

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo

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



Visokošolski program Gradbeništvo,
Smer operativno gradbeništvo

Kandidat:

Slaviša Kuzmanović

Vpliv šibkih mest v strukturi betona na njegovo odpornost proti vdoru vode

Diplomska naloga št.: 345

Mentor:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

Franci Čepon

Ljubljana, 30. 9. 2009

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 vodenje pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici doc. dr. Violeti Bokan Bosiljkov.

Posebna zahvala velja tudi Katedri za preskušanje materialov in konstrukcij, ki mi je omogočila opravljanje preiskav v Konstrukcijsko - prometnem laboratoriju in somentorju Franciju Čeponu dipl. inž. grad., ki mi je pomagal pri preiskavah v laboratoriju.

Zahvalil bi se tudi svojim staršema, bratu Danijelu in puncu Vesni za vso podporo, pomoč in razumevanje skozi vsa leta študija.

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 enosnem 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 lahkogradljivega 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. Vodovezivno 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 elektrofiltrskim 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, . 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 merjenja 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 zgotovitve 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 vrtnanjem. Na ta način smo želeli ugotoviti, v kolikšni meri šibka mesta v betonu zmanjšajo odpornost betona proti prodoru vode.

2 OSNOVNI MATERIALI

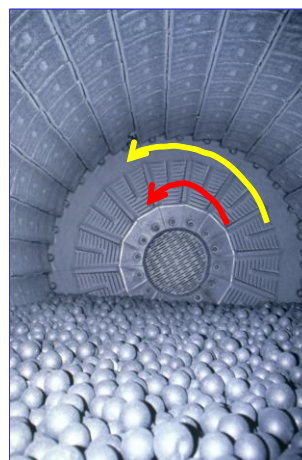
2.1 Cement

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 glinice do temperature sintranja v temperaturnem območju 1300-1500°C.

Osnovna surovina za proizvodnjo cementa je praviloma naravni lapor, ki je zmes apnenca in glinice. 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

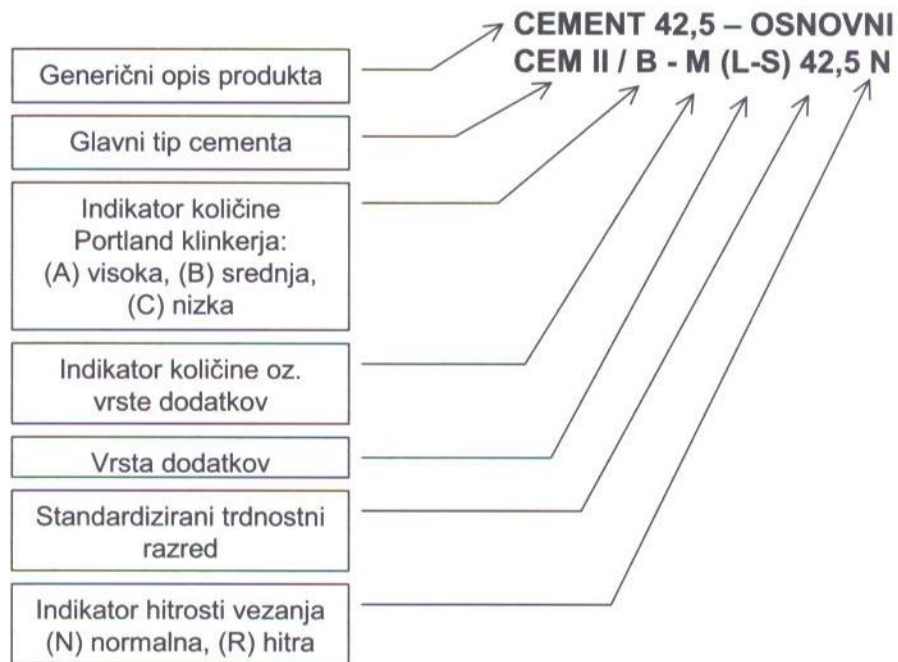
2.1.1 Standard

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	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	≥ 75	≤ 10
32,5 R	$\geq 10,0$	-				
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	≥ 60	
42,5 R	$\geq 20,0$	-				
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-	≥ 45	
52,5 R	$\geq 30,0$	-				

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	$\leq 5,0 \%$
Netopni ostanek	EN 196-2 ^{b)}	CEM I CEM III	vsi	$\leq 5,0 \%$
Vsebnost sulfata (kot SO ₃)	EN 196-2	CEM I	32,5 N	$\leq 3,5 \%$
		CEM II	32,5 R	
		CEM IV	42,5 N	$\leq 4,0 \%$
		CEM V	42,5 R 52,5 N 52,5 R	
		CEM III ^{d)}	vsi	
Vsebnost klorida	EN 196-21	vsi ^{e)}	vsi	$\leq 0,10 \%$ ^{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.

Preglednica 6: Uporabnost cementov po SIST EN 197-1 [5]

1	Ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja	Stopnje izpostavljenosti																							
		Korozija zaradi karbonatizacije					Korozija zaradi kloridov						Zmrzovanje-tajanje				Korozija zaradi sulfatov			Korozija zaradi drugih kemikalij			Abrazija		
							Morska voda			Drugi kloridi															
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2 ²⁾	XF3	XF4 ²⁾	XA1S	XA2S	XA3S	XA1K	XA2K	XA3K	XB1	XB2	XB3
2	CEM I	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+ ¹⁾	0	0	0	+	+	+	
3	CEM II/A-S	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
4	CEM II/B-S	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
5	CEM II/A-D	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
6	CEM II/A-P	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
7	CEM II/B-P	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
8	CEM II/A-Q	+	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	
9	CEM II/B-Q	+	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	
10	CEM II/A-V	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+		
11	CEM II/B-V	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+		
12	CEM II/A-W	+	+	+	0	0	0	-	-	0	0	0	+	-	-	-	-	0	0	0	-	-	-		
13	CEM II/B-W	+	+	+	0	0	0	-	-	0	0	0	0	-	-	-	-	0	0	0	-	-	-		
14	CEM II/A-T	+	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	
15	CEM II/B-T	+	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	
16	CEM II/A-L	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
17	CEM II/B-L	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	0	0	0	+	+	-	
18	CEM II/A-LL	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
19	CEM II/B-LL	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	0	0	0	+	+	-	
20	CEM II/A-M	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
21	CEM II/B-M	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
22	CEM III/A	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+ ¹⁾	0	0	0	+	+	+	
23	CEM III/B	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+	+	+	+	+	+	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+ ¹⁾	0	0	0	+	+	+	
24	CEM III/C	+	0	0	0	0	0	+ ¹⁾	+ ¹⁾	0	0	0	0	0	0	+ ¹⁾	+ ¹⁾	+ ¹⁾	0	0	0	+	+	+	
25	CEM IV/A	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
26	CEM IV/B	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
27	CEM V/A	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	0	0	0	+	+	+	
27	CEM V/B	+	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	-	-	-	0	0	0	0	0	0	

Legenda:

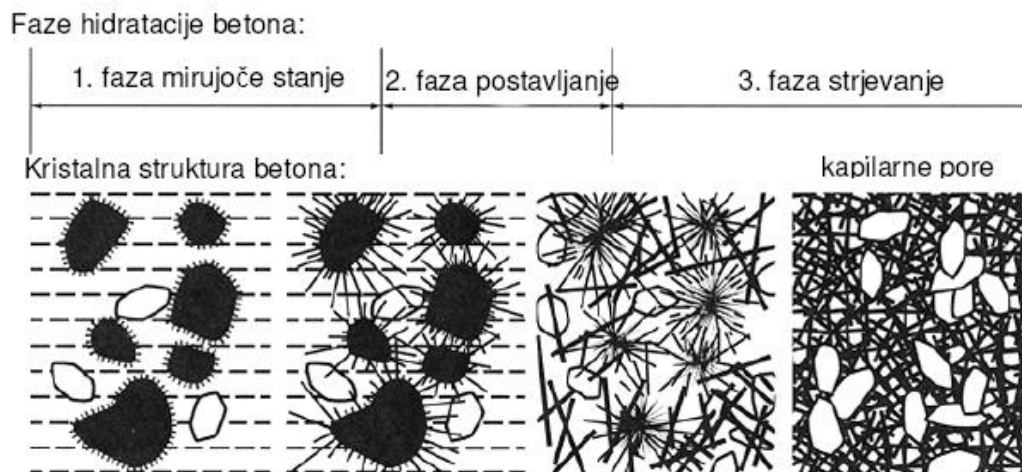
- + uporaba primerna
- uporaba se odsvetuje in je mogoča le na podlagi dokaznih preiskav
- 0 uporaba je mogoča na podlagi dokaznih preiskav

- 1) Priporočljiva je uporaba sulfatno odpornega cementa
- 2) Uporaba koncepta k-vrednosti z elektrofilitrskim pepelom ni primerna

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)



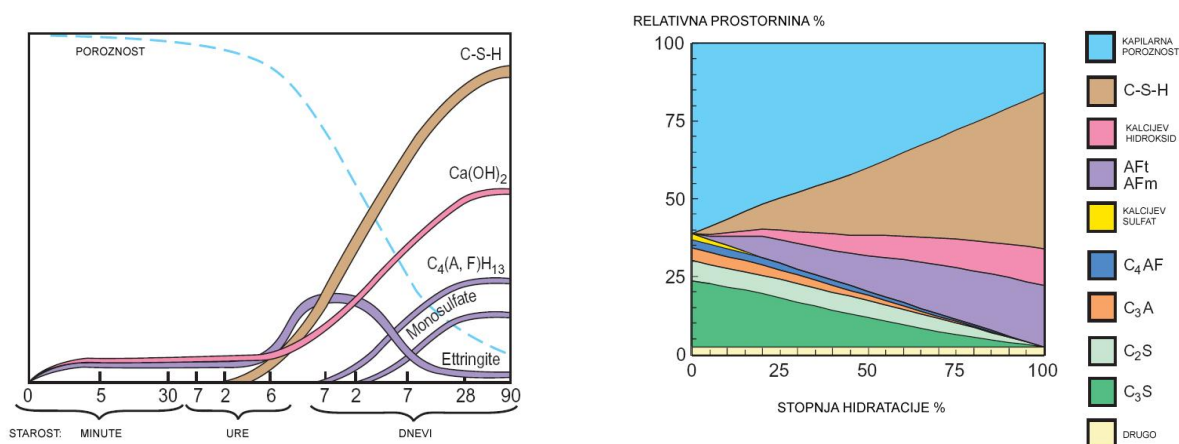
Slika 4: Faze hidratacije portland cementa [2]

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]

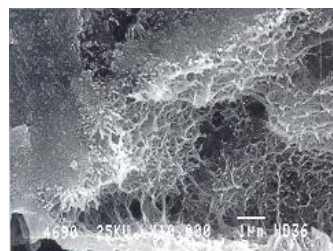
Slika 5 prikazuje oblikovanje različnih produktov hidratacije cementa s časom in njihove prostorninske deleže v odvisnosti od stopnje hidratacije.

- **kalcijski 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,

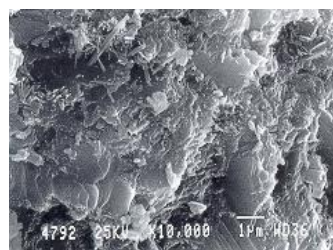
temperature in stopnje hidratacije. Pri popolni hidrataciji lahko sestavo faze privzamemo kot $C_3S_2H_3$ (61% C-S-H faze in 39% kalcijevega hidroksida)



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

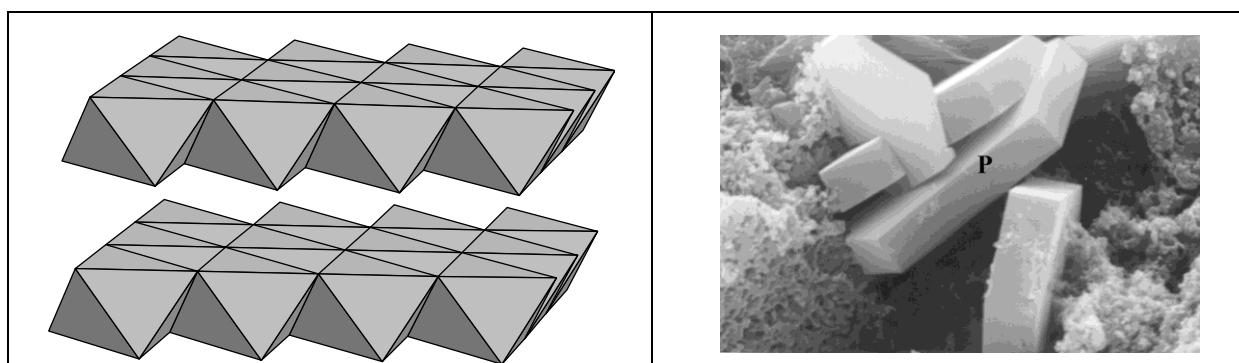


Slika 7: C-S-H (II) [1]



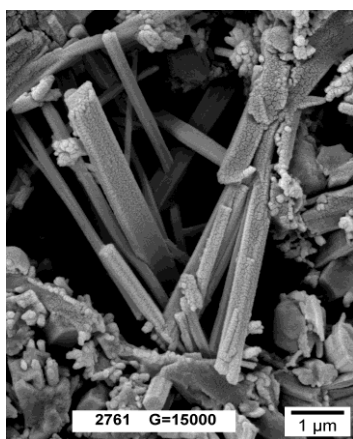
Slika 8: C-S-H (III) [1]

- **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.

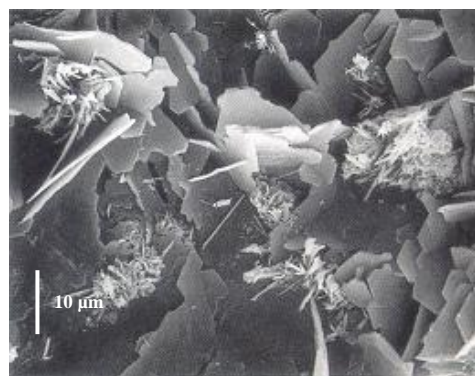


Slika 9: Kalcijev hidroksid $Ca(OH)_2$ [1]

- **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.

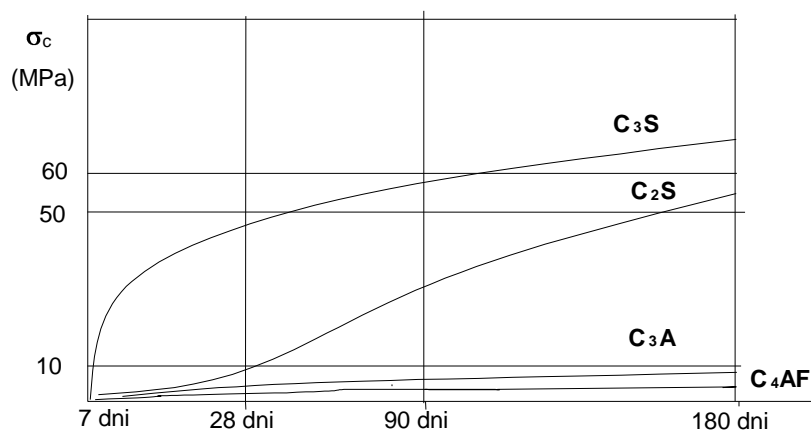
Hitrost hidratacije sorazmerno narašča s finostjo mletja cementa, vendar pa finejši kot je cement, večji so tudi stroški proizvodnje. V preglednici 7 lahko vidimo, kolikšne so priporočene količine finih delcev glede na količine cementa v betonih trdnostnih razredov do vključno C 50/60, z največjim zrnom 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.



