlačnem preskusu [2]	26
Slika 23:	Stopnje količine vlage v agregatu [3]	27
Slika 24:	Shematični prikaz običajnega superplastifikatorja (levo) in superplastifikator na bazi polikarboksilatov (desno) [2].....	33
Slika 25:	Shematični prikaz delovanja običajnega superplastifikatorja [2].....	34
Slika 26:	Shematični prikaz delovanja superplastifikatorja nove generacije [2].....	34
Slika 27:	Shematični prikaz stičnega območja [2].....	44
Slika 28:	Posnetek stičnega območja [2]	44
Slika 29:	Sovisnost med napetostjo in deformacijo za naravni mineralni agregat, cementni kamen in beton [2]	45
Slika 30:	Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona [3].....	52
Slika 31:	Pravilen in nepravilen posed sveže betonske mešanice [8].....	53
Slika 32:	Nepodajna podlaga z vrisanim včrtanim krogom [11]	54
Slika 33:	Kalup (votel prisekan stožec) za preskus (a in b) in lijak (c) [10].....	55
Slika 34:	Standardni kovinski konus in standardna lesena palica [12].....	58
Slika 35:	Prikaz metode preskusa z razlezom [8].....	58
Slika 36:	ASTM C 173 [13].....	59
Slika 37:	Prozimeter SIST EN 12350-7.....	59
Slika 38:	Porozimeter.....	60
Slika 39:	Betonske mešanice pred vibriranjem in po njem [8].....	61

Slika 40:	Napetostno-optično registriranje glavnih napetosti v modelnem betonu [2]	64
Slika 41:	Porazdelitev napetosti okrog agregatnega zrna v homogeni matrici in oblikovanje mikrorazpok pod tlačno obremenitvijo [2].....	65
Slika 42:	Shematični prikaz mikrorazpok v poroznem materialu in porazdelitev napetosti okrog krožne pore pri enosni tlačni obremenitvi [2].....	66
Slika 43:	Sovisnost med napetostjo ter osno oziroma prečno deformacijo [2].....	67
Slika 44:	Oblikovanje mikrorazpok pod natezno obremenitvijo [2]	68
Slika 45:	Cepilni natezni preskus [2].....	69
Slika 46:	Shematični prikaz pravih porušitev betonskih kock po SIST EN 12390-3 [15]	75
Slika 47:	Shematični prikaz nepravilnih porušitev betonskih kock po SIST EN 12390-3 [15]	75
Slika 48:	Shematični prikaz pravilne porušitve valjastih betonskih preskušancev po SIST EN 12390-3 [15].....	75
Slika 49:	Shematični prikaz nepravilne porušitve valjastih betonskih preskušancev po SIST EN 12390-3 [15].....	76
Slika 50:	Shematični prikaz nateznega cepilnega preskusa na valju, kocki in prizmi [8]	77
Slika 51:	Shematični prikaz pravilne postavitve preskušanca pri natezni razcepni trdnosti [16]	78
Slika 52:	Shematski prikaz preskusa vodotesnosti [19].....	80
Slika 53:	Grafični prikaz cikličnega obremenjevanja in razbremenjevanja [17].....	83
Slika 54:	Grafični prikaz ukrivljenosti funkcije betonov različnih trdnosti [17].....	84
Slika 55:	Določevanje statičnega modula elastičnosti [8]	85
Slika 56:	Shematični prikaz določevanja vodovpojnosti [18]	86
Slika 57:	Graf primerjave mešanic s preskusom poseda	97

Slika 58:	Prikaz mejenja poseda po SIST EN 206-1 in razredov.....	97
Slika 59:	Graf primerjave mešanic s preskusom razleza	98
Slika 60:	Prikaz razleza po SIST EN 206-1 in razredov.....	99
Slika 61:	Graf primerjave mešanic s preskusom določevanja stopnje zgoščenosti.	100
Slika 62:	Prikaz poseda betonske mešanice v standardnem kalupu po SIST EN 12350-4 in razredi zgoščitve po SIST EN 206-1	100
Slika 63:	Graf primerjave mešanic s preskusom razleza s posedom	101
Slika 64:	Porozimeter.....	102
Slika 65:	Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 7 dni.....	104
Slika 66:	Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni.....	104
Slika 67:	Primerjava tlačne trdnosti (po 7 dneh) v odvisnosti od vrste opaža.....	105
Slika 68:	Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste opaža.....	106
Slika 69:	Primerjava tlačne trdnosti (po 7 dneh) v odvisnosti od vrste opaža.....	106
Slika 70:	Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste opaža.....	107
Slika 71:	Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste nege.....	108
Slika 72:	Primerjava natezne trdnosti betona.....	109
Slika 73:	Prikaz cepilnega nateznega preskusa.....	109
Slika 74:	Naprava za določevanje globine prodora vode pod pritiskom	110
Slika 75:	Prikaz določevanja globine prodora vode	111
Slika 76:	Grafični prikaz rezultata primerjave preskušanja med JUS in SIST EN standardom	112
Slika 77:	Primerjava preskusa vodotesnosti med betoni mešanic L1, L2 in L3	113
Slika 78:	Primer gnezd grobozrnatega agregata v naših preskušancih.....	115
Slika 79:	Priprava grobozrnatih gnezd v naših preskušancih	115

Slika 80:	Primerjava rezultatov preskusa vodotesnosti betona med betonskimi preskušanci z gnezdi in brez njih.....	116
Slika 81:	Prikaz priprave preskušancev za preskus vodotesnosti betona po hladnem stiku	117
Slika 82:	Primerjava preskusa vodotesnosti betona po stiku preskušancev z preskušanci mešanice L2.....	118
Slika 83:	Prikaz dovajanja zraka preskušancu pod pritiskom in por v notranjosti preskušanca.....	119
Slika 84:	Primerjava preskusa vodotesnosti betona med preskušanci s povečanimi zračnimi porami in preskušanci brez šibkih mest.....	119

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Kemijska sestava čistega portland cementa CEM I [2].....	3
Preglednica 2:	Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti [2].....	4
Preglednica 3:	Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1 [4].....	6
Preglednica 4:	Mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti [4] 7	
Preglednica 5:	Kemijske zahteve, dane kot karakteristične vrednosti [4].....	8
Preglednica 6:	Uporabnost cementov po SIST EN 197-1 [5]	10
Preglednica 7:	Največja priporočena količina finih delcev po SIST 1026:2007 [6].....	15
Preglednica 8:	Toplota hidratacije klinkerskih mineralov [2].....	16
Preglednica 9:	Splošne zahteve za zrnavost [7].....	25
Preglednica 10:	Koeficient temperaturnega raztezanja posameznih kamnin [2]	28
Preglednica 11:	Kategorija za največjo vsebnost sulfatov, topnih v kislini [7]	30
Preglednica 12:	Kemijska sestava elektrofiltrskega pepela [2].....	36
Preglednica 13:	Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona za posamezne stopnje izpostavljenosti [5]	39
Preglednica 14:	Razredi in stopnje izpostavljenosti [5]	40
Preglednica 15:	Klasifikacija konsistence po DIN standardih [8].....	49
Preglednica 16:	Razredi konsistence za metodo preskusa s posedom stožca SIST EN 206-1 [8]	54
Preglednica 17:	Razredi konsistence za metodo preskusa z razlezom SIST EN 206-1 [8]..	59
Preglednica 18:	Razredi konsistence za stopnjo zgoščenosti SIST EN 206-1 [8].....	62
Preglednica 19:	Razredi tlačne trdnosti za normalno težak in težak beton po SIST EN 206-1 [14]	73

Preglednica 20:	Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po SIST EN 206-1 pri starosti betona najmanj 28 dni [14]	80
Preglednica 21:	Ocena kvalitete betona glede na hitrost potovanja ultrazvoka [6].....	83
Preglednica 22:	Lastnosti uporabljenega mineralnega agregata.....	89
Preglednica 23:	Izbrana zrnastostna sestava	89
Preglednica 24:	Lastnosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5R v primerjavi z standardom SIST EN 197-1	90
Preglednica 25:	Receptura mešanice L1.....	92
Preglednica 26:	Receptura mešanice L2.....	93
Preglednica 27:	Receptura mešanice L3.....	95
Preglednica 28:	Prikaz rezultatov poseda.....	101
Preglednica 29:	Prikaz rezultatov trajanja preskusa razleza s posedom.....	102
Preglednica 30:	Primerjava predpostavljene in dejanske poroznosti svežih betonskih mešanic	103
Preglednica 31:	Rezultat primerjave med JUS in SIST EN standardom.....	112
Preglednica 32:	Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po SIST EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni [5]	113
Preglednica 33:	Količina absorbirane vode preskušancev mešanic L1, L2 in L3.....	114

1 UVOD

Odpornost betona proti prodoru vode je lastnost, ki jo največkrat povezujemo z betonskimi konstrukcijami, pri katerih se zahteva vodotesnost. To so praviloma betonski objekti ali njihovi deli, pri katerih bi prodor vode ali druge tekočine pustil posledice na objektu ali v njegovi okolici. Sem spadajo temelji in temeljne plošče, bazeni, čistilne naprave, skladišča plinov, odlagališča radioaktivnih odpadkov in podobno. Odpornost betona proti prodoru vode pa je tudi dober posreden pokazatelj njegove obstojnosti. Zato slovenski standard SIST 1026 podaja zahteve glede dovoljenih vrednosti prodora vode s preskusom po SIST EN 12390-8 za različne stopnje agresivnosti okolja, saj se v takih okoljih zahteva visoka kakovost zaščitne plasti betona nad armaturo.

Na odpornost betona proti prodoru vode vplivajo osnovni materiali njegove sestave, vodocementno ali vodovezivno razmerje ter seveda postopek vgrajevanja betona v opaže, ki vpliva na končno homogenost betona v konstrukciji, morebitno prisotnost gnezd, hladnih stikov, Zelo pomembna pa je tudi nega betona, saj lahko neustrezna nega povzroči oblikovanje površinskih razpok, ki poslabšajo vodotesnost betona. Razpoke v betonskih elementih pa lahko nastanejo tudi kot posledica oviranega krčenja in preobremenitve. Z njihovim oblikovanjem je olajšan vstop vodi ali drugi tekočini v beton ali betonsko pregrado.

Zato smo v diplomski nalogi najprej študirali vpliv različnih sestav betona na odpornost betona proti prodoru vode. Izhodiščna sestava je bila izdelana brez superplastifikatorja in z vodocementnim razmerjem 0,55. Pri naslednji sestavi smo vodocementno razmerje zmanjšali na 0,40, s pomočjo superplastifikatorja. Pri zadnji, tretji sestavi pa smo pri vodovezivnem razmerju 0,40 del cementa nadomestili z elektrofilitrskim pepelom. Poleg odpornosti betona na prodor vode smo preskušali tudi lastnosti betonov v svežem stanju (posed, razlez, razlez s posedom, stopnjo zgoščenosti in poroznost) in tlačno ter cepilno natezno trdnost strjenega betona.

Sledila je izdelava preskušancev ali elementov s šibkimi mesti v obliki gnezd, hladnih stikov med vgrajenimi sloji betona in zračnih žepov. Pri elementih smo preskušance dobili z vrtanjem. Na ta način smo želeli ugotoviti, v kolikšni meri šibka mesta v betonu zmanjšajo odpornost betona proti prodoru vode.

2 OSNOVNI MATERIALI

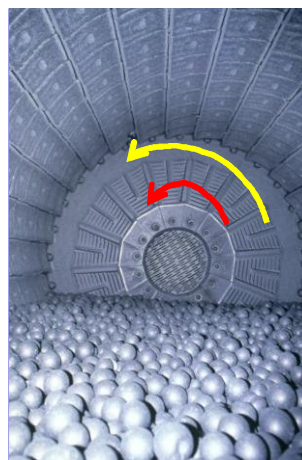
2.1 Cement

Cement je hidravlično mineralno vezivo, ki se pridobiva z mletjem tako imenovanega portland cementnega klinkerja – umetnega kamenega materiala, ki nastaja pri žganju surovinske mešanice apnenca in gline do temperature sintranja v temperaturnem območju 1300-1500°C.

Osnovna surovina za proizvodnjo cementa je praviloma naravni lapor, ki je zmes apnenca in gline. Zaradi pomanjkanja laporja za masovno proizvodnjo uporabljajo cementarne v Sloveniji surovinsko mešanico, ki se pripravlja z mešanjem apnenih in glinenih komponent. Mešanica mora vsebovati 75-78% kalcijevega karbonata (CaCO_3). Glinene komponente pa so nosilci oksidov, kot so SiO_2 , Al_2O_3 in Fe_2O_3 . Z mletjem surovinske mešanice nastane surovinska moka, ki se žge v rotacijski peči. Minerali pri 100°C oddajajo prosto vodo, pri 600°C se izloča kristalno vezana voda. Pri 800°C se stali 30-40% CaO in SiO_2 , pri 900°C se stali 90-95% CaO in SiO_2 . Pri 1280 °C nastane talina, v kateri se tvori mineral C_2S in pri temperaturi 1450 °C se tvori mineral C_3S . Dobljena zmes je cementni klinker, ki je podoben pepelu, ima granule s premerom 3cm in je močno porozen. Klinker se nato hladi in v krogelnih mlinih melje v fini prah - **portland cement**.



Slika 1: Rotacijska peč in cementni grad [1]



Slika 2: Cementni klinker [1]

Poleg portland cementnega klinkerja je cementu dodana manjša količina sadre CaSO_4 (do 5%), ki služi reguliranju časa vezanja cementa. V tem primeru govorimo o čistem portland cementu, ki ga v skladu z zahtevami standarda *SIST EN 197-1: Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente* označimo kot **CEM I**.

Preglednica 1: Kemijska sestava čistega portland cementa CEM I [2]

SPOJINA	DELEŽ
CaO (komponenta C)	62 – 67%
SiO ₂ (komponenta S)	19 -25%
Al ₂ O ₃ (komponenta A)	2-8%
Fe ₂ O ₃ (komponenta F)	1-5%
SO ₃ (komponenta S)II	max 3,5-4,5%
CaO (nevezan)	max 2%
MgO	max 5%
Na ₂ O in K ₂ O	0,5-1,3%

Ohlajen cementni klinker se zmelje do zrn s premerom 0,001 do 0,1 mm. Odvisno od finosti mletja se specifična površina cementa po Blainu giblje med 2000 in 5000 cm²/g. Tako dobljen čisti portland cement (brez mineralnih dodatkov) ima sorazmerno konstantno kemijsko sestavo (Preglednica 1). vsebuje osnovne sestavine C,S,A,F¹ in primesi Na₂O, K₂O, SO₃ (zaradi prisotnosti sadre), MgO in druge. Vse te primesi so škodljive, vendar se jih težko znebimo, ker se pojavljajo kot nečistoče v osnovni surovini. Čisti portland cement sestavljajo klinkerski minerali: Alit, Belit, Celit, Zelit....(Preglednica 2).

¹ C=CaO, A=Al₂O₃, S=SiO₂, F=Fe₂O₃, H=H₂O

Preglednica 2: Klinkerski minerali v portland cementu in njihove lastnosti [2]

OZNAKA	IME	DELEŽ	LASTNOSTI
C ₃ S	trikalcijev silikat - alit	45 - 60 %	Najpomembnejši, pospešuje proces hidratacije, povzroča visoke trdnosti
C ₂ S	dikalcijev silikat - belit	20 - 30 %	Zavira in podaljšuje proces hidratacije in strjevanja
C ₃ A	trikalcijev aluminat – celit	4 – 12 %	Pospešuje strjevanje in razvijanje hidratacijske toplote
C ₄ AF	tetrakalcijev aluminat - zelit	10 – 20 %	Zavira strjevanje, odporen na sulfatno korozijo

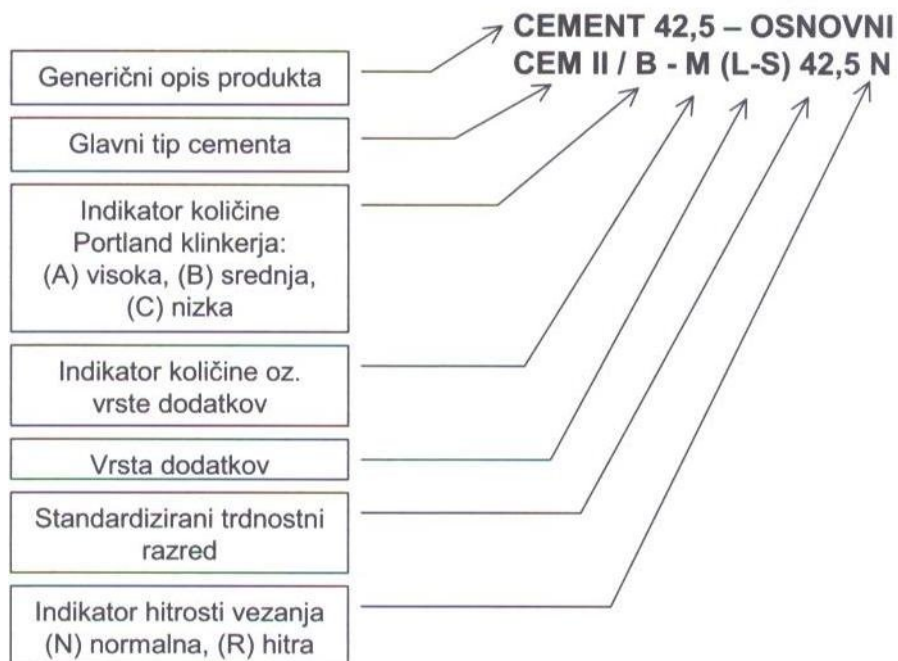
2.1.1 Standard

Lastnosti cementa se preskušajo s standardnimi postopki. Vzorci, ki jih odvzamejo s sondo se delijo na tri enake dele. Prvi se uporabi za osnovne preiskave, drugi za primerjalne, tretji pa se shrani za eventualne poznejše dokazne preiskave. Prostorninska masa cementa brez por in votlin znaša okrog 3,00 g/cm³, medtem ko ima rahlo nasut cement prostorninsko maso od 0,80 g/cm³ do 1,20 g/cm³.

Glavne sestavine cementa so:

- portland cementni klinker (K)...(Preglednica 1)
- granulirana plavžna žindra (S)
- pucolanski materiali (P, Q)...naravni pucolan (P), naravni kalcinirani pucolan (Q), elektrofiltrski pepel (V,W)
- žgani skrilavec (T)
- apnenec (L, LL)
- mikrosilika (D)
- manj pomembne sestavine
- kalcijev sulfat

Količina dodatkov, ki jih dodajamo v cement je standardizirana. Glede na delež mineralnega dodatka, razvrščamo cemente po standardu SIST EN 197-1:2002 v pet različnih razredov. Podrobnosti deležev mineralnih dodatkov, lahko vidite v preglednici 3.



Slika 3: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1 [3]

Preglednica 3: Razvrščanje cementov po standardu SIST EN 197-1 [4]

Glavne vrste	Vrsta glavne sestavine	Oznaka proizvoda		Delež klinkerja / mineralnega dodatka (odstotek mase) ¹
CEM I	klinker	Portlandski cement	CEM I	95-100 / 0
CEM II	Klinker in mineralni dodatki: granularna plavžna žindra (S), pucolan (P, Q), EF pepel (V, W), žgani skrilavec (T), apnenec (L, LL),	Portlandski cement z dodatkom - - žindre - pucolana - EF pepela - žganega skrilavca - apnenca	CEM II/A-m _i ⁴	80-94 / 6-20
			CEM II/B-m _i ⁴	65-79 / 21-35
	mešani mineralni dodatek (M) mikrosilika (D) ²	Portlandski mešani cement ³ - mikrosilike	CEM II/A-D	90-94 / 6-10
CEM III	klinker, granularna plavžna žindra (S)	Žlindrin cement	CEM III/A	35-64 / 36-65
			CEM III/B	20-34 / 66-80
			CEM III/C	5-19 / 81-95
CEM IV	klinker, mikrosilika (D) ² , pucolan (P, Q), EF pepel (V, W)	Pucolanski cement ³	CEM IV/A	65-89 / 11-35
			CEM IV/B	45-64 / 36-55
CEM V	klinker, granularna plavžna žindra (S), mikrosilika (D) ² , pucolan (P, Q), EF pepel (V, W)	Mešani cement ³	CEM V/A	40-64 / 36-60 ⁵
			CEM V/B	20-38 / 62-80 ⁵

Manj pomembnih sestavin je za vse proizvode od 0 do 5%.

¹ Vrednosti v preglednici se nanašajo na vsoto glavnih in manj pomembnih sestavin.

² Delež mikrosilike je omejen na 10%.

³ Pri portlandskih mešanih cementih CEM II/A-M in CEM II/B-M, pucolanskih cementih ter mešanih cementih morajo biti glavne sestavine, razen klinkerja, navedene v oznaki cementa (glej točko 7)

⁴ Oznaka m_i je oznaka uporabljenega mineralnega dodatka (S, P, Q, V, W, T, L, LL ali D) ali M (v primeru mešanega mineralnega dodatka)

⁵ Pri mešanem cementu je en del mineralnega dodatka granularna plavžna žindra (18-30% za A in 31-50% za B) en del pa so pucolanski materiali (18-30% za A in 31-50% za B).

2.1.2 Mehanske zahteve

Standardna trdnost cementa je tlačna trdnost po 28 dneh, preizkušena po SIST EN 196-1. Skladna mora biti z zahtevami v preglednici 4. Vključeni so trije razredi standardne trdnosti (32,5, 42,5 in 52,5).

Zgodnja trdnost cementa je tlačna trdnost po 2 dneh ali 7 dneh, preskušena po SIST EN 196-1. Ustrezati mora zahtevam v preglednici 4. Za vsak razred standardne trdnosti cementa obstajata dva razreda zgodnjih trdnosti: razred z običajno zgodnjo trdnostjo, ki se označuje z N, in razred z visoko zgodnjo trdnostjo, ki se označuje z R.

Preglednica 4: Mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti [4]

Trdnostni razred	Tlačna trdnost [MPa]				Čas začetka vezanja [min]	Prostorninska obstojnost (ekspanzija) [min]
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost			
	2 dneva	7 dni	28 dni			
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	-				
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20,0	-				
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30,0	-				

2.1.3 Kemijske zahteve in zahteve za trajnost

Izbira cementa v mnogih primerih uporabe, zlasti v ostrih podnebnih pogojih, vpliva na trajnost betona, malte in injekcijske mase (odpornost proti učinkom mraza, odpornost proti kemičnim vplivom in zaščito armature). Pri izbiri vrste cementa in trdnostnega razreda je treba za različne namene in stopnje izpostavljenosti upoštevati ustrezne standarde ali predpise za beton ali malto, ki veljajo na mestu uporabe.

Preglednica 5: Kemijske zahteve, dane kot karakteristične vrednosti [4]

1	2	3	4	5
Lastnost	Metoda preskušanja	Vrsta cementa	Trdnostni razredi	Zahteve ^{a)}
Žarilna izguba	EN 196-2	CEM I CEM III	vsi	≤ 5,0 %
Netopni ostanek	EN 196-2 ^{b)}	CEM I CEM III	vsi	≤ 5,0 %
Vsebnost sulfata (kot SO ₃)	EN 196-2	CEM I CEM II CEM IV CEM V	32,5 N	≤ 3,5 %
			32,5 R	
		42,5 N	≤ 4,0 %	
		42,5 R		
52,5 N	vsi			
52,5 R				
Vsebnost klorida	EN 196-21	vsi ^{e)}	vsi	≤ 0,10 % ^{f)}
Pucolanska aktivnost	EN 196-5	CEM IV	vsi	Zadovolji preskusu

a) Zahteve so podane v odstotkih mase gotovega cementa.

b) Določitev ostanka, netopnega v solni kislini in natrijevem karbonatu.

c) Cement vrste CEM II/B-T lahko vsebuje do 4,5 % sulfata pri vseh trdnostnih razredih.

d) Cement vrste CEM II/C lahko vsebuje do 4,5% sulfata.

e) Cement vrste CEM III lahko vsebuje več kot 0,10 % klorida, vendar mora biti v tem primeru največji delež klorida deklariran na embalaži in/ali odpremnici.

f) Cementi za uporabo v prednapenjanju se lahko proizvajajo po nižji zahtevi. V tem primeru se mora vrednost 0,10 % nadomestiti s to nižjo vrednostjo, ki mora biti navedena v spremnem dokumentu.

2.1.4 Izbira cementa

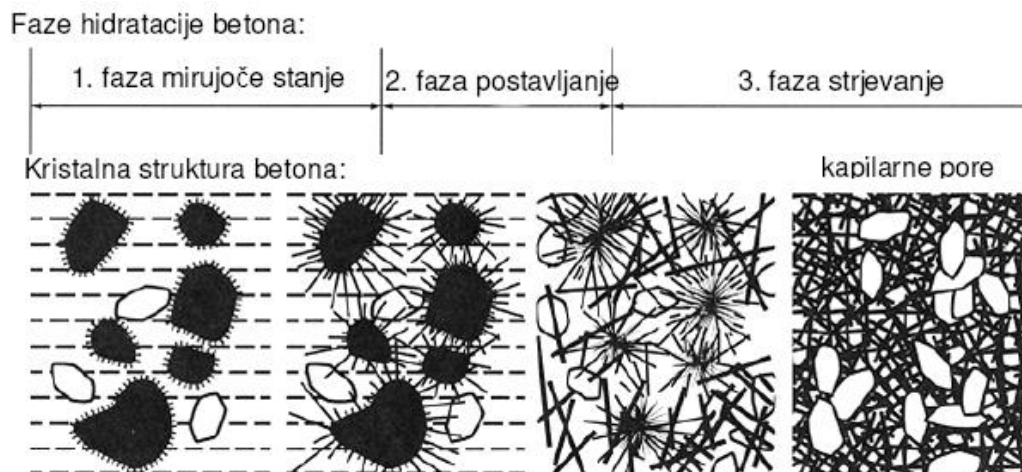
V informativni preglednici 6 so navedene vrste cementa, ki so primerne oz. neprimerne za uporabo v betonu od katerega se zahteva odpornost proti agresivnemu delovanju okolja, pri posameznih razredih in stopnjah izpostavljenosti, opisanih v preglednici.

Tiste vrste cementa za katere ni dovolj izkušenj o njihovem obnašanju v uporabi ali pa je izbira vrste cementa odvisna od dejansko delujočih kemikalij in od stopnje njihovega delovanja (XA), so označeni »x«. Zanje je treba predhodno pridobiti mnenje specializiranega strokovnjaka in dokazati primernost za predvideni namen uporabe v betonu s preiskavami cementa in z začetnim preskusom betona v skladu z normativnim dodatkom A standarda SIST EN 206-1.

2.1.5 Hidratacija cementa

Pri mešanju portland cementa z vodo nastane plastična cementna pasta, ki s časom spreminja agregatno stanje in preide v trdno snov imenovano cementni kamen. Vzrok spremembe agregatnega stanja so fizikalno-kemijski procesi s skupnim imenom hidratacija cementa. Spreminjanju agregatnega stanja cementne paste pravimo vezanje in poteka razmeroma hitro (5-10 ur). Spreminjanje cementne paste v cementni kamen pa imenujemo proces strjevanja in predstavlja dolgotrajen proces, ki traja tudi več let. Če proces hidratacije opazujemo glede na razvoj trdnosti cementa – cementnega kamna, ga lahko razdelimo na tri faze (slika 4):

1. začetna faza: formiranje aluminatne strukture (faza vezanja cementa)
2. faza postopne prevlade silikatne strukture nad aluminatno (faza intenzivnega strjevanja cementa)
3. faza stabilizacije silikatne strukture (dosežena trdnost cementa se s časom bistveno ne spreminja več)



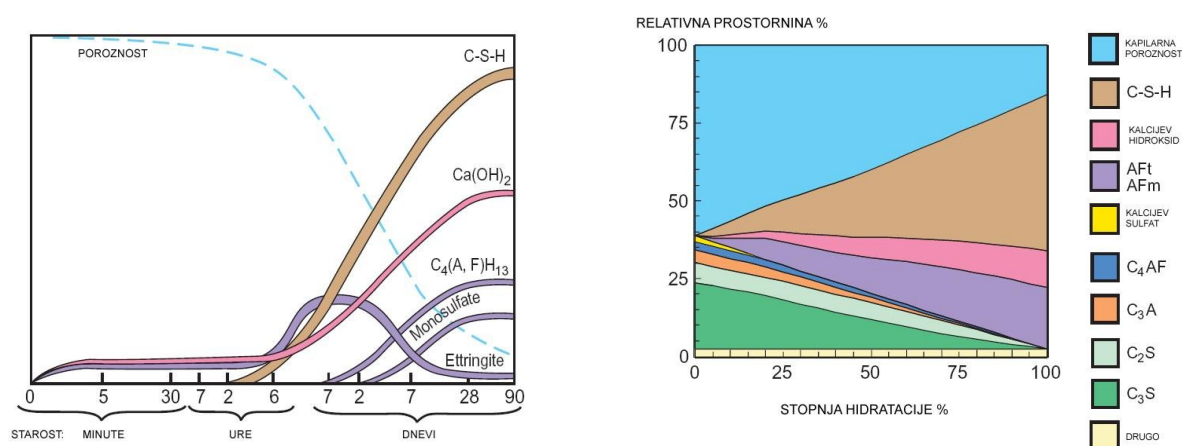
Slika 4: Faze hidratacije portland cementa [2]

Hitrost hidratacije je odvisna od:

- sestave klinkerja in količine primesi v mineralih klinkerja,
- mikrostrukture klinkerja, ki je odvisna od razmer pri žganju klinkerja,
- količine in oblike kalcijevega sulfata,

- finosti in granulacijske sestave cementa,
- vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice,
- razmer pri zorenju mešanice,
- prisotnosti kemičnih dodatkov mešanici.

Bistven vpliv na stopnjo hidratacije ima masno razmerje med vodo in cementom, t.i. vodocementno razmerje (v/c). Hidratacija poteka optimalno pri vrednosti v/c med 0,38 in 0,42. V tem območju naj bi teoretično hidratizirala celotna količina cementa, vendar so raziskave pokazale, da hidratizira le 80-90% cementa, kar pa bistveno ne vpliva na lastnosti cementnega kamna. Pri večjih vodocementnih razmerjih se oblikujejo kapilarne pore večjega premera, ki znižujejo trdnost betona in povečajo njegovo prepustnost.



Slika 5: Shematični prikaz oblikovanja produktov hidratacije cementa s časom in njihovimi prostorninskimi deleži v odvisnosti od stopnje hidratacije [2]

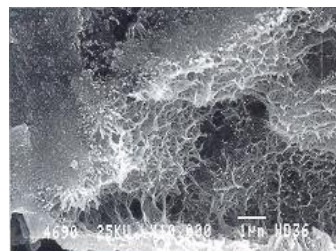
Slika 5 prikazuje oblikovanje različnih produktov hidratacije cementa s časom in njihove prostorninske deleže v odvisnosti od stopnje hidratacije.

- **kalcijev silikat hidrat (C-S-H faza)**; zavzema 50-60% prostornine produktov hidratacije (trdnih delcev) v popolnoma hidratiziranem cementnem kamnu. Razlog da to fazo imenujemo C-S-H faza, brez natančne opredelitve kemijske sestave je ta, da splošna formula lahko variira v širokem območju zaradi odvisnosti od v/c razmerja,

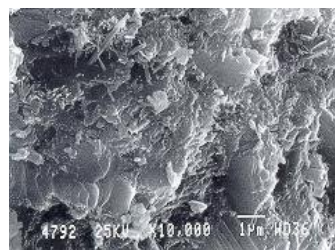
temperature in stopnje hidratacije. Pri popolni hidrataciji lahko sestavo faze privzamemo kot $C_3S_2H_3$ (61% C-S-H faze in 39% kalcijevega hidroksida)



Slika 6: C-S-H (I) [1]

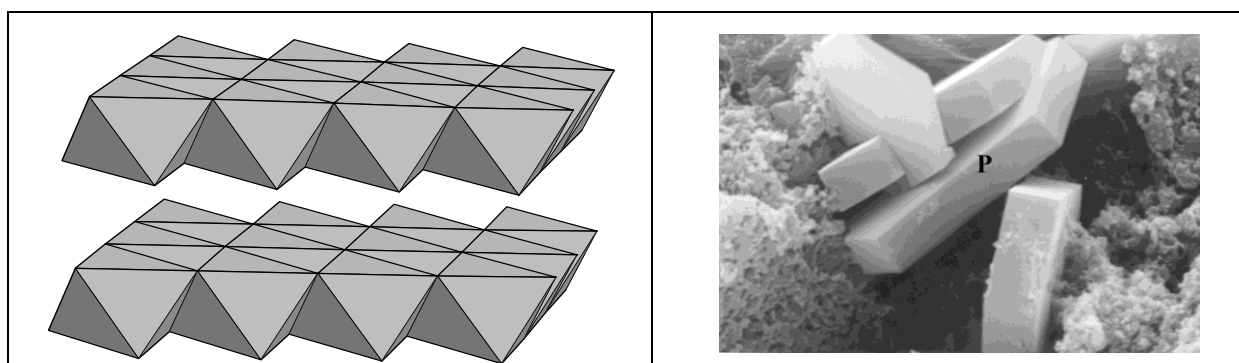


Slika 7: C-S-H (II) [1]



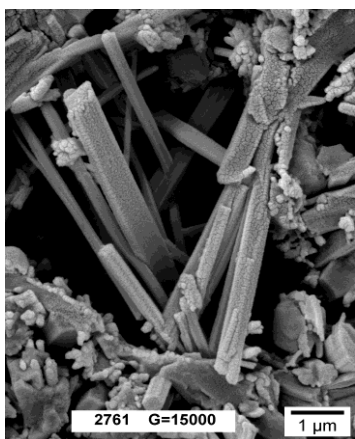
Slika 8: C-S-H (III) [1]

- **kalcijev hidroksid** ($Ca(OH)_2$); kristali zavzemajo 20-25% prostornine trdne faze v cementnem kamnu. Sam kalcijev hidroksid teži za tvorbo velikih kristalov heksagonalne prizmatične oblike. V primerjavi s C-S-H fazo je potencial kalcijevega hidroksida, da prispeva k trdnosti omejen, zaradi bistveno manjše površine.

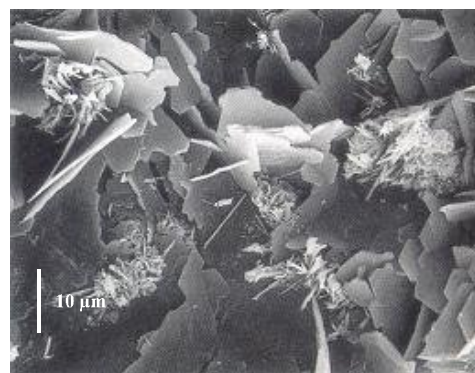


Slika 9: Kalcijev hidroksid $Ca(OH)_2$ [1]

- **hidrati kalcijevega sulfoaluminata;** zavzemajo 15-20% prostornine trdne faze v cementnem kamnu in zato imajo manj pomenben vpliv na sovisnost med mikrostrukturo in lastnostmi cementnega kamna. Med zgodnjo fazo hidratacije se zaradi razmerja med sulfatnimi in aluminatnimi ioni v raztopini praviloma oblikujejo igličasti prizmatični kristali trisulfat-hidrata ($C_3A + \text{sadra} + H \rightarrow \text{etringit}^2$), ki ga imenujemo tudi etringit. V pastah čistega cementa se etringit eventualno preoblikuje v monosulfat hidrat, ki ima obliko heksagonalnih ploščatih kristalov. Zaradi prisotnosti monosulfat hidrata v portland cementnem betonu je beton ranljiv v primeru sulfatnega napada.



Slika 10: Etringit [1]



Slika 11: Monosulfat hidrat [1]

Hitrost in stopnja hidratacije je v veliki meri odvisna tudi od finosti mletja portland cementa. Debelejša zrna nikoli ne hidratizirajo v celoti, ker se temu upirajo odebeljene stene okoli praškastega jedra. Fina zrna cementa popolneje hidratizirajo.

Prednosti fino mletih cementov so:

- zmanjšujejo izcejanje cementnega mleka iz sveže betonske mešanice,
- povečujejo obdelanost sveže betonske mešanice

² Kristali etringita se razvijajo zelo hitro in ustvarjajo neke vrste ovoj okoli cementnih zrn, ki otežuje pristop vode k cementnim zrnom in s tem upočasnjuje hidratacijo.

Slabosti fino mletih cementov so:

- večja nevarnost razpok, kar pa ne velja vedno tudi za beton,
- večje krčenje cementnega kamna,
- povečana potreba po količini vode za standardno konsistenco,
- hitreje reagirajo z alkalno-reaktivnimi agregati.

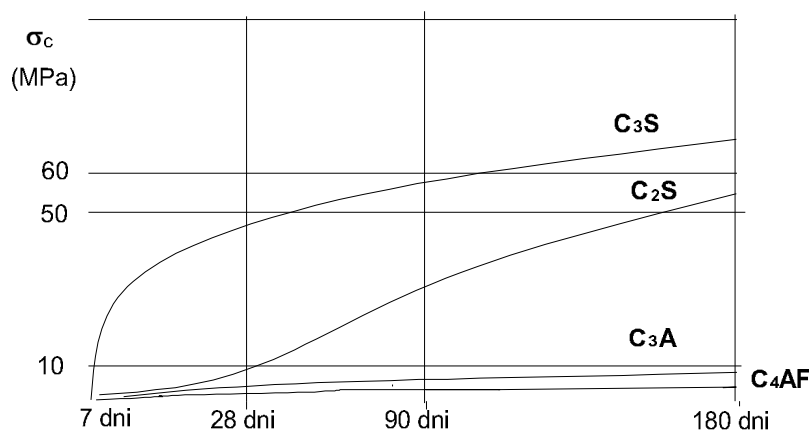
Hitrost hidratacije sorazmerno narašča s finostjo mletja cementa, vendar pa finejši kot je cement, večji so tudi stroški proizvodnje. V preglednici 7 lahko vidimo, kolikšne so priporočene količine finih delcev glede na količine cementa v betonih trdnostnih razredov do vključno C 50/60, z največjim zrnom agregata med 16 in 63mm za stopnje izpostavljenosti betona XF (odpornost proti zmrzovanju/tajanju) i XM (odpornost proti obrabi površine). Fini delci agregata so praškasti in glineni delci, katerih količina ne sme biti prevelika, saj lahko to vpliva na kvaliteto betona (zmanjšanje trdnosti, zmrzinske odpornosti, povečanje vpijanja vode, krčenje in lezenje betona). Če se uporabi pucolanski mineralni dodatek tipa II, se sme priporočena količina finih delcev povečati za količino vsebovanega mineralnega dodatka, vendar največ za 50kg/m³.

Preglednica 7: Največja priporočena količina finih delcev po SIST 1026:2007 [6]

Količina cementa C [kg/m³]	Največja priporočena količina finih delcev [kg/m³]
≤ 300	400
≥ 350	450 + (C – 350)

2.1.6 Nehidratizirana cementna zrna

V odvisnosti od zrnovostne sestave cementa in stopnje hidratacije, lahko v mikrostrukturi cementnega kamna najdemo tudi nehidratizirana zrna cementnega klinkerja. Prispevki produktov hidratacije posameznih klinkerskih mineralov k časovnemu naraščanju trdnosti v odvisnosti od časa so zelo različni (slika 12). Vidimo da k zgodnjim trdnostim največ prispeva C₃S, k dolgotrajnim trdnostim pa C₂S. To pomeni, da lahko z variiranjem deležev C₃S in C₂S v cementu uravnavamo časovno naraščanje trdnosti cementnega kamna.



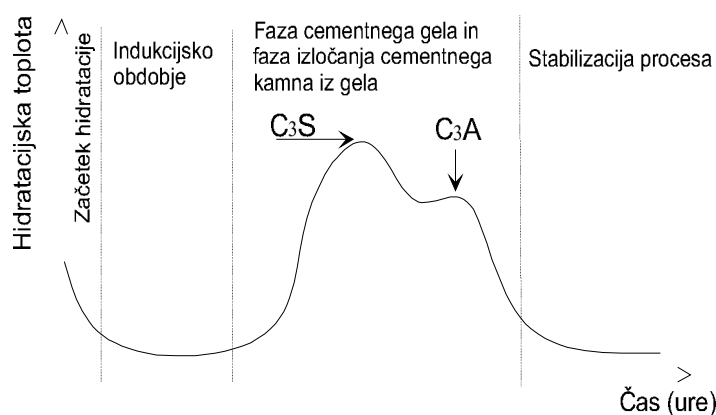
Slika 12: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov portland cementnega klinkerja [2]

2.1.7 Toplota hidratacije cimenta

Ker je hidratacija cimenta eksotermna reakcija, je potrebno biti bolj pazljiv pri zasnovi mešanice za elemente velikih dimenzij izdelanih s cementnim vezivom, da se izognemo nezaželenemu dvigu temperature. Visoke temperature v času vezanja cimenta (večje od 55°C) imajo za posledico počasno naraščanje trdnosti, temperaturne razlike po debelini elementov pa vodijo do oblikovanja razpok in neenakomerne porazdelitve vode v cementnem kamnu. Kot je razvidno iz preglednice (preglednica 8), prispeva k razvoju hidratacijske toplote največ C₃A in najmanj C₂S. To pomeni, da lahko tudi razvoj toplote pri hidrataciji kontroliramo z uravnavanjem deležev klinkerskih mineralov v portland cementu.

Preglednica 8: Toplota hidratacije klinkerskih mineralov [2]

Klinkerski mineral	Toplota hidratacije pri podani starosti		
	3dni	90dni	13let
C ₃ S	243	435	510
C ₂ S	50	176	247
C ₃ A	887	1300	1356
C ₄ AF	289	410	427



Slika 13: Razvoj hidrationske toplote v prvih urah vezanja cementne paste [3]

2.1.8 Pore v cementnem kamnu

Poleg trdnih delcev vsebuje cementni kamen tudi različne vrste por, ki pomenbno vplivajo na njegove lastnosti (Slika 14):

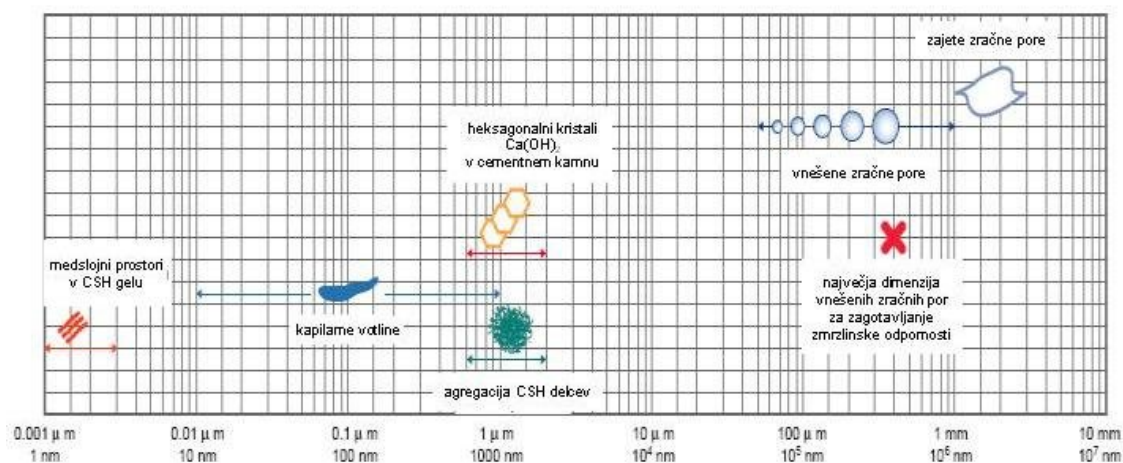
- **medslojni prostori v C-S-H gelu;** imajo glede na Powersov model velikost 1,8nm (gel pore) in zavzamejo 28% delež C-S-H gela. V modelu Feldman in Sereda pa se velikost medslojnih prostorov spreminja med 0,5 in 2,5nm.

Voda v teh prostorih je na trdne površine vezana z vodikovimi vezmi in njena odstranitev povzroči krčenje zaradi sušenja in lezenje cementnega kamna. Ker so medslojni prostori tako majhni in običajno ves čas zapolnjeni s porno vodo, nimajo negativnega vpliva na trdnost in prepustnost cementnega kamna.

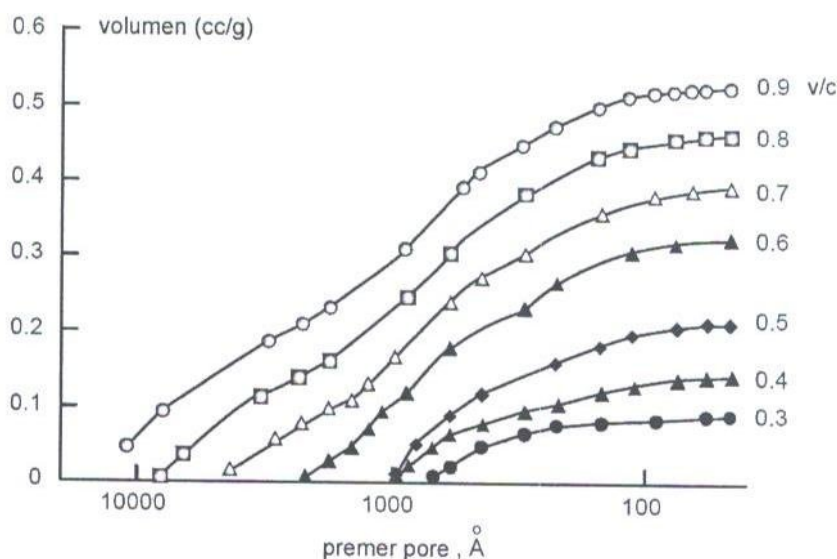
- **kapilarne pore;** Kot kaže slika 5, je hidratacija cementa proces, med katerimi postaja, prostor, ki sta ga v začetku izpolnjevala voda in cement, vse bolj zapolnjena s produkti hidratacije. Kapilarne pore so prostori, ki ga ne zavzamejo produkti hidratacije ali cementa. Prostornina in velikost teh por sta določena z vodocementnim razmerjem in stopnjo hidratacije cementa. V dobro hidratiziranem cementnem kamnu z nizkim v/c razmerjem so kapilarne pore velike od 10 do 50nm. V cementnem kamnu z visokim v/c razmerjem pa znaša velikost kapilarnih por pri zgodnji stopnji hidratacije 3-5 μ m. Tipična porazdelitev por v cementnem kamnu, določena z živosrebrnim porozimetrom, je prikazana na sliki 15.

Boljši kriterij za oceno karakteristik cementnega kamna je porazdelitev por po velikosti in ne celotna kapilarna poroznost. Kapilarne pore večje od 50nm vplivajo na trdnost in prepustnost cementnega kamna, kapilarne pore manjše od 50nm pa so pomembne za krčenje zaradi sušenja in za lezenje betona.

- **zračne pore:** so v splošnem kroglaste oblike. Pore, ki nastanejo zaradi zajemanja zraka med mešanjem betonske mešanice so velike okrog 3mm, velikost por vnesenih v betonsko mešanico s pomočjo aeranta pa se praviloma giblje med 50 in 1000 μ m. Tako zajetje kot vnesene zračne pore so bistveno večje od kapilarnih por, zato negativno vplivajo predvsem na trdnost in prepustnost betona.



Slika 14: Porazdelitev trdnih delcev in por v hidratiziranem cementnem kamnu po velikosti[2]



Slika 15: Porazdelitev por po velikosti v cementnem kamnu, v odvisnosti od v/c razmetja [2]

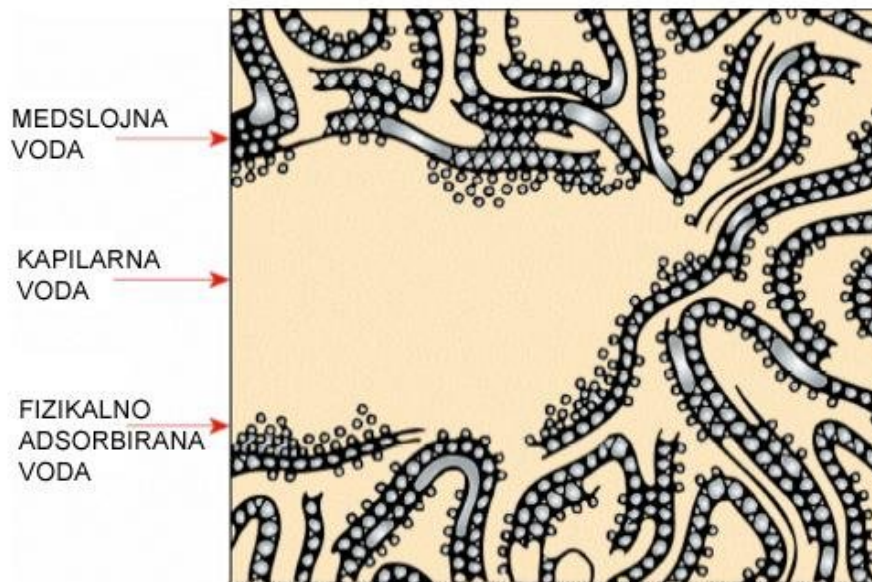
2.1.9 Voda v cementnem kamnu

Voda v cementnem kamnu je prisotna v več oblikah, ki se razlikujejo po stopnji težavnosti, s katero jih odstranimo iz cementnega kamna. Klasifikacija vode v cementnem kamnu je koristna zaradi razumevanja lastnosti cementnega kamna. Poleg pare v praznih ali delno z vodo zapolnjenih porah, ločimo še naslednje oblike vode v cementnem kamnu:

- **kapilarna voda:** je voda, ki se nahaja v porah večjih od 5nm. Predstavljamo si jo lahko kot nakopičeno vodo, na katero ne delujejo privlačne sile trdne površine. Z vidika obnašanja kapilarne vode v cementnem kamnu razdelimo kapilarno vodo v dve kategoriji: vodo v porah večjih od 50nm imenujemo prosta voda, saj njena odstranitev iz cementnega kamna ne povzroča nobenih prostorskih sprememb. Na vodo v majhnih porah (5-50nm) pa delujejo kapilarne sile, zato povzroči odstranitev te vode iz sistema krčenje cementnega kamna.

- **adsorbirana voda:** je voda v neposredni bližini površine. Pod vplivom privlačnih sil so vodne molekule fizikalno adsorbirane na površino cementnega kamna. Predpostavljajo, da je lahko do 6 monomolekularnih slojev vode (1,5nm) fizikalno vezanih z vodikovimi vezmi. Ker energija posamezne vodne molekule upada z njeno oddaljenostjo od trdne površine, se lahko večji del adsorbirane vode izgubi z sušenjem cementnega kamna pri relativni vlagi 30%. Prav

izguba adsorbirane vode je v največji meri odgovorne za krčenje cementnega kamna zaradi sušenja.



Slika 16: Shematičen model vrst vode povezanih s C-S-H fazo [2]

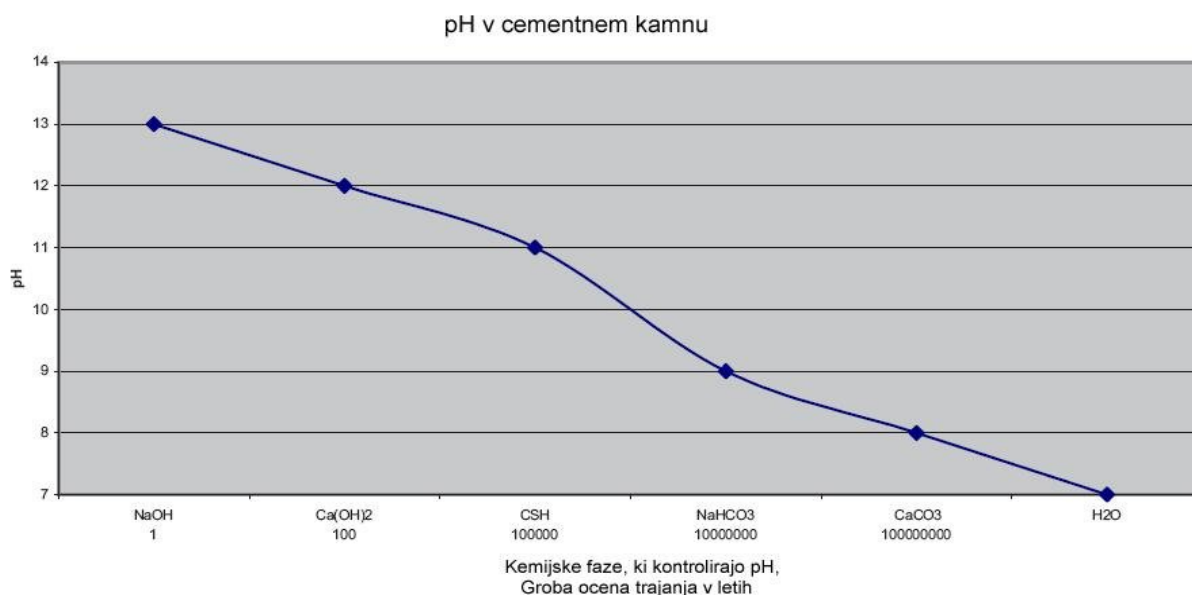
- **medslojna voda:** je voda, ki je povezana s strukturo C-S-H faze. Predpostavljajo da so monomolekularni sloji na trdno površino C-S-H faze močno vezani z vodikovimi vezmi. Izguba te vode je možna le pri zelo intenzivnem sušenju (pod 11% relativne vlage okolice). Ko pride do izgube te vode, se struktura C-S-H faze zelo skrči.
- **kemijsko vezana voda:** je voda, ki je sestavni del mikrostrukture različnih produktov hidratacije. Pri sušenju se iz cementnega kamna ne izloča. Izloča se šele pri razgradnji produktov hidratacije pri visokih temperaturah.

2.1.10 Ph, kisló-bazične lastnosti cementnega kamna

V dobro hidratiziranem cementnem kamnu je trdna faza, sestavljena iz relativno netopnih hidratov kalcija (C-S-H), v stanju stabilnega ravnotežja z visoko pH vrednostjo porne tekočine. V odvisnosti na koncentracije Na^+ , K^+ in OH^- ionov se pH vrednost na začetku giblje od 12,5 do 13,5. pH vrednost se bo s časom spreminjala, postajala bo vse nižja, ko se bo vsaka faza, ki kontrolira pH, izločila iz cementnega kamna. Najbolj topna v vodi sta prav

natrijev in kalijev hidroksid, zato prvi padec pH vrednosti nastopi, ko se raztopita in izlužita iz sistema. Prisotnost kalcijevega hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) v cementnem kamnu omogoča vzdrževanje pH vrednosti okrog 12. Topnost kalcijevega hidroksida je manjša od topnosti natrijevega in kalijevega hidroksida. Kemijska reakcija med kalcijevim hidroksidom in pucolanskimi materiali lahko bistveno zmanjša količino kalcijevega hidroksida v cementnem kamnu istočasno pa poveča delež C-S-H faze. Časovni interval v katerem C-S-H faza kontrolira pH vrednost je zelo dolg, saj je ta faza težko topna. Ko se C-S-H gel stara in rahlo spreminja sestavo lahko pH vrednost pade na 11 ali na 10,5. pH vrednost bo ostala nespremenjena kakor dolgo bo C-S-H faza na razpolago.

Eksperimentalne študije opravljene v ZDA, pri katerih je bila merjena pH vrednost v odvisnosti od časa so pokazale, da cement tipa V z deležem Al_2O_3 manjšim od 5% (sulfatno odporni cement) in cement tipa V, modificiran z žlindro ali elektrofiltrskim pepelom potrebuje več kot 100.000 let, da pH vrednost pade na 10, kar pomeni ugodne razmere za korozijo armature. Ob prisotnosti soli ali kislin je korozija možna tudi pri višjih pH vrednostih. Za korozijo armature morata biti prisotna še vlaga in kisik.

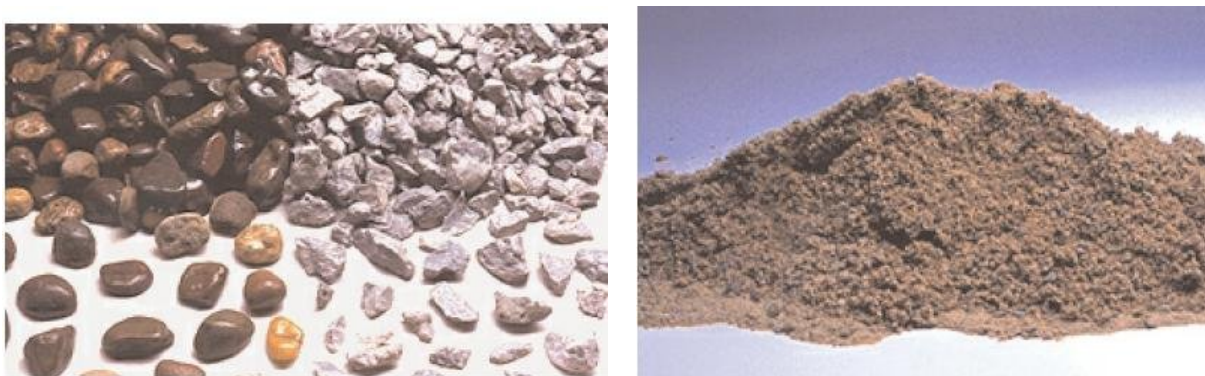


Slika 17: Spreminjanje pH v cementnem kamnu in sprememba kemijskih specij s časom [2]

Prikazani časovni intervali so informativni, saj je trajanje posamezne faze težko predvideti zaradi mnogih vplivnih parametrov (hitrost infiltriranja vode, dotok plinov,...).

2.2 Agregat

Agregat predstavlja približno tri četrtine prostornino betona. Za izdelavo betona se uporablja naravno oblikovan agregat (prod), umetno oblikovan agregat (drobljenec) ali kombinacija obeh. Prod je v Sloveniji zaenkrat praviloma dražji kot drobljen agregat, vendar pa njegova zaobljena zrna omogočajo boljšo vgradljivost in obdelavnost sveže betonske mešanice. Drobljen agregat je v mineraloškem pogledu v splošnem bolj homogen od proda, posledica česar so manjše koncentracije napetosti v strjenem betonu zaradi obtežbe in temperaturnih sprememb. Njegova zrna so ostroroba in se pri vgrajevanju medsebojno zaklinijo, kar rezultira v izboljšanju mehanskih karakteristik, še posebej je povečana natezna trdnost betona. Agregat delimo na droben (zrna velikosti do 4mm) in grob (zrna velikosti nad 4mm). Droben agregat se uporablja za izdelavo malt, kombinacija drobnega in grobega pa za izdelavo betonov.



Slika 18: Prodat in drobljen grob agregat (levo) ter droben agregat (desno) [2]

Agregat z ustrezno zrnastno sestavo zapolni velik del prostornine malt ali betona in ovira segregacijo sveže betonske mešanice. Votline med posameznimi večjimi zrnji se pri ustrezni zrnastni sestavi optimalno zapolnijo z manjšimi zrnji. Specifična površina agregata se povečuje z manjšanjem največjega zrna v agregatu in z večanjem količine drobnega agregata. Največje zrno agregata je odvisno od debeline zaščitne plasti betona nad armaturo, dimenzij betonskih elementov in svetle razdalje med armaturnimi palicami. V betonih za običajne elemente (ne velja za masivne betonske elemente) največje zrno agregata praviloma ni večji

od 32mm. Skupna površina agregatnih zrn določa potrebno količino paste, ki ovije in poveže vsa zrna. Zrnavostna sestava agregata vpliva na kompaktnost, kohezivnost in vgradljivost sveže betonske mešanice, kasneje pa na vse pomembne lastnosti strjenega betona, kot so tlačna trdnost, krčenje, vodoneprepustnost...



Slika 19: Frakcije agregata [2]



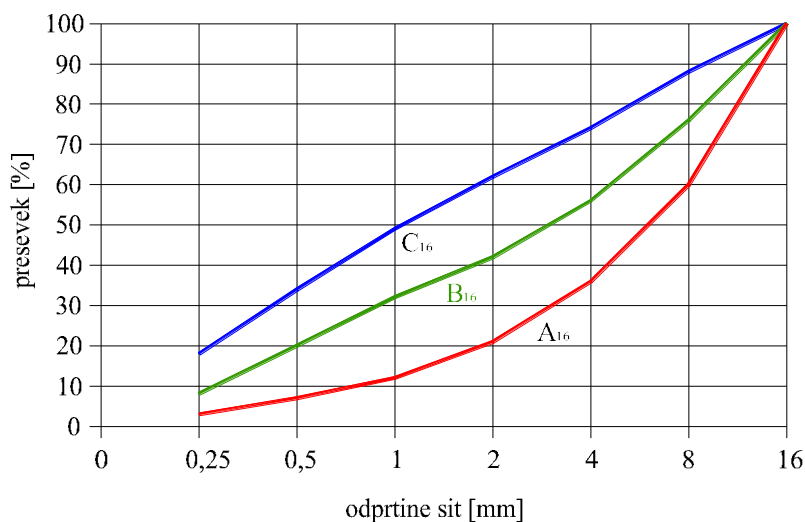
Slika 20: Sejalna analiza agregata [2]

Ustrezno zrnavostno sestavo agregata dobimo s kombinacijo različnih frakcij. Agregat za izdelavo betona je namreč praviloma separiran – s sejanjem na sitih kvadratnih odprtin različnih velikosti (sito z največjo odprtino na vrhu, z najmanjšo pa na dnu sistema sit), razdeljene v skupine z velikostjo zrn v določenem območju. Te skupine imenujemo frakcije.

Zrnavostno sestavo posameznih frakcij preverjamo s sejanjem vzorcev na laboratorijskih sitih (slika 21 in preglednica 9) v skladu z zahtevami SIST EN 12620 : 2002. Velikosti agregata je treba predpisovati s pomočjo najmanj dveh velikosti sit iz slike 21. Razmerje D/d (zgornja in spodnja velikost sita) pri označitvi velikosti agregata ne sme biti večja od 1,4.

Pri sestavljanju agregata ustrezne zrnavostne sestave so nam v pomoč priporočene mejne krivulje zrnivosti agregata, ki jih podaja SIST 1026 (slika 21). V splošnem je zrnavostna sestava agregata primerna, če poteka znotraj območja med krivuljama A in B. Istočasno pa se v primeru drobljenega agregata priporoča izbira zrnavostne sestave blizu krivulje B, v primeru

proda pa zrnava sestava blizu krivulje A. Agregat ne sme vsebovati preveč zrn neugodne oblike, ki onemogočajo učinkoviti zgoščevanje betona. Zrna agregata morajo biti zmrzljivo odporna, v določenih primerih pa odporna tudi na udarce in brušenje. Za vse te karakteristike so podane meje, znotraj katerih se morajo vrednosti nahajati ter metode preiskav, s katerimi te lastnosti agregata ovrednotimo.



Slika 21: Mejne krivulje območij primernosti agregata z $D_{max}=16\text{mm}$ po SIST 1026 [2]

Agregati morajo biti skladni z splošnimi zahtevami za zrnava, ki so predpisane v preglednici 9 in ustrezajo njihovi označeni velikosti d/D in izbrani kategoriji iz preglednice (preglednica 9).

Preglednica 9: Splošne zahteve za zrnavost [7]

Agregat	Velikost [mm]	Presevek v masnih odstotkih					Kategorij a G^d
		2 D	1,4 D ^{a&} d	D ^c	d ^b	d/2 ^a & b	
Grobi	D/d ≤ 2 ali D ≤ 11,2mm	10	98 do	85 do 99	0 do	0 do	G _c 85/20
		0	100	80 do 99	20	5	G _c 80/20
	10	98 do		0 do	0 do		
	0	100		20	5		
	D/d > 2 in D > 11,2mm	10	98 do	90 do 99	0 do	0 do	G _c 90/15
		0	100		15	5	
Drobni	D ≤ 4 mm in d = 0	10	95 do	85 do 99	-	-	G _F 85
		0	100				
Naravni odsejani 0/8	D = 8 mm in d = 0		98 do 100	90 do 99	-	-	G _{NG} 90
Mešani	D ≤ 45 mm in d = 0	10	98 do	90 do 99	-	-	G _A 90
		0	100	85 do 99			G _A 85
		10	98 do				
		0	100				

a) Če izračunana sita niso točno enaka številkam sit iz serije R 20 po ISO 565, je treba upoštevati naslednjo najbližjo velikost sita.

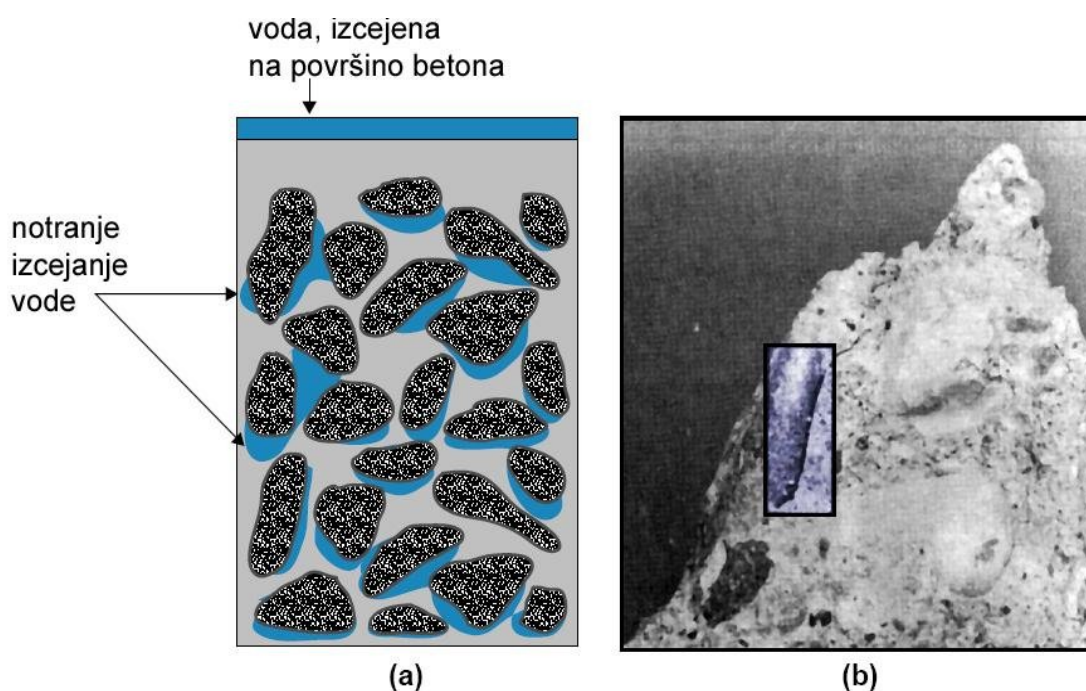
b) Za betone z nezvezno zrnavostjo ali za druge posebne namene se lahko predpišejo dodatne zahteve.

c) Presevek pri D je lahko večji od 99m. %, vendar mora v takšnih primerih proizvajalec dokumentirati in deklarirati tipično zrnavost in pri tem vključiti sita D, d in d/2 ter sita med d in D iz osnovnega in 1. stavka ali iz osnovnega in 2. stavka. Sita, ki niso vsaj 1,4 krat večja od najbližjega spodnjega sita, se lahko izvzamejo.

d) Zahteve za kategorije v drugih standardih za proizvod za agregat so različne.

Ker so agregatna zrna maloporoznega naravnega mineralnega agregata v običajnih betonih bolj trdna kot cementni kamen, agregatna faza običajno neposredno ne vpliva na trdnost

betona. Njegov vpliv pa je lahko posreden. V primeru, da vsebuje grob agregat za izdelavo betonske mešanice veliko število podolgovatih in pliščatih zrn, obstaja v betonu velika težnja po kopičenju vode na površini agregata. Posledica je lokalno visoko v/c razmerje in s tem šibko in prepustno stično območje med agregatnimi zrnji in cementnim kamnom (slika 22).



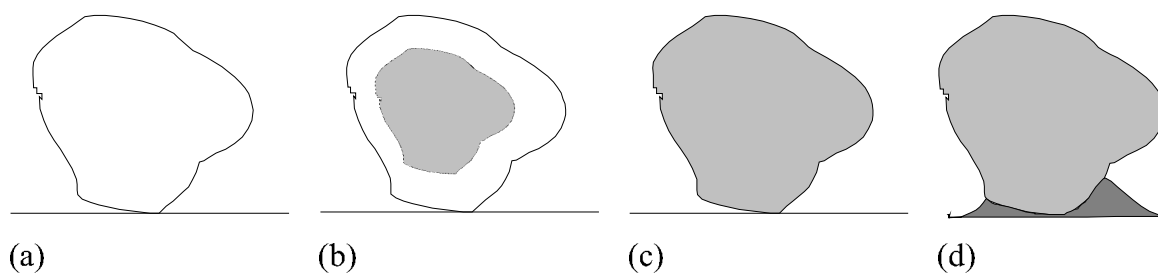
Slika 22:

- a) Shematični prikaz izcejanja vode iz cementne paste v svežem betonu,
- b) Strižna porušitev stika v betonskem vzorcu po enoosnem tlačnem preskusu [2]

2.2.1 Vlažnost agregata

Vsi agregati, ki jih najdemo v naravi vsebujejo določeno količino vlage. Pri uporabi agregata za pripravo betonske mešanice je pomembno ugotoviti, kolikšen je delež te vlage, saj lahko vpliva na spremembo vodocementnega razmerja, slednje pa na konsistenco in končno trdnost.

Drobne frakcije agregata ponavadi vsebujejo večjo količino vlage, zaradi večjega števila stičnih površin, med katerimi se zadržuje voda. Glede na količino vlage v agregatu ločimo štiri stanja, ki so shematsko prikazana na sliki (slika 23).



Slika 23: Stopnje količine vlage v agregatu [3]

- (a) agregat osušen v peči
- (b) zračno suh agregat
- (c) agregat zasičen z vlagom
- (d) moker agregat

2.2.2 Obstočnost agregata

Obstočnost agregata je funkcija geneze posamezne kamnine. Kamnine magmatskega izvora nudijo zadovoljivo odpornost proti delovanju kislin in nižje koncentriranih baz. Zaradi tega agregati dobljeni iz magmatskih kamnin (granit, sijenit, diorit, gabro, andezit, dijabaz, bazalt) omogočajo visoko obstočnost betona tudi v kemijsko zelo agresivnem okolju. Agregati te vrste imajo najpogosteje nizko poroznost (1%) in hkrati nizko vodovpojnost (0,5%). Zato imajo poleg odpornosti na kemijske vplive tudi odlično odpornost na zmrzovanje/tajanje brez in v prisotnosti soli, odporni so tudi na temperaturne spremembe. Raziskave so pokazale, da mineraloška nehomogenost lahko v primeru kombinacije visokih temperaturnih razlik in popolne zasičenosti kamnine z vodo.

Sedimentne kamnine imajo v večini primerov slabo odpornost proti kemijskim vplivom. Apnenec, dolomit in kremen, ki se najpogosteje uporabljajo kot agregati v betonih, imajo nizko odpornost na delovanje kislin (tudi v primeru visoke kompaktnosti). Nekoliko večja je njihova odpornost na delovanje baz. Karbonatne kamnine so v večini primerov premalo odporne tudi proti vodi, ki vsebuje ogljikov dioksid. Tudi v primeru, ko kamnina prihaja v stik z ostalimi vodami (rečna, morska, ostale), prihaja do pojava postopnega raztapljanja

minerala kalcita. Teoretične in eksperimentalne raziskave so pokazale, da je hitrost razpadanja kremenca v morski vodi okoli 1mm na 50let, kar je za uporabo v praksi, še posebej kadar se agregat uporablja v betonu, povsem zanemarljivo. V primeru karbonatnih kamnin masivne zgradbe in s prostorninsko maso 2500-2700 kg/m³ je vpijanje vode zelo majhno (max 1%). Take kamnine imajo zadostno odpornost proti zmrzovanju in delovanju temperaturnih sprememb.

Obstojnost peščenjakov, ki prav tako spadajo v skupino sedimentnih kamnin in so zgrajeni iz med seboj povezanih zrn kremenca, je pretežno odvisna od vrste veziva. Kremenovi peščenjaki so zelo odporni, medtem ko apnenčevi v večini primerov nimajo velike kohezijske odpornosti. Običajno je odpornost peščenjakov na zmrzovanje, delovanje vode in topnih soli odvisna od njihove poroznosti in vrste veziva v kamnini.

Najbolj pogosta agregata, ki se uporabljata iz skupine metamorfnih kamnin sta kvarcit in marmor. Kvarcit je dobro odporen proti kislinam in bazam. Zaradi majhnega vpijanja vode je zelo odporen na zmrzovanje. Zaradi sestave pa se slabše obnaša v primeru visokih temperatur (preko 500°C), pri katerih pride do oblikovanja razpok.

Marmor je zelo odporen na delovanje mraza, slabše pa se obnese v stiku s kislinami. Po večini je slabo odporen tudi na atmosferske vplive.