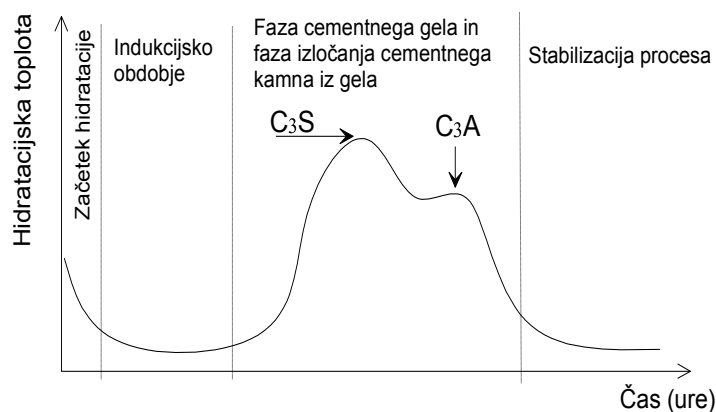
Slika 12: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov portland cementnega klinkerja [2]

2.1.7 Toplota hidratacije cimenta

Ker je hidratacije 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):

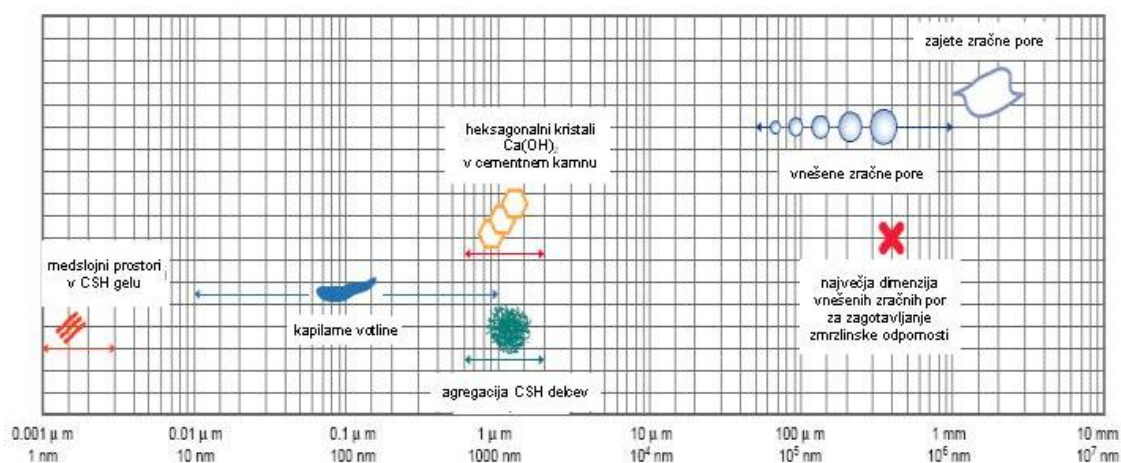
- **medslojni prostori v C-S-H gelu;** imajo glede na Powersov model velikost 1,8nm (gel pore) in zavzamejo 28% delež C-S-H gela. V modelu Feldman in Sereda pa se velikost medslojnih prostorov spreminja med 0,5 in 2,5nm.

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.

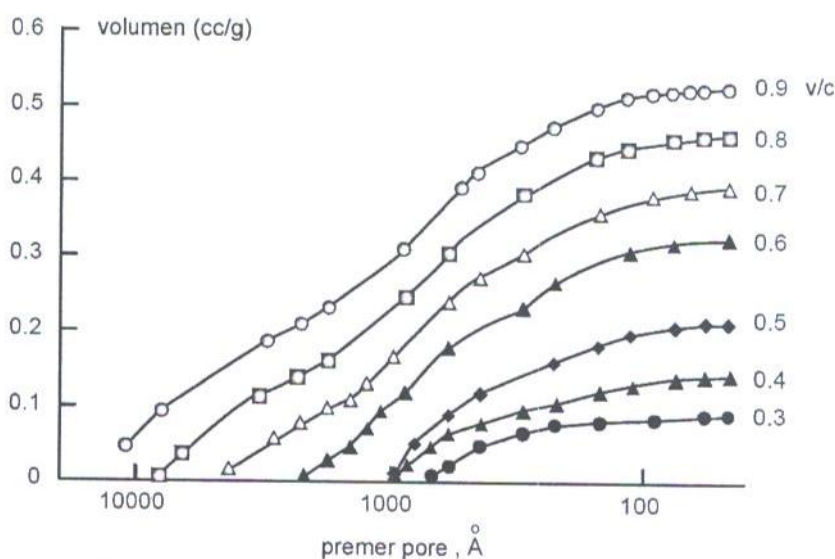
- **kapilarne pore;** Kot kaže slika 5, je hidratacija cementa proces, med katerimi postaja, prostor, ki sta ga v začetku izpolnjevala voda in cement, vse bolj zapolnjena s produkti hidratacije. Kapilarne pore so prostori, ki ga ne zavzamejo produkti hidratacije ali cementa. Prostornina in velikost teh 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 razmerja [2]

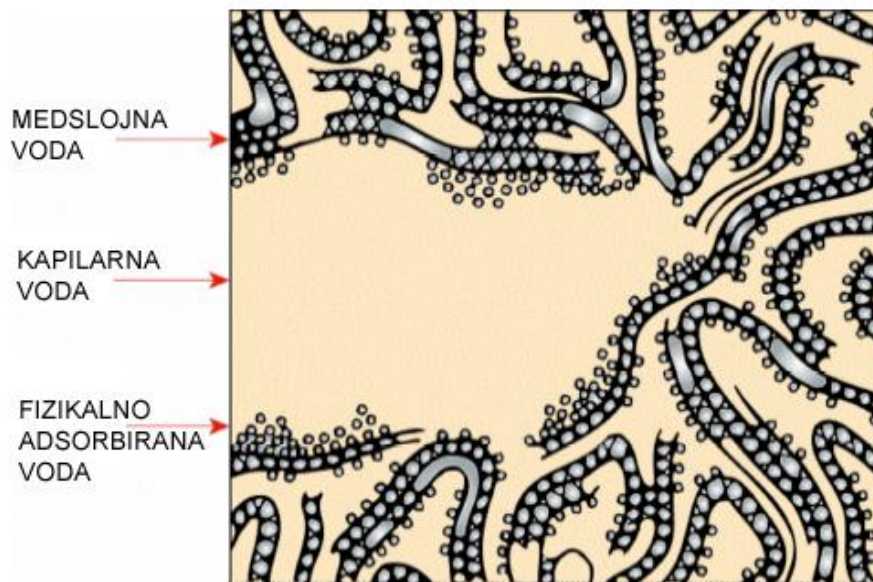
2.1.9 Voda v cementnem kamnu

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.

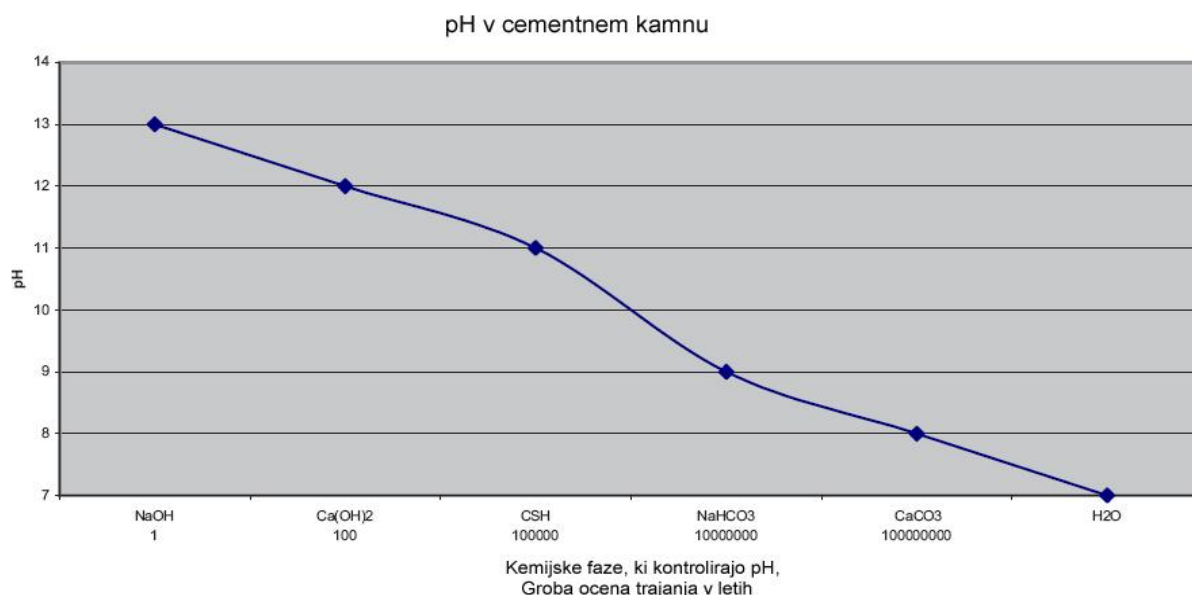
- **kemijsko vezana voda:** je voda, ki je sestavni del mikrostrukture različnih produktov hidratacije. Pri sušenju se iz cementnega kamna ne izloča. Izloča se šele pri razgradnji produktov hidratacije pri visokih temperaturah.

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.

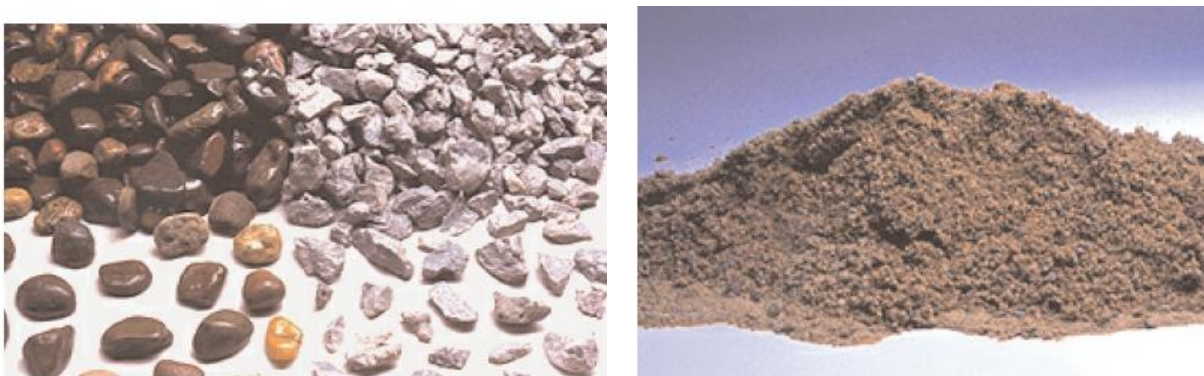


Slika 17: Spreminjanje pH v cementnem kamnu in sprememba kemijskih specij s časom [2]

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 prod, 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]



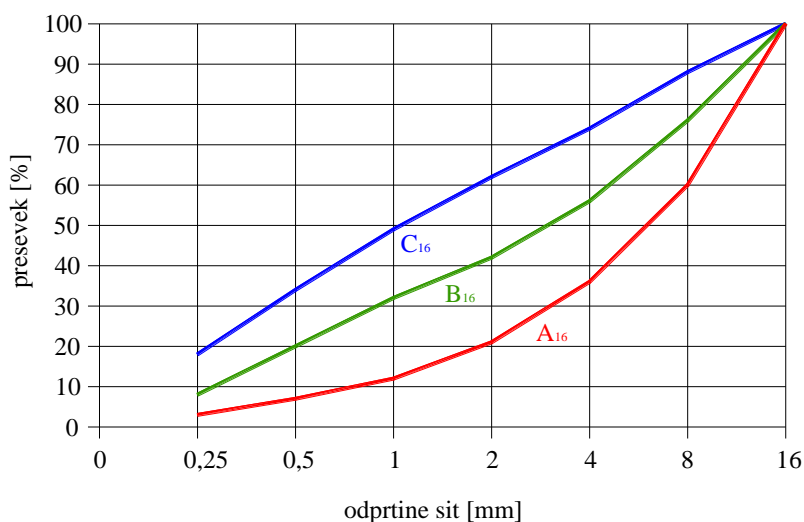
Slika 20: Sejalna analiza agregata [2]

Ustrezno zrnavostno sestavo agregata dobimo s kombinacijo različnih frakcij. Agregat za izdelavo betona je namreč praviloma separiran – s sejanjem na sitih kvadratnih odprtih 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 zrnastostna 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 zrnastost, 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.

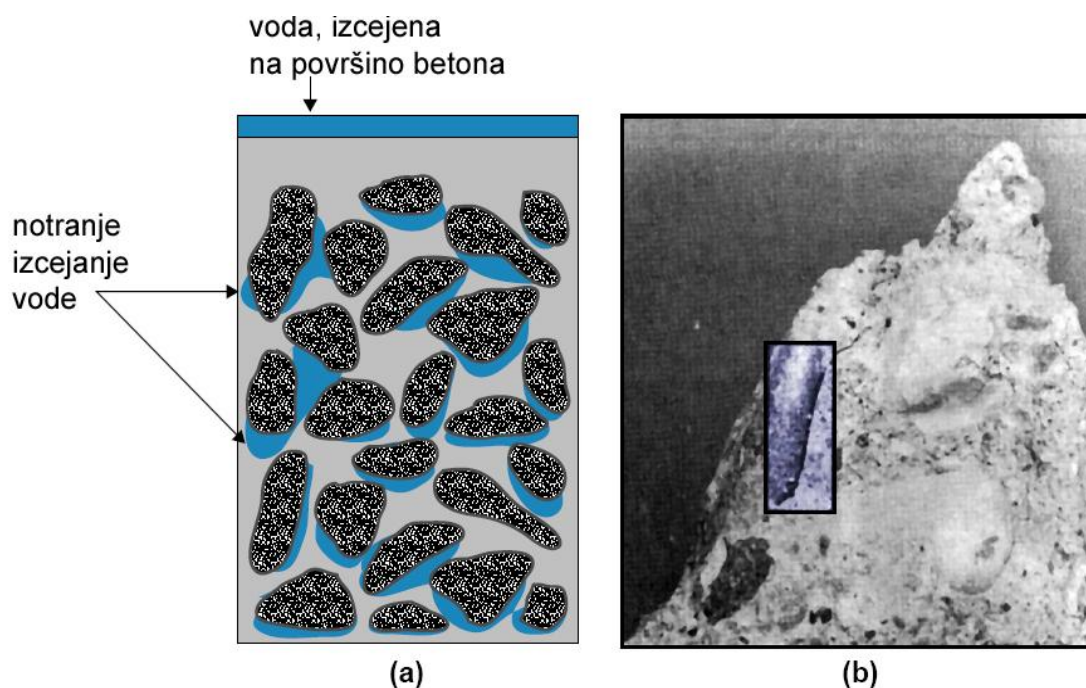
b) Za betone z nezvezno zrnavostjo ali za druge posebne namene se lahko predpišejo dodatne zahteve.