Preglednica 10: Koeficient temperaturnega raztezanja posameznih kamnin [2]

Material	$\alpha_T(1/^\circ\text{C})$
Apnenec	$(0,1 - 1,2) \times 10^{-5}$
Marmor	$(0,1 - 1,5) \times 10^{-5}$
Granit	$(0,2 - 1,2) \times 10^{-5}$
Gabro, Bazalt	$(0,4 - 1,0) \times 10^{-5}$
Diorit, Andezit	$(0,4 - 1,1) \times 10^{-5}$
Dolomit	$(0,5 - 1,2) \times 10^{-5}$
Kremen	$(0,8 - 1,3) \times 10^{-5}$
Peščenjaki	$(1,0 - 1,2) \times 10^{-5}$

Glede na navedene lastnosti posameznih kamnin, lahko določimo korozijsko odpornost agregata. Tako povezavo lahko naredimo predvsem zato, ker je v večini primerov agregat sestavljen iz komponent enakega izvora, tako pri rečnem produ, kot pri drobljenem agregatu. Kadar govorimo o odpornosti agregata v povezavi z betonom ali malto, moramo upoštevati, da je najprej odvisna od odpornosti posameznih zrn agregata na agresivno okolje. Obstojnost betona je pa tudi odvisna od vrste drugih lastnosti agregata, kot so: vsebnost organskih primesi, vsebnost kemijsko škodljivih snovi, vsebnost gline, ovitost zrn z praškastimi delci ali glino... Zato moramo pri zagotavljanju ustrezne odpornosti betona poleg mineraloško-petrografskih zagotoviti tudi ustrezne ostale lastnosti agregata, ki so v večini odvisne od njegove kvalitete.

2.2.3 Kemične sestavine agregata, ki vplivajo na trajnost betona: SIST EN 12620 : 2002

Kloridi: običajno so kloridi v agregatih lahko prisotni kot natrijeve in kalijeve soli (odvisno od izvora agregata). Za zmanjšanje tveganja pred korozijo vgrajenih kovin se običajno omeji skupna količina kloridnih ionov, ki v beton pridejo z osnovnimi materiali. Kjer se ugotovi, da vsebnost v takšnih materialih ni večja od 0,01%, se lahko ta vrednost uporabi v postopku za izračuna za beton.

Sulfati: sulfati v agregatih lahko zaradi ekspanzije povzročijo razpadanje betona. Znatno delež sulfata v kristalizirani plavžni žlindri je zaprt v zrnih žlindre in zato ne sodeluje v reakcijah hidratacije cementa. Zato se v žlindri dopušča večji delež sulfata. Druge žveplove spojine, ki so prisotne v agregatih, lahko v nekaterih okoliščinah oksidirajo v betonu in tvorijo sulfate. Tudi to lahko povzroči razpadanje betona zaradi ekspanzije.

Preglednica 11: Kategorija za največjo vsebnost sulfatov, topnih v kislini [7]

Aregat	Vsebina sulfatov, topnih v kislini m. %	Kategorija AS
Vsi agregati, razen zračno hlajene plavžne žindre	$\leq 0,8$	AS _{0,2}
	$\leq 0,8$	AS _{0,8}
	$> 0,8$	AS _{deklarirana}
	ni zahteve	AS _{NR}
Zračno hlajena plavžna žindra	$\leq 1,0$	AS _{1,0}
	$> 1,0$	AS _{deklarirana}
	ni zahteve	AS _{NR}

Alkalno silikatna reakcija: določeni agregati lahko reagirajo z alkalnimi hidroksidi, ki so v porni tekočini betona. V neugodnih okoliščinah in v prisotnosti vlage to lahko pripelje do ekspanzije, ki ji sledi razpokanje ali razpadanje betona. Najobičajnejša oblika reakcije nastopi med alkalijami in nekaterimi oblikami kremenice (alkalno silikatna reakcija). Druga manj običajna reakcija je alkalno karbonatna reakcija. Če ni predhodnih dolgoročnih izkušenj, da pri določeni kombinaciji cementa in agregata ne obstaja nevarnost rušilne reakcije, je iz previdnosti treba izvesti enega od naslednjih ukrepov:

- omejiti skupno vsebnost alkalij v betonski mešanici,
- uporabiti cement z nizko efektivno vsebnostjo alkalij,
- uporabiti nereaktivno mešanico agregata,
- omejiti stopnjo nasičenosti betona z vodo.

Če nobenega od gornjih postopkov ni mogoče uporabiti, se lahko kombinacija agregatov in cementa oceni na podlagi veljavnih predpisov v kraju uporabe.

Sestavine, ki vplivajo na vezanje in strjevanje betona: druge sestavine agregatov lahko škodljivo vplivajo na hitrost hidratacije cementa in s tem spremenijo hitrost vezanja in strjevanja betona. Humus in materiali, kot je sladkor, sta dva primera snovi s takšnim vplivom. Tudi nekateri glineni minerali škodljivo vplivajo na dinamiko razvoja trdnosti ter na trdnost in trajnost betona, v katerega so vgrajeni.

Sestavine zračno hlajene plavžne žindre: če se zračno hlajena plavžna žindra uporablja kot agregat za beton, lahko nekatere njene sestavine škodljivo vplivajo na njegovo prostorninsko stabilnost. Pri zračno hlajeni plavžni žindri iz sodobnih proizvodnih obratov pa je to le malo verjetno. Celotna vsebnost žvepla v agregatih in polnilnih agregatih po EN 1744-1:1998, 11. točka ne sme presegati: 2,0 m.% pri zračno hlajeni plavžni žindri in 1,0m.% pri drugih agregatih, razen pri zračno hlajeni plavžni žindri.

2.3 Kemijski dodatki betonu – superplastifikator

Kemijski dodatki so snovi, ki s svojim fizikalnim in kemijskim delovanjem vplivajo na določene lastnosti sveže cementne paste ali strjenega cementnega kamna in s tem seveda tudi na lastnosti materialov s cementnim vezivom (injekcijskih mas, malt in betonov). Lahko so v tekočem ali praškastem stanju. Dodajajo se betonu pred ali med mešanjem v majhnih količinah, ki so običajno izražene v odstotkih na maso cementa. Osnove skupine dodatkov so:

- plastifikatorji in superplastifikatorji (povečajo plastičnost svežega betona in s tem zmanjšajo potrebo po vodi),
- aeranti (izboljšajo odpornost strjenega betona na zmrzovanje/tajanje brez ali v prisotnosti soli),
- zavlačevalci vezanja (upočasniyo vezanje cementa),
- pospeševalci vezanja (pospešijo hidratacijo cementa),
- gostilci (povečujejo vodotesnost betona)
- sredstva za kontrolo viskoznosti (povečajo viskoznost betona),
- dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah

2.3.1 Superplastifikatorji

Superplastifikator je dodatek za uravnavanje reoloških lastnosti sveže mešanice s cementnim vezivom s tem, da omogoča:

- zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti mešanice,
- izboljšanje obdelavnosti mešanice ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode,

- počasnejši padec obdelavnosti mešanice.

Zmanjšanje količine potrebne zmesne vode je v glavnem odvisno od uporabljenega superplastifikatorja, začetne konsistence mešanice in lastnosti cementnega veziva.

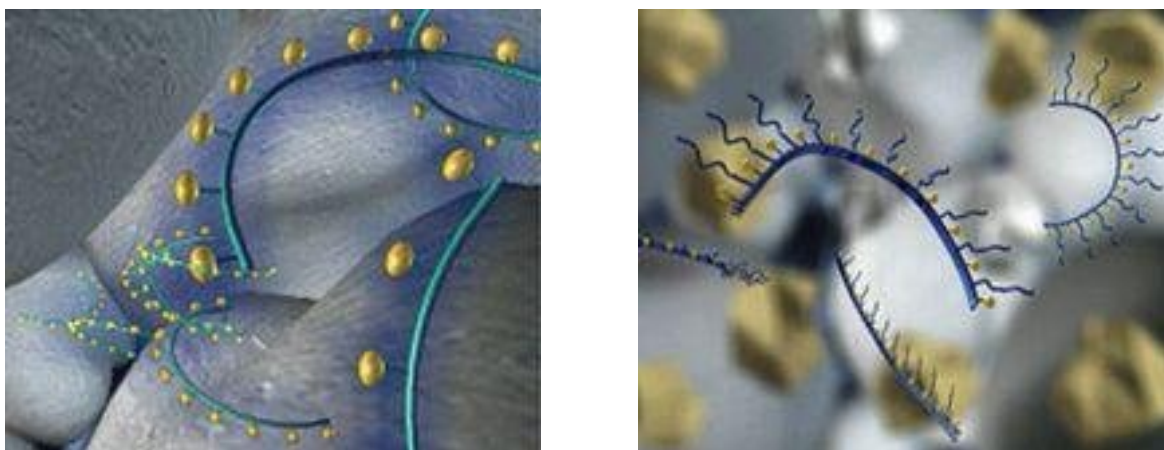
Glede na kemijsko setavo so superplastifikatorji razvrščeni v štiri skupine:

- A) sulfonirani melamin-formaldehidni kondenzati (SMF)
- B) sulfonirani naftalen-formaldehidni kondenzati (SNF)
- C) modificirani lignin-sulfonati (MLS)
- D) modificirani polikarboksilati

Običajni superplastifikatorji na bazi melamin- in naftalen-sulfonatov lahko »utekočinijo« mešanico za 15-30min in pri tem zmanjšajo potrebo po vodi za 5-25%. Superplastifikatorji na bazi polikarboksilatov (v nadaljevanju tudi superplastifikator nove generacije) pa lahko vzdržuje tekoče stanje mešanice dlje časa, 120-180minut, količina potrebne vode pa se zmanjša za 25-40%. Čas vzdrževanja obdelavnosti mešanice je odvisen od kompatibilnosti superplastifikatorja in mešanice praškastih delcev. Če le ti niso kompatibilni, se v prvih 15-ih minutah po zamešanju opazi očitna izguba konsistence mešanice.

2.3.2 Delovanje superplastifikatorja

Razlike v učinkih različnih superplastifikatorjev so posledica njihove kemijske sestave. Superplastifikator na bazi polikarboksilatov je sestavljen iz ene glavne polimerne verige, iz krajših stranskih verig z negativnimi karboksilatnimi skupinami in iz dolgih stranskih verig iz polietilen oksidov. Zgradba običajnega superplastifikatorja se razlikuje v tem, da ima namesto dolgih stranskih verig iz polietilen oksidov kratke verige, ali jih pa sploh nima (slika 24).

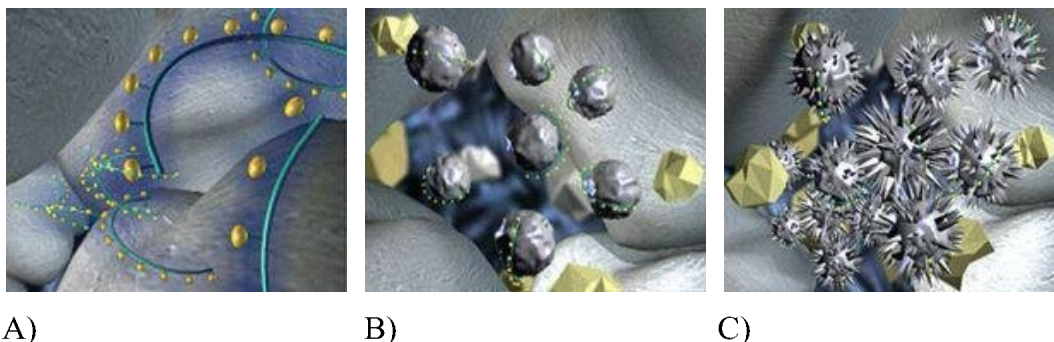


Slika 24: Shematični prikaz običajnega superplastifikatorja (levo) in superplastifikator na bazi polikarboksilatov (desno) [2]

Superplastifikator nove generacije je površinsko delujoča snov, ki se adsorbira na površino cementnih zrn in povzroča disperzijo le teh z električnim in steričnim oziroma prostorskim odbojem. Cementna zrna s sprejetim negativnim električnim nabojem iz karboksilatnih skupin se medsebojno odbijajo in dispergirana struktura cementnih zrn se stabilizira. Posledica negativnega naboja je nastanek orientiranih molekul vode na površini cementnih zrn, ki delujejo kot mazivo, to je povečujejo obdelavnost sveže mešanice. Nastanek steričnega odboja povzročijo dolge verige iz polietilen oksidov, ki prostorsko preprečujejo, da bi se cementni delci združevali. Prostorski odboj ima veliko večji in dalj časa trajajoč učinek kot električni naboj.

Delovanje običajnega superplastifikatorja:

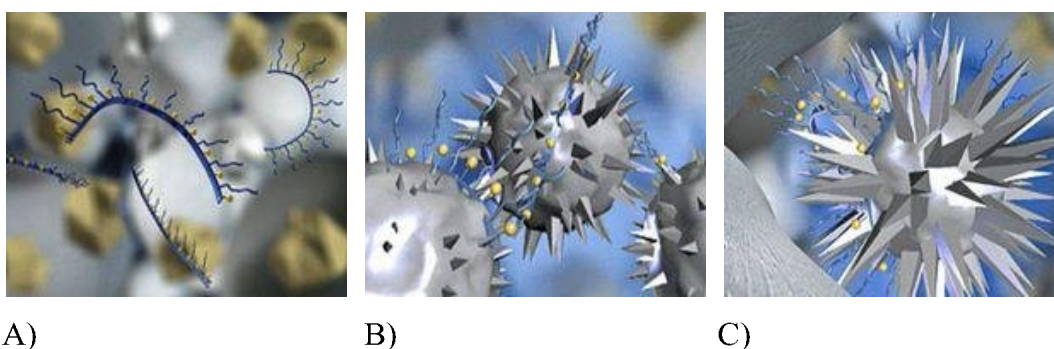
- A) Molekule superplastifikatorja se razporedijo po površini cementnih zrn v mešanici.
- B) Cementna zrna se zaradi elektrostaticnega naboja medsebojno odbijajo in se enakomerno dispergirajo v mešanici, ki se posledično utekočini.
- C) Zaradi procesa hidratacije začnejo na površini cementnih zrn rasti različni kristali – produkti hidratacije, ki se medsebojno prepletajo, istočasno pa onemogočijo nadaljni učinek dodatka.



Slika 25: Shematični prikaz delovanja običajnega superplastifikatorja [2]

Delovanje superplastifikatorja na bazi polikarboksilatov:

- A) V nasprotju z molekulo običajnega superplastifikatorja ima molekula superplastifikatorja nove generacije dolge stranske verige, ki podaljšujejo delovanje dodatka.
- B) Delovanje superplastifikatorja nove generacije je v začetni fazi enako prej opisanemu delovanju običajnega superplastifikatorja. S pojavom kristalov pa se preostale molekule superplastifikatorja na bazi polikarboksilatov v suspenziji razporedijo tudi delno okoli hidratiziranih cementnih zrn.
- C) Dolge stranske verige molekul superplastifikatorja nove generacije prostorsko preprečujejo združevanje delno hidratiziranih cementnih delcev in s tem podaljšujejo obdelavnost mešanice.



Slika 26: Shematični prikaz delovanja superplastifikatorja nove generacije [2]

Učinek superplastifikatorja nove generacije je odvisen od vrste in količine cementa, vodocementnega razmerja, sestave agregata in količine samega dodatka SP.

V materialih s cementnim vezivom v odlagališčih NSRAO, inženirskih pregradah, skladiščih nevarnih snovi in čistilnih napravah dodajamo superplastifikatorje betonu zato, da dosežemo dovolj nizko v/c razmerje in istočasno ustrezne in dovolj dolgo trajajoče reološke lastnosti svežih mešanic. Dozacije superplastifikatorjev so majhne. Praviloma ne presežejo 3 % glede na maso cementa pri običajnih in 1,5 % pri superplastifikatorjih nove generacije. Ker pa gre večinoma za tekoče proizvode (vodne raztopine), katerih delež suhe snovi običajno ni večji od 37 % pri superplastifikatorjih nove generacije in 20% pri običajnih superplastifikatorjih, vnesemo z njimi v cementno vezivo zelo majhno količino organske snovi (pri 400kg cementa v m³ betona ne več kot 2,4kg).

2.4 Mineralni dodatki

Veliko materialov obstaja, tako naravnih kot umetno pridobljenih, ki sami zase niso hidravlična veziva, vendar pa lahko njihove hidravlične lastnosti aktiviramo tako, da jim dodamo apno, portland cement ali alkalije iz drugih virov. Najbolj uporabljeni mineralni dodatki cementu so: granulirana plavžna žindra (latentno hidravlično vezivo), mikrosilika (pucolanski material) in pa elektrofiltrski pepel (pucolanski material), katerega bomo v nadaljevanju podrobneje obravnavali.

Mineralni dodatek je fino presejan material, ki se uporablja v betonski sestavi za izboljšanje določenih lastnosti ali za doseganje posebnih lastnosti. Poznamo dve vrsti neorganskih mineralnih dodatkov, ki jih obravnava standard SIST EN 206-1:2003: skoraj interne mineralne dodatke (TIP I) in pucolanske dodatke ali latentno hidravlične mineralne dodatke (TIP II).

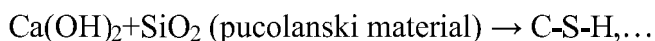
2.4.1 Elektrofitrski pepel

Elektrofitrski pepel pridobivamo z odstranjevanjem delcev iz dimnih plinov, nastalih pri gorenju uprašenega premoga. Njegova sestava je zelo odvisna od uporabljenega premoga in temperaturnih režimov, ki jim je izpostavljen. Glede na vsebnost CaO jih delimo na silicijske (manj kot 5% CaO) in kalcijске (več kot 5% aktivnega CaO). Velikost sferičnih delcev je med 1 in 100 μ m, razvita površina po Blainu pa se praviloma giblje med 3000 in 5000 cm²/g. Elektrofitrski pepel je, poleg mikrosilike, primaren pucolanski material. V primerjavi z cementnim klinkerjem vsebuje bistveno manj kalcijevega oksida in bistveno več pucolanskih oksidov silicija, aluminija in železa (preglednica 22). Tako kot portland cement tudi elektrofitrski pepel nastaja v oksidacijskih pogojih. Elektrofitrski pepel, ki se uporablja kot zamenjava cementnega klinkerja, mora izpolnjevati zahteve standarda *SIST EN 450:2005 – Elektrifitrski pepel – 1. del: Definicije, specifikacije in merila skladnosti*. Z njim lahko zamenjamo do okrog 30% cementnega klinkerja.

Preglednica 12: Kemijska sestava elektrofitrskega pepela [2]

SPOJINA	DELEŽ
CAO	3 – 30 %
SIO ₂	30 – 55 %
AL ₂ O ₃	4 – 10 %
FE ₂ O ₃	0,2 – 2,0 %
SO ₃	< 3 %
MGO	< 7 %
NA ₂ O IN K ₂ O	1 – 2 %

Če zamenjamo del čistega portland cementa z elektrofiltrskim pepelom, mikrosiliko ali žlindro, s tem zmanjšamo delež kalcijevega hidroksida v cementnem kamnu (ali pa ga celo v celoti izločimo) s pucolansko kemijsko reakcijo, ki jo v enostavni obliki zapišemo:



Istočasno pa povečamo delež C-S-H faze v cementnem kamnu.

Zamenjava portland cementa s pucolanskim materialom pa ima lahko zelo ugoden vpliv tudi na fizikalne lastnosti cementnega kamna. Praviloma imajo pucolanski materiali, s katerimi nadomeščamo del portland cementa, bolj fino porazdelitev delcev kot cement. Začetna spakiranost delcev je torej v mešanici cement-žlindra ali cement-EF pepel večja, kar pomeni da delci mešanega veziva zavzemajo večji del prostora kot bi ga delci čistega portland cementa. Rezultat je praviloma zmanjšanje količine vode za potrebno konsistenco sveže paste s cementno-pucolanskim vezivom. Povečana je tudi kohezivnost take paste, kar pomeni, da je zmanjšana nevarnost segregacije in izcejanja vode. To je še posebej pomembno pri injekcijskih masah in črpnem betonu. V strjenem cementnem kamnu pa je zaradi uporabe pucolanskega dodatka zmanjšana njegova poroznost in s tem tudi prepustnost ter večjo odpornost na abrazijo in kemijsko agresijo.

Kinetika hidratacije žlindre in elektrofiltrskega pepela je pri temperaturi 0°C do 40°C bolj odvisna od temperature okolice, kot napredovanje hidratacije cementa. Če je temperatura okolice višja od 60°C cementno-pucolanska mešanica hidratizira hitro in odda približno enako količino toplote kot čisti portland cement. Pri običajnih temperaturah okolja (okrog 20 °C) lahko portland cement sprost kar 40-50% vse toplote, ki se sprosti pri popolni hidrataciji, v prvih 3dneh. V istem času bo EF pepel sprostil bistveno manjšo količino toplote. Pri običajnih temperaturah okolice torej uporaba žlindre ali EF pepela omogočata bistveno zmanjšanje toplote hidratacije in s tem temperature materialov s cementno-pucolanskim vezivom. Pri teh temperaturah začnejo namreč pucolanski dodatki reagirati praviloma šele po nekaj dneh in pri pucolanski reakciji se sprošča v grobem le polovico toliko toplote kot se v povprečju sprosti pri hidrataciji portland cementa. To pomeni, da z zamenjavo dela portland cementa s pucolanskim dodatkom zmanjšamo hidratacijsko toploto in s tem lahko preprečimo nastanek mikrorazpok, ki so posledica temperaturnih razlik v materialu.

2.4.2 Uporaba elektrofiltrskega pepela po SIST EN 1026 : 2007

Mineralni dodatki tipa II se smejo pri sestavi betona upoštevati v računu vsebnosti cementa in v/c-razmerja. Pri elektrofiltrskem pepelu in mikrosiliki lahko uporabljamo koncept k-vrednosti, ki dovoljuje upoštevanje mineralnega dodatka tipa II: z nadomestitvijo v/c razmerja; **voda / (cement +k × mineralni dodatek)**. Dejanska k-vrednost je odvisna od posameznega mineralnega dodatka in jo je potrebno določiti.

Največja količina elektrofiltrskega pepela, ki se sme upoštevati v konceptu k-vrednosti, mora ustrezati naslednjim masnim razmerjem: SIST 1026 : 2007

CEM I	elektrofiltrski pepel/cement $\leq 0,33$
CEM II/A	elektrofiltrski pepel/cement $\leq 0,2$
CEM II/B	elektrofiltrski pepel/cement $\leq 0,1$

Če se uporabi večja količina elektrofiltrskega pepela, se ta višek ne sme upoštevati pri izračunu razmerja **voda / (cement +k × elektrofiltrski pepel)** in najmanjše količine cementa.

Za beton, ki vsebuje cement vrst CEM II/A in CEM II/B po SIST EN 197-1, so dovoljene naslednje k-vrednosti:

CEM II/A 32,5	k= 0,2
CEM II/A 42,5 in višji	k= 0,4
CEM II/B 42,5 in višji	k= 0,4

Za posamezno stopnjo izpostavljenosti se zahtevana najmanjša vsebnost cementa sme zmanjšati največ za količino $k \times (\text{najmanjša vsebnost cementa} - 200) \text{ kg/m}^3$, poleg tega pa skupna količina cementa in elektrofiltrskega pepela ne sme biti manjša od najmanjše vsebnosti cementa, ki se zahteva v skladu z točko 5.3.2 standarda SIST EN 1026.

Stopnja izpostavljenosti betona smo omenjali v predhodnih poglavjih 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5.


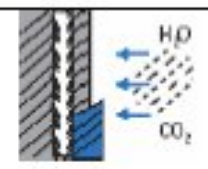
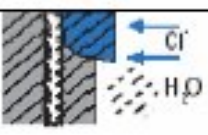
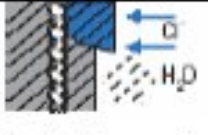



Preglednica 13: Zahtevane posebne lastnosti strjenega betona in priporočene vrednosti parametrov sestave svežega betona za posamezne stopnje izpostavljenosti [5]

Stopnja agresivnosti okolja	Stopnja izpostavljenosti po SIST EN 206-1	Posebne lastnosti betona za preverjanje izbranih parametrov sestave svežega betona			Priporočeni parametri sestave svežega betona	
		XC, XD, XS, XA	XF	XM	(v/c) max	Najmanjša vsebnost cementa [kg/m ³]
I	Nizka	X0			0,75	
		XC1			0,65	260
II	Zmerna	XC2, XC3	PV-I		0,55	300
		XC2 + XF1	PV-I	NOZT-100	0,55	300
III	Normalna	XD1, XS1, XA1, XM1	PV-I		0,55	320
		XD1 + XF2	PV-I	OPZT-S10	0,60ae	300
					0,55	320
IV	Močna	XC4, XD2, XS2, XA2, XM2	PV-II		0,50	340
		XC4 + XF1	PV-II	NOZT-150	0,55ae	320
					0,50	340
V	Zelo močna	XD3, XS3, XA3, XM3	PV-III		0,45	350
		(XD2, XD3) + XF4	PV-II	OPZT-S25	0,50ae	350

(v/c)max	Največje efektivno vodocementno razmerje (v/c)max ki pri določeni stopnji izpostavljenosti po izkušnjah omogoča 50-letno življenjsko dobo objekta. Prekoračitev deklarirane vrednosti (v/c)max za več kot 0,02 pomeni neskladnost pri kontroli proizvodnje. Če se predpostavi normalna statistična porazdelitev vrednosti v/c, je $(v/c)_{max} = 1,75 \sigma_{v/c}$, kjer je (v/c) srednja vrednost, $\sigma_{v/c}$ pa standardni odklon normalne porazdelitve izmerjenih vrednosti v/c. Pri $\sigma_{v/c} \approx 0,03$ velja potem naslednja poenostavitev: $(v/c)_{max} \approx (v/c) + 0,05$. Postopek določitve (v/c) je opisan v dodatku 3.
ae	(v/c)max za aeriran beton
FV	prodor vode iz tč. 5.5.3 (stopnje I, II, III)
OZT	odpornost proti zmrzovanju/tajanju
NOZT 100 NOZT 150	notranja odpornost proti zmrzovanju/tajanju, tč. 5.5.5 (po 100 ali po 150 ciklih zmrzovanja/tajanja)
PZT-S10	odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju s sredstvi za tajanje, po 10 ciklih zmrzovanja/tajanja, tč. 5.5.6
PZT-S25	odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju s sredstvi za tajanje, po 25 ciklih zmrzovanja/tajanja, tč. 5.5.6
OO	odpornost proti obrabi (1,2,3)

Preglednica 14 opisuje vpliv, obremenjenost in konstrukcijske ukrepe za različne stopnje izpostavljenosti betona. Beton je lahko izpostavljen več kot enemu delovanju oziroma vplivu, opisanem v preglednici 14.

Preglednica 14: Razredi in stopnje izpostavljenosti [5]

Stopnje izpostavljenosti (vplivi okolja – napad)		Betonski konstrukcijski ukrepi (odpornost)			
Oznaka stopnje	Vpliv in obremenjenost	največje V/C	najmanj cementa (kg/m ³)	najmanjši razred trdnosti	
XD	 ni napada na beton	ni zahteve	ni zahteve	C12/15	
XC	 karbonatizacija	suho ali trajno mokro	0,65	280	C20/25
		mokro, le redko suho	0,60	280	C25/30
		zmerna vlažnost	0,55	280	C30/37
		izmenično mokro in suho	0,50	300	C30/37
XD	 kloridi – ne iz morske vode	zmerna vlažnost	0,55	300	C30/37
		mokro, le redko suho	0,55	300	C30/37
		izmenično mokro in suho	0,45	320	C35/45
XS	 kloridi – iz morske vode	izpostavljeno solem v zraku	0,50	300	C30/37
		trajno potopljeno	0,45	320	C35/45
		območja plimovanja, škropljenja, pršenja	0,45	340	C35/45
XF	 zmrzovanje/tajanje	zmerna nasičenost z vodo, brez soli	0,55	300	C30/37
		zmerna nasičenost z vodo + soli	0,55+AE	300	C25/30
		močna nasičenost z vodo, brez soli	0,50+AE	320	C30/37
		močna nasičenost z vodo + soli	0,45+AE	340	C30/37
XA	 kemično delovanje	malo agresivno kemično okolje	0,55	300	C30/37
		srednje agresivno kemično okolje	0,50	320	C30/37
		močno agresivno kemično okolje	0,45	380	C35/45
XM	 Abrasion	zmerna obremenitev	0,55	300	C30/37
		močna obremenitev	0,50	320	C30/37
		zelo močna obremenitev	0,45	340	C35/45

2.5 Voda

Voda predstavlja pomembno komponento vsake mešanice s cementnim vezivom (injekcijske mase, malte in betona), saj omogoča proces hidratacije (vezave) cementa. V svežem betonu deluje kot komponenta za doseganje potrebne obdelavnosti betonske mešanice. Istočasno pa z njeno pomočjo dosežemo ustrezno konsistenco teh materialov v svežem stanju. Če je zahteva po tekoči mešanici, se vodocementno razmerje giblje od 0,4 do 1,0. Potrebna količina kemijsko vezane vode je sicer blizu v/c razmerja 0,25, ki pa ne zagotavlja ustrezne konsistencije materialov na bazi cementa. Količina vode večja od kemijsko vezane prispeva k plastičnosti cementne paste, istočasno pa poveča poroznost cementnega kamna (strjene cementne paste) in s tem njegovo prepustnost.

Za izdelavo betonske mešanice je vedno primerna pitna voda in je zato ni potrebno preiskovati. Vsa voda iz drugih virov (vode, črpane iz podzemnih virov, površinske vode in industrijske odpadne vode ter vode reciklirane iz proizvodnje betona) pa se mora preskusiti po SIST EN 1008:2003, da se dokaže njeno primernost. Posebno škodljive so naslednje snovi, ki jih voda ne sme vsebovati:

- organske primesi (zemlja, humus, masti, olja, sladkor),
- sulfati (soli, ki med kristalizacijo povečajo volumen),
- kloridi (soli, ki povzročijo korozijo armature),
- mulj (ki absorbira velike količine cementa).

Za betone namenjene vgrajevanju v nearmirane konstrukcije, se smejo vode iz drugih virov (razen pitne vode) uporabiti že na podlagi primerjalnih preskusov časa vezanja in tlačne trdnosti betona, pripravljenega z destilirano ali predvideno vodo. Če se dokaže, da časovna razlika začetkov in koncev vezanja ni večja od 30 minut in, da je razlika med tlačnimi trdnostmi manjša kot 10%, se voda lahko uporabi za izdelavo betonov.

Morska voda se sme uporabljati le za betone, namenjene vgrajevanju v nearmirane konstrukcije. Zgornja meja prisotnosti soli v vodi za pripravo armiranega betona je namreč 5g/l.

Drobni delci (glina, organske snovi in soli), ki so razpršeni v vodi, ustvarjajo prevleke na agregatu in prekinitev med zrnici cementa ter s tem bistveno vplivajo na proces hidratacije in sprejemanje cemente paste z agregatom. Vpliv neznane vode na trdnost cementne paste lahko preizkušamo s primerjalnimi preskusi prizem izdelanih z vodo znane in neznane kakovosti.

Beton mora vsebovati toliko vode kolikor je potrebno za hidratacijo cementa, če je vode manj, bo del cementa ostal nehidratiziran, če je pa vode preveč, pa bo iz betona del vode izhlapel in oblikovale se bodo kapilarne pore. Idealna količina vode se običajno ravna po načelu čim boljše vgraditve. Velja pravilo: bolje dobro vgrajen slabši beton, kot pa slabo vgrajen boljši beton.

Neprirodnost vode se lahko pokaže tudi s pojavi kot so:

- eflorescenca (površinsko izločanje v vodi topnih soli, ki se naberejo na površini zaradi izhlapevanja vode),
- prostorninska nestabilnost cementnega kamna,
- sprememba časovnega poteka hidratacije paste,
- sprememba barve paste in različne vrste korozije

Vodocementno razmerje je razmerje med maso vode in maso cementa, ki ima zelo velik vpliv na trdnost betona. Potrebno količino vode v kubičnem metru sveže betonske mešanice prikazuje naslednja enačba,

$$V = V_a + (V_p + \Delta V_p) + (V_k + \Delta V_k) \quad (\text{Enačba 1})$$

kjer je:

V_avoda, ki jo vpije agregat

V_pvoda, ki omoči površino agregata

ΔV_pdodatna voda odvisna od teksture in mineraloško petrografske sestave agregata

V_kvoda potrebna za standardno konsistenco cementne paste

ΔV_kdodatna voda potrebna za doseganje zahtevane konsistencne betonske mešanice

2.6 Stično območje med zrnji agregata in cementim kamnom

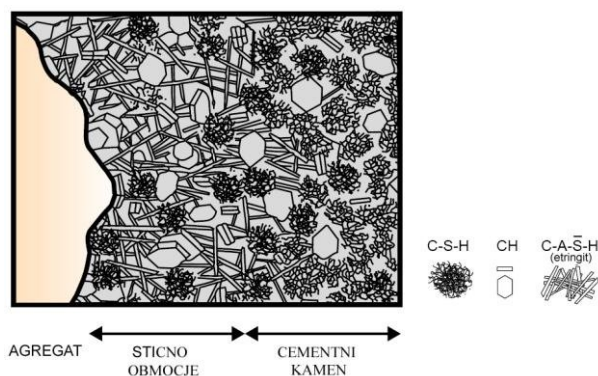
2.6.1 Pomembnost stičnega območja

Zaradi vpliva, ki ga ima prisotnost stičnega območja med večjimi agregatnimi zrnji in cementnim kamnom (v nadaljevanju stično območje) na lastnosti betona:

- je beton krhek v nategu, vendar pa relativno duktilen v tlaku,
- se beton pri enosnem tlaku obnaša neelastično, medtem ko se njegovi osnovni sestavini, agregat in cementni kamen, obnašata elastično do porušitve,
- je tlačna trdnost betona približno 10x večja od njegove natezne trdnosti,
- se tlačna trdnost betona manjša z naraščanjem deleža večjih zrn, to je z naraščanjem velikosti največjega zrna – posledica je tudi ta, da bo imela malta, izdelana z enako količino in vrsto cementa, enakim v/c razmerjem in pri enaki stopnji hidratacije večjo trdnost kot beton,
- je prepustnost betona izdelanega z zelo kompaktnim agregatom za red velikosti večja od prepustnosti cementnega kamna,
- se pri požaru elastični modul betona hitreje manjša, kot njegova tlačna trdnost.

2.6.2 Mikrostruktura stičnega območja

V sveže zamešanem betonu se okrog večjih zrn agregata oblikuje vodni film. To je vzrok za lokalno višje v/c razmerje v bližini večjih zrn agregata. Proces hidratacije v tem območju poteka enako kot v samem cementnem kamnu, vendar pa so produkti hidratacije sestavljeni iz relativno velikih kristalov. Poleg tega pa ploščati kristali kalcijevega hidroksida oblikujejo orientirane sloje, s c-osjo pravokotno na površino agregata. Posledica je mnogo bolj porozna struktura stičnega območja v primerjavi s strukturo cementnega kamna. Z napredovanjem hidratacije začnejo C-S-H faza in druga generacija manjših kristalov etringita in kalcijevega hidroksida zapolnjevati prostore med večjimi kristali. Na ta način se poveča gostota stičnega območja in izboljša njegova trdnost. Shematično stično območje je prikazano na Sliki 27, posnetek stičnega območja dobljen z vrstičnim elektronskim mikroskopom pa na Sliki 28.



Slika 27: Shematični prikaz stičnega območja [2]

Slika 28: Posnetek stičnega območja [2]

2.6.3 Trdnost stičnega območja

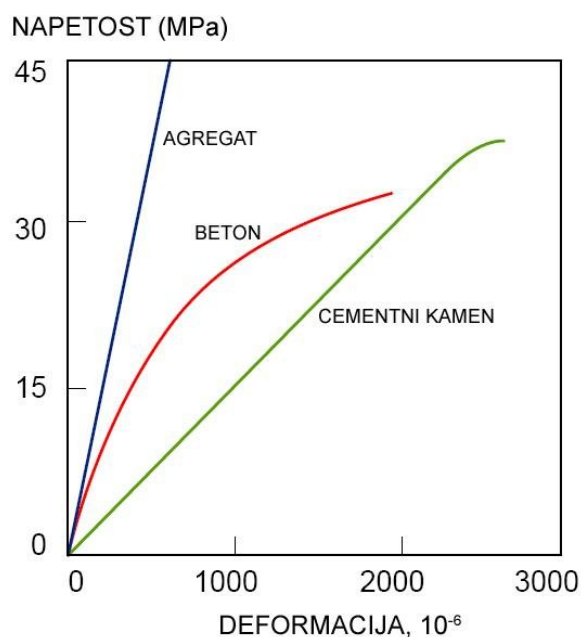
Kakor v cementnem kamnu so tudi v stičnem območju izvor adhezije med produkti hidratacije cementa in agregatnimi zrnji Van der Waalsove privlačne sile. Zaradi tega je trdnost stičnega območja v vsaki točki odvisna od prostornine in velikosti prisotnih por. Celo pri zelo nizkem v/c razmerju betona sta pri zgodnji starosti betona (do 3 dni) prostornina in velikost por v stičnem območju večja kot v cementnem kamnu. Z naraščanjem starosti betona pa lahko postane trdnost stičnega območja enaka ali celo večja od trdnosti cementnega kamna. To se zgodi v primeru, če v porah stičnega območja kristalizirajo novi produkti, ki nastanejo praviloma zaradi kemične reakcije med produkti hidratacije in sestavinami agregata, to je oblikovanje C-S-H faze pri silikatnem agregatu in oblikovanje karboaluminat hidratov pri apnenčevem agregatu. Tovrstne reakcije prispevajo k trdnosti betona, saj istočasno zmanjšajo koncentracijo kalcijevega hidroksida v stičnem območju. Veliki kristali kalcijevega hidroksida imajo namreč manjšo sposobnost adhezije zaradi manjše razpoložljive površine in ustrezno šibkih Van der Waalsovih sil, poleg tega pa služijo tudi kot prednostna mesta za razcepitev, zaradi tendence oblikovati usmerjeno strukturo.

Poleg velike prostornine kapilarnih por in orientalnih kristalov kalcijevega hidroksida, trdnost stičnega območja zmanjšuje tudi prisotnost mikrorazpok. Količina mikrorazpok je odvisna od velikosti največjega zrna in zrnavostne sestave agregata, količine cementa, v/c razmerja,

stopnje zgoščenosti svežega betona, pogojev nege, relativne vlage v okolici in porazdelitve temperature po betonu od zamešanja betona naprej. Mikrorazpoke se oblikujejo zaradi nateznih napetosti v stičnem območju, ki so posledica diferenčnih pomikov med agregatnimi zrnji in cementnim kamnom. Diferenčni pomiki so posledica sušenja in ohlajanja betona.

Mikrorazpoke v stičnem območju se lahko torej pojavijo, še preden je beton obremenjen z zunanjo obtežbo. Kratkotrajna udarna obremenitev, krčenje betona zaradi sušenja in vzdrževana obtežba, ki ima za rezultat napetosti večje od 40% tlačne trdnosti betona pa povzročajo širjenje obstoječih in oblikovanje novih razpok.

2.6.4 Vpliv stičnega območja na lastnosti betona



Slika 29: Sovisnost med napetostjo in deformacijo za naravni mineralni agregat, cementni kamen in beton [2]

Zaradi prisotnosti stičnega območja popusti beton pri bistveno nižji napetosti, kot je trdnost obeh ostalih glavnih komponent, agregata in cementnega kamna. Energija, ki je potrebna za povečanje mikrorazpok, ki že obstajajo v stičnem območju, je relativno majhna. Zaradi tega se začne beton pri enosnem preskusu že pri napetostih od 40 do 70% tlačne trdnosti betona

obnašati nelinearno, medtem ko se njegovi osnovni komponenti (cementni kamen in agregat) obnašata linearno elastično vse do porušitve, kar prikazuje diagram na sliki (slika 29).

Pri nivojih napetosti večjih od 70% tlačne trdnosti se oblikujejo razpoke tudi v cementni malti. Z naraščanjem napetosti se razpoke v cementni malti širijo, dokler se ne povežejo z razpokami v stičnem območju. Sistem razpok postane povezan in material se poruši.

Struktura stičnega območja, še posebej količina, velikost in porazdelitev kapilarnih por in obstoječih mikrorazpok ima velik vpliv na togost ali na modul elastičnosti betona. V kompozitnem materialu je stično območje most med dvema komponentama: maltno matrico in grobimi agregatnimi zrn. Čeprav imata matrica in zrna veliko togost, je togost kompozita znižana zaradi »porušenega mostu«, ki ne dovoljuje prenosa napetosti med osnovnima komponentama betona. Zato se zaradi mikrorazpok v stičnem območju, ki se oblikujejo pri naprimer požarni obremenitvi, modul elastičnosti betona zmanjša hitreje kot njegova tlačna trdnost.

Lastnosti stičnega območja vplivajo tudi na obstojnost betona. Obstoj mikrorazpok v stičnem območju je primarni razlog za bistveno večjo prepustnost betona, v primerjavi z prepustnostjo cementnega kamna ali malte. Tudi lokalno večje v/c razmerje okrog večjih agregatnih zrn, še posebej če so neugodne oblike, rezultira v večji poroznosti stičnega območja. Prav ta razlika v v/c razmerju v sami strukturi betona nam jasno kaže, da relacija med izbranim v/c razmerjem in poroznostjo velja le za cementni kamen in cementno malto, ne pa tudi za beton. Pri betonu so pomembnejši parametri, ki lahko vplivajo na lokalno povečanje v/c razmerja okrog agregatnih zrn. To so:

- največje zrno agregata (čim večje je, tem večja je verjetnost notranjega izcejanja vode ob zrnih),
- oblika zrn,
- zrnastostna sestava agregata,
- zgoščevanje sveže mešanice.

Torej, če želimo doseči ustrezno obstojnost betona moramo zagotoviti, da bo v betonu čim manj poroznih stičnih območij. To lahko dosežemo:

- z izbiro manjšega največjega zrna agregata (zadnje čase je to velikokrat 16 mm),
- z optimalno zrnastostno sestavo agregata,
- z izbiro agregata z čim manjšim deležem zrn neugodne oblike,
- z dovolj veliko količino kohezivne cementne paste in,
- z ustreznim zgoščevanjem betonske mešanice (brez pojava mikrosegacije).

3 LASTNOSTI SVEŽEGA BETONA

3.1 Lastnosti svežih betonskih mešanic

Izbira ustreznih materialov in sestave betonske mešanice sta seveda pomembna koraka pri proizvodnji betona, ki bo izpolnil zahteve glede trdnosti in obstojnosti konstrukcijskih elementov in materiala. Vendar pa izpolnitev teh dveh pogojev še ne zagotavlja ustreznih karakteristik betonskih in armirano betonskih elementov. Zato je potrebno posebno pozornost posvetiti tudi proizvodnji in tehnološkim operacijam, ki jim je beton izpostavljen pri zgodnji starosti (zgodnja starost je največkrat definirana kot obdobje prvih dveh dni po proizvodnji betona). Te operacije so mešanje, transport do gradbišča, vgrajevanje v opaže, zgoščevanje, zaključna obdelava površine, nega in odstranitev opažev.

3.2 Mešanje betona

Osnovne sestavine betona (agregat, voda, cement, zrak, dodatki) se morajo pazljivo zamešati v homogeno celoto. Pri tem je odločilnega pomena zaporedje dodajanja posameznih sestavin. Pomembno je, kdaj se doda voda v suho mešanico agregata in cementa ter kolikšna je hitrost obračanja bobna mešalca. Pomembna je količina mešanice glede na kapaciteto mešalca, čas polnjenja glede na čas mešanja, oblika ter stanje bobna in njegovih lopatic. Bobni dobrih mešalcev omogočajo izmenjavo materiala z enega na drugi konec bobna s kotaljenjem, pregibanjem in gnetenjem. Dodatki betonu se v večini primerov dodajajo v obliki vodne raztopine.

3.2.1 Konsistenca betonske mešanice

Konsistenca betona je tisti parameter, ki določa plastičnost betona. Standardi predpisujejo metode določanja konsistence sveže betonske mešanice (Ve-Be metoda, metoda s posedom, metoda z razlezom, metoda z zgoščevanjem pri vibriranju) in kriterije za posamezne stopnje konsistence. Izbira konsistence betona je odvisna od pomembnosti konstrukcije, sredstev za

vgrajevanje in zgoščevanje ter od deleža armature v armiranobetonskih elementih. Izbrano konsistenco mora imeti betonska mešanica tik pred vgradnjo. To pomeni, da se od betonarne do gradbišča ne sme spreminjati, ali da se v betonarni izdelata beton bolj plastične konsistence, med transportom in agitiranjem (mešanjem) pa se dovoli omejen padec konsistence, ki pa mora biti znan vnaprej.

Preglednico 15. uporabljamo za lažjo predstavo vrst konsistence betona in kot izhodišče za izbiro konsistence pri lastnih preiskavah.

Preglednica 15: Klasifikacija konsistence po DIN standardih [8]

OPIS (MEJE) KONSISTENCE	Mere konsistence		
	Posed (mm)	Razlez (mm)	Posed pri vibriranju (mm)
Zemeljsko vlažna	–	–	≥ 1,46
Trdoplastična	10 - 40	≤ 340	1,45 – 1,26
Srednjeplastična	50 - 90	350 - 410	1,25 – 1,11
Mehkoplastična	100 - 150	420 - 480	1,10 – 1,04
Zelo mehko plastična	–	490 - 550	–
Tekoča	160 - 210	560 - 620	–
Zelo tekoča	≥ 220	≥ 630	–

3.3 Vgradljivost

Stopnjo vgradljivosti betona določajo enostavnost vgrajevanja, zgoščevanje sveže betonske mešanice in zaključna obdelava.

Pri transportu in vgradnji betona morajo vsa zrna v plastični mešanici ostati enakomerno razporejena brez pojava segregacije in prekomernega izcejanja vode. Homogenost je lastnost, ki jo beton mora ohraniti vez čas vgrajevanja in strjevanja ter tako tvoriti homogen strjen beton. Beton je treba pripravljati kar se da blizu mesta vgradnje ali pa ga transportirati v ustreznih mešalcih/agitatorjih. Zrak, ki je vgrajen v beton, zmanjšuje pojave segregacije in izcejanja vode.

3.4 Izcejanje vode

Izcejanje vode je pojav, pri katerem na vrhu sveže mešanice betona nastaja plast vode. Pojav je posledica istočasne sedimentacije trdnih delcev (cementnih in agregatnih zrn) in potovanja vode znotraj mešanice navzgor proti površju. Pri tem nastaja vrhnja plast betona s pretirano visokim v/c razmerjem. Ta plast ima nizko odpornost proti zunanjim vplivom, je neobstojna in ima slabe mehanske lastnosti. V ekstremnih primerih se na površini ustvarijo žepi in večje odprte pore kraterske oblike.

Po izhlapevanju izcejene vode je strjena površina betona nižja od nivoja površine sveže betonske mešanice. Pojav se imenuje plastično posedanje. Kapaciteta izcejanja (posedek strjenega betona na enoto višine sveže betonske mešanice) se povečuje z večanjem v/c razmerja, z višino betonske plasti in z večanjem zunanega tlaka. Vpliv in obseg izcejanja se da zmanjšati z ustrezno zrnovostno sestavo agregata, kemijskimi dodatki, aeriranjem, mineralnimi dodatki in z izbiro bolj fino mletih cementov. Zmanjševanje izcejanja je pomembno pri betonih, ki jih uporabljamo za zalivanje votlin, podpor in izdelavo neprepustnih plasti, ki med seboj dobro nalegajo.

3.5 Zgoščevanje

Pri vgradnji betona z delovanjem energije (vibratorji, nabijala) se delci svežega betona spravijo v gibanje, zmanjša se njihovo medsebojno trenje, mešanica pa pri tem prehaja v stanje gostega fluida. Vibriranje omogoča uporabo bolj toge mešanice z večjimi zrn, pri kateri je potrebna manjša količina cementne paste za oblikovanje zrn agregata in s tem manjša potreba po vodi.

Vibriramo beton, ki ga ne moremo kvalitetno ročno vgraditi. Pri ročno vgradljivem betonu vibriranje lahko povzroči njegovo segregacijo. Med različnimi vrstami vibratorjev se najbolj pogosto uporabljajo vibratorji, ki so pritrjeni na kovinske opaže (izdelava prefabriciranih betonskih elementov) in vibratorji z iglo (vibriranje betonov pri neposredni vgradnji v konstrukcijo). Premeri vibracijskih igel so odvisni od frekvence vzbujanja vibracij (višje

frekvence, tanjše igle). Pri visoko frekvenčnih vibratorjih (140 - 250 Hz) se uporabljajo igle premera od 20 do 40 mm, pri nižje frekvenčnih vibratorjih (70 – 140 Hz) pa igle premera od 130 do 180 mm.

Uporaba vibratorjev za ustrezno zgostitev betona v opažu lahko povzroči izrazit transport praškastih delcev, vode in zračnih mehurčkov, ne samo k zgornji površini elementa v izdelavi, ampak tudi k stenam opaža. Zato so na površini razopaženih elementov pogosto prisotni lunke, površina ima primerjalno višje vodo-cementno razmerje in ni homogena, zato je seveda površinske plast elementa tudi manj obstojna. To pomeni, da ima izbira ustreznega načina zgoščevanja ter njegova strokovna izvedba zelo pomemben vpliv na obstojnost zaščitne plasti betona.

Rešitev problemov povezanih z nehomogeno strukturo betona zaradi neustreznega zgoščevanja predstavljajo samozgoščevalni betoni. Samozgoščevalni beton izdelamo s kemijskim dodatkom superplastifikatorja. Učinek superplastifikatorja je odvisen od vrste in količine cementa, vodocementnega razmerja, sestave agregata in količine superplastifikatorja. Dodatek superplastifikator pa nam omogoča:

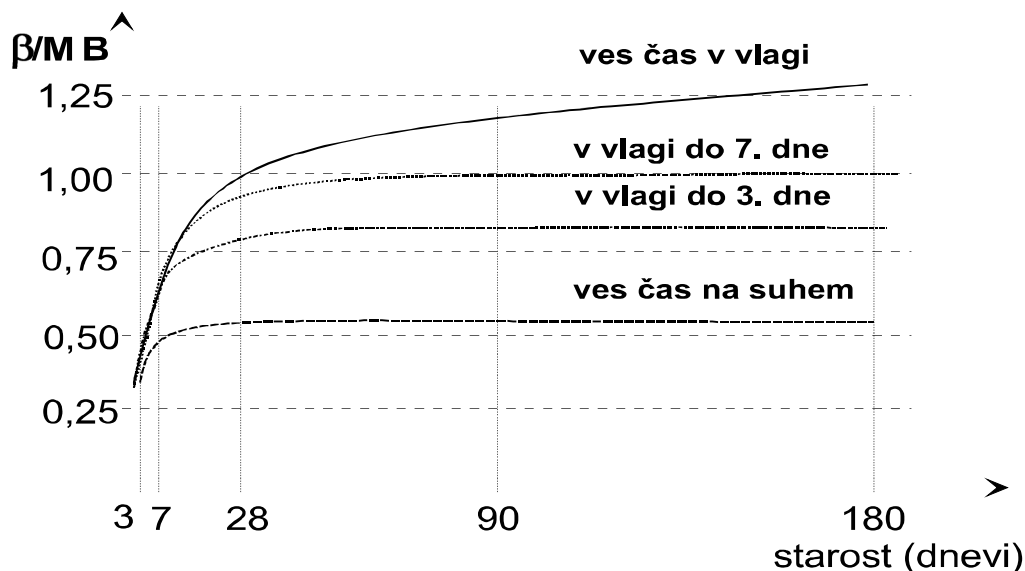
- zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti mešanice,
- izboljšanje obdelavnosti mešanice ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode,
- počasnejši padec obdelavnosti mešanice,
- dosežemo dovolj nizko v/c razmerje in istočasno ustrezne in dovolj dolgo trajajoče reološke lastnosti svežih mešanic.

3.6 Nega betona

Negi betona je potrebno posvetiti posebno pozornost, saj je velikokrat prav neustrezna nega odgovorna za oblikovanje razpok in s tem znižanje trdnosti in obstojnosti betonov ustrezne sestave, ki so bili ustrezno vgrajeni in zgoščeni. Nega betona ima dve glavni nalogi:

- preprečiti izhlapevanje vode iz betona, saj je potrebna za hidratacijo cementa,
- kontrolirati temperaturo betona dovolj dolgo, da se doseže ustrezna trdnost betona.

Trajati mora praviloma vsaj 7 dni, priporoča pa se čim bolj dolga nega, ki jo je seveda možno zagotoviti v dejanskih pogojih.



Slika 30: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti betona [3]

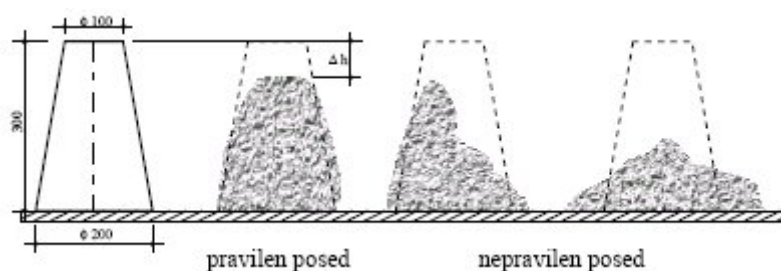
Beton lahko negujemo na različne načine. Lahko ga polivamo z vodo, pokrijemo z mokrimi tkaninami, prekrijemo z plastično folijo, vlažimo z razprševanjem vode.... Na ta način lahko negujemo le površine, ki niso v stiku z opažem, ostale površine pa le po odstranitvi opaža. Zadnje čase pa se uporabljajo tudi posebne tkanine, ki se namestijo na opaž in negujejo tudi površine betona v stiku z opažem in to tako, da najprej vpijejo vodo s površinske plasti betona in s tem lokalno znižajo v/c razmerje površinske plasti, potem pa s to vpito vodo negujejo površino in omogočajo neovirano hidratacijo cementa. Na ta način se izboljša kvaliteta površinske plasti in njena obstojnost. Čeprav so tovrstne tkanine še relativno drage, pa je njihova uporaba smiselna v primeru pomembnih objektov, kjer je neprepustnost zaščitne betonske plasti ključnega pomena. Menimo, da sem spadajo tudi armiranobetonske inženirske pregrade.

Poleg ustreznih vlažnostnih pogojev pa je ustrezna nega odvisna tudi od temperature okolja. Zadnji rezultati preiskav opravljenih v laboratoriju KPMK [2] so pokazali, da lahko mokra nega v vodi z temperaturo 15°C rezultira v manjši obstojnosti površine betona pri zmrzovanju/tajanju v prisotnosti soli, kot nega pri relativni vlagi okrog 70% pri 20 °C.

4 METODE PREISKAV OBDELOVALNOSTI SVEŽE BETONSKE MEŠANICE IN ZAHTEVE STANDARDA

4.1 Preskus s posedom stožca; SIST EN 12350-2 [9]

Metoda s posedom je zasnovana na merjenju deformacije zgoščenega betonskega prisekanega stožca, ki se posede zaradi lastne teže. Rezultat preiskave je razlika med višino posedenega stožca in začetno višino stožca. Kovinski stožec višine 300mm ter zgornjega premera $\phi 100\text{mm}$ in spodnjega premera $\phi 200\text{mm}$ polnimo z zidarsko žlico po $\frac{1}{3}$ višine. Vsako plast zgostimo s 25 udarci s standardno kovinsko palico, ki je na koncu zaobljena. Prvo plast prebadamo po celi višini, medtem ko mora pri nadaljnjih dveh plasteh palica prodreti o spodaj ležeče plasti. Po koncu zgostitve zadnje plasti presežek betona odstranimo in ga poravnamo z vrhom stožca. Po napolnitvi počasi dvignemo stožec (2 - 5sekund) in ga postavimo ob betonski stožec. Standardno palico za zgoščevanje postavimo na vrh stožca tako, da seže nad betonski stožec in nato izmerimo razliko višin Δh , katera je lahko minimalno 10mm. V praksi je ta metoda največkrat uporabljena, omogoča nam tudi večkrat dnevno določanje konsistenčne stopnje betonov. Na sliki 31. je prikazan pravilen in nepravilen posed z takšno metodo. V preglednici 15. pa so podane konsistenčne stopnje betona po standardu SIST EN 206-1 : 2003 za to metodo.



Slika 31: Pravilen in nepravilen posed sveže betonske mešanice [8]

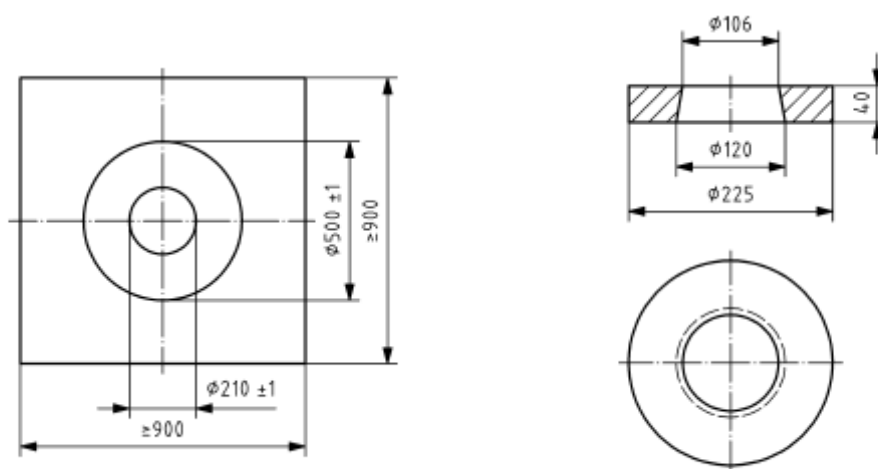
Preglednica 16: Razredi konsistence za metodo preskusa s posedom stožca SIST EN 206-1 [8]

Razredi poseda:

Razred	Posed
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220

4.2 Navodilo za preskus konsistence svežega lahkogradljivega betona (določitev poseda, razleza s posedom in časa preoblikovanja zaradi delovanja lastne teže) [10]

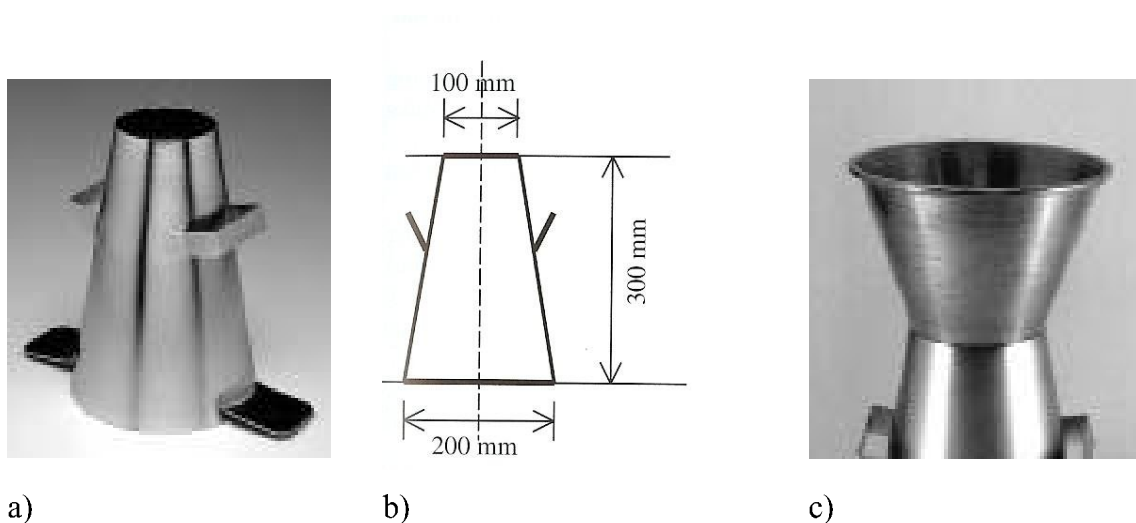
Preiskava razleza s posedom je enostavna, vendar učinkovita metoda ovrednotenja sposobnosti tečenja in stabilnosti sveže betonske mešanice na podlagi opazovanja hitrosti deformiranja in premera razširitve preizkušene mešanice, ki se deformira zaradi lastne teže. Metodo razleza z posedom uporabljamo samo pri samozgoščevalnih betonih, kjer uporabimo standardni prisekan stožec za določitev poseda običajnega betona, dovolj gladko vodotesno in togo podlago dimenzije najmanj $(700 \pm 2\text{mm}) \times (700\text{mm} \pm 2\text{mm})$. Na podlagi orišemo krog premera 500mm, ki je potreben za določitev časa, ki ga beton potrebuje da doseže razlez 500mm (T_{50}). Določimo še tudi čas in dimenzije končnega razleza ter tudi višino poseda.



Slika 32: Nepodajna podlaga z vrisanim včrtanim krogom [11]

Navodilo za preskus konsistence svežega betona temelji na smiselni kombinaciji; določil evropskega standarda EN 12350-2:1999 (Metoda s posedom), ki ga je CEN odobril oktobra 1999, SIST pa objavil l. 2001, in pa evropskega predstandarda prEN 12350-8:2007, ki ga je sist objavil l. 2008.

Vzorec betona odvezamemo v skladu z določili slovenskega standarda SIST EN 12350-1:2001. Prostornina kalupa je $5,5\text{dm}^3$, zato je najmanjša količina betona potrebna za posamezni preskus približno 6dm^3 ali 14 kg običajnega betona.



Slika 33: Kalup (votel prisekan stožec) za preskus (a in b) in lijak (c) [10]

Postopek preskusa:



1. Napolni kalup do nekaj več kot $1/3$ njegove višine s svežim betonom in ga zgosti s 25 udarci z zgoščevalno palico. Udarce razporedi enakomerno po površini vzorca, kar pomeni, da boš pri prvem sloju moral palico rahlo nagniti in približno polovico udarcev opraviti blizu plašča stožca (približno vzporedno z njim) in potem nadaljevati z vertikalnimi udarci spiralno proti središču kalupa.



2. Napolni kalup do nekaj več kot $2/3$ njegove višine s svežim betonom in novi sloj ponovno zgosti s 25 udarci z zgoščevalno palico tako, da palica prodre čez stik med prvim in drugim slojem (toliko da še prodre v spodaj ležeči sloj), ne sme pa iti skozi prvi sloj. Udarce razporedi enakomerno po površini vzorca.



3. Napolni kalup preko vrha (pri tem si lahko pomagaš z lijakom) in zgosti še zadnji sloj s 25 udarci z zgoščevalno palico tako, da palica za spoznanje prodre v spodaj ležeč sloj. Če se vrhnji sloj betona zaradi zgoščevanja sesede pod zgornji rob kalupa, je treba beton dodajati, da vedno sega preko zgornjega roba kalupa. Tudi v tem primeru razporedi udarce enakomerno po površini vzorca.



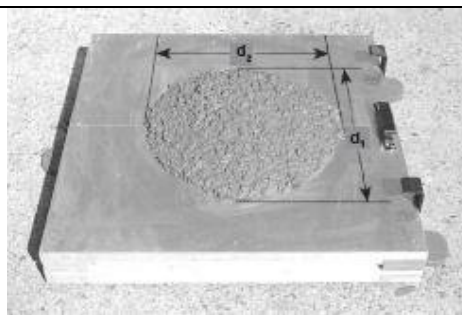
4. V primeru uporabe lijaka, le tega previdno odstrani. Potem s pomočjo jeklene palice za zgoščevanje odstrani odvečni beton tako, da vodiš palico s kretnjami žaganja ali valjanja po zgornjem obodu kalupa. Nato odstrani beton, ki je padel na osnovno ploščo/površino ter ploščo očisti.



5. Takoj po končanem koraku 4 vertikalno, s počasnim in enakomernim vlečenjem navzgor, odstrani kalup v 5-tih do 10-tih sekundah, pri čemer se premiki v horizontalni smeri in sukanje kalupa ne smejo prenašati na beton. Celoten postopek od začetka polnjenja do odstranitve kalupa je treba izvesti brez prekinitve najpozneje v 150 sekundah. Ko začneš z odstranjevanjem kalupa vključi uro stoparico in jo ustavi, ko preskušavec zavzame končno obliko po preoblikovanju zaradi delovanja lastne teže (ko se več ne poseda in razleza). Čas $t-d$ do končnega razleza preskušanca s posedom zapiši na 0,1 s natančno.



6. Kalup položi na osnovno ploščo ob preoblikovan preskušavec. Kalup je lahko tudi obrnjen. Položi palico za zgoščevanje horizontalno čez kalup tako, da sega čez poseden preskušavec. Z merilom določi razdaljo med prvotno višino preskušanca (višina kalupa) in najvišjo točko posedenega betonskega preskušanca. Višino poseda (h) zabeleži.

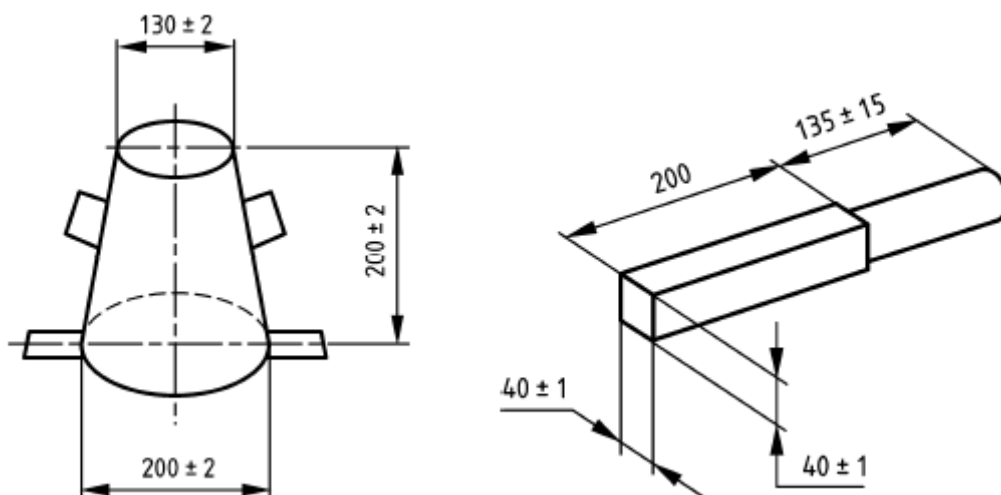


7. Na koncu z merilom izmeri največji dimenziji d_1 in d_2 razleza s posedom v dveh smereh, vzporednih s stranicami osnovne plošče (slika), in obe meritvi zaokroži na najbližjih 10 mm in jih zabeleži.

4.3 Preskus z razlezom; SIST EN 12350-5

Metoda z razlezom je zasnovana na merjenju deformacij zbitega betonskega konusa. Na stresalno mizico postavimo skrajšani kovinski konus (slika 34), ki ga napolnimo v dveh približno enakih plasteh. Vsako plast nabijemo z desetimi udarci z leseno palico prečnega

prereza 4x4 cm. Po nabijanju odstranimo presežek betona tako z vrha konusa kot z stresalne mizice, če je pri polnjenju padel na stresalno mizico.

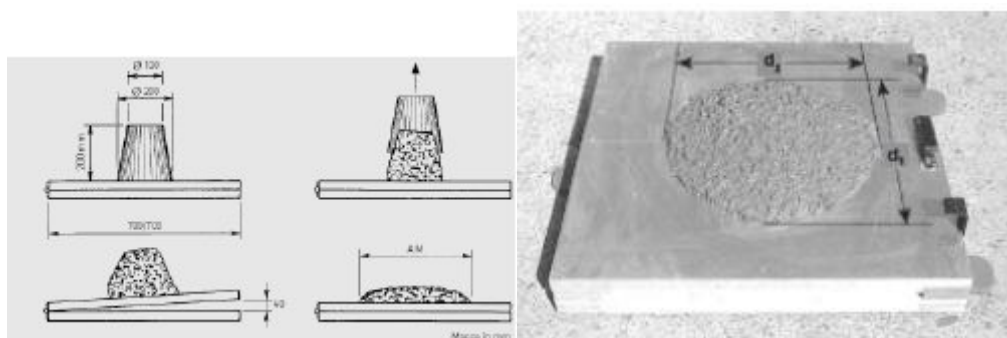


Slika 34: Standardni kovinski konus in standardna lesena palica [12]

Po 30-ih sekundah pazljivo odstranimo kovinski konus v času od 1 do 3 sekunde. Stopimo na nožico spodnje plošče stresalne mize, dvignemo zgornjo ploščo za 4cm (do mejnika) in jo spustimo da prosto pade. Postopek ponovimo 15 krat. Betonska mešanica se razleze po stresalni mizici (slika 35) in izmerimo dva medsebojno pravokotna premera razlezene betonske mešanice (d_1 in d_2), vzporedna z robovi stresalne mizice. Dobljeni rezultat je povprečje izmerjenih premerov. Dobljene rezultate zaokrožimo na 10mm.

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ [mm]}$$

(Enačba 2)



Slika 35: Prikaz metode preskusa z razlezom [8]

Mera konsistence je povprečje obeh izmerjenih premerov (d). S pomočjo preglednice 17, nato določimo konsistenčno stopnjo v skladu z določili standarda SIST EN 206-1:2003.

Preglednica 17: Razredi konsistence za metodo preskusa z razlezom SIST EN 206-1 [8]

Razredi razleza

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

4.4 Vsebnost zraka – metode s pritiskom; SIST EN 12350-7 [20]

Vsebnost zraka v normalno težkih betonih in težkih betonih po SIST EN 12350-7, za lahke betone pa po ASTM C 173. Vsebnost zraka v svežem betonu določimo s porozimetrom, ki je prikazan na sliki 36. Standardna posoda porozimetra mora imeti minimalno kapaciteto 5l in zdržati pritisk 0,2 MPa. Naprava mora določati prostornini zraka od 0% do vsaj 8% oziroma 10%. Skala prikazovanja poroznosti pa mora biti natančna minimalno na 0,1% v intervalu od 0 do 3%, 0,2% v intervalu od 3 do 6% in 0,5% v intervalu od 6 do 10%.



Slika 36: ASTM C 173 [13]



Slika 37: Prozimeter SIST EN 12350-7

Standardno posodo porozimetra napolnimo s svežo betonsko mešanico v treh slojih. Vsak sloj posebej zgostimo. Pri tem moramo paziti, da se z vibracijsko iglo ne dotikamo sten posode porozimetra. Pri metodi določanja vsebnosti zraka lahko svežo betonsko mešanico zgostimo z: vibracijsko iglo, vibracijsko mizo, jekleno palico krožnega prečnega prereza (ϕ 16mm) ali z jekleno palico kvadratnega prečnega prereza dimenzije 25mm x 25mm. Višek materiala odstranimo z ravnilom tako, da ostane površina betona gladka. Nalagajoče površine osnovne posode in pokrova pazljivo očistimo in na osnovno posodo pritrdimo pokrov. Skozi odprtino v pokrovu vlijemo vodo, s katero zapolnimo prostor med osnovno posodo in pokrovom. Ko iz druge odprtine prenehajo izhajati zračni mehurčki ventila zapremo. Nato z ročno črpalko vnesemo toliko zraka v predkomoro, da kazalec na manometru pokaže nič (takrat je zračni pritisk v predkomori 98,066 kPa). Nato odpremo ventil med predkomoro in prostorom nad betonom, ki je zapolnjen z vodo. Manometer nam prikaže padec tlaka in sicer kot delež zračnih por v odstotkih.



Slika 38: Porozimeter

4.5 Stopnja zgoščenosti; SIST EN 12350-4

Ta metoda daje dobre kvantitativne rezultate pri definiranju konsistence trdih in srednjeplastičnih mešanic, kjer določimo stopnjo zgoščenosti betonske mešanice z razmerjem višin pred in po vibriranju betona v kovinskem kalupu standardnih dimenzij. Standardni kalup dimenzije 200x200x400mm napolnimo do vrha z betonsko mešanico. Pri vgrajevanju mora betonska mešanica padati v kalup z višine 10cm preko ene od širših stranic zidarske žlice. Ko se kalup napolni, odstranimo presežek betona in ga poravnamo z zgornjo površino. Betonsko

mešanico vibriramo enako kot pri vgrajevanju betona na gradbišču (z vibracijsko iglo ali na vibracijski mizici). Vibriranje z vibracijsko iglo mora imeti frekvenco minimalno 120 Hz (7200 ciklov na minuto) v našem primeru je bila frekvenca vibracijske igle 216 Hz (1300 ciklov na minuto), pri vibriranju z vibracijsko mizico pa je minimalna frekvenca 40 Hz (2400 ciklov na minuto).

Po končanem vibriranju izmerimo višino od površine vgrajenega betona do vrha kalupa v vseh štirih vogalih in izračunamo merodajno (povprečno) višino.

Na sliki 39 lahko vidimo, kako se betonska mešanica po vibriranju sesede skupaj in na podlagi tega izračunamo stopnjo zgoščenosti.

$$C = \frac{h_1}{h_2} = \frac{h_1}{h_1 - s} \quad (\text{Enačba 3})$$

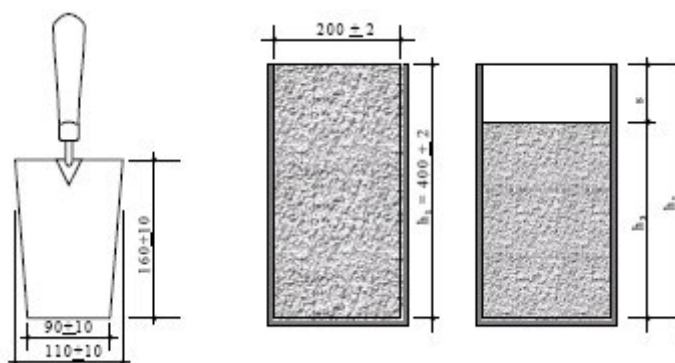
kjer je;

h_1 notranja višina kalupa

h_2 višina zgoščenega betona

s povprečna oddaljenost površine zgoščenega betona od zgornjega roba kalupa

C stopnja zgoščenosti



Slika 39: Betonske mešanice pred vibriranjem in po njem [8]

Po tej metodi je mera konsistence razmerje med začetno višino betona in višino po vibriranju. Poročilo o preiskavi konsistence se mora sklicevati na ustrezeni standard in mora med ostalim vsebovati datum in čas preiskave, oznako vzorca in izmerjeno zgoščenost (indeks zgoščenosti) na dve decimalki natančno. Takšno metodo največkrat srečamo v obratih za prefabricirane izdelke, kjer se uporablja bolj suh beton.