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).



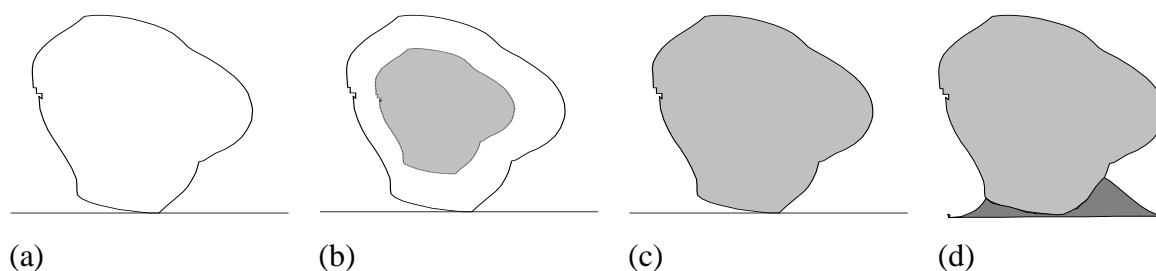
Slika 22:

- Shematični prikaz izcejanja vode iz cementne paste v svežem betonu,
- 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. Znatni 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.

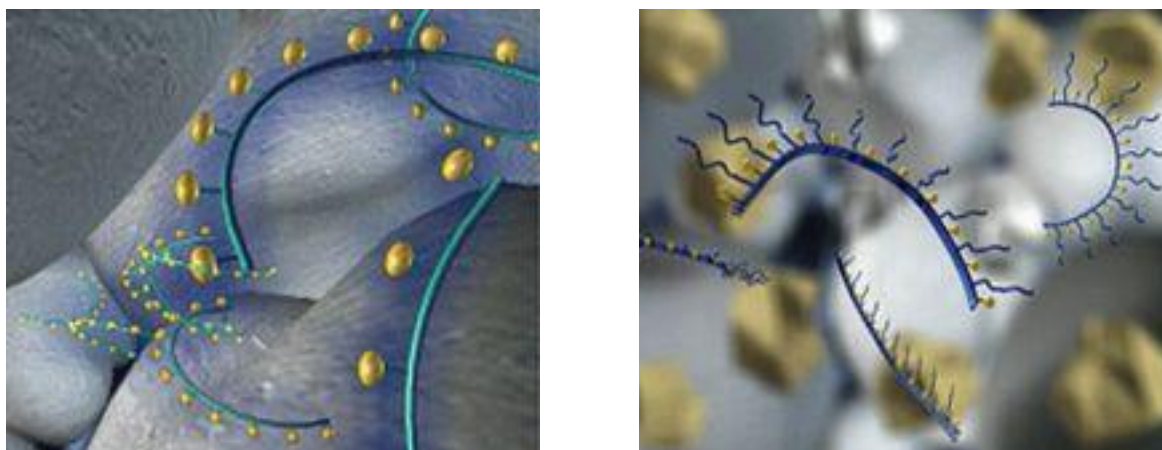
Glede na kemijsko setavo so superplastifikatorji razvrščeni v štiri skupine:

- 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.



A)

B)

C)

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.



A)

B)

C)

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).

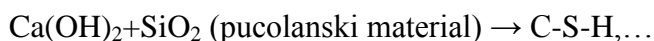
2.4.1 Elektrofiltrski pepel

Elektrofiltrski 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. Elektrofiltrski 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 elektrofiltrski pepel nastaja v oksidacijskih pogojih. Elektrofiltrski pepel, ki se uporablja kot zamenjava cementnega klinkerja, mora izpolnjevati zahteve standarda *SIST EN 450:2005 – Elektrofiltrski pepel – 1. del: Definicije, specifikacije in merila skladnosti*. Z njim lahko zamenjamo do okrog 30% cementnega klinkerja.

Preglednica 12: Kemijska sestava elektrofiltrskega pepela [2]

SPOJINA	DELEŽ
CAO	3 – 30 %
SIO₂	30 – 55 %
AL₂O₃	4 – 10 %
FE₂O₃	0,2 – 2,0 %
SO₃	< 3 %
MGO	< 7 %
NA₂O IN K₂O	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		OO-1	0,55	320
		XD1 + XF2	PV-I	OPZT-S10	0,60ae	300	
					0,55	320	
IV	Močna	XC4, XD2, XS2, XA2, XM2	PV-II		OO-2	0,50	340
		XC4 + XF1	PV-II	NOZT-150	0,55ae	320	
					0,50	340	
V	Zelo močna	XD3, XS3, XA3, XM3	PV-III		OO-3	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)


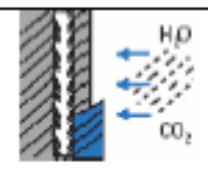
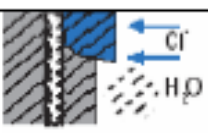
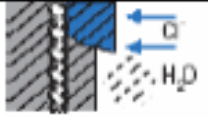



PZT-S10 odpornost površine proti zmrzovanju/tajanju s sredstvi za tajanje, po 10 ciklih zmrzovanja/tajanja, tč. 5.5.6

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)		Vpliv in obremenjenost		Betonski konstrukcijski ukrepi (odpornost)		
Oznaka stopnje				največje V/C	najmanj cementa (kg/m ³)	najmanjši razred trdnosti
XD			ni napada na beton	ni zahteve	ni zahteve	C12/15
XC	1		suho ali trajno mokro	0,65	280	C20/25
	2		mokro, le redko suho	0,60	280	C25/30
	3		zmerna vlažnost	0,55	280	C30/37
	4		karbonatizacija	izmenično mokro in suho	0,50	300
XD	1		zmerna vlažnost	0,55	300	C30/37
	2		mokro, le redko suho	0,55	300	C30/37
	3		kloridi – ne iz morske vode	izmenično mokro in suho	0,45	320
XS	1		izpostavljeno solem v zraku	0,50	300	C30/37
	2		trajno potopljeno	0,45	320	C35/45
	3		kloridi – iz morske vode	območja plimovanja, škropljenja, pršenja	0,45	340
XF	1		zmerna nasičenost z vodo, brez soli	0,55	300	C30/37
	2		zmerna nasičenost z vodo + soli	0,55+AE	300	C25/30
	3		močna nasičenost z vodo, brez soli	0,50+AE	320	C30/37
	4		močna nasičenost z vodo + soli	0,45+AE	340	C30/37
XA	1		malo agresivno kemično okolje	0,55	300	C30/37
	2		srednje agresivno kemično okolje	0,50	320	C30/37
	3		močno agresivno kemično okolje	0,45	360	C35/45
XM	1		zmerna obremenitev	0,55	300	C30/37
	2		močna obremenitev	0,50	320	C30/37
	3		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 konsistence 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 30minut 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.

Neprimernost 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_a voda, ki jo vpije agregat
 V_p voda, ki omoči površino agregata
 ΔV_p dodatna voda odvisna od teksture in mineraloško petrografske sestave agregata
 V_k voda potrebna za standardno konsistenco cementne paste
 ΔV_k dodatna voda potrebna za doseganje zahtevane konsistencne betonske mešanice

2.6 Stično območje med zrnji agregata in cementim kamnom

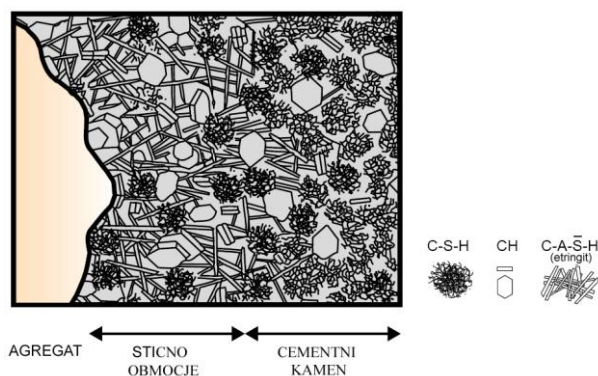
2.6.1 Pomembnost stičnega območja

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

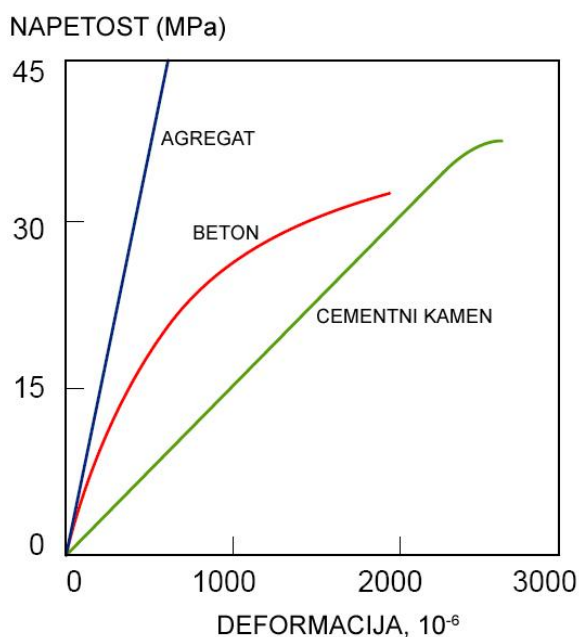
Kakor v cementnem kamnu so tudi v stičnem območju izvor adhezije med produkti hidratacije cementsa in agregatnimi zrnji Van der Waalsove privlačne sile. Zaradi tega je trdnost stičnega območja v vsaki točki odvisna od prostornine in velikosti prisotnih por. Celo pri zelo nizkem v/c razmerju betona sta 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 zrnastostne sestave agregata, količine cementsa, 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 izdelava 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 predstavitev 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	–	–	$\geq 1,46$
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 časa 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 zunanjega 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 oblivanje 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:

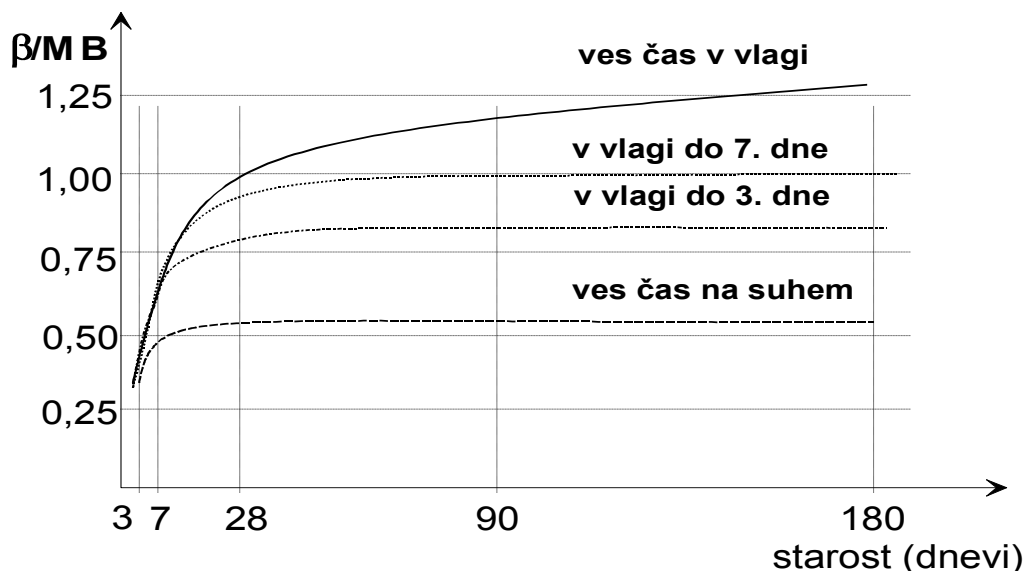
- zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti mešanice,
- izboljšanje obdelavnosti mešanice ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode,
- počasnejši padec obdelavnosti mešanice,
- dosežemo dovolj nizko v/c razmerje in istočasno ustrezne in dovolj dolgo trajajoče reološke lastnosti svežih 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]

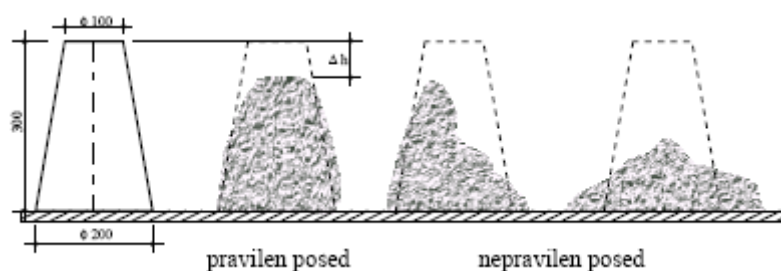
Beton lahko negujemo na različne načine. Lahko ga polivamo z vodo, pokrijemo z mokrimi tkaninami, prekrijemo z plastično folijo, vlažimo z razprševanjem vode... Na ta način lahko negujemo le površine, ki niso v stiku z opažem, ostale površine pa le po odstranitvi opaža. Zadnje čase pa se uporabljajo 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

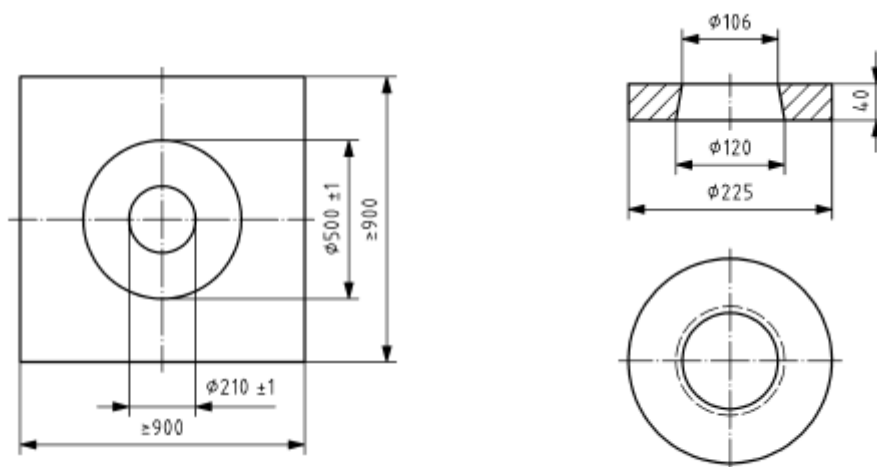
[8]

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 lahkovgradljivega 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 toga 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.



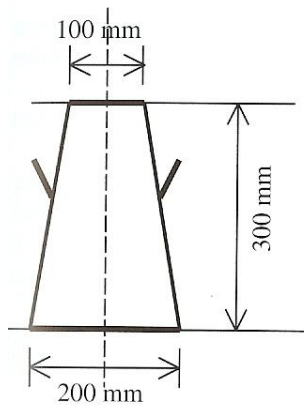
Slika 32: Nepodajna podlaga z vrisanim včrtanim krogom [11]

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.



a)



b)



c)

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.