Preglednica 18: Razredi konsistence za stopnjo zgoščenosti SIST EN 206-1 [8]

Razredi zgostitve

Razred	Razredi zgostitve
C0	$\geq 1,46$
C1	1,45 do 1,26
C2	1,25 do 1,11
C3	1,10 do 1,04

5 LASTOSTI STRJENEGA BETONA

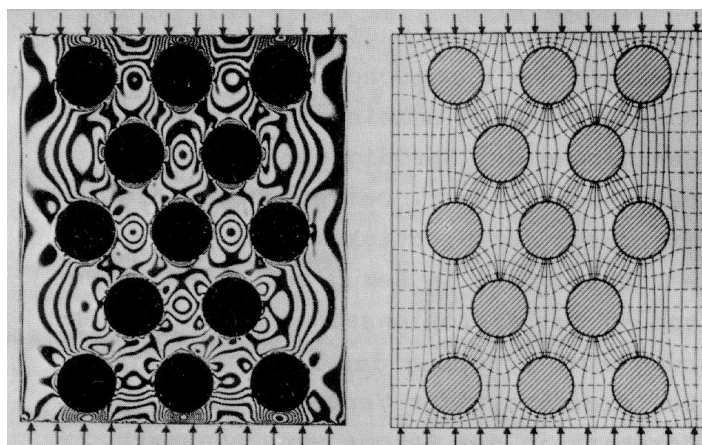
5.1 Lastnosti betona

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

Trdnost materiala definiramo kot njegovo sposobnost prenašati obremenitev brez porušitve. Porušitev materiala je v določenih primerih identična z nastankom razpok. Vendar pa v betonu, za razliko od mnogih ostalih konstrukcijskih materialov, obstajajo v materialu razpoke že pred njegovo obremenitvijo. Zato je pri betonu trdnost pri enoosnem tlaku ali nategu definirana z napetostjo, ki je potrebna za porušitev betona in je sinonim za stopnjo poškodovanosti materiala, pri kateri doseže napetost največjo vrednost.

5.2 Obnašanje betona pri enoosnem tlaku

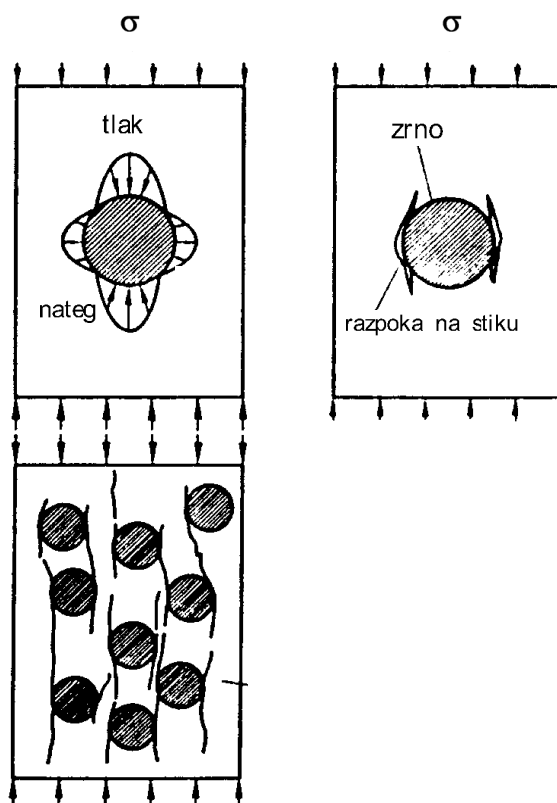
Poleg materialno pogojenih nehomogenosti vplivata na moten potek silnic predvsem različna modula elastičnosti cementnega kamna in agregata. Napetostno-optične metode izpeljane na modelnih betonih prepričljivo ponazarjajo, da bolj tog agregat privlači inducirane glavne napetosti. Zato napetosti ne potekajo v smeri zunanje obtežbe, ampak, primerljivo z nosilnostjo prostorskega paličja, potekajo koncentrirano med agregatnimi zrni (Slika 40).



Slika 40: Napetostno-optično registriranje glavnih napetosti v modelnem betonu [2]

Pri homogeni zunanji obremenitvi se torej v notranjosti betonskega elementa vzpostavi večosno napetostno stanje z, za material kritičnimi, nateznimi napetostmi. Hkrati pa se, poleg manj obremenjenih delov, pojavijo v elementu tudi območja koncentriranih napetosti. V teh visoko obremenjenih področjih sledi prekoračitvi lokalne trdnosti najprej omejeno trajno oblikovanje razpok, z naraščanjem zunanje obtežbe pa povzroči širjenje teh razpok trajno spremembo nosilnega sistema.

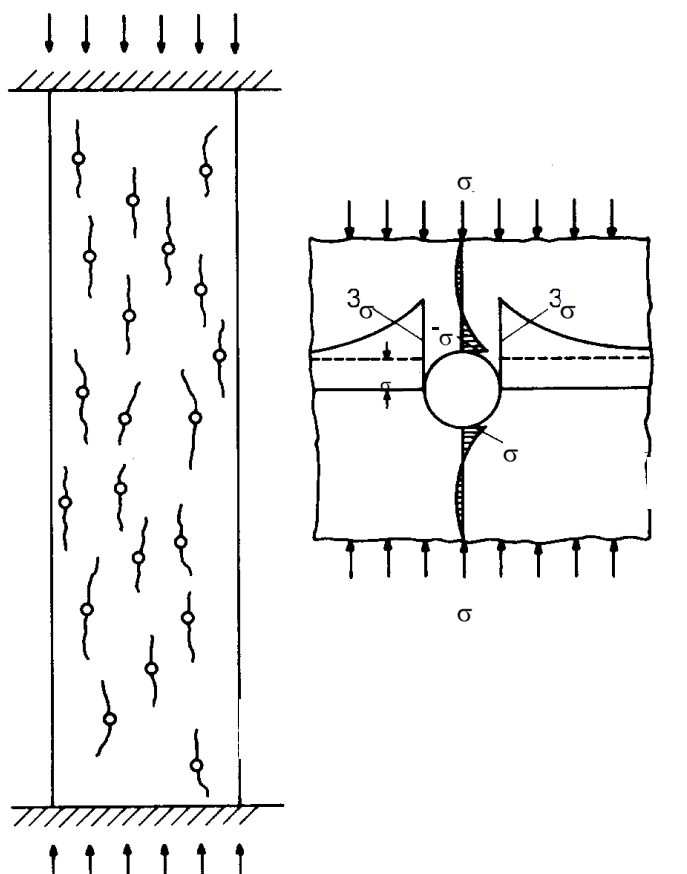
Če ponovno primerjamo strukturo betona s prostorskim paličjem, izhajajo iz agregatnih zrn, ki predstavljajo vozlišča sistema, tako tlačno kot natezno obremenjene palice (Slika 40). S pomočjo teoretičnih računskih modelov določen potek napetosti okrog krožnega agregatnega zrna je shematsko prikazan na sliki (Slika 41). Velikost napetosti je odvisna od premera agregatnega zrna, razmerje modulov elastičnosti agregata in matrice ter razmerja trdnostnih lastnosti agregata in matrice.



Slika 41: Porazdelitev napetosti okrog agregatnega zrna v homogeni matrici in oblikovanje mikrorazpok pod tlačno obremenitvijo [2]

Če se opremo na mehanske lastnosti agregata in cementne matrice, znaša natezna trdnost agregatov, ki se uporabljajo za izdelavo običajnih konstrukcijskih betonov, med 10 in 15MPa. Natezna trdnost običajnega betona je bistveno manjša od natezne trdnosti agregata, manjša je celo od natezne trdnosti cementnega kamna. Kot je natančneje razloženo v predhodnih poglavjih, na nosilnost betona pomembno vpliva predvsem spetje med obema osnovnima komponentama, to je tako imenovano stično območje med agregatom in cementno matrico. Zaradi nizke natezne trdnosti stičnega območja in napak v strukturi cementnega kamna, je zunanja tlačna obtežba, pri kateri se oblikujejo prve z obtežbo inducirane mikrorazpoke, bistveno nižja od porušne obtežbe betonskega elementa. Med obremenjevanjem betonskega elementa z enakomerno tlačno zunanjo obtežbo se torej najprej oblikujejo mikrorazpoke v smeri zunanje obtežbe v ekvatorskem področju zrn (Slika 41) in na polih zračnih por (Slika 42). Z naraščanjem zunanje obtežbe razpoke napredujejo, kar ima za posledico spremeno geometrije znotraj materiala, ki s premiki agregatnih zrn v prečni smeri povzroči dodatne

natezne napetosti. Razpoke, ki rastejo še naprej v smeri delovanja zunanje obtežbe, se med seboj povezujejo in kot paličast sveženj prepredajo preizkušanelec (Slika 41). Zaradi izklona ali prestriga nastopi končna porušitev vzorca. Torej je porušitev betonskega elementa pod tlačno obtežbo, zaradi heterogenosti materiala, v bistvu posledica natezne porušitve.

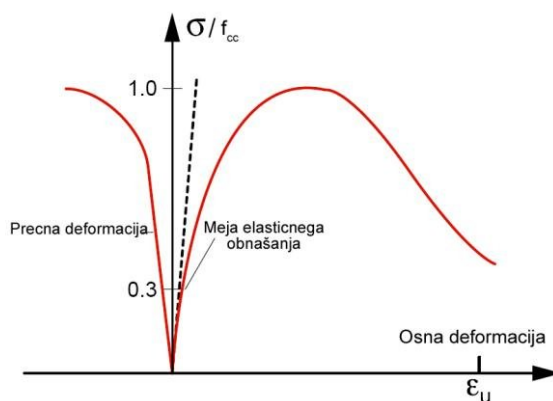


Slika 42: Shematični prikaz mikrorazpok v poroznem materialu in porazdelitev napetosti okrog krožne pore pri enosni tlačni obremenitvi [2]

5.3 Modul elastičnosti in Poissonov koeficient

Pri enosnem tlačnem preskusu na standardnem betonskem valju ali prizmi lahko določimo poleg tlačne trdnosti betona (f_{cc}) tudi statični modul elastičnosti betona (E_{cc}) in Poissonov koeficient, če poleg sile kontinuirno merimo še vzdolžno/osno deformacijo (v smeri enosne sile) in prečno deformacijo (prečno na enosno silo), (Slika 43). Statični modul elastičnosti je največkrat definiran kot razmerje med napetostjo in pripadajočo deformacijo pri 30-40%

tlačni trdnosti betona (meja elastičnega obnašanja), Poissonov koeficient pa kot absolutna vrednost razmerja med prečno in vzdolžno deformacijo pri isti napetosti.

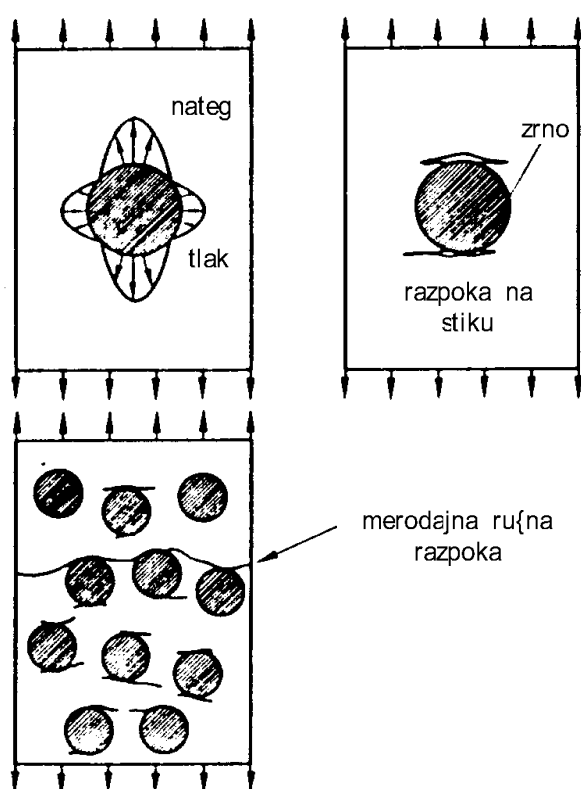


Slika 43: Sovisnost med napetostjo ter osno oziroma prečno deformacijo [2]

Tlačna trdnost betona je odvisna predvsem od v/c razmerja, vrste cementa (razmerja med cementnimi materiali, ki različno vplivajo na trdnost), stopnje hidratacije ter seveda od karakteristik stičnega območja. Ker pa so le te odvisne od velikosti, oblike, teksture in mineraloške sestave mineralnega agregata, pa tudi od njegove zrnastosti (vpliva na segregacijo in izcejanje vode v betonu), vpliva karakteristik mineralnega agregata na tlačno trdnost betona ne smemo spregledati. Po drugi strani pa je med karakteristikami grobih agregatnih zrn, ki vplivajo na modul elastičnosti betona, najpomembnejša njegova poroznost, ki ne vpliva na tlačno trdnost običajnih betonov. Poroznost agregata je mera njegove togosti, to je sposobnosti, da se upira deformaciji cementne malte. V splošnem velja, da z večanjem grobih zrn agregata z visokim elastičnim modulom v betonski mešanici, narašča tudi modul elastičnosti betona. Na modul elastičnosti pa vplivajo še velikost največjega zrna agregata, oblika zrn in tekstura površine, zrnastostna sestava agregata in mineraloška sestava agregata – to so karakteristike agregata, ki vplivajo na karakteristike stičnega območja in imajo zato vpliv tudi na tlačno trdnost betona. Elastični modul cementnega kamna in stičnega območja pa sta določena s poroznostjo teh dveh faz.

5.4 Natezna trdnost betona (cepilni natezni preskus)

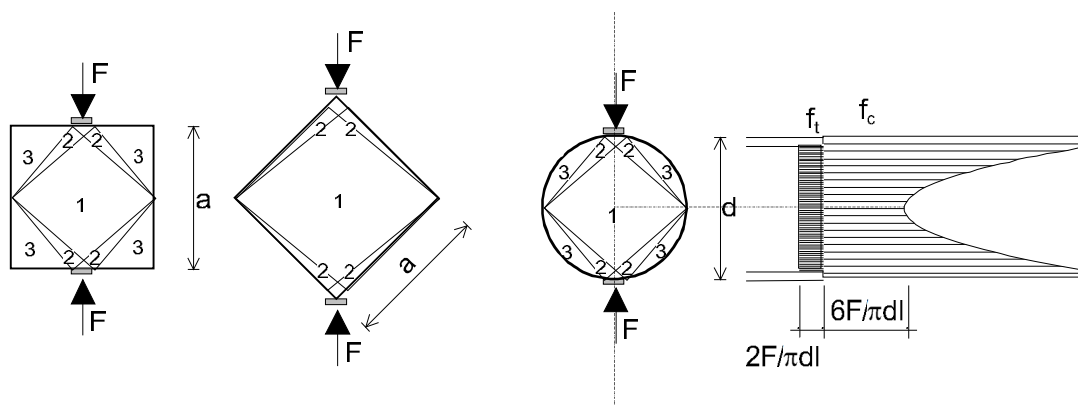
Pri enakomerni natezni obtežbi betonskega elementa so slike koncentracij napetosti in razpok obrnjene za 90° (Slika 44). Mikrorazpoke ležijo na polih agregatnih zrn. V tem primeru je širjenje razpok pospešeno, saj vpeljana zunanja obtežba pri tem neposredno sodeluje. Prečni prerez, ki je sposoben prenašati obtežbo, pravokotno na smer delovanja zunanje obtežbe usmerjenimi razpokami, postopoma manjša. Zato povzroči rušna razpoka praviloma hitro natezno porušitev.



Slika 44: Oblikovanje mikrorazpok pod natezno obremenitvijo [2]

Rezultat opisanega dogajanja v strukturi betona pri enosni natezni obremenitvi je nizka natezna trdnost betona, ki se giblje med 0,07 in 0,11 njegove tlačne trdnosti. Razmerje je manjše pri betonih z višjo tlačno trdnostjo. Zaradi tega je večina betonskih elementov dimenzionirana ob predpostavki, da je beton sposoben prevzeti tlačne napetosti, nateznih pa ne. Seveda pa natezne trdnosti betona ne smemo popolnoma ignorirati, saj je oblikovanje in širjenje razpok v strukturi betona posledica lokalne prekoračitve natezne trdnosti materiala.

Določitev natezne trdnosti betona z enosnim nateznim preskusom je zaradi krhke narave betona težavno in se v praksi redko izvaja. Najbolj ustrezno oceno natezne trdnosti dobimo z cepilnim nateznim preskusom, pri katerem uporabimo standardne betonske preizkušance brez posebne priprave (Slika 45).



Slika 45: Cepilni natezni preskus [2]

Kot rezultat preiskave dobimo natezno trdnost, ki je 10-15% večja od enosne natezne trdnosti betona.

Izboljšanje nosilnosti betona lahko dosežemo s povečanjem trdnosti stika med agregatom in cementnim kamnom ter s povečanjem natezne trdnosti cementnega kamna, ali pa s prilagoditvijo modula elastičnosti agregata. Zadnje se da izpolniti le pogojno, saj visokotrdni cementi povečajo elastični modul cementnega kamna le na okrog 50% modula elastičnosti naravne kamnine. Določeno stopnjo izboljšanja natezne trdnosti običajnega betona dosežemo s kombinacijo znižanja koncentracij napetosti z uporabo zbitega agregata z zvezno zrnastostno sestavo, uporabo visokotrdnega cementa, agregatnih zrn s hrapavo površino, izbire manjšega vodocementnega razmerja in dobre zgostitve svežega betona.

5.5 Transportni mehanizmi v materialih s cementnim vezivom

Kompleksnost mikrostrukture materialov s cementnim vezivom (injekcijskih mas, malt in betonov) predstavlja velik izziv za teoretične in eksperimentalne preiskave njihovih

transportnih lastnosti. Transport snovi v teh materialih je odvisen od poroznosti, porazdelitve por po velikosti, povezanosti in zapletenosti pornega sistema. Kot smo videli v predhodnih poglavjih, so omejene lastnosti odvisne od uporabljenih materialov, v/c razmerja, stopnje hidratacije, priprave in vgradnje materiala ter od nege. Ker pa so vsi naštetih materiali porozni materiali, praviloma veljajo enaki mehanizmi kot za ostale porozne materiale.

Običajno se transportni mehanizmi v poroznih materialih shematsko prikažejo s pomočjo modela idealizirane pore, zožene na obeh straneh. Ker pa je voda glavni vir propadanja materialov s cementnim vezivom, se praviloma mehanizmi transporta opišejo na primeru vode. Ločimo tri transportne mehanizme procesa fizikalne penetracije v porozni material: tečenje pod tlakom, difuzija in sorbcija. Mi se bomo v nalogi omejili na tečenje pod tlakom.

5.5.1 Tečenje pod tlakom

Je tečenje ali gibanje plina ali tekočine zaradi razlike v tlakih. Razlika v tlakih je lahko posledica razlike v gostotah (zaradi razlik v temperaturi) ali pa je posledica delovanja pritiskov (največkrat gre za razliko hidravličnih pritiskov). Gibanje plina ali tekočine je lahko turbulentno ali laminarno in ga opišemo z vektorskim poljem. S plinom ali tekočino se gibljejo tudi raztopljeni delci, ki jih le ti nosijo s seboj. Prenos snovi v plinu ali v tekočini zaradi naravnega termalnega gibanja ali mešanja imenujemo konvekcija, prenos snovi zaradi delovanja hidravličnih pritiskov imenujemo tudi vsiljena konvekcija ali advekcija. Pri advekciji se delci gibljejo z povprečno hitrostjo toka. Z izrazom advekcija pa se velikokrat poimenuje samo prenos snovi s pomočjo horizontalnih tokov. V primeru, ko obravnavamo advekcijsko tečenje v nezasičenem poroznem materialu je potrebno upoštevati tudi delež vlage v nezasičenem materialu.

Hitrost gibanja skozi porozne materiale s cementnim vezivom je dovolj majhna, da je gibanje bodisi plina ali tekočine laminarno, zato ga lahko zapišemo z Darcy-jevim zakonom.

$$u_x = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (\text{Enačba 4})$$

kjer je za tok v x-smeri:

u_x - povprečna hitrost toka

$\partial h / \partial x$ – sprememba tlaka v x smeri

K - konstanta, ki jo imenujemo koeficient prepustnosti, z enoto m/s

Koeficient prepustnosti K vode se za betone giblje med 10^{-8} in 10^{-10} .

6 METODE PREISKAV STRJENEGA BETONA IN ZAHTEVE STANDARDOV

6.1 Tlačna trdnost preizkušancev; SIST EN 12390-3

Tlačna trdnost betona je definirana kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Za klasifikacijo se lahko uporabi karakteristična tlačna trdnost valjev s premerom 150mm in višino 300mm po 28 dneh (f_{ck-cyl}), ali pa karakteristična tlačna trdnost kock s stranico 150mm po 28 dneh. Preizkušanci naj bi bili pred preiskavo ves čas v vodi ali pa v okolju z najmanj 95% relativno vlažnostjo in pri temperaturi $20\pm 3^{\circ}\text{C}$. Na osnovi znanih dimenzij in ugotovljene porušne sile določimo tlačno trdnost preizkušanca. V preglednici 19 so razredi tlačne trdnosti za normalno težak in težak beton po standardu SIST EN 206-1:2003.

Karakteristična tlačna trdnost betona je vrednost, pod katero je za preiskani beton možno pričakovati največ predpisan odstotek vseh rezultatov preiskav tlačne trdnosti. Predpisan odstotek imenujemo fraktila, njegovo vrednost pa predpisuje ustrezen nacionalni ali mednarodni standard. JUS standard za beton je predpisoval 10% fraktilo, SIST EN standard pa predpisuje 5% fraktilo.

Preglednica 19: Razredi tlačne trdnosti za normalno težak in težak beton po SIST EN 206-1

[14]

Trdnostni razredi	Minimalna karakteristična trdnost valja $f_{ck, cyl}$ (N/mm²)	Minimalna karakteristična trdnost kocke $f_{ck, cube}$(N/mm²)
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
C100/115	100	115

Trdnostni razred betona (C) je tlačna trdnost izražena v (MPa), ki izhaja iz karakteristične tlačne trdnosti betona pri starosti betona 28dni. Na primer: C 35/45 pomeni, da je karakteristična tlačna trdnost pri starosti 28 dni dobljena na valju vsaj 35 MPa in ne več kot 40 MPa, na kocki pa vsaj 45 MPa in ne več kot 50 MPa.

Tlačna trdnost je podana z enačbo:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (\text{Enačba 5})$$

kjer je:

- f_c tlačna trdnost v [N/mm²];
- F maksimalna porušna sila [KN];
- A_c površina vodoravnega prereza preizkušanca [mm].

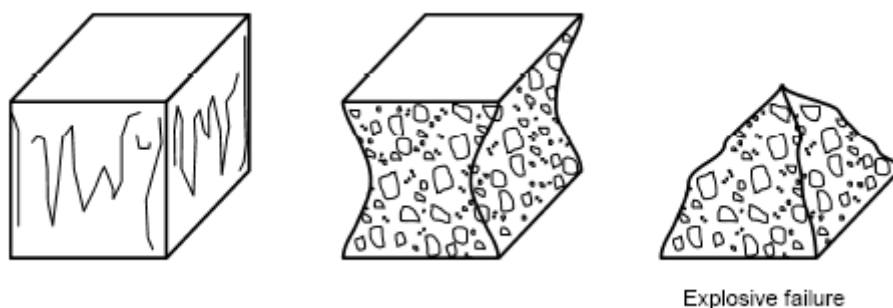
Tlačna trdnost mora biti zaokrožena na minimalno 0,1 MPa [N/mm²] natančno.

6.1.1 Določevanje tlačne trdnosti betona

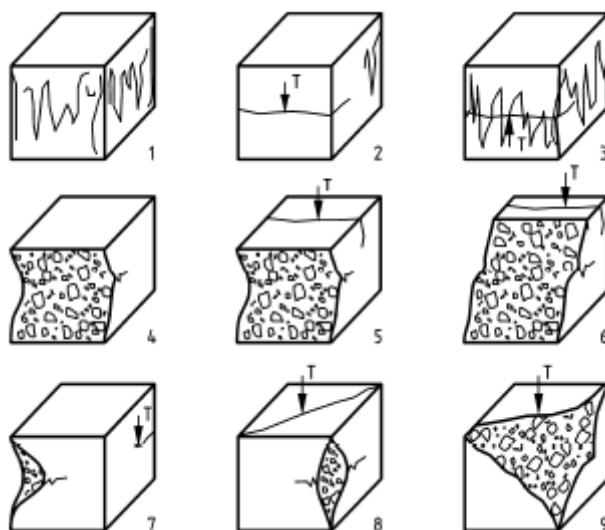
Če je treba določiti tlačno trdnost betona, mora določanje temeljiti na preskusih izvedenih na kockah s stranico 150mm ali na valjih s premerom 150mm in višino 300mm, skladnih s SIST EN 12390-1, izdelanih in negovanih po SIST EN 12390-2 iz vzorcev vzetih po SIST EN 12350-1.

Preden postavimo preskušane v stiskalnico, obrišemo z njegove površine odvečno vlago. Vse površine za prenos obtežbe na preskusni napravi pobrišemo do čistega in s tistih površin preskušanca, ki bodo v stiku z stiskalnimi ploščami, odstranimo vse proste trde delce oziroma drug tuj material. Za morebitno podlaganje preskušanca in stiskalnih plošč smemo uporabljati le pomožne stiskalne plošče ali distančne bloke katere pa predpisuje SIST EN 12390-4:2001. Preskušance v obliki kocke moramo postaviti tako, da je smer uvajanja sile pravokotna na smer vgrajevanja. Preskušane moramo postaviti na sredino spodnje plošče s točnostjo ± 1 % od označene velikosti stranice kocke, oziroma od označenega premera valja. Če uporabljamo pomožne stiskalne plošče, jih je treba poravnati z zgornjo in spodnjo ploskvijo preskušanca. Izberemo konstantno hitrost obremenjevanja 0,6 ± 0,2 MPa/s (N/(mm²·s)). Obremenitev uvajamo na preskušane brez sunkov in jo enakomerno povečujemo z izbrano konstantno hitrostjo ± 10 %, do največje možne obremenitve. Na osnovi znanih dimenzij in ugotovljene porušne sile določimo tlačno trdnost preizkušanca.

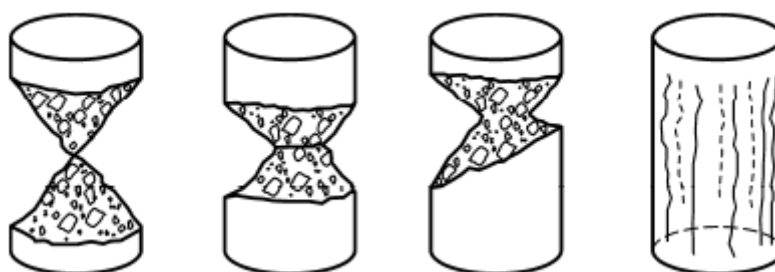
Če je preizkušane primerno oziroma neprimerno porušeno je možno preveriti v SIST EN 12390-3, kar prikazujejo spodnje slike:



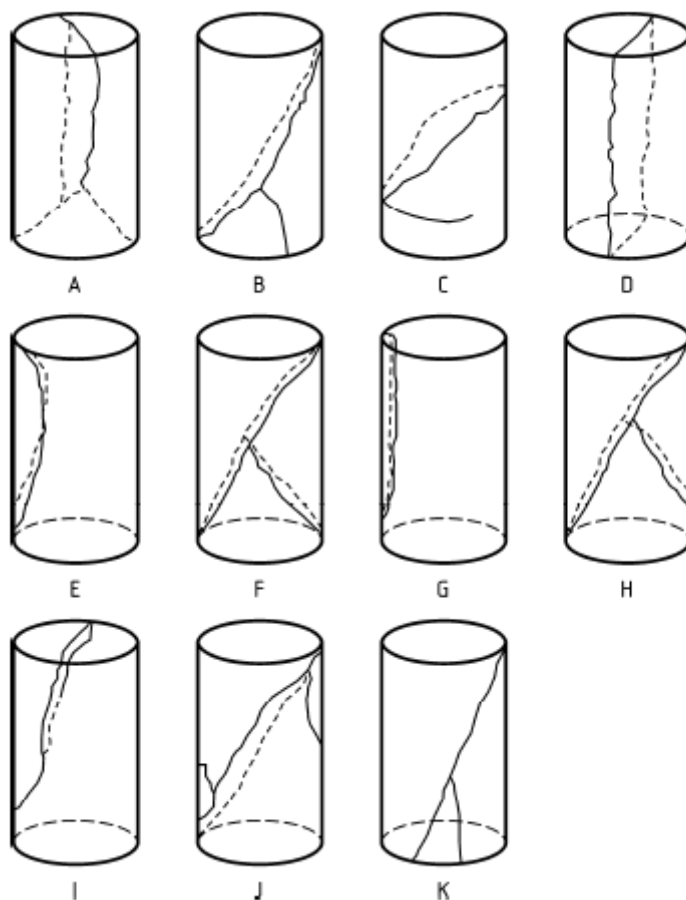
Slika 46: Shematični prikaz pravih porušitev betonskih kock po SIST EN 12390-3 [15]



Slika 47: Shematični prikaz nepravilnih porušitev betonskih kock po SIST EN 12390-3 [15]



Slika 48: Shematični prikaz pravilne porušitve valjastih betonskih preskušancev po SIST EN 12390-3 [15]



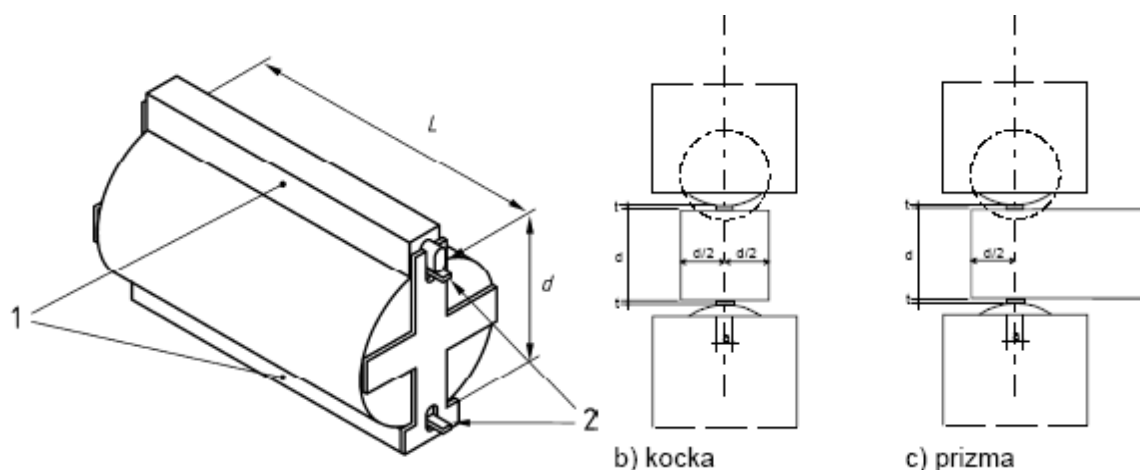
Slika 49: Shematični prikaz nepravilne porušitve valjastih betonskih preskušancev po SIST EN 12390-3 [15]

Če je porušitev neprimerna je to potrebno navesti v rezultatih, in posvetiti pozornost možnim pomanjkljivostim pri postopku preizkušanja ali pa preveriti ustreznost naprave.

6.2 Natezna razcepna trdnost preizkušancev; SIST EN 12390-6

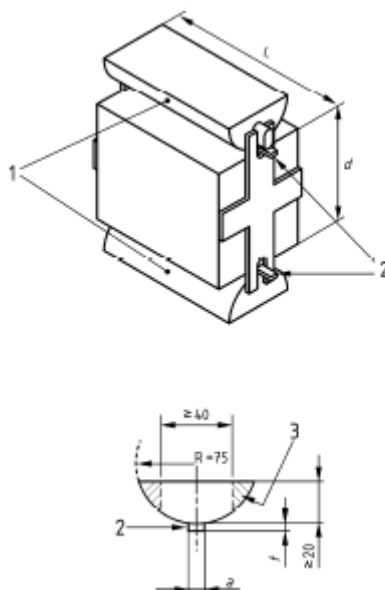
Natezna razcepna trdnost je pomembna pri oceni obremenitve, pri kateri nastanejo razpoke v betonu. Postopek določanja natezne razcepne trdnosti betona je opisan v standardu SIST EN 12390-6.

Rezultat merjenja razcepne trdnosti betona je odvisen od oblike in dimenzije preizkušanca. Betonske prizme in kocke cepimo z pomočjo ukrivljenih plošč medtem ko valjaste preizkušance cepimo z ravnimi ploščami (slika 50). Betonske kocke prenesejo do 10% večje obremenitve od betonskih valjev. Betonske kocke dimenzije 150x150x150mm, dajejo nižje trdnosti kot kocke dimenzij 100x100x100mm. Za preizkušance valjaste oblike pa vpliva velikosti valja ne moremo opredeliti. Standard določa, da moramo za cepljenje uporabiti mehke lesene trakove, ki pa jih lahko uporabimo le če: imajo prostorninsko maso 900kg/m^3 ali več, če imajo širino $15\pm 1\text{mm}$, debelino $4\pm 1\text{mm}$ in dolžino kolikor je preizkušanec dolg. Ti leseni trakovi naj bi se uporabili samo enkrat. Standard določa zahteve za valje, medtem ko so zahteve za preskušanje kock in prizem navedene v dodatku.



Slika 50: Shematični prikaz nateznega cepilnega preskusa na valju, kocki in prizmi [8]

Preizkušanci, kakor pravi standard, naj bi bili valjaste oblike in skladni z SIST EN 12390-1, izdelani in negovani po SIST EN 12390-2 ter iz vzorcev vzeti po SIST EN 12350-1. Če preizkušanci ne izpolnjujejo teh zahtev morajo biti zavrjeni ali pa popravljeni tako, da zadovoljijo zahteve standarda. Pri preizkušarju moramo biti pozorni na pozicijo preizkušanca in lesenih trakov in da je preizkušanec razcepljen na sredini, kot prikazuje spodnja slika.



Slika 51: Shematični prikaz pravilne postavitve preskušanca pri natezni razcepni trdnosti [16]

Najprej določimo konstantno stopnjo obremenjevanja znotraj območja 0,04 MPa/s – 0,06 MPa/s. Po začetni obremenitvi, ki ne presega 20% porušne obremenitve, povečujemo silo brez večjih sunkov obremenitve, zaradi zahtevanega konstantnega in neprekinjenega nanosa.

Zahtevana hitrost nanašanja sile je podana z enačbo:

$$R = \frac{s \cdot \pi \cdot L \cdot d}{2} \quad (\text{Enačba 6})$$

kjer je:

- R zahtevana hitrost nanašanja sile [N/s];
- L dolžina preizkušanca [mm];
- d premer oz. širina preizkušanca [mm];
- s hitrost obremenjevanja [MPa/s].

Natezna razcepna trdnost pa je podana z enačbo:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (\text{Enačba 7})$$

kjer je:

- f_{ct} natezna razcepna trdnost [MPa];
- F maksimalna sila [N];
- L dolžina raznosa sile [mm];
- d nazivna dimenzija prečnega prereza [mm].