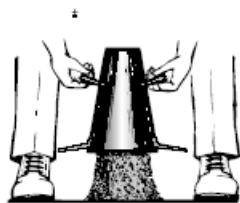
2. Napolni kalup do nekaj več kot 2/3 njegove višine s svežim betonom in novi sloj ponovno zgosti s 25 udarci z zgoščevalno palico tako, da palica prodre čez stik med prvim in drugim slojem (toliko da še prodre v spodaj ležeči sloj), ne sme pa iti skozi prvi sloj. Udarce razporedi enakomerno po površini 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.



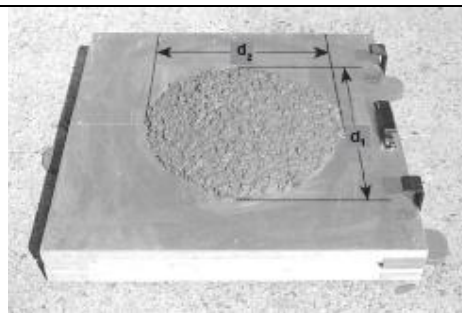
4. V primeru uporabe lijaka, le tega previdno odstrani. Potem s pomočjo jeklene palice za zgoščevanje odstrani odvečni beton tako, da vodiš palico s kretnjami žaganja ali valjanja po zgornjem obodu kalupa. Nato odstrani beton, ki je padel na osnovno ploščo/površino ter ploščo očisti.



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 preskušanec 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 preskušanec. Kalup je lahko tudi obrnjen. Položi palico za zgoščevanje horizontalno čez kalup tako, da sega čez poseden preskušanec. Z merilom določi razdaljo med prvotno višino preskušanca (višina kalupa) in najvišjo točko posedenega betonskega preskušanca. Višino poseda (h) zabeleži.

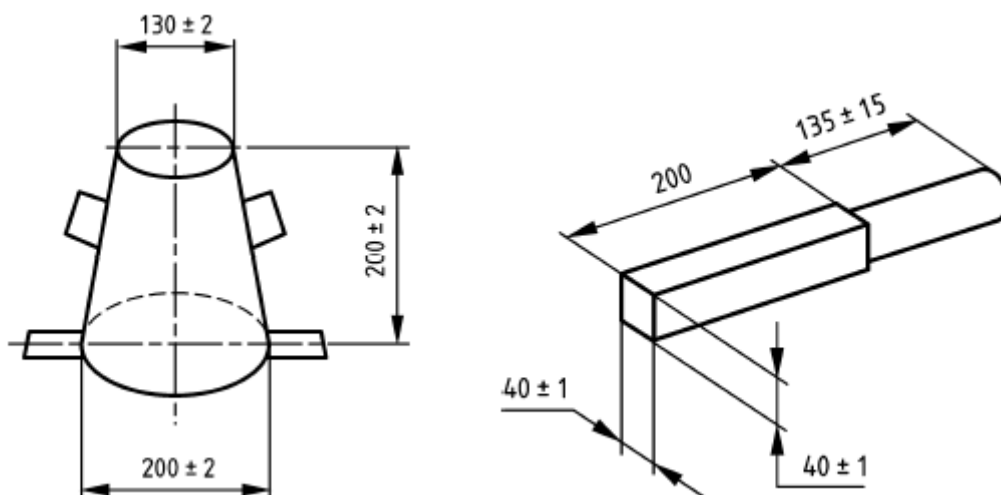


7. Na koncu z merilom izmeri največji dimenziji d_1 in d_2 razleza s posedom v dveh smereh, vzporednih s stranicami osnovne plošče (slika), in obe meritvi zaokroži na najbližjih 10 mm in jih zabeleži.

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.

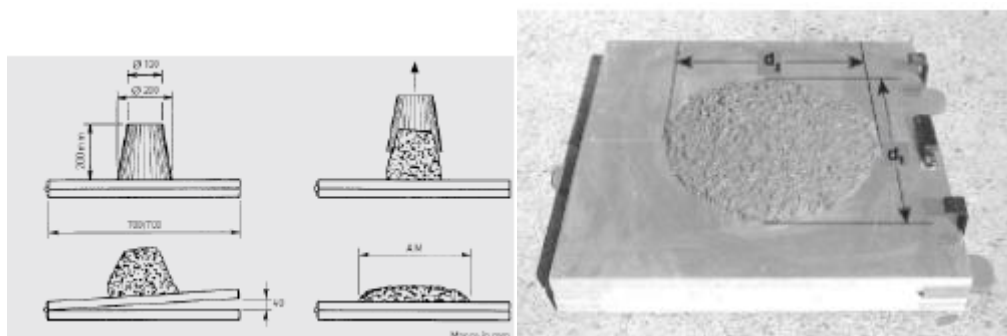


Slika 34: Standardni kovinski konus in standardna lesena palica [12]

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.

$$C = \frac{h_1}{h_2} = \frac{h_1}{h_1 - s} \quad (\text{Enačba 3})$$

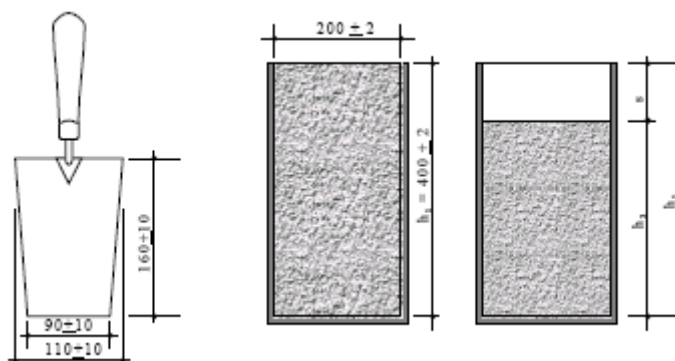
kjer je;

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

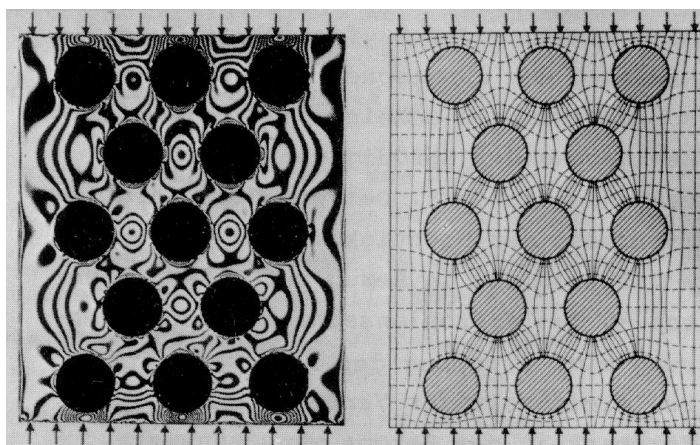
5.1 Lastnosti betona

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

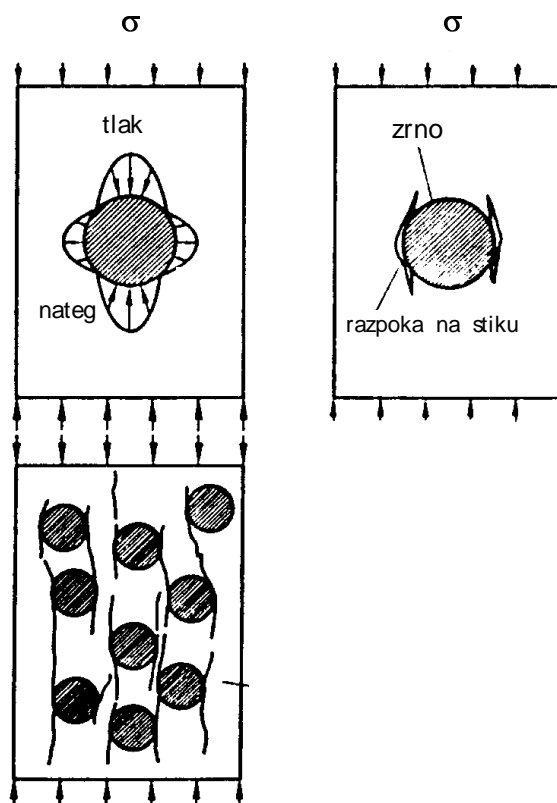
Poleg materialno pogojenih nehomogenosti vplivata na moten potek silnic predvsem različna modula elastičnosti cementnega kamna in agregata. Napetostno-optične metode izpeljane na modelnih betonih prepričljivo ponazarjajo, da bolj tog agregat privlači inducirane glavne napetosti. Zato napetosti ne potekajo 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.

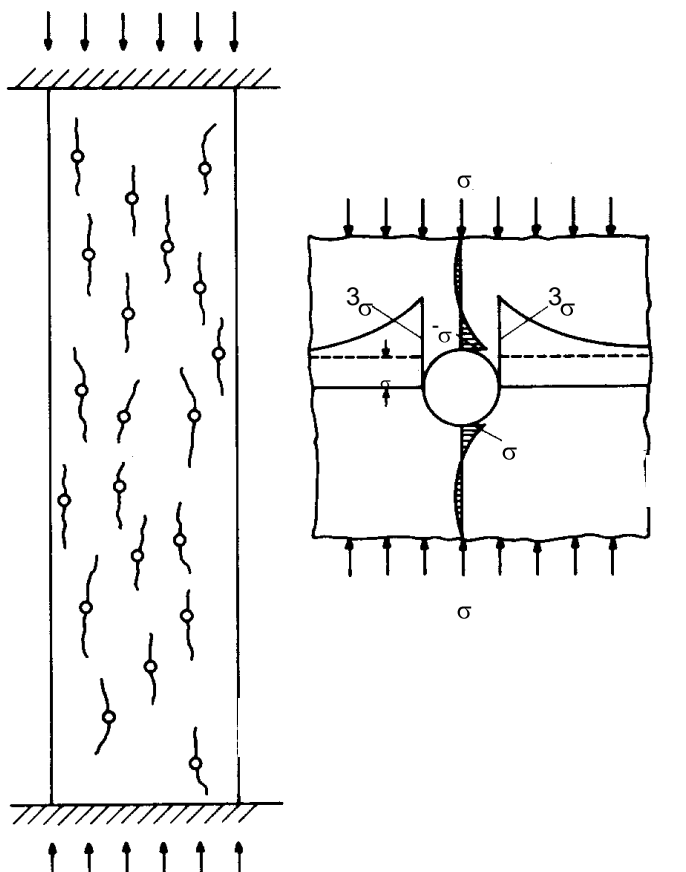
Če ponovno primerjamo strukturo betona s prostorskim paličjem, izhajajo iz agregatnih zrn, ki predstavljajo vozlišča sistema, tako tlačno kot natezno obremenjene palice (Slika 40). S pomočjo teoretičnih računskih modelov določen potek napetosti okrog krožnega agregatnega zrna je shematsko prikazan na 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.

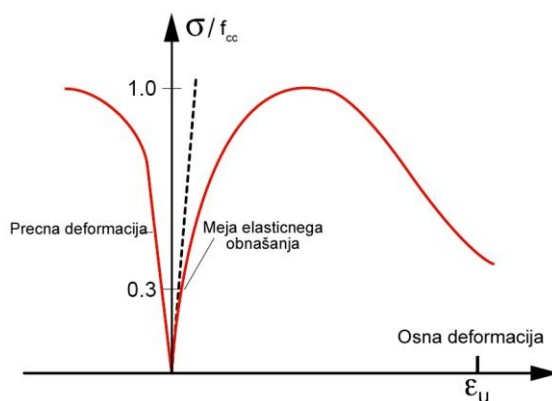


Slika 42: Shematični prikaz mikrorazpok v poroznem materialu in porazdelitev napetosti okrog krožne pore pri enosni tlačni obremenitvi [2]

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.

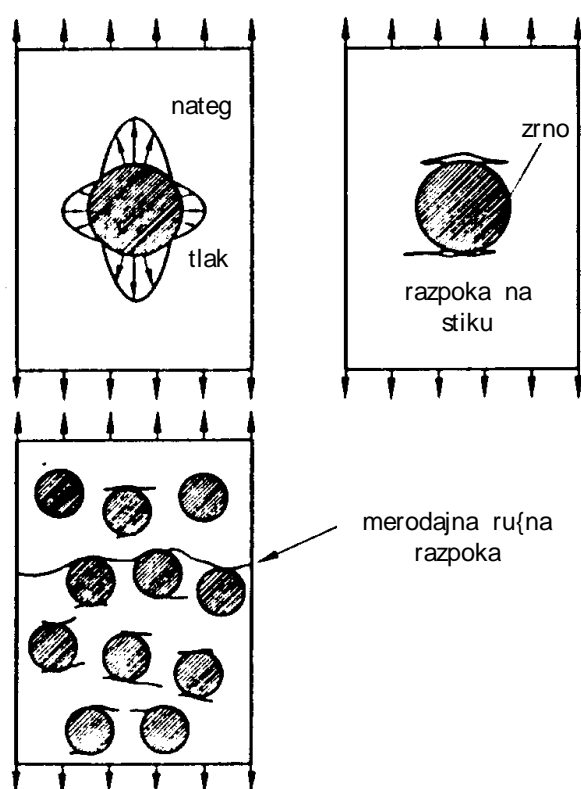


Slika 43: Sovisnost med napetostjo ter osno oziroma prečno deformacijo [2]

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 zrnovostne sestave (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, zrnovostna 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)

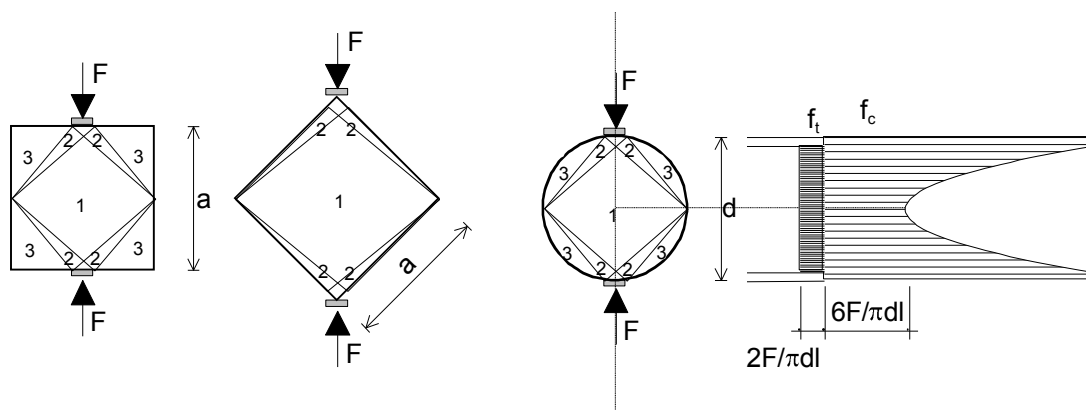
Pri enakomerni natezni obtežbi betonskega elementa so slike koncentracij napetosti in razpok obrnjene za 90° (Slika 44). Mikrorazpoke ležijo na polih agregatnih zrn. V tem primeru je širjenje razpok pospešeno, saj vpeljana zunanja obtežba pri tem neposredno sodeluje. Prečni prerez, ki je sposoben prenašati 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-jevimi zakonomi.

$$u_x = -K \cdot \frac{\partial h}{\partial x}, \quad (\text{Enačba 4})$$

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

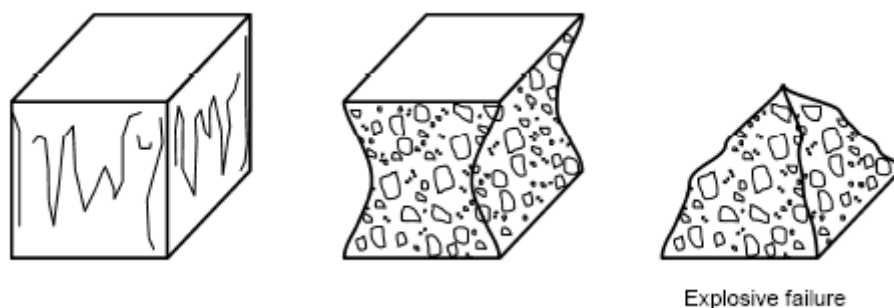
Tlačna trdnost mora biti zaokrožena na minimalno 0,1 MPa [N/mm²] natančno.