6.3 Globina vpijanja vode pod pritiskom; SIST EN 12390-8

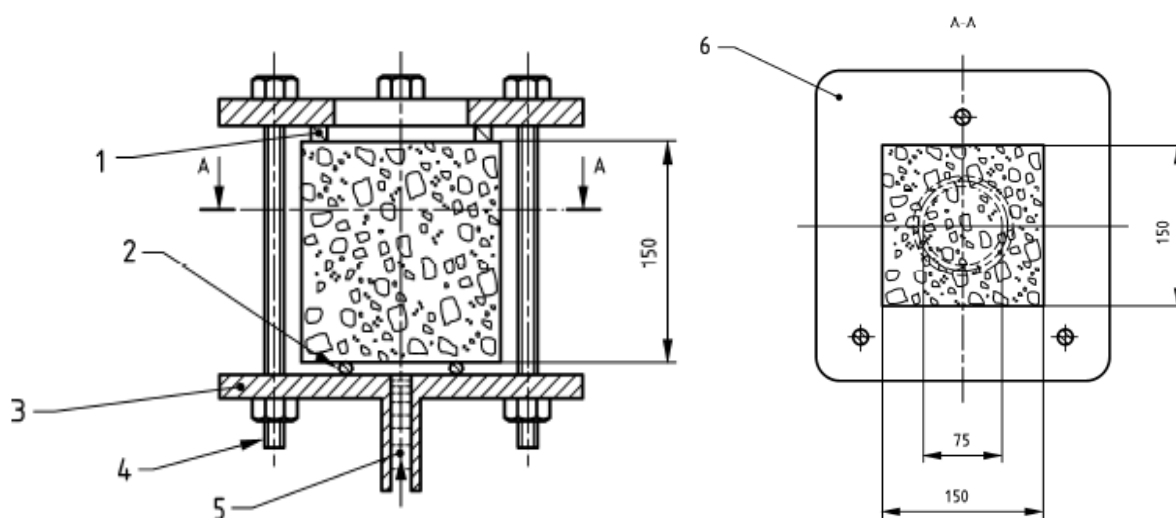
Takšen preskus opravljamo, kadar nas zanima odpor betona na različnih objektih ali konstrukcijah, na katere lahko deluje podzemna voda, ali druge tekočine. Problem lahko nastane pri zahtevnih objektih, kot so: inženirske pregrade, vodotesne betonske konstrukcije, odlagališča radioaktivnih odpadkov, bazeni, čistilne naprave, skladišča plinov, objekti kjer moramo zagotoviti visoko kakovost zaščitne plasti betona nad armaturo..., kjer prodor vode negativno vpliva na okolico ali na sam objekt.

Če se zahteva, je treba odpornost betona proti prodoru vode preskušati po EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni in največ 35 dni, na 3 preizkušancih, izdelanih iz vzorcev svežega ali strjenega betona iste vrste in enake starosti (vzorci svežega betona je treba odvzeti iz različnih mest šarže ali prepeljane količine betona). V preglednici 20 so določene stopnje odpornosti betona proti prodoru vode PV, pripadajoče največje dovoljene vrednosti prodora vode v preizkušane pri preskusu po EN 12390-8 in največji in največji dovoljeni odklon posameznih rezultatov preskušanja od največje dovoljene vrednosti prodora vode pri ocenjevanju skladnosti s pomočjo prevzemnih števil iz preglednice 20.

Preglednica 20: Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po SIST EN 206-1 pri starosti betona najmanj 28 dni [14]

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

Preskus poteka tako, da voda pod pritiskom deluje oziroma prodira v strjen beton. Preskušanece nato razcepimo in izmerimo globino prodora vode v preskušancu. Preskušanece določenih dimenzij postavimo na primerno napravo tako, da lahko voda pod želenim pritiskom deluje na površino preskušanca in da je pritisk lahko konstanten (Slika 52). Preskušanci so lahko le betonske kocke, valji ali prizme, pri katerih pa najmanjša dimenzija površine, ki bo izpostavljena vodi pod pritiskom, ne sme biti manjša od 150mm, preostala dimenzija pa ne sme biti manjša od 100mm.



Slika 52: Shematski prikaz preskusa vodotesnosti [19]

Takoj ko preskušance razkalupimo, moramo površino, ki bo izpostavljena vodi pod pritiskom obrusiti z žično krtačo, zato da odstranimo cementno mleko s površine. Preskušance negujemo v skladu z standardom SIST EN 12390-2.

Ko je preizkušanec pravilno nameščen v napravo, namestimo delovanje vode nanj pod pritiskom 500 ± 50 kPa za obdobje 72 ± 2 h. Med preiskavo opazujemo, če naprava oziroma tesnilo prepušča vodo, ali je preskušanec dobro nameščen... Morebitne napake med preiskavo zabeležimo in tudi smiselno upoštevamo pri obdelavi rezultatov. Po končanem preskušanju preskušanec odstranimo iz naprave, ga razcepimo pravokotno na površino, ki je bila izpostavljena vodi pod pritiskom in odčitamo maksimalno globino vode v preskušancu v mm, kar pa je tudi rezultat preiskave.

6.4 Določevanje hitrosti prehoda ultrazvoka; SIST EN 12504-4

Naprava za merjenje hitrosti potovanja ultrazvoka je sestavljena iz merilnega instrumenta, dveh sond – oddajnika in sprejemnika ultrazvočnih impulzov, kablov, ki spajajo merilni instrument s sondama in kalibratorja za preverjanje točnosti merilca. Oddajnik ima lahko nastavljivo resonančno frekvenco med 10 in 200 kHz. Višja frekvenca (60 – 200 kHz) daje točnejše rezultate meritve potovalnega časa, in jih uporabljamo za kratke dolžine (<50mm). Z nižanjem frekvence pa se zmanjšujejo izgube valovanja na relativno dolgi poti med sondama. Nizke frekvence (10 – 40 kHz) pa uporabljamo za dolge dolžine (max 15m). Optimalna frekvenca in tudi najbolj uporabljana pa se nahaja med 40 kHz in 60 kHz. Pri direktni postavitvi sond je pot prehoda najkrajša, v primerjavi z poldirektno ali indirektno postavitvijo. Longitudinalni valovi potujejo skozi beton z najvišjo možno hitrostjo. Dolžina preskušanca mora biti izmerjena na $\pm 1\%$ natančno. Rezultat, hitrost prehoda ultrazvoka, pa naj bi bil na 0,01km/s natančen.

Vzorec, na katerem želimo meriti hitrost ultrazvoka, postavimo med sondi, ki jih pritiskamo na preskušanec. Potrebno je zagotoviti popolni kontakt med posamezno sondo in površino vzorca. To zagotovimo s čiščenjem in brušenjem stične ploskve betona ter z nanašanjem tankega sloja silikonske paste. Oddajnik odda skozi preskušanec frekvenčni val. Na drugi

strani preskušanca sprejemna sonda lovi oddani val in izmeri potovalni čas. Longitudinalni valovi potujejo skozi beton z najvišjo možno hitrostjo, tako da je možni čas širjenja valov skozi vzorec najkrajši. Signal skozi poškodovano območje potuje počasneje. Z izmerjenim potovalnim časom in pripadajočo dolžino poti skozi preskušane od oddajnika do sprejemnika lahko izračunamo hitrost longitudinalnih ultrazvočnih valov s spodnjo enačbo 8.

$$v = \frac{l}{t} \quad (\text{Enačba 8})$$

kjer je:

- v hitrost ultrazvočnih valov [km/s];
- l dolžina poti [mm];
- t potovalni čas [μ s].

Potovalna hitrost longitudinalnih ultrazvočnih valov skozi beton je funkcija nekaterih njegovih fizikalno-mehanskih karakteristik, kar je razvidno iz izraza:

$$v = \sqrt{\frac{E_D}{\gamma} \cdot f(\mu_D)} \rightarrow E_D = \frac{v^2 \cdot \gamma}{f(\mu_D)}; \quad f(\mu_D) = \frac{1 - \mu_D}{(1 + \mu_D)(1 - 2\mu_D)} \quad (\text{Enačba 9})$$

kjer je:

- v hitrost ultrazvočnih valov [km/s];
- E_D dinamični modul elastičnosti [MPa];
- μ_D dinamični Poissonov koeficient;
- γ prostorninska masa materiala [g/m^3].

Ultrazvočna metoda omogoča oceno homogenosti betona v obstoječih konstrukcijah. Z ustrezno kalibracijo opravljeno na betonskih preskušancih določene sestave (najprej meritev z ultrazvokom na preskušancu, ki mu nato določimo tlačno trdnost) pa lahko ocenimo tlačno trdnost vgrajenega betona z enako sestavo. Zelo je primerna za oceno homogenosti in kvalitete vgrajenega betona. V literaturi obstajajo podatki o intervalih hitrosti potovanja ultrazvoka, s pomočjo katerih lahko ocenimo kvaliteto vgrajenega betona (preglednica 21).

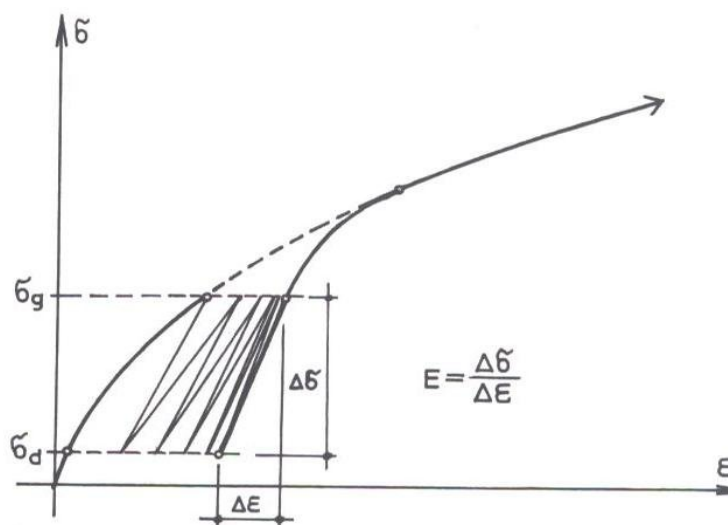
Preglednica 21: Ocena kvalitete betona glede na hitrost potovanja ultrazvoka [6]

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

6.5 Modul elastičnosti; JUS U.M1.025 [17]

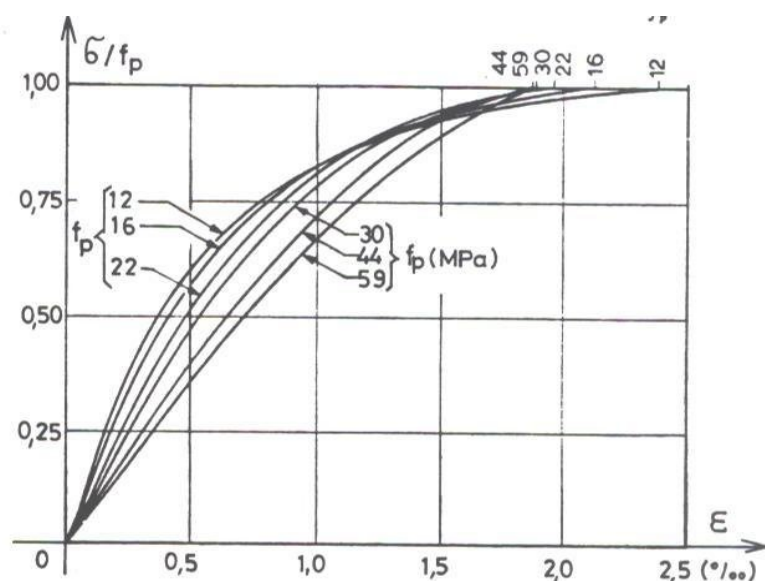
Modul elastičnosti betona se določa s preiskavami betonskih prizem (100x100x400mm) ali valjev ($d=100-150$; $h=300$) po 28 dnevnem negovanju v vodi ali v prostoru s 95% vlažnostjo. Dimenzije preskušancev so takšne, da imajo razmerje med višino in širino večje od 2.

Pri preiskavah za določanje statičnega modula elastičnosti uporabljamo postopek večkratnega tlačnega obremenjevanja in razbremenjevanja preskušancev. Predhodne preiskave so namreč pokazale, da po določenem številu ciklov obremenjevanja in razbremenjevanja, funkcija $\sigma - \epsilon$ odgovarja pravi krivulji, katere naklonski kot definira modul elastičnosti E . Kot naklona se nanaša na področje od 0,5MPa do $\frac{1}{3}$ tlačne trdnosti preskušanca (f_{cc}).



Slika 53: Grafični prikaz cikličnega obremenjevanja in razbremenjevanja [17]

Pri določevanju modula elastičnosti začnemo z obremenjevanjem pri majhni vrednosti σ_d (0,5MPa), nadaljujemo s postopnim obremenjevanjem s hitrostjo $0,6 \pm 0,4$ MPa do σ_g ($1/3f_{cc}$) in nato spet razbremenjujemo do σ_d . Cikle nato ponavljamo, dokler se krivulji dveh zaporednih ciklov ne prekrijeta. Ponavadi pri preiskavah za določevanje elastičnega modula naredimo 5 ciklov obremenjevanja in razbremenjevanja, pri 6. ciklu pa preizkušane obremenjujemo do porušitve. Pri preskušancih večje trdnosti bo ukrivljenost funkcije σ - ϵ manjša kot pri preskušancih manjše trdnosti.



Slika 54: Grafični prikaz ukrivljenosti funkcije betonov različnih trdnosti [17]

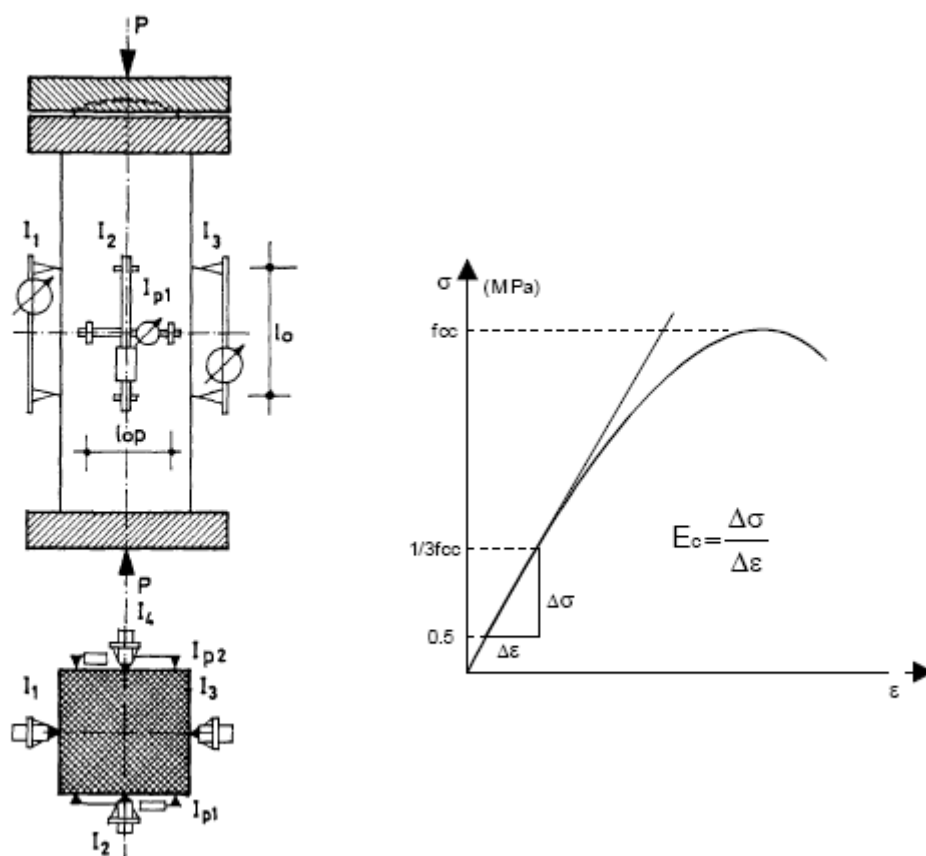
Po tem standardu, se vrednost modula elastičnosti E določa na prizmah ali valjih, kjer pa mora biti izpolnjen pogoj da je razmerje $2 \leq h/a \leq 4$, s tem da mora dimenzija a biti minimalno štiri krat večja od največjega trna agregata v betonu. Za preskušanje potrebujemo 3 preskušance za ciklično obremenjevanje in pa 3 preskušance za predhodno določitev tlačne trdnosti preskušancev. Pri preskušanju potrebujemo dve merilni mesti, kjer merimo prečne deformacije in pa dve merilni mesti, kjer merimo vzdolžne deformacije. Po končanem preskušanju določimo modul elastičnosti z naslednjo enačbo 10:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{Enačba 16})$$

kjer je:

- $\Delta\sigma$ razlika napetosti ($\sigma_g - \sigma_d$) [MPa];
- $\Delta\varepsilon$ razlika pripadajočih deformacij [%].

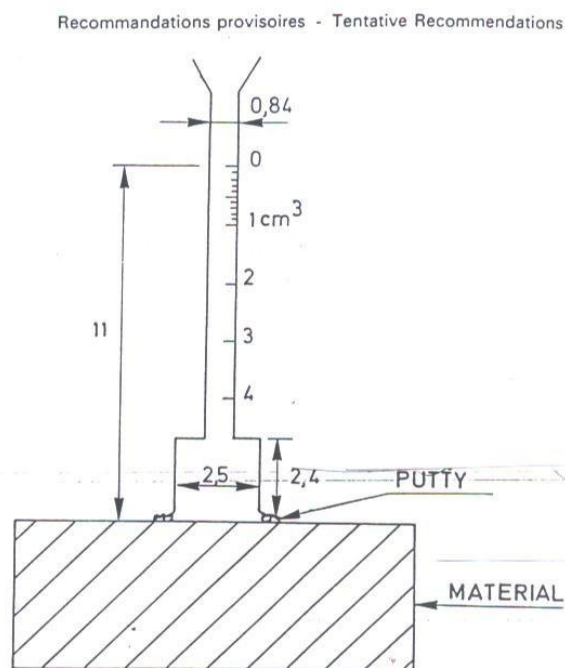
Rezultate zaokrožimo na 500 MPa, za vrednosti večje od 10000 MPa ali pa na 100 MPa, za rezultate do 10000 MPa. Na ta način dobljeno vrednost elastičnega modula imenujemo tudi statični modul elastičnosti. V primeru delovanja kratkotrajnih obremenitev, v področju napetosti od 0,5MPa do $\frac{1}{3}$ tlačne trdnosti preskušanca, beton natančno sledi Hookovem zakonu.



Slika 55: Določevanje statičnega modula elastičnosti [8]

6.6 Vodovpojnost (The pipe-method)

S preskusom vodovpojnosti po "pipe"-metodi (RILEM test N° II.4 of RILEM commission 25-PEM) določamo, koliko vode pod nizkim tlakom lahko preskušavec absorbira. Oprema za določevanje vodovpojnosti je zelo enostavna in omogoča določanje vodovpojnosti vertikalne površine ali določanje vodovpojnosti horizontalne površine. Mi smo merili vodovpojnost horizontalne površine. Na horizontalni del preskušanca smo postavili stekleno cev, kot prikazuje spodnja slika (Slika 56). Potem ko smo kalibrirano cev zatesnili na spodnjem robu, smo vanjo nalili vodo do začetne višine označene z 0. V cev lahko nalijemo $9,8 \text{ cm}^3$ vode. Vsaka zarisana črta predstavlja $0,1 \text{ cm}^3$, tako da lahko natančno odmerimo volumen absorbirane vode tudi do $0,05 \text{ cm}^3$ natančno. Ko je cev napolnjena z vodo, je pritisk na dnu cevi enak $961,38 \text{ Pa}$.



Slika 56: Shematični prikaz določevanja vodovpojnosti [18]

V trenutku, ko smo vodo nalili do na cevi označene ničle, smo začeli s preiskavo in merjenjem časa. Na vseh merskih mestih odčitavamo absorpcijo vode po 5, 10, 15, 30 minutah in po 1 h trajanja preskusa.

7 LASTNE PREISKAVE

7.1 Uvod

V okviru eksperimentalnega dela naloge smo primerjali lastnosti svežega in strjenega betona treh različnih betonskih mešanic. Eksperimentalno delo naloge je potekalo na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo, v Konstrukcijsko - prometnem laboratoriju. Glavni namen eksperimentalnega del naloge je bil ugotoviti, kolikšen je vpliv v/c razmerja in delne zamenjave cementa z EF pepelom na prepustnost betona za vodo in kako določena šibka mesta ali napake v strukturi betona spremenijo njegovo prepustnost.

Mešanice betona smo poimenovali L1, L2 in L3. Mešanica L1 je sestavljena iz osnovnih materialov (cement, apnenčast drobljeni agregat, voda). Mešanici L2 smo zmanjšali v/c razmerje zato smo poleg osnovnih materialov dodali še kemijski dodatek superplastifikator polikarboksilatnega tipa. Mešanici L3, z enakim vodo-vezivnim razmerjem kot pri mešanici L2 pa smo poleg osnovnih materialov in superplastifikatorja dodali še mineralni dodatek v obliki elektrofiltrskega pepela. Skupno smo napravili 24 mešanic po 43 litrov betona. Delež sestavin betona smo imeli določeno po recepturi doc.dr Violete Bokan Bosiljkov, ki so v nadaljevanju podrobneje predstavljene.

V okviru preiskav smo preskušali lastnosti svežih betonskih mešanic po navodilih skupine standardov SIST EN 12350. Konsistenco betona smo določali s preskusi poseda, razleza, razleza s posedom in stopnje zgoščenosti. Za zahtevne objekte uporabljamo lahkovgradljive betone zato so betonske mešanice morale zadovoljiti pogoju konsistence med mehkoplastično in tekočo.

Nadaljevali smo s preskušanjem strjenih betonov, najprej tlačne trdnosti preskušancev, nato natezne trdnosti preskušancev ter na kocu še preskušanje vodotesnosti. Pri preskušanju tlačnih trdnosti betona smo najprej primerjali zgodnjo in pozno trdnost betonov naših treh mešanic. Poskušali smo določiti vpliv različne nege betona ter razlike med betoni vgrajenimi v železne in plastične kalupe na tlačno trdnost betona. Nadaljevali smo s preskušanjem cepilne natezne trdnosti betonov naših treh mešanic. Ob zaključku eksperimentalnega dela smo preskušali vodotesnost betona naših treh mešanic. Najprej smo ugotavljali, katera metoda določanja

vodotesnosti betona, po JUS standardu ali po standardu SIST EN je bolj neugodna. Nadaljevali smo s primerjavo vodotesnosti betona naših treh mešanic po standardu SIST EN. Na koncu pa smo ugotavljali še vpliv šibkih mest v strukturi betona na njegovo vodotesnost. Nastanek gnezd grobozrnatega dela betona je pogosta napaka pri gradnji betonskih objektov, zato nas je zanimal vpliv te napake na vodotesnost betona. Velikokrat se sprašujemo o nosilnosti oziroma obstojnosti betonov na stiku dveh slojev betona, zato smo preskusili vpliv tega šibkega mesta na vodotesnost betona. Ker velika poroznost betona vpliva na trdnost in obstojnost betona smo naredili preskus vodotesnosti betona na preskušancih s povečanim volumnom zračnih por. Vse preiskave so potekale po programu mentorice doc.dr Violete Bokan Bosiljkov, pri samem izvajanju, pa mi je pomagal somentor Franci Čepon dipl.inž.grad.

Vodotesnost betona nas zanima pri gradnji objektov, kjer je prisotna podzemna voda ali kjer gre za združevanje vode ali drugih tekočin. Problem lahko nastane pri inženirskih pregradah, vodotesnih betonskih konstrukcijah, čistilnih napravah, pri skladiščenju plinov, v odlagališčih radioaktivnih odpadkov, kjer pronicanje vode čez pregrado negativno vpliva na okolico ali na sam objekt. Pri gradnji tovrstnih objektov, je vodotesnost betona zelo pomenben parameter za obstojnost in pa tudi za uporabnost objekta.

7.2 Osnovni materiali

7.2.1 Agregat

Za izdelavo naših betonskih mešanic smo uporabili drobljen apnenčev agregat, ki spada med najkvalitetnejše agregate za beton v Sloveniji. Njegove lastnosti so prikazane v preglednici 22.

Preglednica 22: Lastnosti uporabljenega mineralnega agregata

Frakcija	Prostorninska masa zrn [kg/m³]	Prostorninska masa agregata v zbitem stanju [kg/m³]	Vodovpojnost zrn [%]
Grobozrnat apnenčast agregat frakcije 8/16	2710	1510	0,3
Grobozrnat apnenčast agregat frakcije 4/8	2716	1485	0,4
Drobnozrnat apnenčast agregat frakcije 0/4	2714	1815	1,3

Zrnavostna sestava naših mešanic se skozi celotni potek laboratorijskih preiskav ni spreminjala. Že v začetku sem po recepturi mentorice doc.dr Violete Bokan Bosiljkov imel določeno optimalno zrnavostno sestavo naših betonskih mešanic, ki je:

Preglednica 23: Izbrana zrnavostna sestava

Frakcije	Delež [%]
0/2	25
0/4	25
4/8	15
8/16	35

7.2.2 Voda

Uporabili smo pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

7.2.3 Cement

Kot vezivo v naših mešanicah smo uporabili portland cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R. Je portlandski mešani cement z dvema dodatkom, apnencem (LL) in žlindro (S), trdnostnega razreda 42,5, z visoko zgodnjo trdnostjo. Prostorninska masa cementa je $\gamma_c = 3,01 \text{ g/cm}^3$,

specifična površina cementa po Blainu pa je 4000 cm²/g. Namenjen je za najzahtevnejše gradnje, pri katerih se zahtevajo visoke začetne trdnosti.

CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, je sestavljen:

- Minimalno 80 % portland cementnega klinkerja,
- 6 – 20 % mešanega dodatka (apnenec, žindra),
- Maksimalno 5 % dodatkov – polnil,
- Regulator vezanja – sadra.

Preglednica 24: Lastnosti CEM II/A-M (LL-S) 42,5R v primerjavi z standardom SIST EN 197-1

KEMIJSKE ZAHTEVE	ZAHTEVE STANDARDA	DOSEŽENE VREDNOSTI CEM II/A-M (LL-S) 42,5R
Vsebnost sulfata (kot SO ₃)	≤ 4,0 %	3,0 %
Vsebnost klorida	≤ 0,1 %	0,03 %
MEHANSKE IN FIZIKALNE ZAHTEVE	ZAHTEVE STANDARDA	DOSEŽENE VREDNOSTI CEM II/A-M (LL-S) 42,5R
Zgodnja trdnost, 2 dneva	≥ 20,0 MPa	25 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5 – 62,5 MPa	50 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 60 min	125 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 min	1 min

7.2.4 Kemijski dodatki – superplastifikator

V okviru preiskav smo uporabili kemijski dodatek superplastifikator, ki je narejen na osnovi modificiranih polikarboksilatov. Učinek superplastifikatorja je odvisen od vrste in količine cementa, vodocementnega razmerja, sestave agregata in količine samega dodatka SP.

Uporaben je za:

- beton za prefabrikate z zmanjšano potrebo po vodi in visoko začetno trdnostjo,
- beton visoke zmogljivosti s povišano kemično in mehansko obremenitvijo (čistilne naprave, betonske cevi, itd.) ter z zmanjšano potrebo po vodi (30%),
- samozgoščevalni beton in mikroarmiran beton in
- beton za podvodna dela.

Kljub temu, da se vsebnost vode v sveži betonski mešanici zmanjša na minimum, se beton zaradi ustreznih lastnosti v svežem stanju zlahka vgrajuje. Superplastifikator ne vsebuje kloridov in drugih substanc, ki povzročajo korozijo armaturnega jekla in jekla za prednapenjanje. V okviru naših preiskav nas je zanimal učinek superplastifikatorja na zmanjšanje količine zamesne vode, poleg tega pa tudi, kako dolgo mešanica zadrži ustrezne reološke lastnosti v svežem stanju. Gostota našega superplastifikatorja je $1,09 \text{ g/cm}^3$, pH vrednost pa $5,5 \pm 0,5$. Doziranje superplastifikatorja se določa v %-ih glede na maso veziva (cement, elektrofiltrski pepel). Dozira se v zamesno vodo ali hkrati z ostalimi sestavinami v mešalnik. Za optimalni iskoristek zmanjšanja potrebe po vodi se priporoča čas mokrega mešanja 1 minuto pri optimalnem mešanju. Končni učinek plastificiranja se doseže po približno 2 minutah, zato naknadno dodajanje vode lahko povzroči močno razmešanje betona.

7.2.5 Mineralni dodatki – elektrofiltrski pepel

V okviru naših preiskav smo uporabili elektrofiltrski pepel znanega slovenskega izvora, ki ima certifikat v skladu s SIST EN 450 (1.del in 2.del). Za vključitev elektrofiltrskega pepela v mešanico betona smo se odločili, ker je zaradi velike specifične površine in pucolanskih lastnosti posebej primeren za izdelavo visoko kvalitetnih malt in betonov visokih trdnosti ter omogoča povečano odpornost na abrazijo in kemijsko agresijo. Tovrstni betoni imajo, glede na podatke v razpoložljivi literaturi, večjo sposobnost sorpcije radionuklidov, in so bolj odporni proti prodoru vode v beton. Elektrofiltrski pepel je mineralni dodatek (TIP II) oziroma pucolanski dodatek in je dokazano neškodljiv v stiku z armaturo. Velikost sferičnih delcev je med 1 in $100 \mu\text{m}$, razvita površina po Blainu pa se praviloma giblje med 3000 in $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Elektrofiltrski pepel, ki se lahko uporablja v betonih, mora izpolnjevati zahteve standarda SIST EN 450:2005. Dodatek EF pepela in/ali zamenjava dela cementnega klinkerja z EF pepelom ima lahko ugoden vpliv na lastnosti betona. Rezultat je praviloma zmanjšanje količine vode za potrebno konsistenco sveže paste s cementno-pucolanskim vezivom. Povečana je tudi kohezivnost take paste, kar pomeni, da je zmanjšana nevarnost segregacije in izcejanja vode. Z njim lahko zamenjamo do okrog 30% cementnega klinkerja.

7.3 Predstavitev betonskih mešanic

7.3.1 Mešanica L1

V okviru naših preiskav smo začeli s prvo osnovno betonsko mešanico, ki smo jo poimenovali L1. Mešanica L1 je sestavljena iz cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, iz drobljenega apnenčevega agregata in vode iz ljubljanskega vodovodnega omrežja. Sestavine mešanice so podrobneje predstavljene v preglednici 25:

Preglednica 25: Receptura mešanice L1

MEŠANICA L1	1m ³ BETONA [Kg]	PROSTORNINSKA MASA [Kg/m ³]	VOLUMEN	43I BETONA [Kg]
CEMENT	400	3010	0,13	17,2
VODA	220	1000	0,22	9,46
V/C	0,55			0,55
ZRAK ≈			2%	
AGREGAT	1690	2700	0,63	72,67
γ_{proj} [Kg/m³]	2310		100%	
FRAKCIJA 0/2 -25%	423	2700	0,16	18,19
FRAKCIJA 0/4 -25%	422	2700	0,16	18,15
FRAKCIJA 4/8 -15%	254	2700	0,09	10,92
FRAKCIJA 8/16 -35%	591	2700	0,22	25,41

Vodocementno razmerje mešanice L1 je 0,55, prostorninska masa sveže betonske mešanice pa 2350 kg/m³.

Za mešanico L1 smo zamešali 43 litrov betona, v protitočnem laboratorijskem mešalniku s kapaciteto 50 litrov betona. Najprej smo agregat in cement na suho zamešali v mešalcu nato pa dodali izračunano količino vode in mešali približno 60s.

7.3.2 Mešanica L2

Z našimi preiskavami smo nadaljevali z drugo mešanico L2. Mešanica vsebuje cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, drobljen apnenčev agregat, vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja ter superplastifikator polikarboksilatnega tipa. Za tovrstno mešanico smo se odločili, ker smo potrebovali beton, med mehko plastično in tekočo konsistenco, hkrati pa beton z manjšim vodocementnim razmerjem in ob nespremenjeni obdelavnosti mešanice dlje časa (120 do 180 minut). Pri betonih z nizkim vodocementnim razmerjem pa hkrati pridobimo tudi na trdnosti betona. Receptura naše druge mešanice L2 je podrobneje predstavljena v preglednici 26.

Preglednica 26: Receptura mešanice L2

MEŠANICA L2	1m ³ BETONA [Kg]	PROSTORNINSKA MASA [Kg/m ³]	VOLUMEN	43l BETONA [Kg]
CEMENT	400	3010	0,13	17,2
VODA	160	1000	0,16	6,88
V/C	0,4			
SUPERPLASTIFIKATOR	6,616		min	0,28 (1,654%)
ZRAK ≈	2%		2%	
AGREGAT	1854	2700	0,69	79,72
γ_{proj} [Kg/m³]	2420		100%	
FRAKCIJA 0/2 -25%	464	2700	0,17	19,95
FRAKCIJA 0/4 -25%	463	2700	0,17	19,91
FRAKCIJA 4/8 -15%	278	2700	0,10	11,95
FRAKCIJA 8/16 -35%	649	2700	0,24	27,91

Vodocementno razmerje mešanice L2 je 0,4, prostorninska masa sveže betonske mešanice pa 2420 kg/m^3 .

Drugo mešanico L2 smo napravili v enaki količini kot mešanico L1 to je 43 litrov. Najprej smo agregat in cement na suho zamešali v laboratorijskem mešalcu. Nato smo zamesni vodi dodali 280g superplastifikatorja ter postopoma dodajali ostalim komponentam v mešalniku. Čas mešanja je bil 120 sekund. Nato smo začeli z vgrajevanjem oziroma s preiskavami sveže betonske mešanice.

7.3.3 Mešanica L3

Nadaljevali smo z mešanico L3, ki vsebuje cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5R, drobljen apnenčev agregat, vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja, superplastifikator polikarboksilatnega tipa in elektrofiltrski pepel. Elektrofiltrski pepel se pri sestavi betona upošteva v račun vsebnosti veziva, kot nadomestilo dela cementa. Pri EF pepelu uporabljamo koncept k-faktorja tako, da se želeno v/c razmerje izračuna na način: $v/c = \text{količina zamesne vode} / (\text{cement} + k \times \text{elektrofiltrski pepel})$. Dejanska k-vrednost je odvisna od posameznega mineralnega dodatka in jo je potrebno določiti. Zaradi velike specifične površine elektrofiltrskega pepela se močno poveča potreba po vodi. Zato smo pri tej mešanici uporabili tudi superplastifikator, ki zmanjša potrebo po vodi. Največja možna količina elektrofiltrskega pepela, ki se sme upoštevati v konceptu k-vrednosti, mora ustrezati naslednjemu masnemu razmerju: $\text{elektrofiltrski pepel} / \text{cement} \leq 0,33$. V našem primeru je k-vrednost znašala 0,4. Celotna receptura mešanice L3 pa je podrobneje predstavljena v preglednici 27:

Preglednica 27: Receptura mešanice L3

MEŠANICA L3	1m3 BETONA [Kg]	PROSTORNINSKA MASA [Kg/m3]	VOLUMEN	43l BETONA [Kg]
CEMENT [g]	330	3010	0,11	14,19
ELEKTROFILTRSKI PEPEL [g]	170	2600	0,07	7,31
VODA	160	1000	0,16	6,88
V/C	0,4			
SUPERPLASTIFIKATOR	10		min	0,43 (2%)
ZRAK≈	3%		3%	
AGREGAT	1700	2700	0,63	73,1
γproj [Kg/m3]	2370		100%	
FRAKCIJA 0/2 -25%	425	2700	0,16	18,28
FRAKCIJA 0/4 -25%	425	2700	0,16	18,27
FRAKCIJA 4/8 -15%	255	2700	0,09	10,97
FRAKCIJA 8/16 -35%	595	2700	0,22	25,58

Vodocementno ali pravilno vodovezivno razmerje mešanice L3 znaša 0,4, prostorninska masa svežega betona pa 2370 kg/m³. V/c razmerje po konceptu k-vrednosti smo izračunali na naslednji način: $v/c = 160\text{kg (vode)} / (330\text{kg (cementa)} + 0,4 \times 170\text{kg (elektrofiltrskega pepela)}) = 0,4$.

Tudi tretjo mešanico L3 smo zamešali v enaki količini 43litrov. Najprej smo agregat, cement in elektrofiltrski pepel na suho zamešali v laboratorijskem mešalniku. Nato smo zamesni vodi dodali superplastifikator ter postopoma dodajali ostalim trem komponentam v mešalcu. Čas mešanja je bil 120 sekund. Nato smo začeli z vgrajevanjem oziroma s preiskavami sveže betonske mešanice.