6.1.1 Določevanje tlačne trdnosti betona

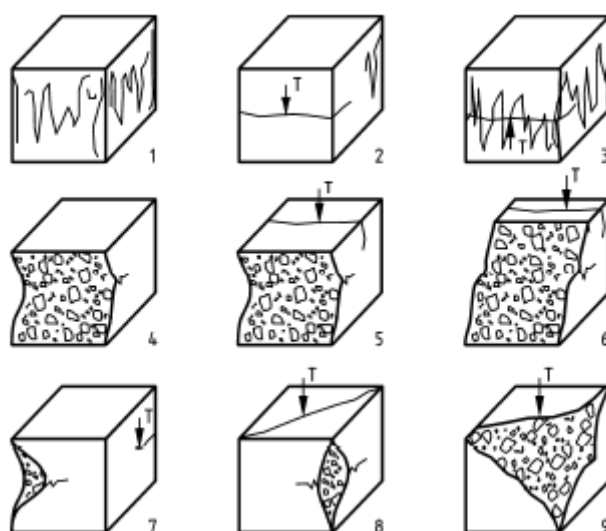
Če je treba določiti tlačno trdnost betona, mora določanje temeljiti na preskusih izvedenih na kockah s stranico 150mm ali na valjih s premerom 150mm in višino 300mm, skladnih s SIST EN 12390-1, izdelanih in negovanih po SIST EN 12390-2 iz vzorcev vzetih po SIST EN 12350-1.

Preden postavimo preskušanec 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. Preskušanec 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 $0,6 \pm 0,2$ MPa/s (N/(mm²·s)). Obremenitev uvajamo na preskušanec 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.

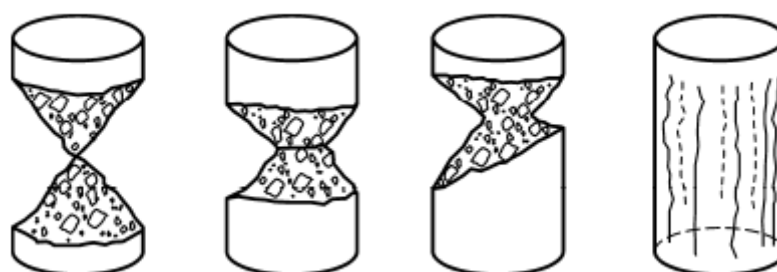
Če je preizkušane primerno oziroma neprimerno porušen je možno preveriti v SIST EN 12390-3, kar prikazujejo spodnje slike:



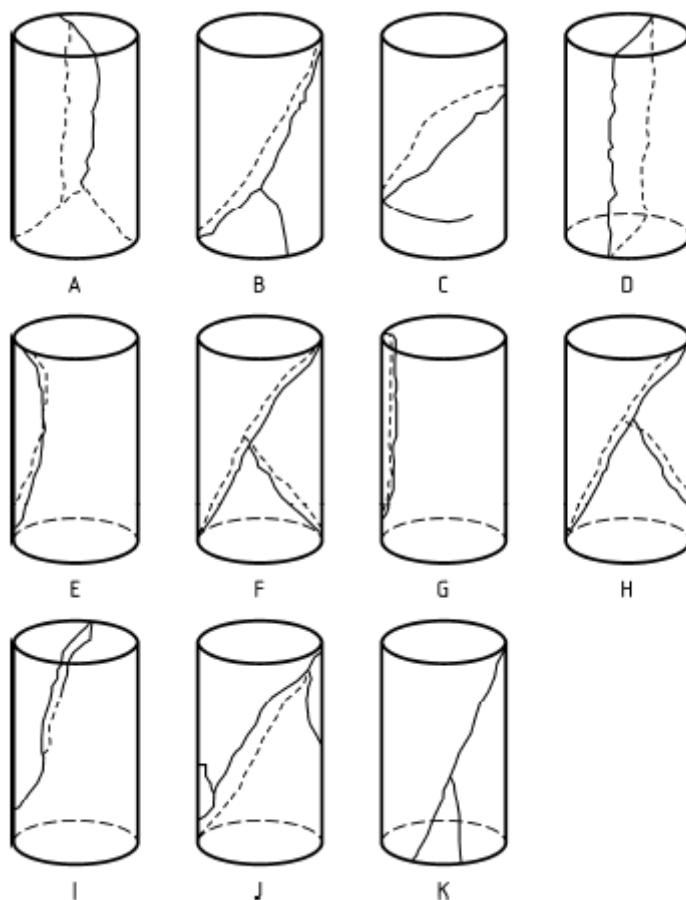
Slika 46: Shematični prikaz pravih porušitev betonskih kock po SIST EN 12390-3 [15]



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]



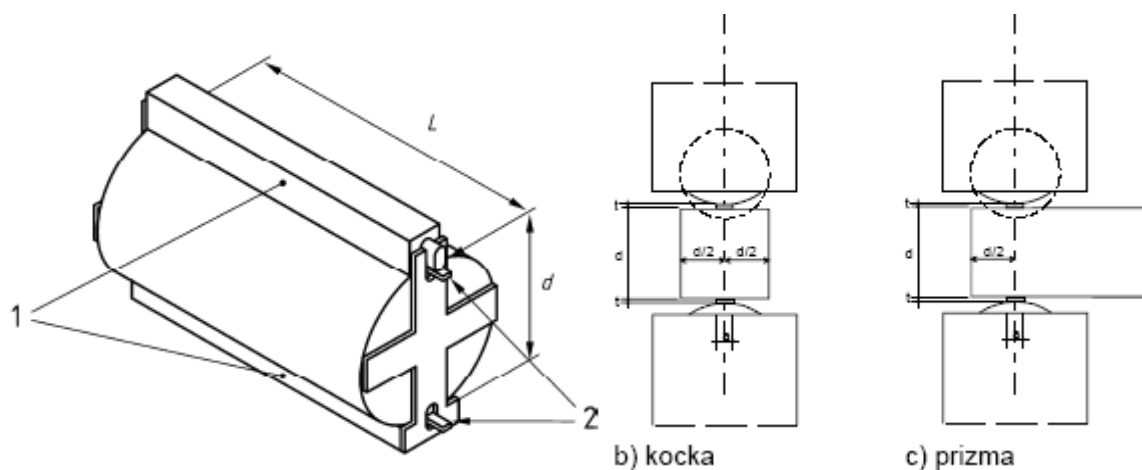
Slika 49: Shematični prikaz nepravilne porušitve valjastih betonskih preskušancev po SIST EN 12390-3 [15]

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

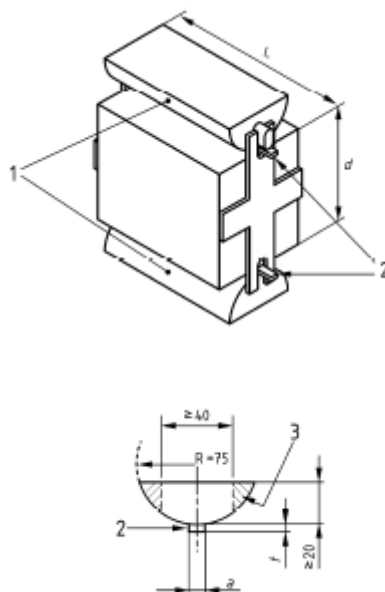
Natezna razcepna trdnost je pomembna pri oceni obremenitve, pri kateri nastanejo razpoke v betonu. Postopek določanja natezne razcepne trdnosti betona je opisan v standardu SIST EN 12390-6.

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 zavrnjeni ali pa popravljeni tako, da zadovoljijo zahteve standarda. Pri preizkušanju 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

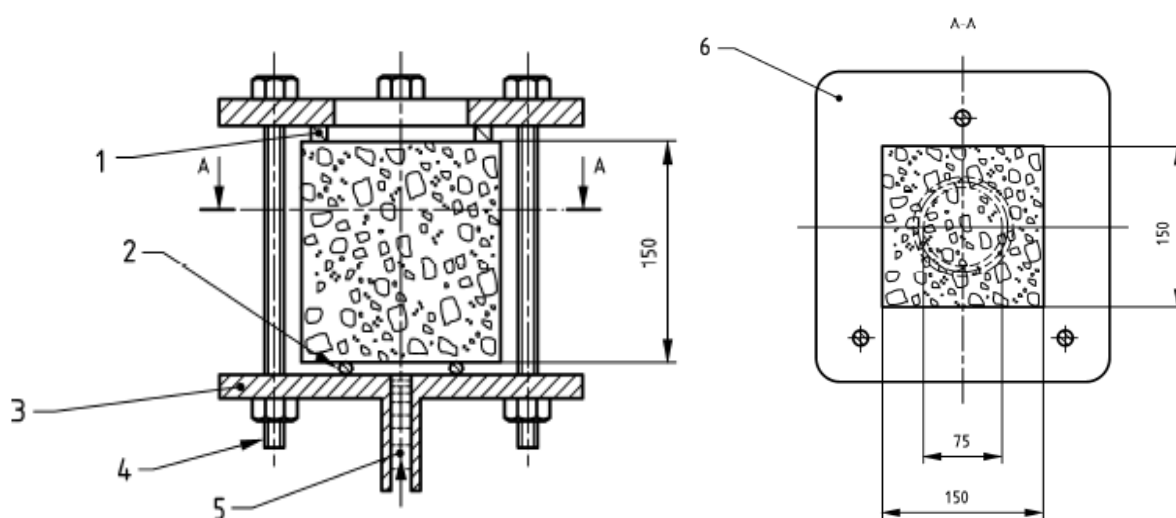
Takšen preskus opravljamo, kadar nas zanima odpor betona na različnih objektih ali konstrukcijah, na katere lahko deluje podzemna voda, ali druge tekočine. Problem lahko nastane pri zahtevnih objektih, kot so: inženirske pregrade, vodotesne betonske konstrukcije, odlagališča radioaktivnih odpadkov, bazeni, 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 ustrežno 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).

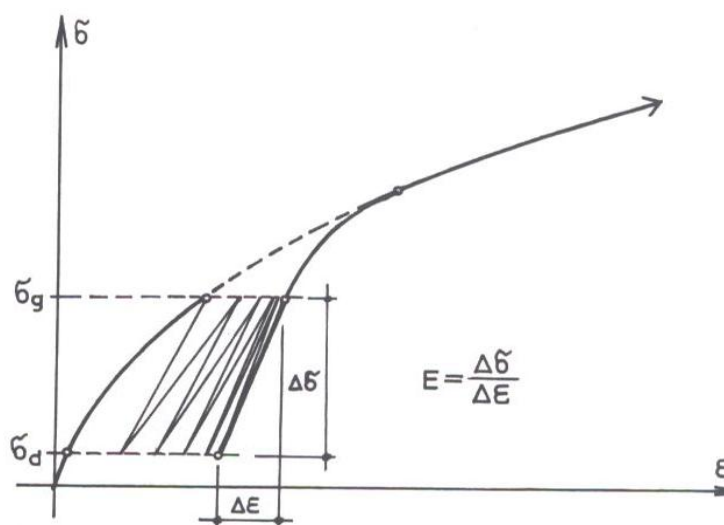
Preglednica 21: Ocena kvalitete betona glede na hitrost potovanja ultrazvoka [6]

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]

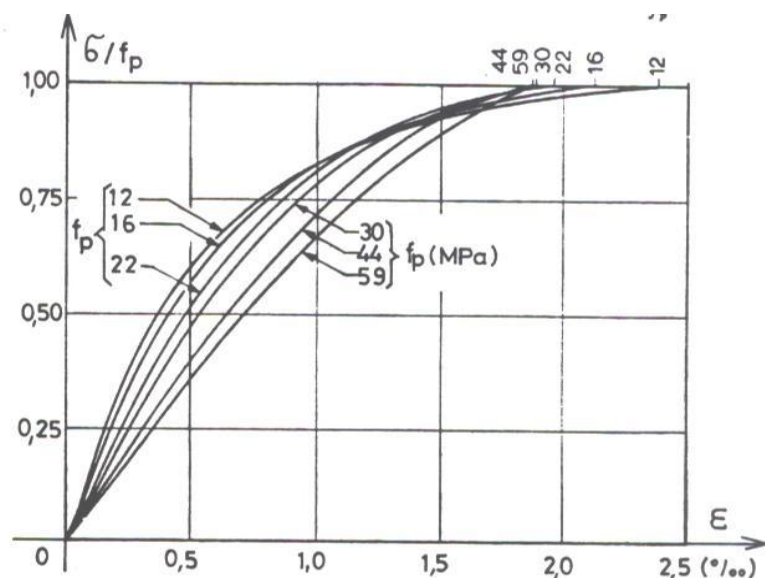
Modul elastičnosti betona se določa s preiskavami betonskih prizem (100x100x400mm) ali valjev ($d=100-150$; $h=300$) po 28 dnevem negovanju v vodi ali v prostoru s 95% vlažnostjo. Dimenzije preskušancev so takšne, da imajo razmerje med višino in širino večje od 2.

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 preizkušanec 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]

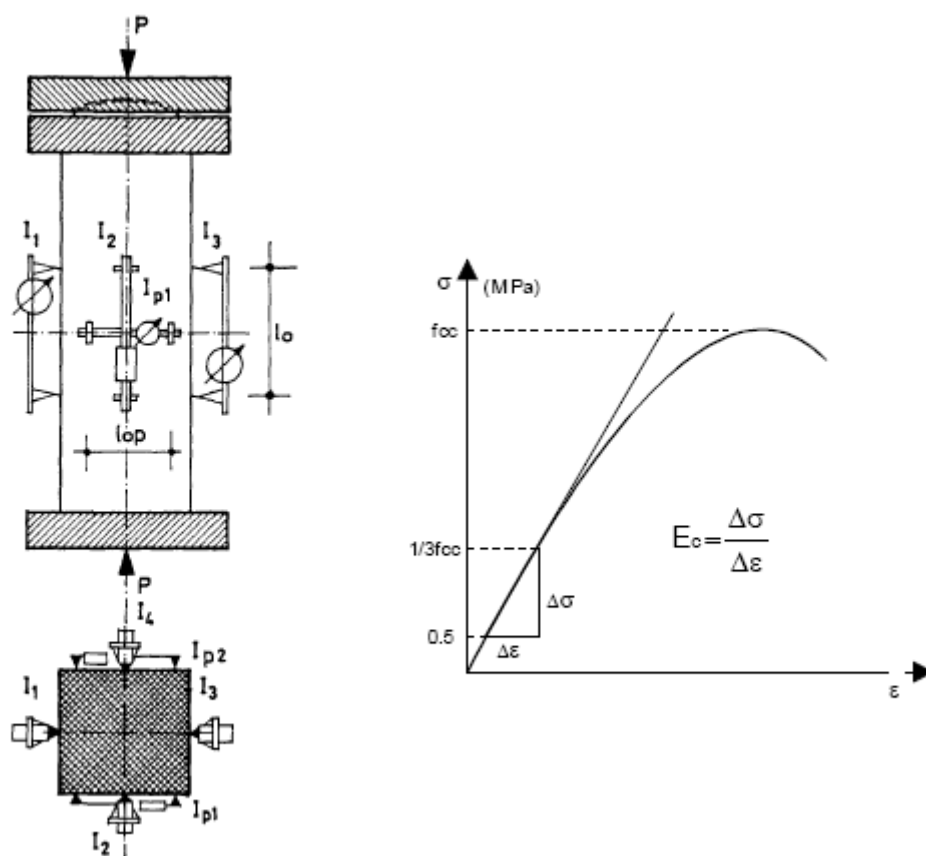
Po tem standardu, se vrednost modula elastičnosti E določa na prizmah ali valjih, kjer pa mora biti izpolnjen pogoj da je razmerje $2 \leq h/a \leq 4$, s tem da mora dimenzija a biti minimalno štiri krat večja od največjega trna agregata v betonu. Za preskušanje potrebujemo 3 preskušance za ciklično 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:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{Enačba 10})$$

kjer je:

- $\Delta\sigma$ razlika napetosti ($\sigma_g - \sigma_d$) [MPa];
- $\Delta\varepsilon$ razlika pripadajočih deformacij [%].

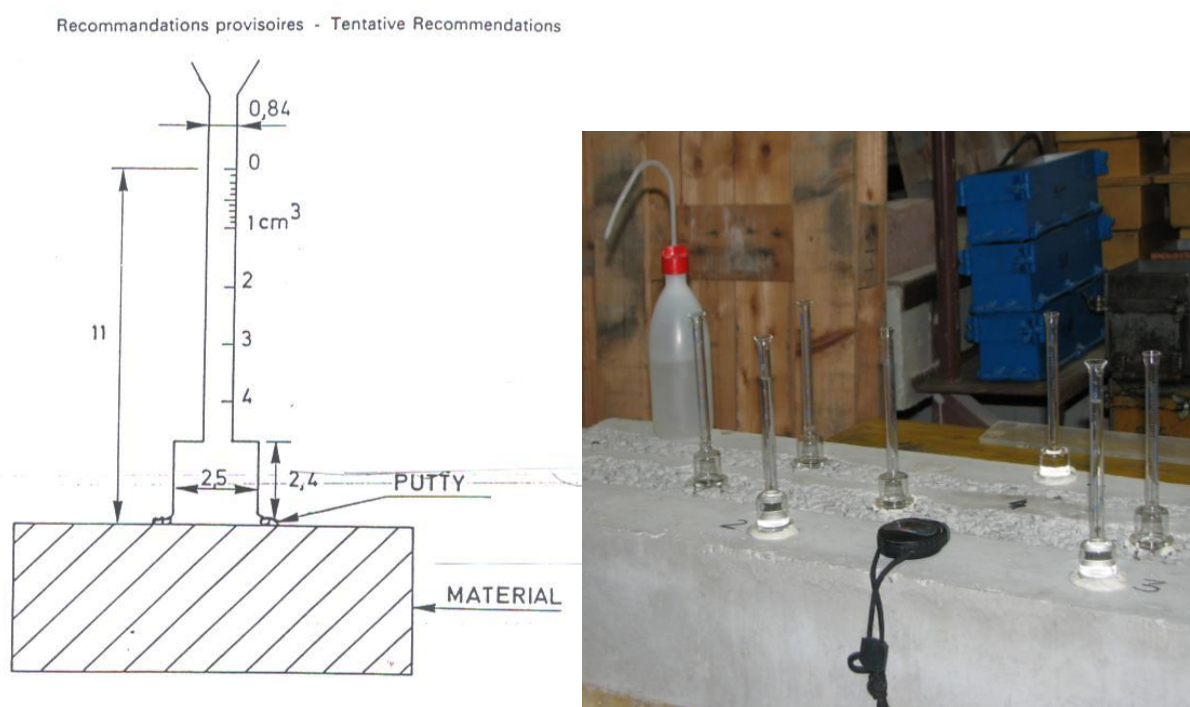
Rezultate zaokrožimo na 500 MPa, za vrednosti večje od 10000 MPa ali pa na 100 MPa, za rezultate do 10000 MPa. Na ta način dobljeno vrednost elastičnega modula imenujemo tudi statični modul elastičnosti. V primeru delovanja kratkotrajnih obremenitev, v področju napetosti od 0,5MPa do $\frac{1}{3}$ tlačne 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/m ³]	Prostorninska masa agregata v zbitem stanju [kg/m ³]	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 43litrov betona, v protitočnem laboratorijskem mešalniku s kapaciteto 50litrov 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 180minut). 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	1m3 BETONA [Kg]	PROSTORNINSKA MASA [Kg/m3]	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
γproj [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.

Drugo mešanico L2 smo napravili v enaki količini kot mešanico L1 to je 43litrov. 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.

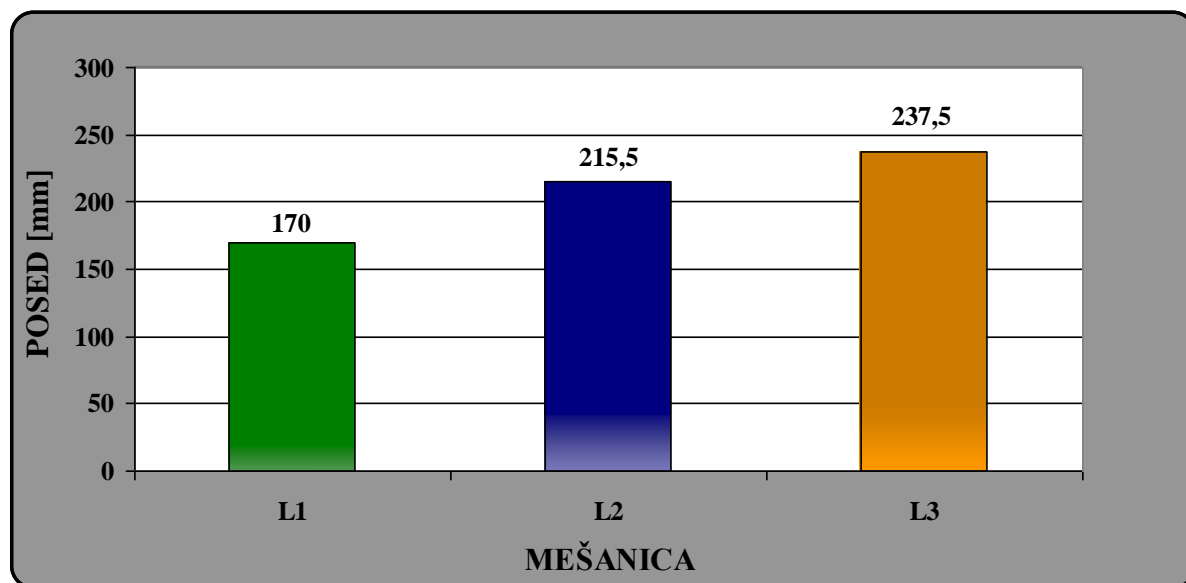
7.4 Preiskave svežih betonskih mešanic

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.



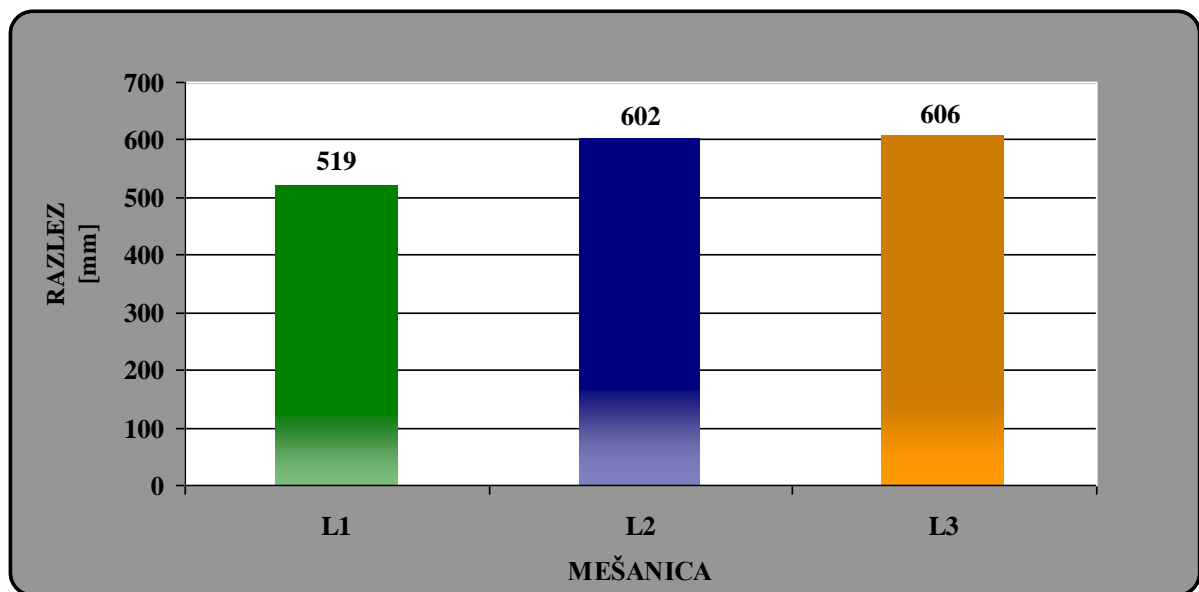
Razredi poseda:

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.



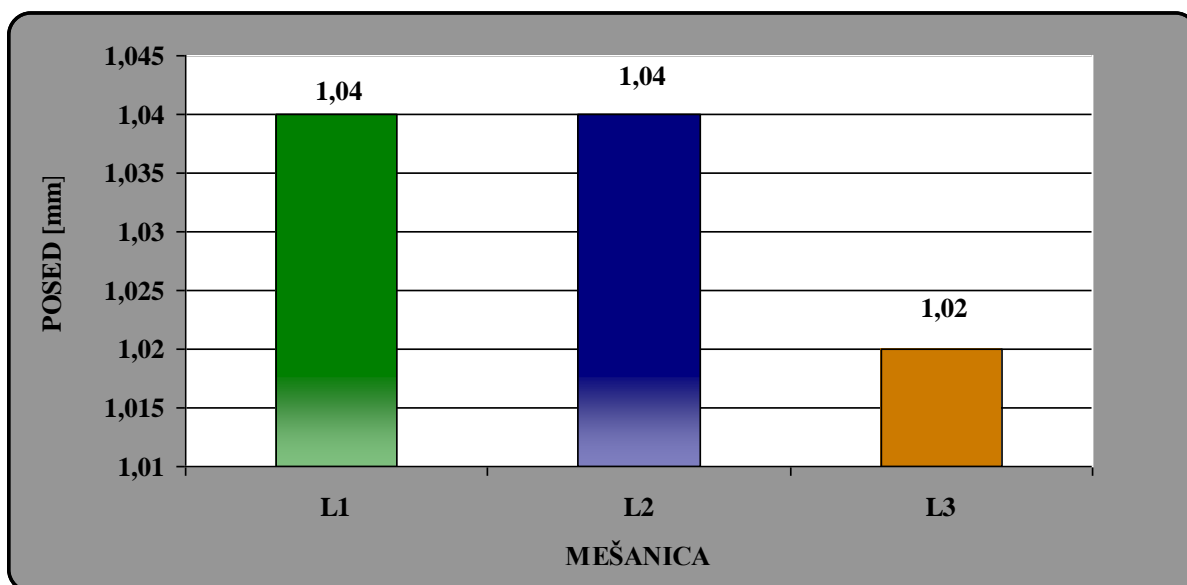
Razredi razleza

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

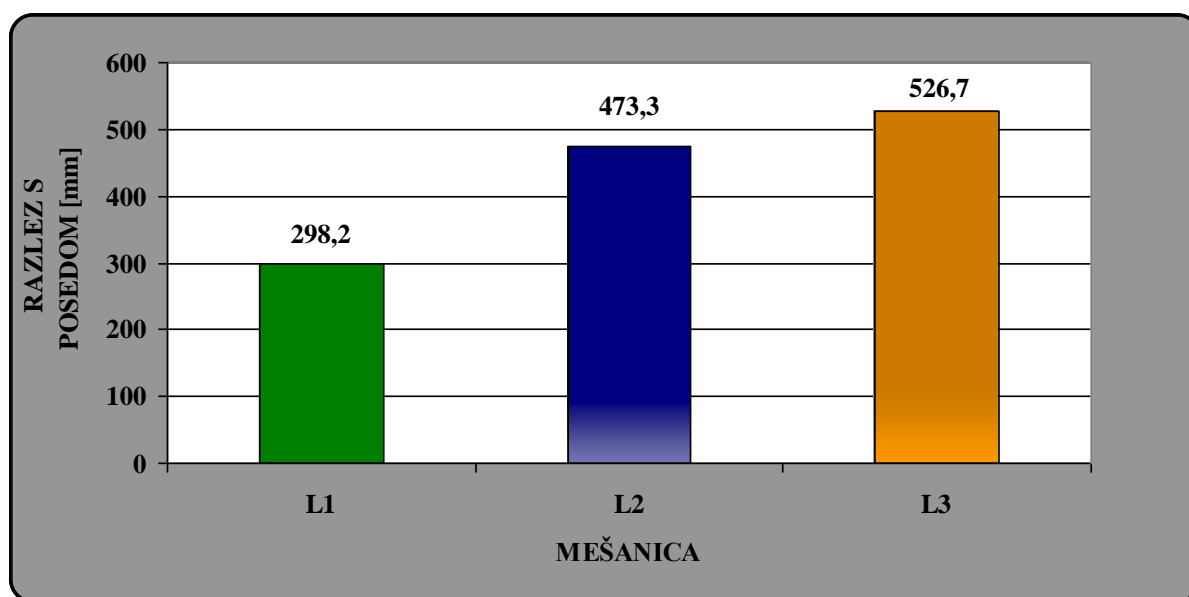
Slika 62: Prikaz poseda betonske mešanice v standardnem kalupu po SIST EN 12350-4 in razredi zgoščitve po SIST EN 206-1

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 mašanice.