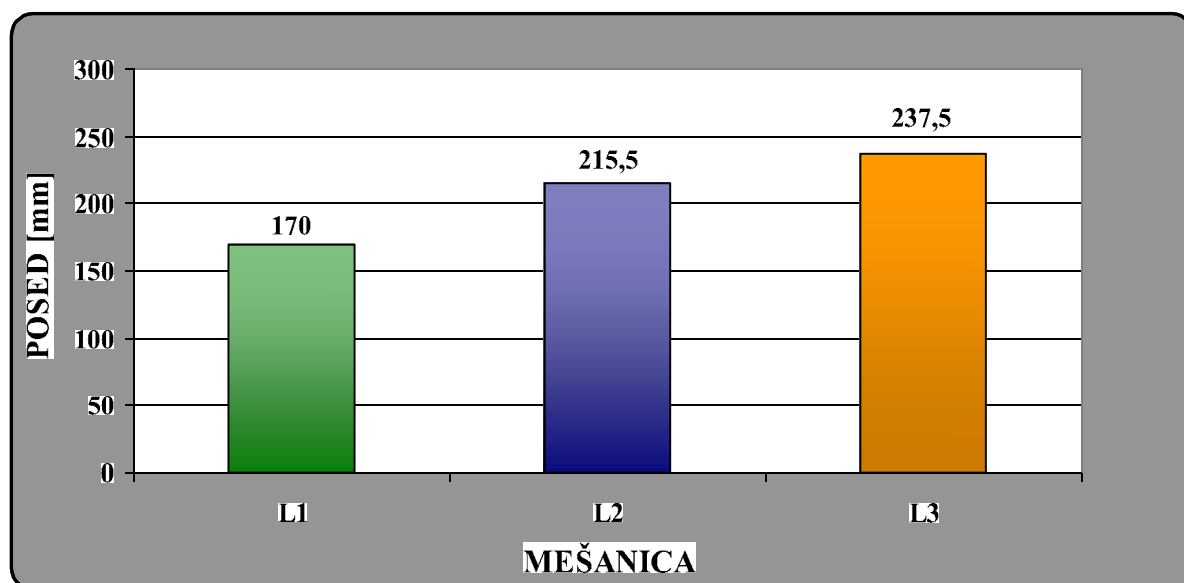
7.4 Preiskave svežih betonskih mešanic

7.4.1 Določitev konsistence

Konsistenca betona je tisti parameter, ki določa plastičnost betona. Standardi skupine SIST EN 12350 predpisujejo metode določanja konsistence sveže betonske mešanice (Ve-Be metoda, metoda s posedom, metoda z razlezom, metoda z zgoščevanjem pri vibriranju) standard SIST EN 206-1 pa kriterije za posamezne stopnje konsistence. Ker so inžinerske armiranobetonske pregrade z izolativno vlogo kot so: odlagališča radioaktivnih odpadkov, čistilne naprave, skladišča nevarnih snovi, praviloma relativno močno armirane, saj morajo ostati v elastičnem področju tudi pri najbolj ekstremnih obremenitvah, kot je na primer potres, se bo konsistenca betona gibala nekje med mehkoplastično in tekočo ali mogoče tudi zelo tekočo.

7.4.1.1 Preskus s posedom stožca; SIST EN 12350-2

Metoda s posedom je zasnovana na merjenju deformacije zgoščenega betonskega prisekanega stožca, ki se posede zaradi lastne teže. Kot smo že zgoraj navedli, se mora konsistenca betona gibati med mehkoplastično in tekočo ali mogoče tudi zelo tekočo, kar bi po standardu SIST EN 206-1 pomenilo, da se giblje med razredoma S3 in S4 ali pa tudi mogoče v razredu S5. Primerjali bomo konsistenco betona med našimi mešanicami z različnimi sestavami in v/c razmerji.



Slika 57: Graf primerjave mešanic s preskusom poseda

Pri mešanici L1, kjer imamo v/c razmerje 0,55, to pomeni največ zamesne vode v mešanici smo dobili najmanjši posed in sicer v razredu S4 (tekoča konsistenca). V primeru mešanic L2 in L3, ki imata v/c razmerje 0,4 pa imamo večji posed in sicer sta mešanici padli v razred S5 (zelo tekoča konsistenca). Diagram nam prikazuje pozitiven vpliv superplastifikatorja, glede na to, da smo z manjšo količino zamesne vode dobili višji razred konsistence.



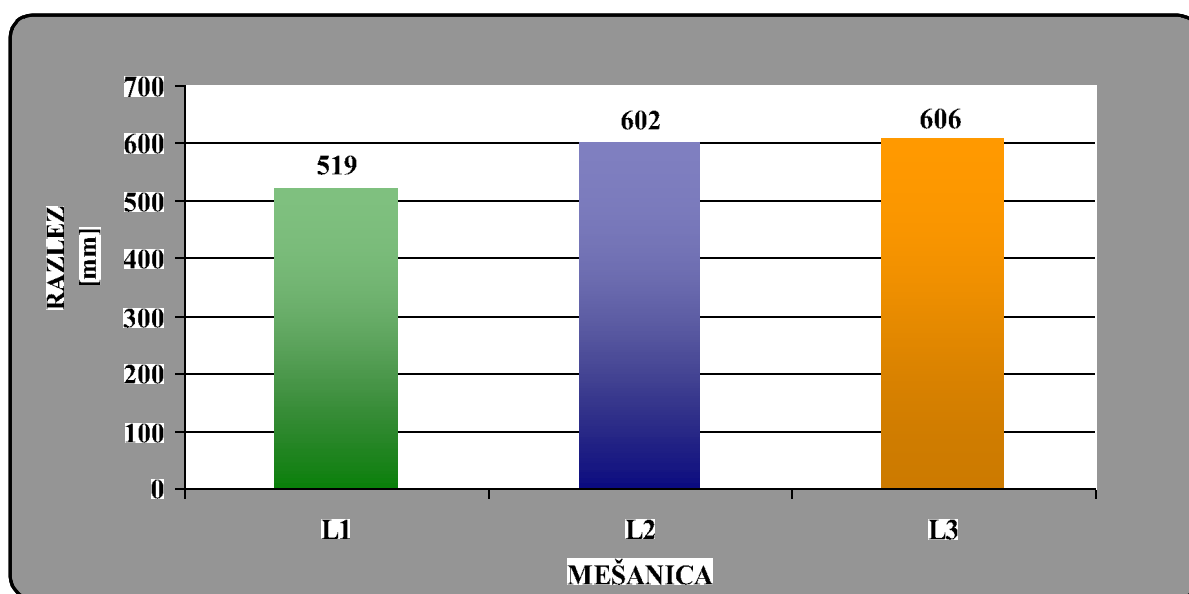
Razredi poseda:

Razred	Posed
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220

Slika 58: Prikaz merjenja poseda po SIST EN 206-1 in razredov

7.4.1.2 Preskus z razlezom; SIST EN 12350-5

Metoda z razlezom je zasnovana na merjenju deformacij zbitega betonskega konusa. Konsistenca betona se mora gibati med mehkoplastično in tekočo ali mogoče tudi zelo tekočo, kar bi po standardu SIST EN 206-1 pomenilo, da se giblje med razredoma F3 in F5 ali pa tudi mogoče v razredu F6. Primerjava naših treh mešanic:



Slika 59: Graf primerjave mešanic s preskusom razleza

Mešanica L1 z v/c razmerjem 0,55 pade v razred F4 (zelo mehko plastična konsistenca), medtem ko ostali dve mešanici z v/c razmerjem 0,4 padeta v razred F5 (tekoča konsistenca). Ponovno nam diagram prikazuje pozitiven vpliv superplastifikatorja, glede na to, da smo z manjšo količino zamesne vode dobili višji razred konsistence.



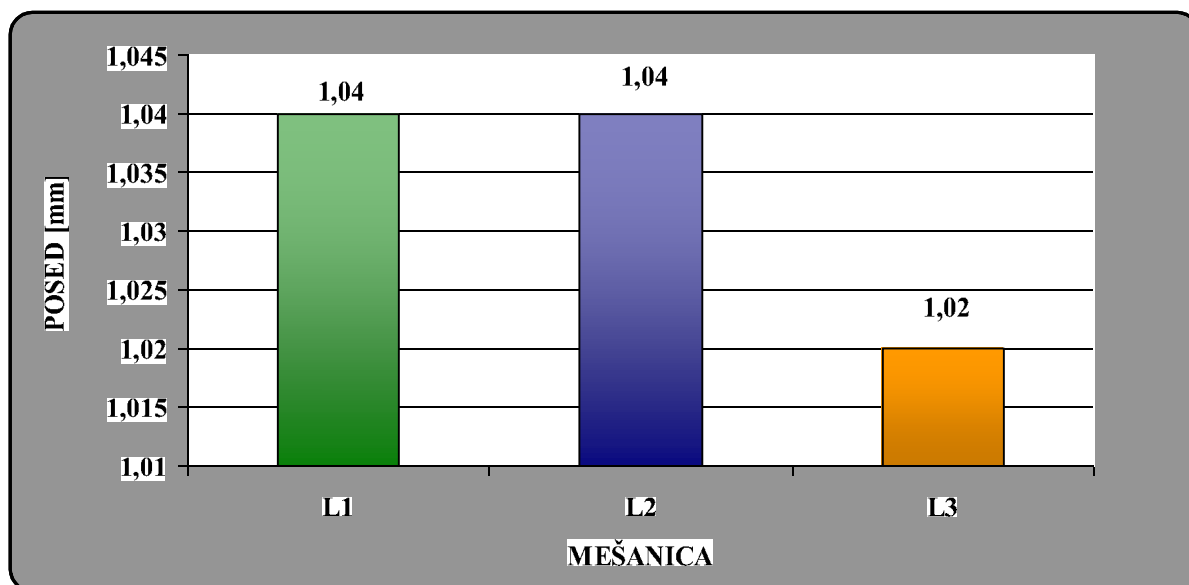
Razredi razleza

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

Slika 60: Prikaz razleza po SIST EN 206-1 in razredov

7.4.1.3 Stopnja zgoščenosti; SIST EN 12350-4

Ta metoda daje dobre kvantitativne rezultate pri definiranju konsistence trdih in srednjeplastičnih mešanic, kjer določimo stopnjo zgoščenosti betonske mešanice z razmerjem višin pred in po vibriranju betona v kovinskem kalupu standardnih dimenzij. Ta metoda preskusa za naše mešanice ni merodajna. Uporabili smo jo le kot indikator deleža zajetega zraka v lahkogradljivi betonski mešanici, ki se vgrajuje brez zgoščevanja. Primerjali smo posed betonskih mešanic po tem, ko smo jih vibrirali v standardnem kalupu.



Slika 61: Graf primerjave mešanic s preskusom določevanja stopnje zgoščenosti

Mešanici L1 in L2 padeta v razred C3 (mehkoplastičen beton), medtem ko mešanica L3 pade izven območja razreda C3, verjetno v (zelo mehko plastičen beton).



Razredi zgoščitve

Razred	Razredi zgoščitve
C0	$\geq 1,46$
C1	1,45 do 1,26
C2	1,25 do 1,11
C3	1,10 do 1,04

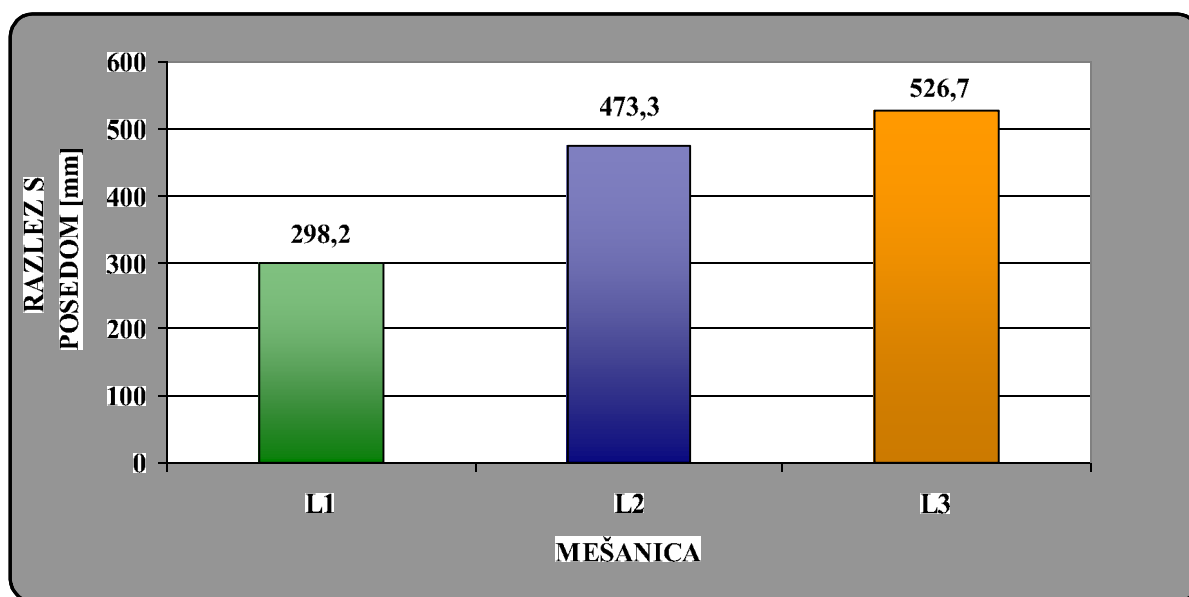
Slika 62: Prikaz poseda betonske mešanice v standardnem kalupu po SIST EN 12350-4 in razredi zgoščitve po SIST EN 206-1

7.4.1.4 Preskus konsistence svežega lahkogradljivega betona (določitev poseda, razleza s posedom in časa preoblikovanja zaradi delovanja lastne teže)

Preskus je uporaben za lahkogradljive betone. Kriteriji za ta preskus še niso narejeni, zato smo rezultate dobljene po tem postopku samo primerjali med seboj za različne mešanice.

Preglednica 28: Prikaz rezultatov poseda

MEŠANICA	POSED [mm]
L1	170
L2	220
L3	238



Slika 63: Graf primerjave mešanic s preskusom razleza s posedom

Zgornji grafikon nam prikazuje rezultate poseda z razlezom naših mešanic. Pri tem preskusu merimo čas, ki ga beton potrebuje da doseže končni razlez 500mm (T_{50}). Časi do končnega razleza naših mešanic so dosegali naslednje rezultate:

Preglednica 29: Prikaz rezultatov trajanja preskusa razleza s posedom

MEŠANICA	ČAS [s]
L1	11
L2	27
L3	47

7.4.1.5 Vsebnost zraka – metode s pritiskom; SIST EN 12350-7

Beton oziroma cementni kamen vsebuje različne vrste por, ki pomembno vplivajo na lastnosti betona. Pore večje od 50nm vplivajo na trdnost in prepustnost cementnega kamna, pore manjše od 50nm pa so pomembne za krčenje zaradi sušenja in za lezenje betona. Skupno vsebnost zraka v svežem betonu določimo s porozimetrom, ki je prikazan na Sliki 64. Standardna posoda porozimetra mora imeti minimalno kapaciteto 5 litrov in zdržati pritisk 0,2 MPa.



Slika 64: Porozimeter

V okviru naših preiskav smo najprej predpostavili poroznost svežih betonskih mešanic, da smo lahko določili recepturo in na koncu dejanske poroznosti še izmerili. Dobljeni rezultati so prikazani v preglednici 30:

Preglednica 30: Primerjava predpostavljene in dejanske poroznosti svežih betonskih mešanic

MEŠANICA	PREDVIDENA POROZNOST [%]	DEJANSKA POVPREČNA POROZNOST [%]
L1	2	1,87
L2	2	1,78
L3	3	2,73

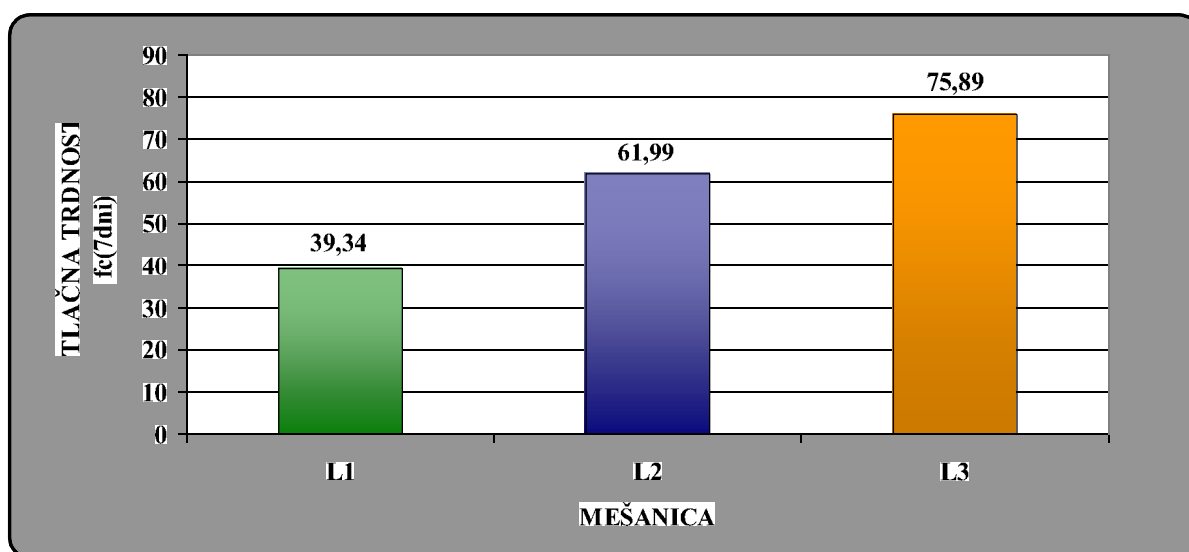
7.5 Preiskave strjenega betona

7.5.1 Tlačna trdnost

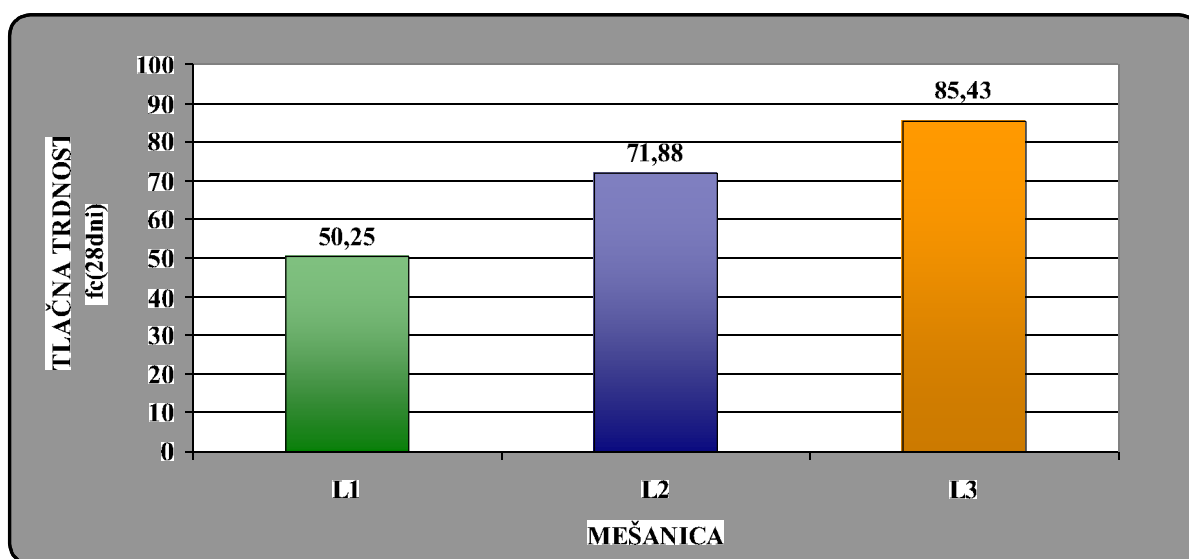
Tlačna trdnost betona je definirana, kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Za klasifikacijo se lahko uporabi karakteristična tlačna trdnost kock s stranico 150mm po 28 dneh. Primerjali smo tlačno trdnost mešanic L1, L2, L3, v odvisnosti od različne nege, v odvisnosti od različnega vgrajevanja, različnega opaža...

7.5.1.1 Primerjava tlačnih trdnosti mešanic L1, L2 in L3

Najprej smo začeli z preskušanjem tlačnih trdnosti kock pri starosti 7 dni in nato še pri starosti 28 dni. Betonske kocke so narejene, vgrajene in negovane na identični način, razlika je samo v sestavi mešanic (razlike smo predstavili v poglavju 7.3).



Slika 65: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 7 dni



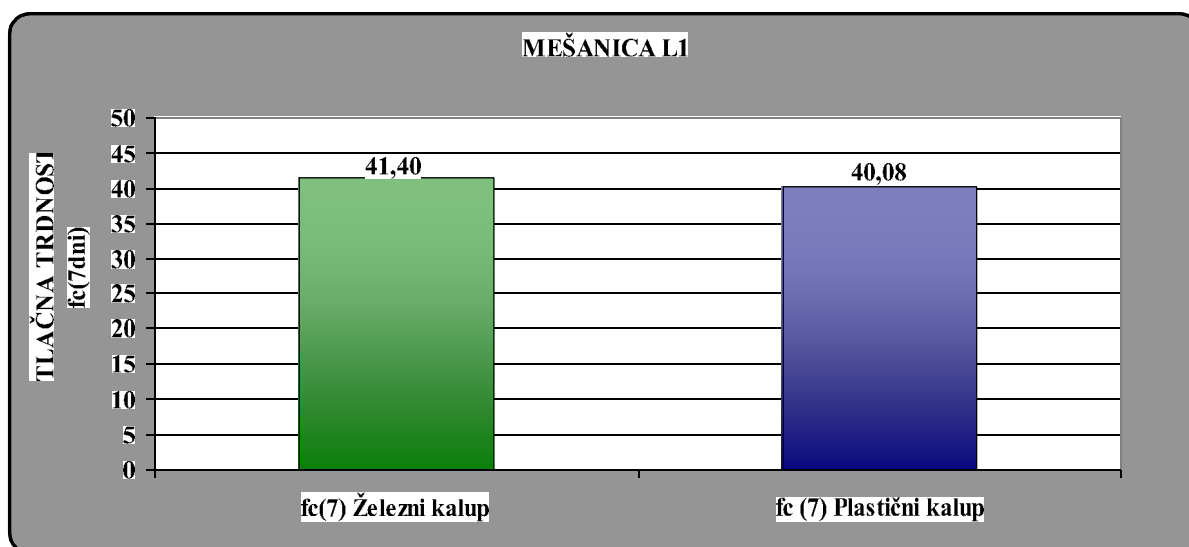
Slika 66: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni

Diagram zgodnji tlačnih trdnosti prikazuje (slika 65), da že pri zgodnjih trdnostih dosegamo najvišje vrednosti, pri mešanicah z nižjim vodocementnim razmerjem 0,4. Nižje vodocementno razmerje smo dosegli z uporabo superplastifikatorja, zmanjšali smo ga z 0,55 na 0,4, kar posledično pomeni večje tlačne trdnosti. Preiskave so pokazale, da uporaba elektrofiltrskega pepela, kot delno nadomestilo cementa, pripomore k še višjim trdnostim betonov. Predvidevamo da se z elektrofiltrskim pepelom, ker ima večjo specifično površino

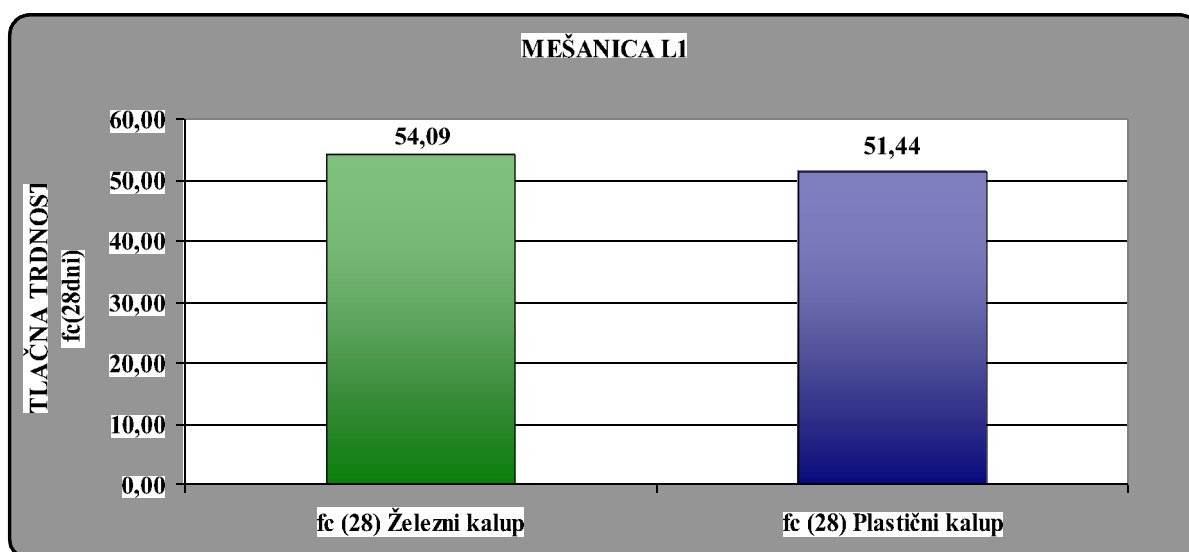
(3000 in 5000 cm²/g), bolj zapolnijo pore v betonski strukturi, zato je le ta gostejša kot pri betonu L2 z enakim v/c razmerjem, vendar brez EF pepela. Dodaten ugoden vpliv pa lahko predstavlja tudi večja kohezivnost betona.

7.5.1.2 Primerjava tlačnih trdnosti betonov v odvisnosti od vrste opaža

Nadaljevali smo s preizkušanjem zgodnjih in poznih tlačnih trdnosti betonov v odvisnosti od vrste opaža. Tako smo polovico preskušancev vgradili v plastične, drugo polovico pa v železne kalupe. Opazili smo, da so preskušanci vgrajeni v plastičen kalup nekoliko toplejši kot pa preskušanci vgrajeni v železen kalup. Zanimalo nas je ali vrsta opaža lahko vpliva na končne tlačne trdnosti in ali večja temperatura preskušancev vgrajenih v plastične kalupe vpliva na zgodnje oziroma pozne tlačne trdnosti preskušancev. V spodnjih slikah prikazujemo primerjavo tlačnih trdnosti v odvisnosti od vrste opaža, najprej na betonu mešanice L1 in nato še na betonu mešanice L2.

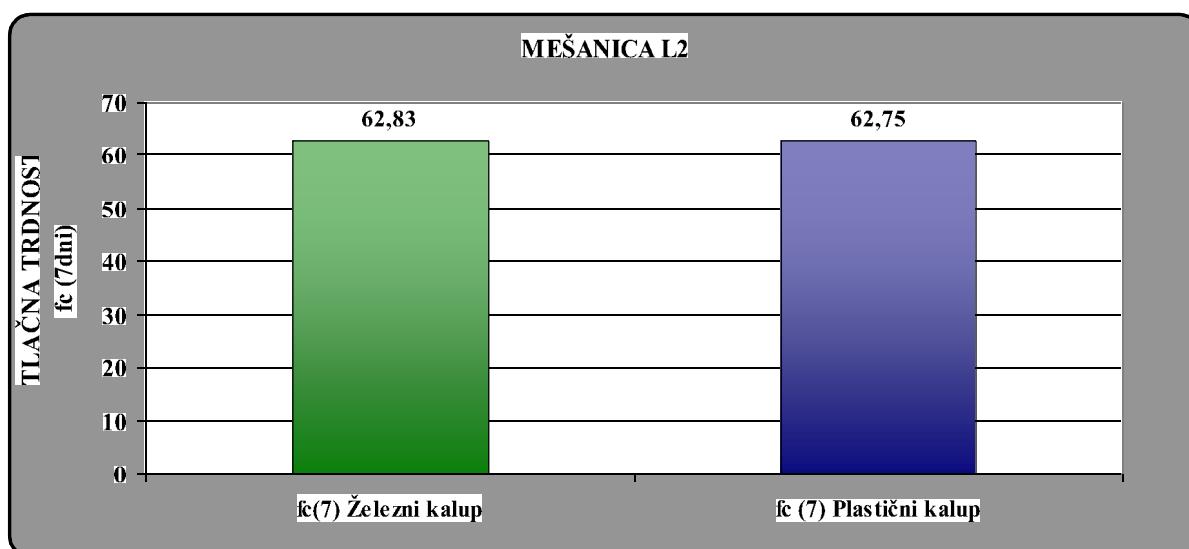


Slika 67: Primerjava tlačne trdnosti (po 7 dneh) v odvisnosti od vrste opaža

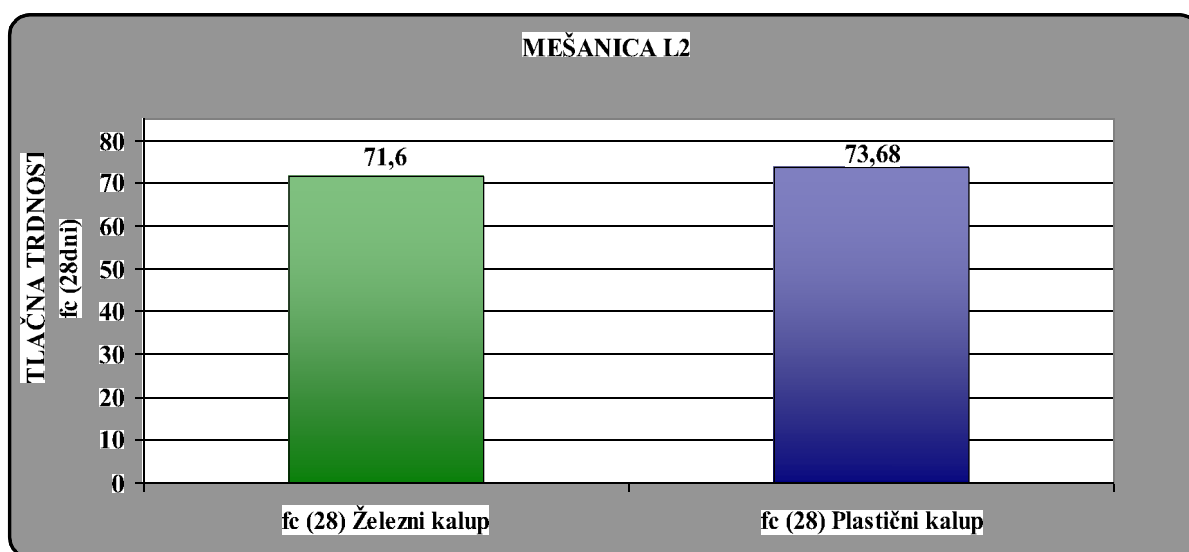


Slika 68: Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste opaža

Pri preskusu betona mešanice L1 smo dobili malo višje trdnosti pri preskušancih vgrajenih v železne kalupe. Razlika zgodnjih trdnosti betonov je zanemarljivo majhna. Razlika pri končnih trdnosti pa je približno 5% (2,65MPa). Zaradi raztrosa rezultatov lahko zanemarimo razliko manjšo od 3%. V tem primeru bi lahko najvišja razlika znašala 1,62MPa. Zato lahko v tem primeru rečemo, da ima beton mešanice L1 vgrajen v železen kalup malo višje končne trdnosti, kot pa beton vgrajen v plastičen kalup. V nadaljevanju smo preskus opravili še na betonu mešanice L2, dobljene rezultate pa prikazujeta sliki 69 in 70:



Slika 69: Primerjava tlačne trdnosti (po 7 dneh) v odvisnosti od vrste opaža

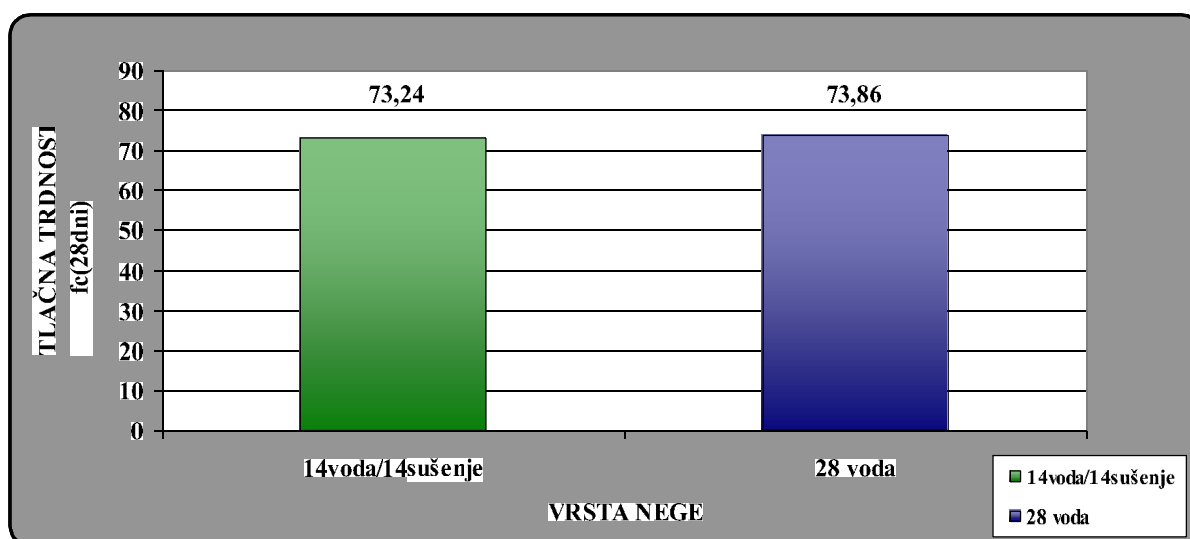


Slika 70: Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste opaža

Pri preskusu betona na drugi mešanici L2 pa smo dobili malo višje trdnosti pri preskušancih narejenih v plastičnih kalupih. Razlika zgodnjih trdnosti betonov je zanemarljivo majhna (0,08MPa). Razlika poznih trdnosti betona mešanice L2 pa tudi. Dobljeni rezultati so pokazali, da je razlika med preskušanci narejenimi v plastičnih ali železnih kalupih manj kot 3%, kar pa zaradi raztrosa rezultatov lahko zanemarimo.

7.5.1.3 Primerjava tlačnih trdnosti v odvisnosti od nege betona

V okviru naših preiskav smo se veliko ukvarjali s sušenjem preskušancev, za določitev vodotesnosti. V predhodnem poglavju (2.6) smo navedli, da je prav neustrezna nega odgovorna za oblikovanje razpok in s tem znižanje trdnosti in obstojnosti betonov. Zato smo v naših preiskavah napravili primerjavo, koliko nega betona lahko vpliva na pozne trdnosti betona. Na identičen način smo izdelali 12 preskušancev. Polovico smo jih 14dni negovali v vodi in jih nato 14 dni sušili v sušilnici pri konstantni temperaturi 60°C. Preostalo polovico preskušancev pa smo 28 dni negovali v vodi. Rezultate preiskav tlačne trdnosti prikazuje slika 71:



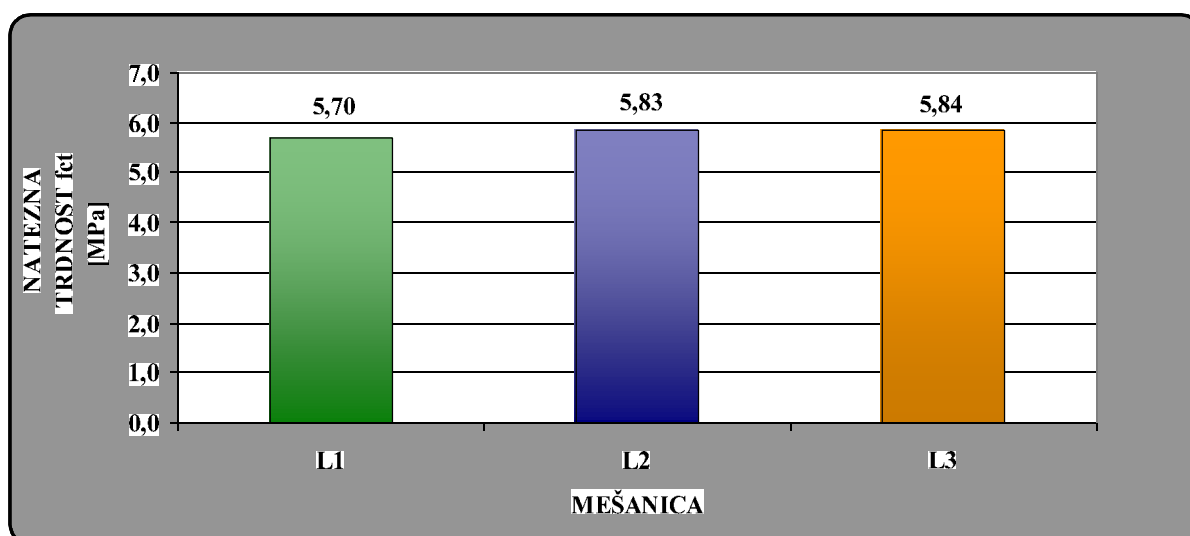
Slika 71: Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste nege

Rezultati preskusa so povprečne vrednosti na po 6 preskušancih. Diagram prikazuje, da je razlika v poznih trdnostih betona mešanice L2 minimalna. Razlika dobljenih trdnosti je manj kot 1%, zaradi česar lahko razliko zanemarimo. Rečemo lahko, da v našem primeru različna nega betona ni vplivala na pozno trdnost betona mešanice L2.