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

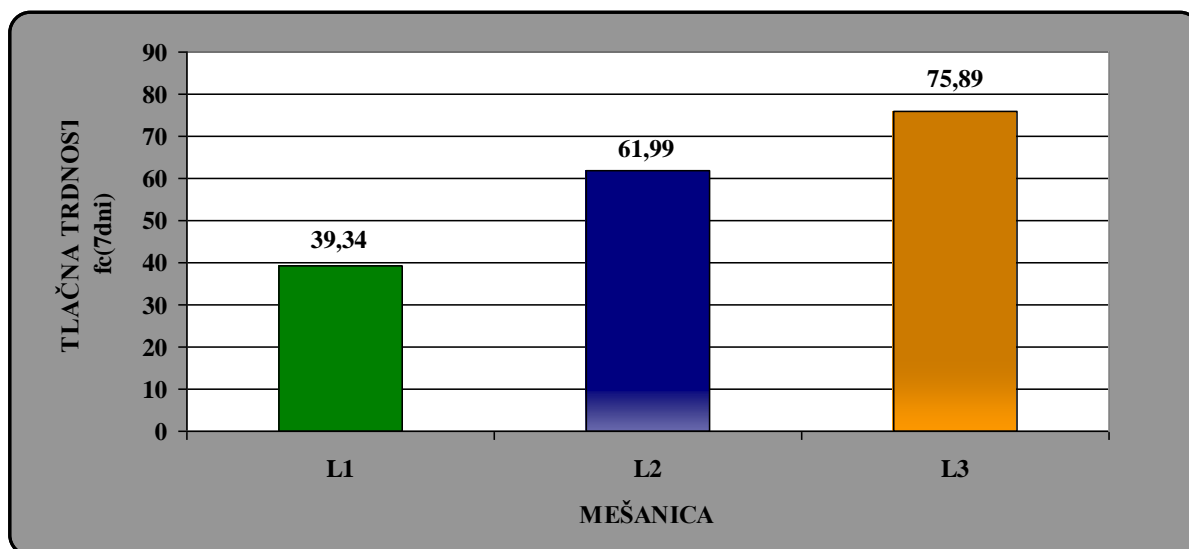
7.5 Preiskave strjenega betona

7.5.1 Tlačna trdnost

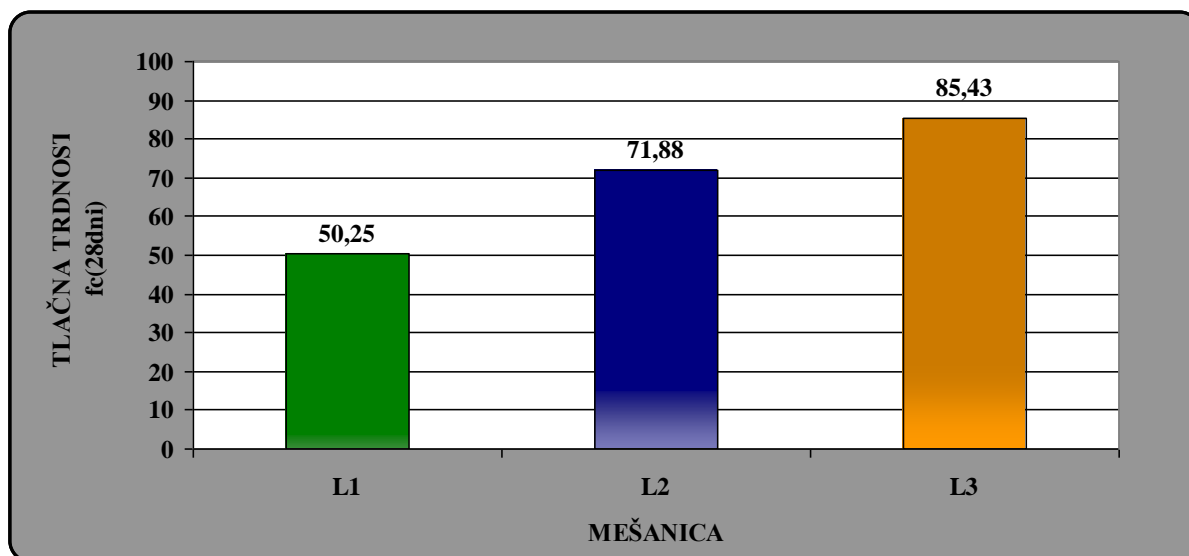
Tlačna trdnost betona je definirana, kot maksimalna izmerjena odpornost betona na osno tlačno obremenitev. Za klasifikacijo se lahko uporabi karakteristična tlačna trdnost kock s stranico 150mm po 28 dneh. Primerjali smo tlačno trdnost mešanic L1, L2, L3, v odvisnosti od različne nege, v odvisnosti od 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



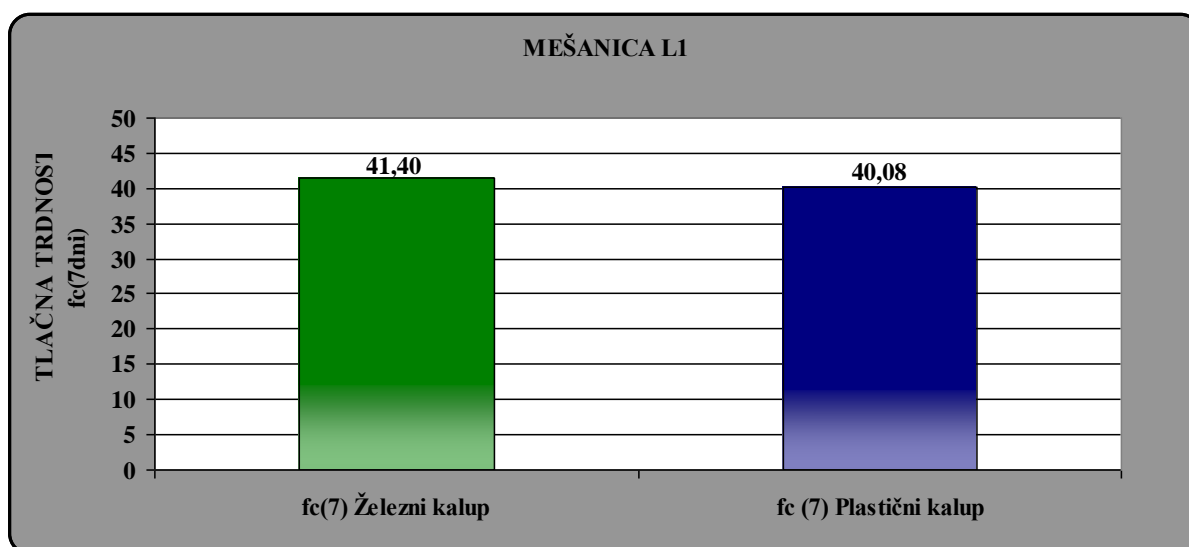
Slika 66: Povprečna tlačna trdnost betonov pri starosti 28 dni

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

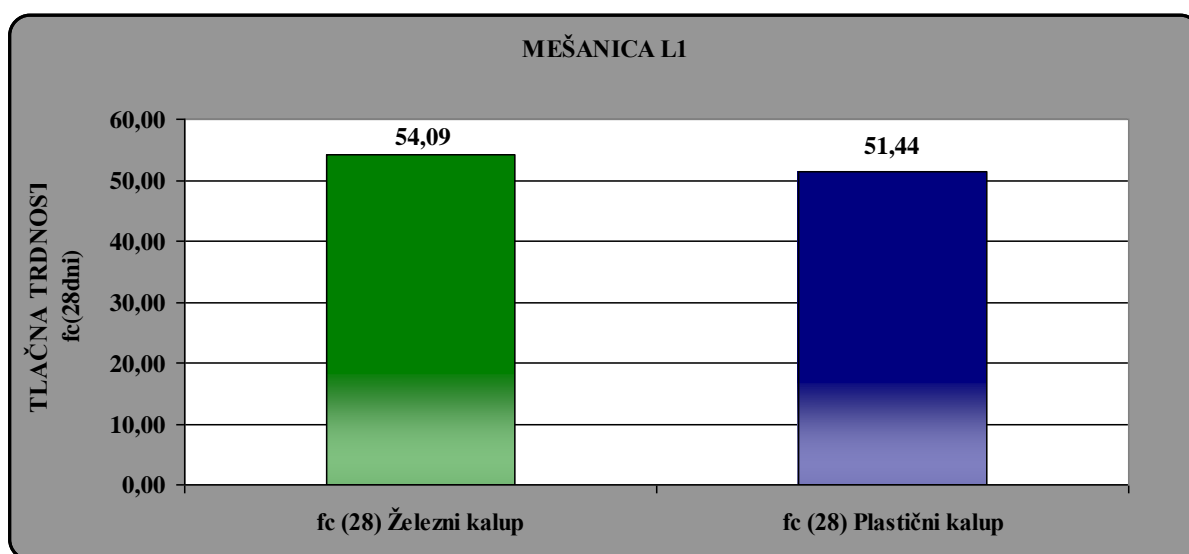
(3000 in 5000 cm²/g), bolj zapolnijo pore v betonski strukturi, zato je le ta gostejša kot pri betonu L2 z enakim v/c razmerjem, vendar brez EF pepela. Dodaten ugoden vpliv pa lahko predstavlja tudi večja kohezivnost betona.

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.

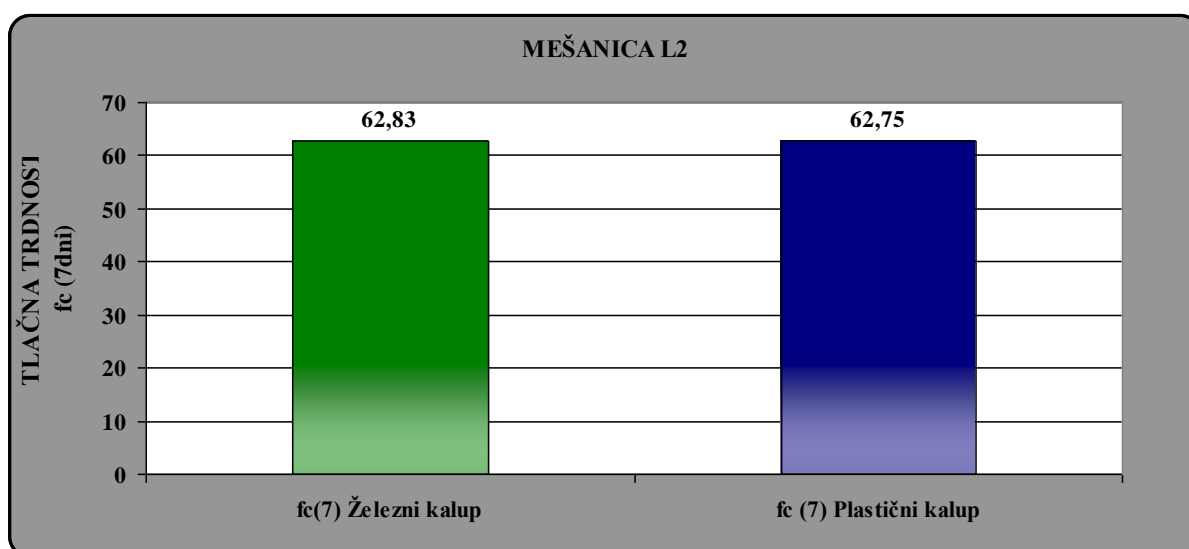


Slika 67: Primerjava tlačne trdnosti (po 7 dneh) v odvisnosti od vrste opaža

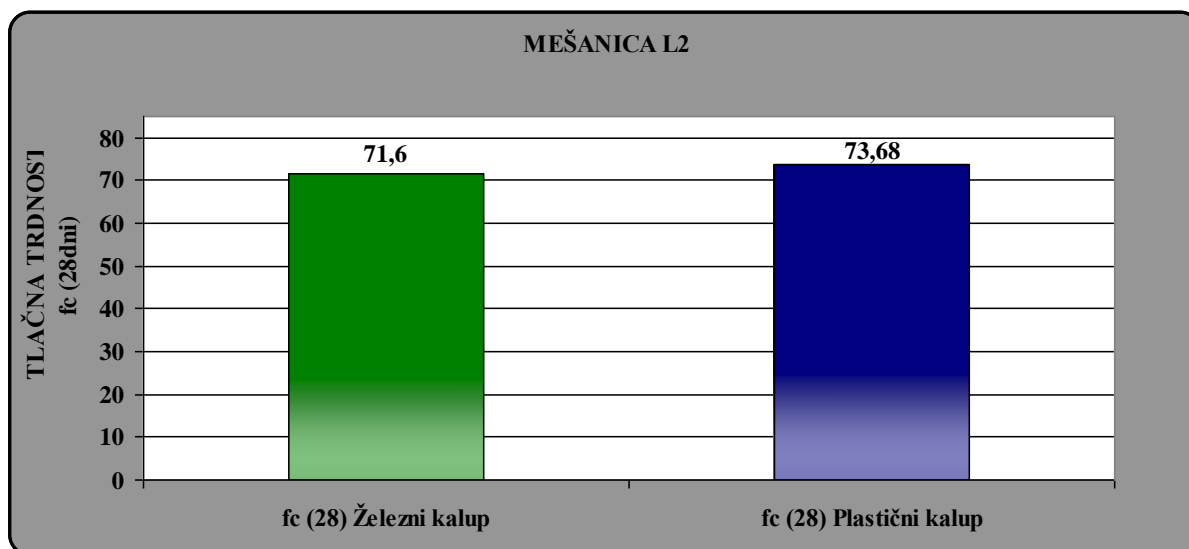


Slika 68: Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste opaža

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

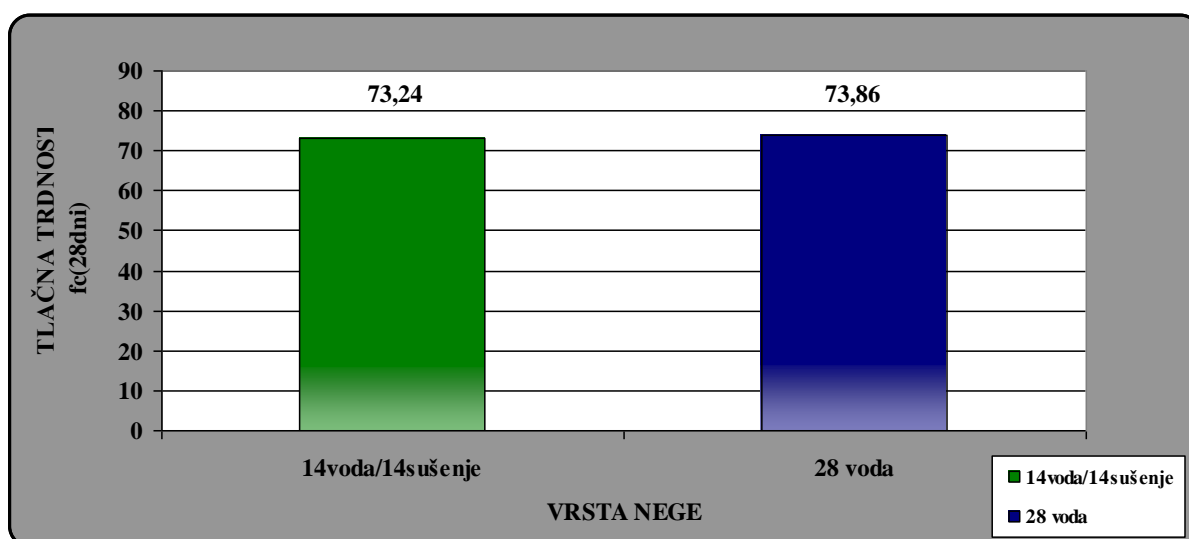


Slika 70: Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste opaža

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:



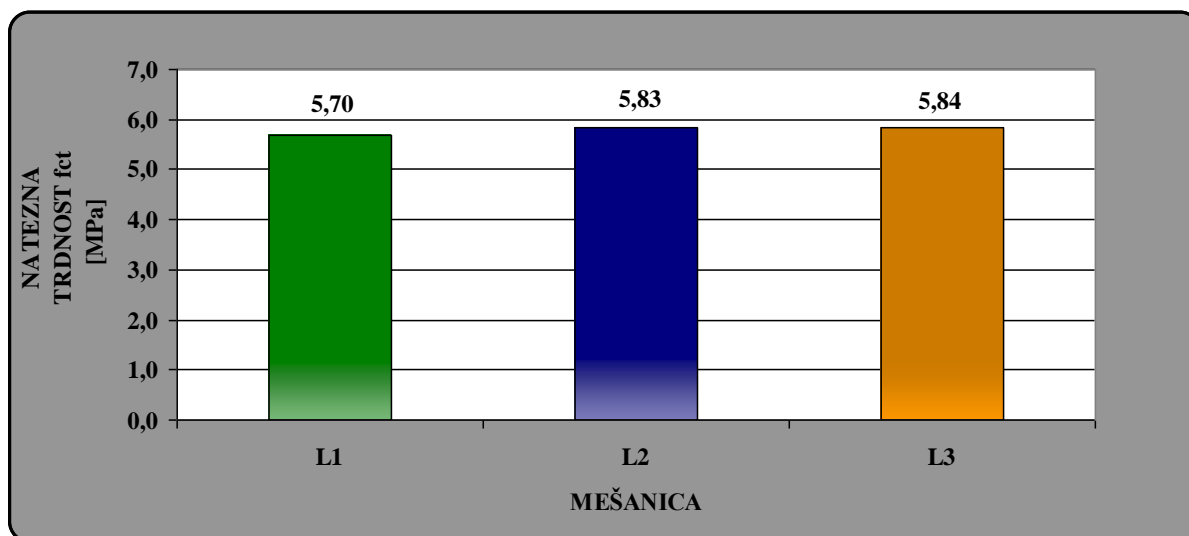
Slika 71: Primerjava tlačne trdnosti (po 28 dneh) v odvisnosti od vrste nege

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

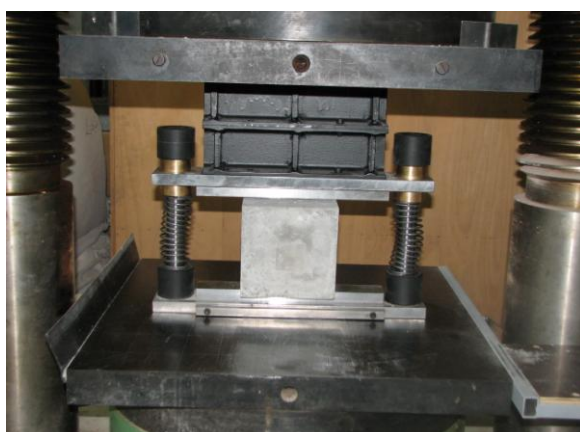
7.5.2.1 Primerjava nateznih trdnosti naših mešanic L1,L2 in L3

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.

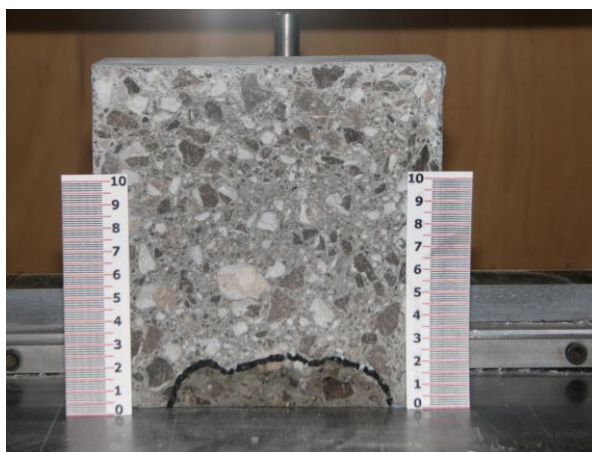
7.5.3.1 Primerjava preskusa vodotesnosti med JUS U.M1 015 standardom in SIST EN 12390-8

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.



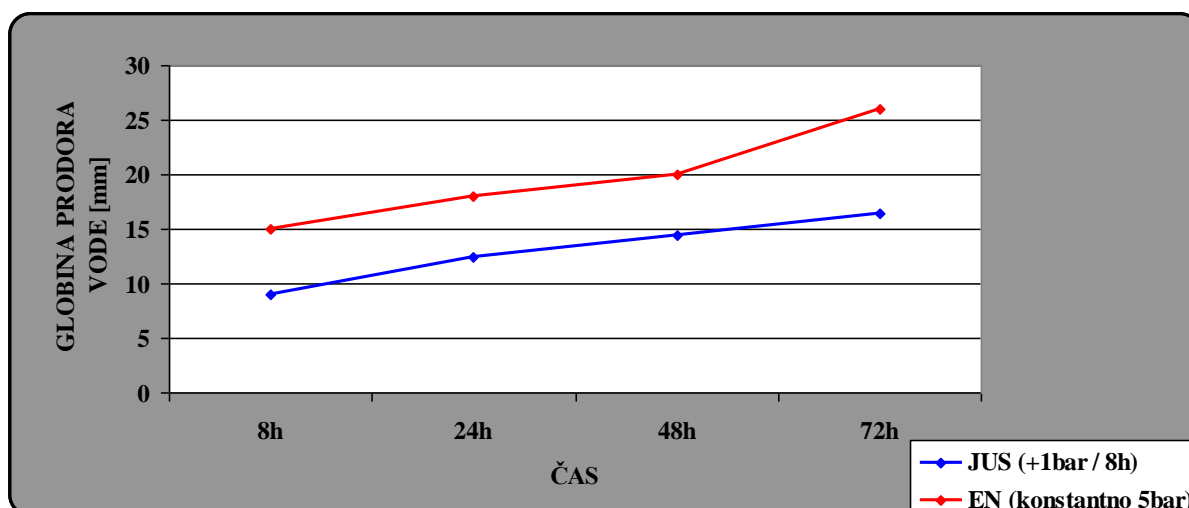
Slika 75: Prikaz določevanja globine prodora vode

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 preizkušanelec pri preskusu po SIST EN 12390-8

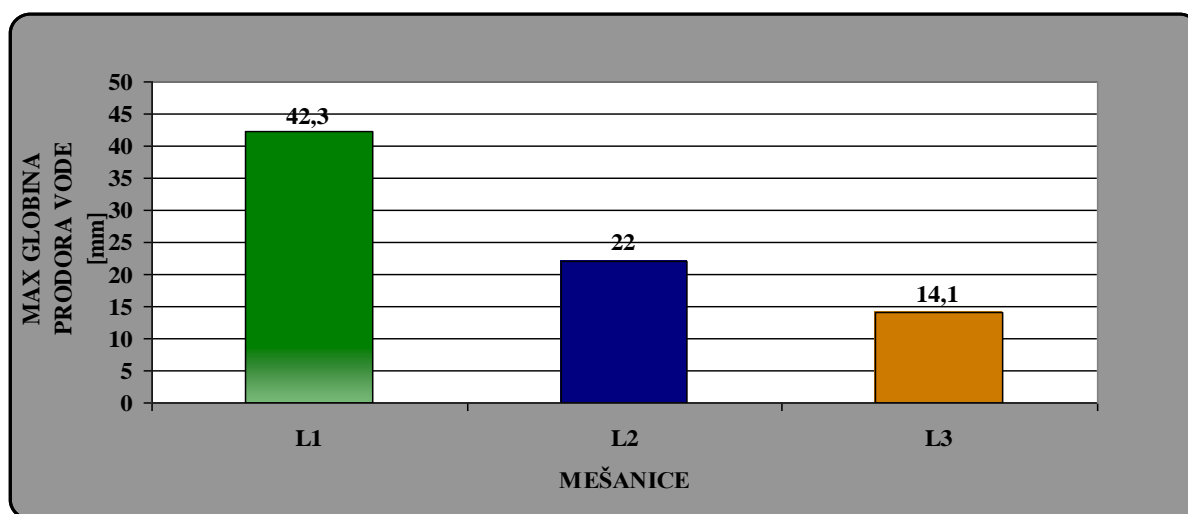
in največji dovoljeni odklon posameznih rezultatov preskušanja od največje dovoljene vrednosti prodora vode (preglednica 32).

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

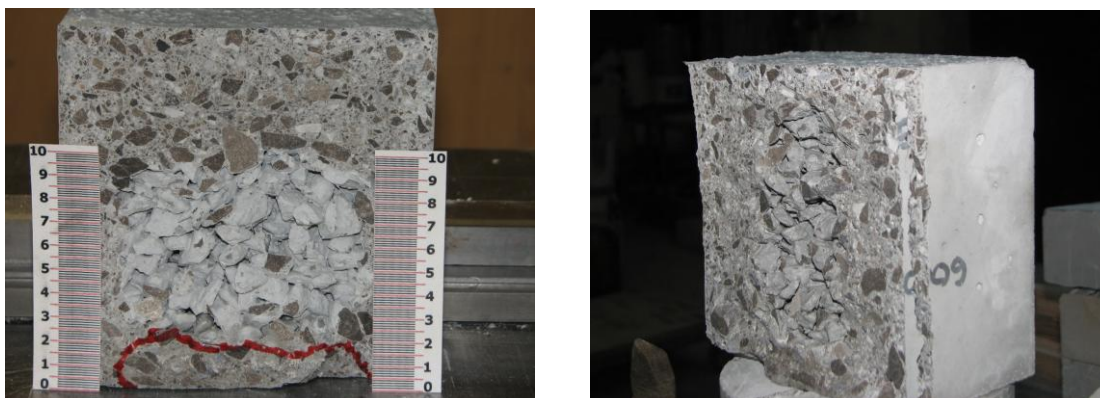
7.5.3.3 Vpliv šibkih mest v betonu na njegovo vodotesnost

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

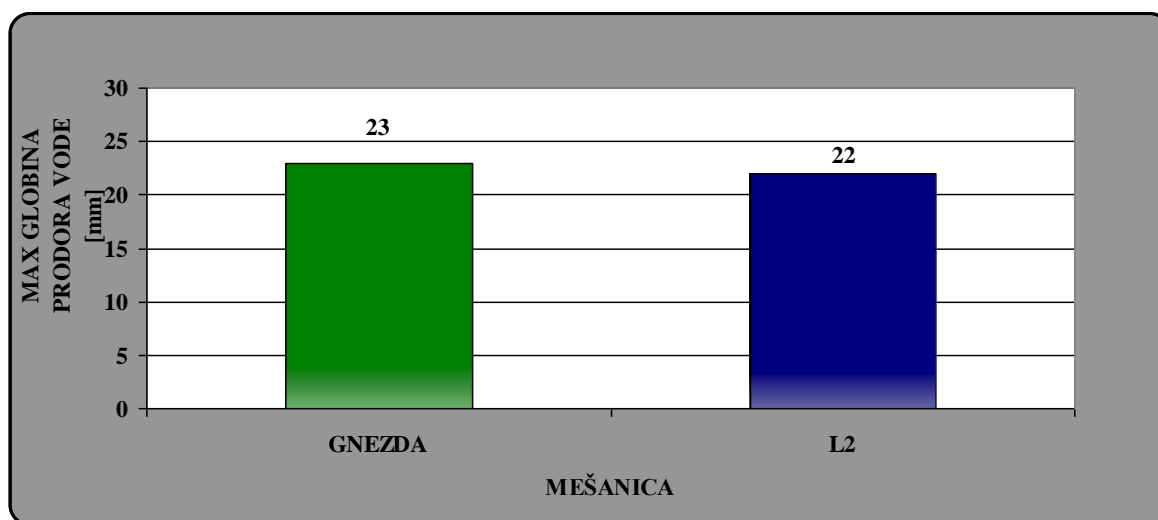
Preskušance z gnezdi smo naredili tako, da smo beton presejali na "grobozrnat" in "drobnozrnat" beton. Nato smo v kalup vgradili del drobnozrnatega betona in nato z pomočjo cevi v sredino preskušanca vgradili grobozrnat beton. Okoli grobozrnatega betona smo vgradili še preostanek drobnozrnatega betona, tako da je zunanja površina narejena iz drobnozrnatega 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 gneзда 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

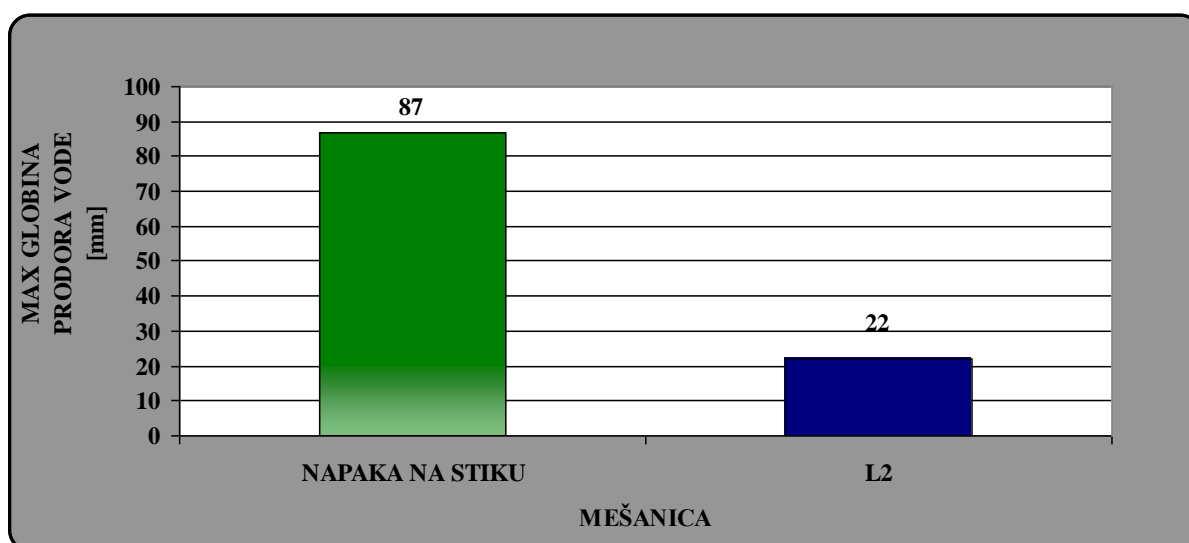
je zanimalo, kako se beton na stiku dveh slojev odziva pri preskusu vodotesnosti betona, saj pri delovanju vode na betonski objekt lahko voda prodre prav skozi stik dveh slojev betona.

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.