7.5.2 Cepilna natezna trdnost

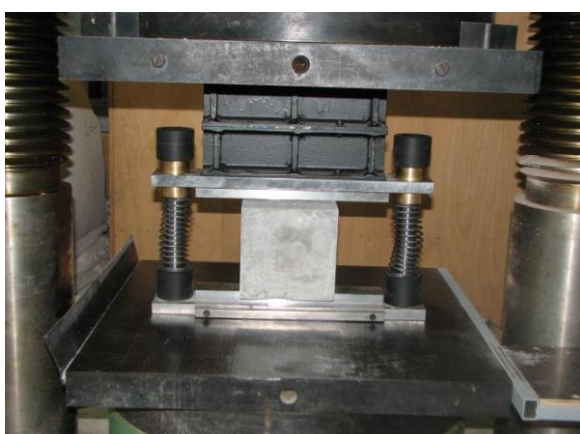
7.5.2.1 Primerjava nateznih trdnosti naših mešanic L1, L2 in L3

V okviru naših preiskav smo se veliko ukvarjali z cepilnim nateznim preskusom, saj smo na podlagi tega preskusa določevali dejansko vodotesnost betona. Z cepilnim nateznim preskusom ocenimo natezno trdnost betona. Večina betonskih elementov je dimenzionirana ob predpostavki, da je beton sposoben prevzeti tlačne napetosti, nateznih pa ne. Natezne trdnosti betona pa seveda ne smemo popolnoma ignorirati, saj je oblikovanje in širjenje razpok v strukturi betona posledica lokalne prekoračitve natezne trdnosti materiala. Natezna trdnost betona se giblje okrog 10 % njegove tlačne trdnosti. Kot rezultat preiskave s cepilnim preskusom dobimo natezno trdnost, ki je 10-15% večja od enosne natezne trdnosti betona. Slika 72 prikazuje primerjavo nateznih trdnosti betona treh mešanic:



Slika 72: Primerjava natezne trdnosti betona

Slika 72 prikazuje majhne razlike med natezno trdnostjo betonov mešanice L1, L2 in L3. Ker najnižjo vrednost dobimo pri betonu mešanice L1 lahko rečemo, da betoni z nižjim vodocementnim razmerjem dajejo višje rezultate natezne trdnosti, kot betoni z višjim vodocementnim razmerjem. Najvišjo vrednost, čeprav zanemarljivo višjo, tako kot pri preskusu tlačne trdnosti, dosežemo z betonom mešanice L3. Rečemo lahko, da nižje vodocementno razmerje, ki smo ga dosegli z uporabo superplastifikatorja, pripomore tudi k višjim nateznim trdnostim betona, čeprav razlike med obravnavanimi betoni niso velike.



Slika 73: Prikaz cepilnega nateznega preskusa

7.5.3 Globina prodora vode pod pritiskom; SIST EN 12390-8

Osrednji del naših preiskav je bil preskus globine prodora vode pod pritiskom. Preskus poteka tako, da voda pod pritiskom deluje oziroma prodira v strjen beton. Preskušamo preskušance iste vrste in enakih starosti. Preskušanec nato razcepimo z cepilnim nateznim preskusom in izmerimo globino prodora vode v preskušancu.

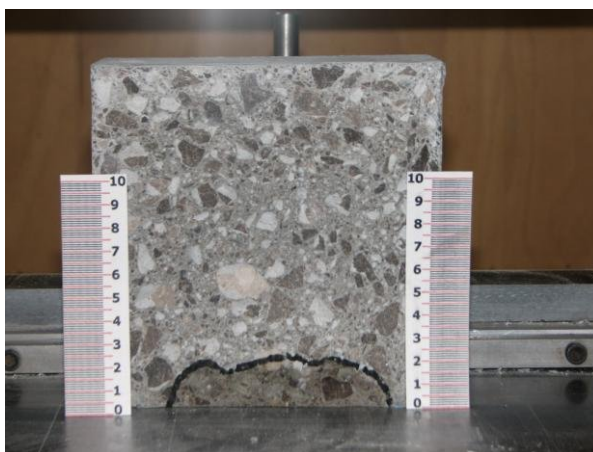
7.5.3.1 Primerjava preskusa vodotesnosti med JUS U.M1 015 standardom in SIST EN 12390-8

Na identičen način smo izdelali preskušance mešanice L2. Preskušance smo 14 dni negovali v vodi, nato smo jih 14 dni sušili v sušilnici pri konstantni temperaturi 60°C, dokler nismo dobili konstantne mase preskušancev. Po 28-ih dneh smo preskušance preskusili v napravi za določevanje globine prodora vode betona pod pritiskom oziroma določevanje vodotesnosti betona.. Najprej smo prvih 12 preskušancev preskušali po JUS U.M1 015 standardu, naslednjih 12 pa smo preskušali po SIST EN 12390-8.



Slika 74: Naprava za določevanje globine prodora vode pod pritiskom

Preskušanje po JUS U.M1 015 standardu: ko so preskušanci stari 28 dni jih najprej stehtamo, potem pa postavimo v napravo za določevanje vodotesnosti betona. Po JUS standardu mora voda najprej delovati oziroma prodirati v strjen beton pod pritiskom 1bara prvih 8ur. Po 8 urah povečamo pritisk vode na 2bara. Pritisk vode na 2barih deluje na preskušance naslednjih 8 ur preskušanja. Od 16 ure preskušanja do 24 ure voda deluje pod pritiskom 3 barov. In tako nadaljujemo z povečanjem pritiska vode za 1bar vsakih 8ur. Od 64 ure preskušanja do 72 ure znaša pritisk vode na preskušanec 8barov. Po 72 urah preskušanja preskus ustavimo. Ko je pritisk vode postavljen nazaj na 0 barov, preskušance stehtamo in pripravimo za cepilni natezni preskus. Z cepilnim nateznim preskusom prekušanec razcepimo na dva enaka dela in nato z milimetrskim merilom odmerimo globino prodora vode v preskušanec, kot nam prikazuje slika 75.



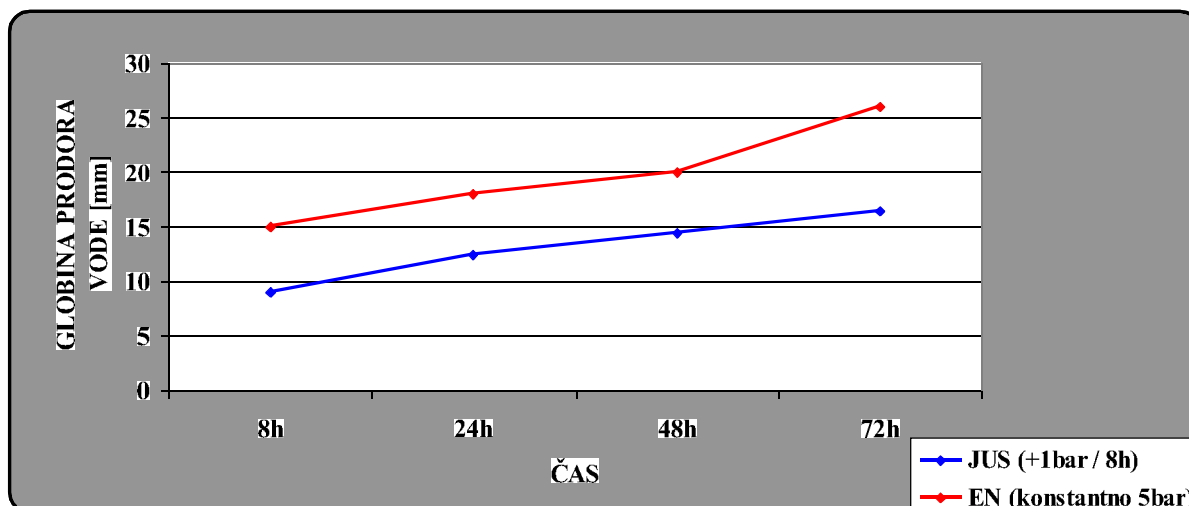
Slika 75: Prikaz določevanja globine prodora vode

Preskušanje po SIST EN 12390-8: ko so preskušanci stari od 28 do največ 35 dni, jih najprej stehtamo, potem pa postavimo v napravo za določevanje vodotesnosti betona. Po zahtevah standarda SIST EN 12390-8 moramo zagotoviti, da voda deluje oziroma prodira v strjen beton pod pritiskom 5barov skozi celotno trajanje preskusa, to je 72ur. Po 72 urah preskus ustavimo. Ko je pritisk vode postavljen nazaj na 0 barov preskušance stehtamo, da bi dobili maso vode, ki jo je preskušanec absorbiral v času preskušanja. Preskušance nato pripravimo na cepilni natezni preskus, kjer preskušance razcepimo na dva enaka dela in nato z milimetrskim merilom odmerimo globino prodora vode v preskušanec, kot nam prikazuje slika 75.

Primerjavo rezultatov preskušanja vodotesnosti betona med JUS U.M1 015 standardom in SIST EN 12390-8 standardom smo naredili na mešanici L2. Zanimal nas je potek prodora vode tekom celotne preiskave, zato smo po 8, 24, 48 in 72 urah po tri preskušance razcepili in določili globino prodora vode. Rezultat preskušanja smo prikazali v preglednici 31 in grafično ponazorili tudi na sliki 76.

Preglednica 31: Rezultat primerjave med JUS in SIST EN standardom

PRIMERJAVA JUS – EN SIST	8h	24h	48h	72h
JUS (+1bar/8h)	0,9	1,25	1,45	1,65
EN (konstantno 5bar)	1,5	1,8	2	2,6



Slika 76: Grafični prikaz rezultata primerjave preskušanja med JUS in SIST EN standardom

Najprej smo predvidevali, da je preskušnje po JUS U.M1 015 standardu ostrejše kot preskušanje po SIST EN 12390-8. Predvidevali smo, da bo prodiranje vode pri postopnem večanju pritiska hitrejše, zato smo tudi prvih nekaj preskušancev preskušali po JUS standardu. Rezultati pa so pokazali, da voda prodre globlje pri preskušanju po SIST EN, kar je razvidno iz slike 76.

Standard SIST 1026 določa stopnje odpornosti betona proti prodoru vode PV, pripadajoče največje dovoljene vrednosti prodora vode v preizkušane pri preskusu po SIST EN 12390-8

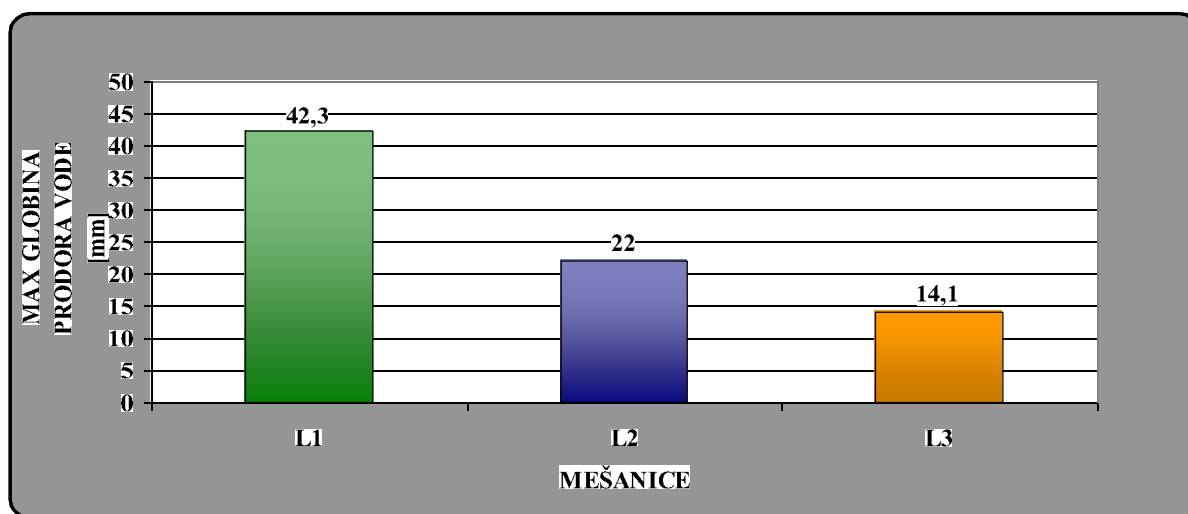
in največji dovoljeni odklon posameznih rezultatov preskušanja od največje dovoljene vrednosti prodora vode (preglednica 32).

Preglednica 32: Dovoljene vrednosti prodora vode s preskusom po SIST EN 12390-8 pri starosti betona najmanj 28 dni [5]

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

7.5.3.2 Primerjava preskusa vodotesnosti betonov L1, L2 in L3

Dejali smo že, da je preskus globine prodora vode pod pritiskom osrednji del naših preiskav. V poglavju 7.2. smo predstavili mešanice betona, ki smo jih poimenovali L1, L2 in L3. Betonske preskušance vseh treh mešanic smo preskušali in med seboj primerjali z namenom, da dobimo najbolj optimalno mešanico, z največjo odpornostjo proti prodoru vode. Rezultat preskušanja smo grafično ponazorili na sliki 77.



Slika 77: Primerjava preskusa vodotesnosti med betoni mešanic L1, L2 in L3

Rezultati kažejo, da beton mešanice L1 spada v razred PV-I. Iz grafa na sliki 77 je razvidno, da je beton mešanice L1 dal najslabše rezultate glede odpora proti prodoru vode v beton in je zato najmanj primeren za zahtevne objekte, kjer prodor vode negativno vpliva na okolico ali na sam objekt. Beton mešanice L2 spada v razred PV-II in daje za skoraj polovico boljše rezultate glede odpora proti prodoru vode v beton kot beton L1. Najboljše rezultate daje beton mešanice L3, ki spada v najzahtevnejši razred PV-III, in je najbolj primeren za gradnjo zahtevnih objektov, pri katerih moramo zagotoviti minimalen prodor vode skozi beton.

Kot zanimivost lahko podamo še povprečno količino absorbirane vode preskušancev vseh treh mešanic (preglednica 33). Količina absorbirane vode se ujema z preskusom vodotesnosti betonov vseh treh mešanic.

Preglednica 33: Količina absorbirane vode preskušancev mešanic L1, L2 in L3

VODOTESNOST	L1	L2	L3
KOLIČINA ADSORBIRANE VODE [g]	97	36,6	19,5

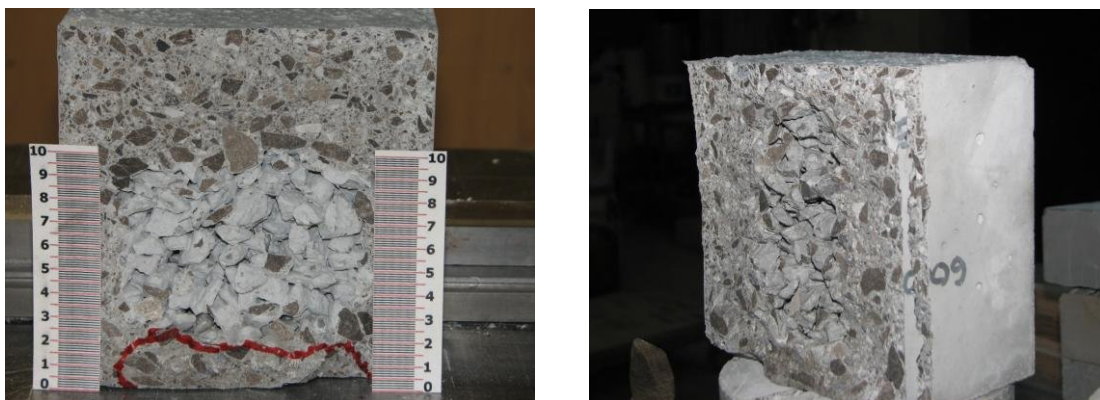
7.5.3.3 Vpliv šibkih mest v betonu na njegovo vodotesnost

Pri preskušanju vodotesnosti betona smo razmišljali tudi o vplivu napak in/ali šibkih mest v betonskih objektih. Zanimalo nas je, koliko lahko določena napaka in/ali šibko mesto vpliva na vodotesnost betona. Zato smo naredili preskušance z napako pri vgradnji betona, preskušance z veliko poroznostjo in preskušance narejene iz dveh plasti betona, zabetonirali s časovnim zamikom 1 dne (hladni stik). Za preskus smo uporabili beton mešanice L2.

a) Vpliv gnezd na vodotesnost betona

Pogost problem pri gradnji objektov se zgodi zaradi napačnega zgoščevanja betona. Zaradi malomarnosti in neizkušenosti delavcev se nam pojavi problem, da se agregatna zrna med

vibriranjem neenakomerno razporedijo po elementu. Zato se nam pojavijo gnezda grobozrnatega agregata, kar pa na vodotesnost betona lahko vpliva zelo negativno.



Slika 78: Primer gnezd grobozrnatega agregata v naših preskušancih

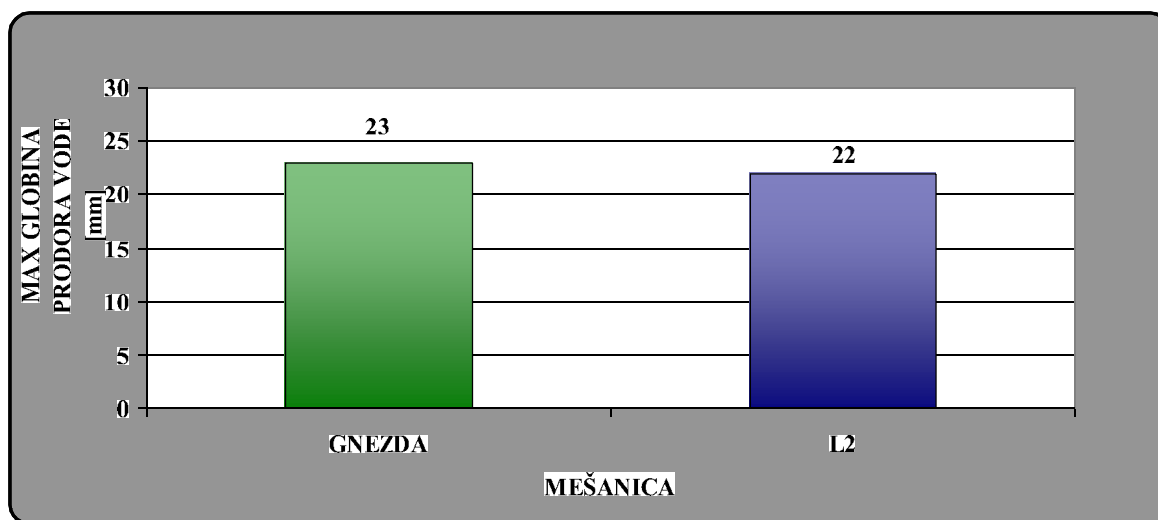
Preskušance z gnezdi smo naredili tako, da smo beton presejali na "grobozrnat" in "drobnzrnat" beton. Nato smo v kalup vgradili del drobnzrnatega betona in nato z pomočjo cevi v sredino preskušanca vgradili grobozrnat beton. Okoli grobozrnatega betona smo vgradili še preostanek drobnzrnatega betona, tako da je zunanja površina narejena iz drobnzrnatega betona (slika 79).



Slika 79: Priprava grobozrnatih gnezd v naših preskušancih

Izdelane preskušance smo najprej 14 dni negovali v vodi, nato smo jih 14 dni sušili v sušilnici pri konstantni temperaturi 60°C. Pri starosti 28 dni smo preskušance postavili v napravo za preskušanje vodotesnosti betona. Voda nato pod pritiskom 5 barov 72 ur deluje oziroma prodira v betonski preskušavec. Nato z cepilnim nateznim preskusom preskušavec razcepimo na dva dela in odčitamo globino prodora. Dobljene rezultate smo primerjali z

rezultati na preskušancih iz betona L2, saj smo preskuse šibkih mest v betonu izvajali z betonom mešanice L2 (slika 80).



Slika 80: Primerjava rezultatov preskusa vodotesnosti betona med betonskimi preskušanci z gnezdami in brez njih

Grafikon na sliki 80. prikazuje, da preskus vodotesnosti betona ni pokazal razlike med navadnimi betonskimi preskušanci mešanice L2 in preskušanci z gnezdami. Rezultat prodora vode v preskušancih z gnezdami po SIST EN 12390-8 spada v razred PV-II, tako kot pri preskušancih mešanice L2 brez šibkih mest. Pričakovali smo veliko razliko, saj voda lahko hitro potuje oziroma prodira skozi grobozrnat beton z votlinami. Vse kaže, da smo z izbranim načinom umestitve gnezd v preskušance le ta preveč odmaknili od površine betona, ki je bila v stiku z vodo pod pritiskom. Zato je voda prodirala le v območje "drobnozrnatega" betona, do gnezda pa ne in zato tudi ni razlike med globinami prodora vode med preskušanci brez in z gnezdami. Če hočemo ugotoviti vpliv gnezd na vodotesnost betona, jih moramo verjetno bolj približati površini, ki bo v stiku z vodo pod pritiskom.

b) Vpliv hladnih stikov na vodotesnost betona

Pri gradnji betonskih objektov, ker ni mogoče ves beton vgraditi naenkrat, beton vgrajujemo po slojih. Pogosto se sprašujemo o nosilnosti in trajnosti betona na stiku dveh slojev. Zato nas

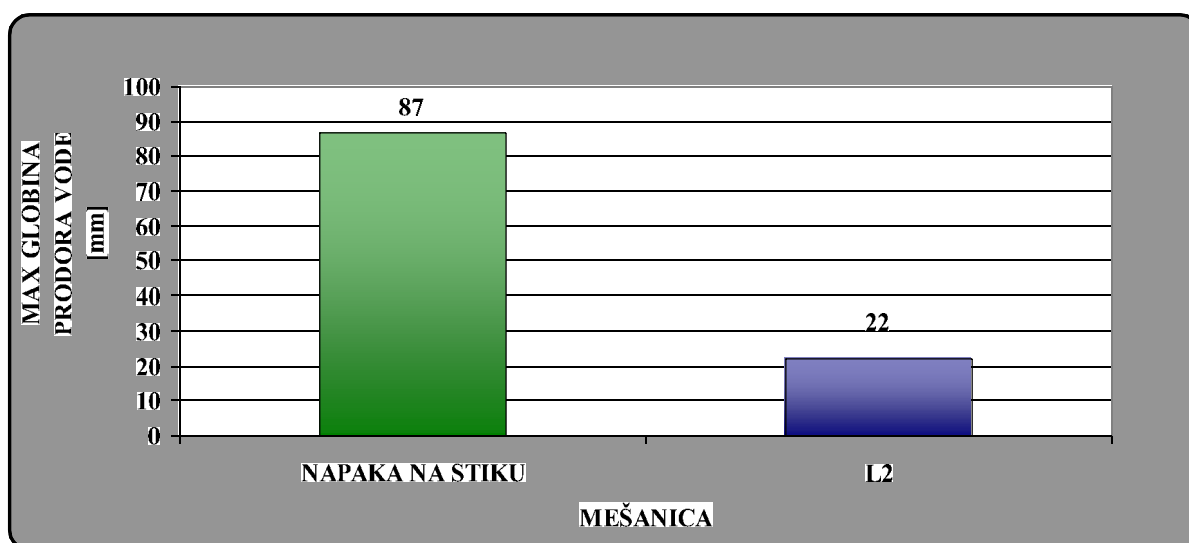
je zanimalo, kako se beton na stiku dveh slojev odziva pri preskusu vodotesnosti betona, saj pri delovanju vode na betonski objekt lahko voda prodre prav skozi stik dveh slojev betona.

Pri praktičnem delu naših preiskav smo izdelali opaž za betonsko steno in beton po stikih vgrajevali v opaž. Vsak naslednji sloj smo vgradili 24 ur pozneje kot prejšnjega. Po 7 dneh od zadnjega vgrajenega betona, smo opaž odstranili in s strojem izvrtali preskušance v obliki valja, tako, da je stik dveh slojev betona šel čez polovico preskušanca. Nato smo preskušance 7 dni negovali v vodi ter jih nato 14 dni sušili v sušilnici pri konstantni temperaturi 60°C. Pri starosti 28 dni smo preskušance postavili v napravo za preskušanje vodotesnosti betona. Voda pod pritiskom 5 barov 72 ur deluje oziroma prodira v betonski preskušanec. Ko preskus zaključimo, z cepilnim nateznim preskusom preskušanec razcepimo na dva dela in odčitamo globino prodora vode.



Slika 81: Prikaz priprave preskušancev za preskus vodotesnosti betona po hladnem stiku

Dobljene rezultate preskusa smo primerjali z rezultati na preskušancih mešanice L2, saj smo preskuse vpliva šibkih mest v betonu opravljali z betonom mešanice L2 (slika 82).



Slika 82: Primerjava preskusa vodotesnosti betona po stiku preskušancev z preskušanci mešanice L2

Grafikon na sliki 82. prikazuje veliko razliko med globino prodora vode v preskušance. Voda po stiku prodre veliko globlje. Rezultat prodora vode po stikih je po SIST EN 12390-8 izven vseh treh razredov dovoljene vrednosti prodora vode, kar pomeni, da niso izpolnjene zahteve standarda SIST 1026 za vodotesne betone. Menimo, da je pri gradnji betonskih objektov potrebno posvetiti posebno pozornost stikom med betonskimi plastmi oziroma temu, da hladnih stikov ni ali jih je čim manj. Rezultati kažejo, da so betonski objekti na stikih lahko zelo ranljivi. To velja vsaj za objekte, kjer voda, ki prodira v ali skozi beton, negativno vpliva na okolico ali na sam objekt.

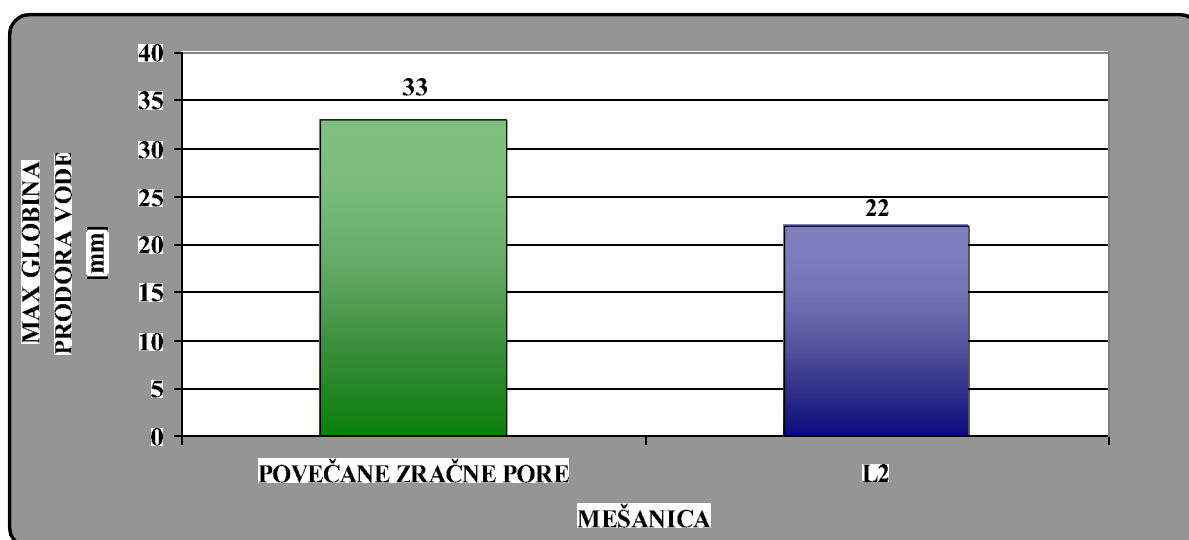
c) **Vpliv povečane poroznosti betona na njegovo vodotesnost**

Zračne pore v betonu so ponavadi kroglaste oblike in negativno vplivajo predvsem na trdnost betona. Pore v betonu lahko nastanejo zaradi zajemanja zraka med mešanjem betonske mešanice in so velike okrog 3mm ali pa s pomočjo aeranta, njihova velikost se giblje med 50 in 1000 μ m. V okviru naših preiskav smo poskušali ne samo povečati poroznost betona ampak smo hoteli povečati že obstoječe pore v betonu in/ali povzročiti njihovo združevanje zato smo med vgrajevanjem betonske mešanice v kalup mešanici pod pritiskom dovajali zrak (slika 83).



Slika 83: Prikaz dovajanja zraka preskušancu pod pritiskom in por v notranjosti preskušanca

Preskušance smo 14 dni negovali v vodi in jih nato 14 dni sušili v sušilnici pri konstantni temperaturi 60°C. Pri starosti 28 dni smo preskušance postavili v napravo za preskušanje vodotesnosti betona. Voda nato pod pritiskom 5 barov 72 ur deluje oziroma prodira v betonski preskušavec. Ko preskus zaključimo s cepilnim nateznim preskusom preskušavec razcepimo na dva dela in odčitamo globino prodora vode. Dobljene rezultate preskusa smo primerjali z rezultati mešanice L2 brez šibkih mest v strukturi betona (slika 84).



Slika 84: Primerjava preskusa vodotesnosti betona med preskušanci s povečanimi zračnimi porami in preskušanci brez šibkih mest

Rezultati kažejo, da so povečane zračne pore vplivale na višji prodor vode v preskušavec, kot prikazuje grafikon na sliki 84. Rezultat prodora vode v preskušancih s povečanim volumnom

in velikostjo zračnih por spada v razred PV-III, in ne izpolnjuje pogojev za betone zahtevnih objektov. Zato je potrebno posebno pozornost posvetiti betonom za zahtevne objekte, kjer prodor vode negativno vpliva na okolico ali na sam objekt, predvsem ustreznemu zgoščevanju betona, ki ne sme povzročati združevanja por.

7.6 Sklep

Konsistenca izhodiščne mešanice betona L1, ki ni vsebovala superplastifikatorja, je bila med zelo mehko plastično in tekočo (razred poseda S4, razred razleza F4 in razred zgostitve C3. ostali dve mešanici, L2 in L3, ki sta vsebovali superplastifikator, pa spadata med lahkogradljive betone, saj je bil njun posed 220mm ali več. Zato je v tem primeru merodajna preiskava razleza s posedom. Mešanica L2, ki ni vsebovala EF pepela, je dosegla posed 220mm razlez s posedom 475mm in čas do končnega razleza 27s. mešanica L3, izdelana z EF pepelom, pa je dosegla posed 238mm, razlez s posedom 525mm in čas do končnega razleza 47s.

Pri preiskavah tlačne trdnosti naših treh vrst betonov je najmanjše trdnosti dosegel beton mešanice L1 (50MPa), zaradi najvišjega vodocementnega razmerja enakega 0,55. Betona mešanic L2 in L3 sta z nizkim vodocementnim razmerjem enakim 0,4 dosegla visoke zgodnje (L2 = 62 MPa, L3 = 76 MPa) in pozne (L2 = 72 MPa, L3 = 85 MPa) trdnosti. Beton mešanice L3 je dosegel za približno 13 MPa višje trdnosti kot beton L2, kljub temu, da je bilo vodovezivno razmerje betonov L2 in L3 enako. Posebnih razlik pri študiju različne nege in vgrajevanja betona v različne kalupe rezultati niso pokazali. Tudi razlike med cepilnimi nateznimi trdnostmi teh betonov so bile zanemarljive.

Rezultati osrednjega dela naših preiskav, preskusa globine prodora vode pod pritiskom, so pokazali, da preskušanje po standardu SIST EN 12390-8 daje bolj kritične rezultate kot preskušanje po JUS U.M1 015 standardu. Preskušanje po SIST EN 12390-8 standardu je pokazalo, da je beton mešanice L1 veliko bolj vodoprepusten kot betona mešanic L2 in L3. Najboljše rezultate je, tako kot pri tlačni trdnosti betona, tudi pri vodotesnosti betona dosegel beton mešanice L3. Po kriterijih standarda SIST EN 1026, beton mešanice L1 spada v razred PV-I, beton mešanice L2 v bolj zahteven razred PV-II, beton mešanice L3 pa spada v najzahtevnejši razred standarda PV-III.

Pri študiju vpliva šibkih mest na vodotesnost betona smo pri preskušancih z vključenimi gnezdi dobili enako globino prodora vode. To ni posledica vpliva gnezd ampak zasnove preskusa – prevelike debeline plasti kvalitetnega betona med površino, na katero je delovala voda pod pritiskom in gnezdom. Zato voda med preskusom ni prodrla do gnezda. Kljub temu smo mnenja, da je treba posebno pozornost posvetiti vgradnji betona na objektih, ker lahko nastanek gnezd iz grobozrnatih delov betona zelo negativno vpliva na vodotesnost betona. Posebno pozornost je potrebno posvetiti tudi stiku dveh slojev betona saj, kot so pokazali rezultati preiskav ima beton na stiku dveh slojev bistveno večjo prepustnost za vodo, kot beton izven območja stika. Zaradi povečanja prostornine in velikosti por v betonskih mešanica smo dobili povečano vodoprepustnost betona. Zato moramo biti pri zgoščevanju betona, da z njim izločimo večino zajetega zraka in ne povzročimo združevanja vmesnih zračnih mehurčkov.

Ko primerjamo dobljene rezultate betonskih mešanic L1, L2 in L3, smo pri betonu mešanice L3 dobili najboljše rezultate, tako pri preiskavah svežih betonskih mešanic kot pri preiskavah strjenega betona. Betonu mešanice L3 smo, poleg osnovnih komponent, dodali kemijski dodatek superplastifikator in mineralni dodatek v obliki elektrofiltrskega pepela. Zaradi kemijskega dodatka polikarboksilatnega tipa, je beton L3 dražji od navadnega betona. Z elektrofiltrskim pepelom, ki izpolnjuje zahteve standarda SIST EN 450, smo zamenjali del cementa v betonu in ker je elektrofiltrski pepel cenejši od cementa je mešanica L3 cenejša od mešanice L2. Kljub temu smo boljše rezultate dobili z betonom, ki vsebuje elektrofiltrski pepel (L3), kot pri betonu mešanice L2. Beton L2 in L3 se razlikujeta le po sestavi veziva, beton L2 ne vsebuje EF pepela, vodovezivno razmerje pa je pri obeh betonih enako 0,4. Tako nizko vodovezivno razmerje omogoča praviloma odlično obstojnost betona, kar dokazujejo tudi rezultati odpornosti betona na prodor vode. Dosežemo ga z uporabo superplastifikatorja, kar sicer podraži betonsko mešanico, vendar je, zaradi doseganja bistveno višjih trdnosti in obstojnosti, uporaba superplastifikatorja praviloma ekonomsko upravičena.

VIRI

- [1] Dr Celine Cau dit Coumes. 2008. Basics of cement chemistry. Switzerland, ITC, Cement and cementitious materials in geological disposal of radioactive waste: str. 4-19.
- [2] Violeta Bokan Bosiljkov, Roko Žarnič. 2006. Izdelava metodologije za presojo varnosti inženirskih pregrad odlagališča nizko in srednje radioaktivnih odpadkov, Končno poročilo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanja materialov in konstrukcij: str. 1-92.
- [3] Roko Žarnič. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: str. 54-119.
- [4] SIST EN 197-1. 2002. Cement – 1. del: Sestava, zahteve, merilo in skladnosti za običajne cemente (istoveten z EN 197-1:2000).
- [5] SIST 1026. 2007. Beton -1del.: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost – Pravila za uporabo SIST EN 206 – 1.
- [6] Jure Trtnik. 2004. Uporaba elektrofiltrskega pepela kot mineralnega dodatka vibriranim in samozgoščevalnim betonom. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, diplomska naloga: str. 3-30.
- [7] SIST EN 12620. 2002. Agregati za beton.
- [8] Roko Žarnič, Vlatko Bosiljkov, Violeta Bokan Bosiljkov, Bruno Dujić. 2008. Gradiva vaje 2008/2009. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: str. 5-72.
- [9] SIST EN 12350-2. 2008. Testing fresh concrete – Part 2: Slump-test.
- [10] Violeta Bokan Bosiljkov. 2009. Navodilo za preskus konsistence svežega lahkogradljivega betona-določitev poseda, razleza s posedom in časa preoblikovanja zaradi delovanja lastne teže, Delovno gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij.
- [11] SIST prEN 12350-8. 2007. Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test.
- [12] SIST prEN 12350-5. 2008. Testing fresh concrete – Part 5: Floe table test.

- [13] Humboldt Mfg. Co. 2009. Naprava za določevanje poroznosti betona.
<http://www.humboldtmfg.com/c-3-p-170-id-3.html>.
- [14] SIST EN 206-1. 2003. Beton – 1.del.: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.
- [15] SIST prEN 12390-3. 2008. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [16] SIST prEN 12390-6. 2009. Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.
- [17] Dr. Mihailo Muravljov. 1991. Osnovi teorije i tehnologije betona, Građevinska knjiga. Beograd.
- [18] Revija Rilem.75. 1980. Materials and structures, research and testing.
- [19] SIST prEN 12390-8. 2008. Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure.
- [20] SIST prEN 12350-7. 2008. Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods.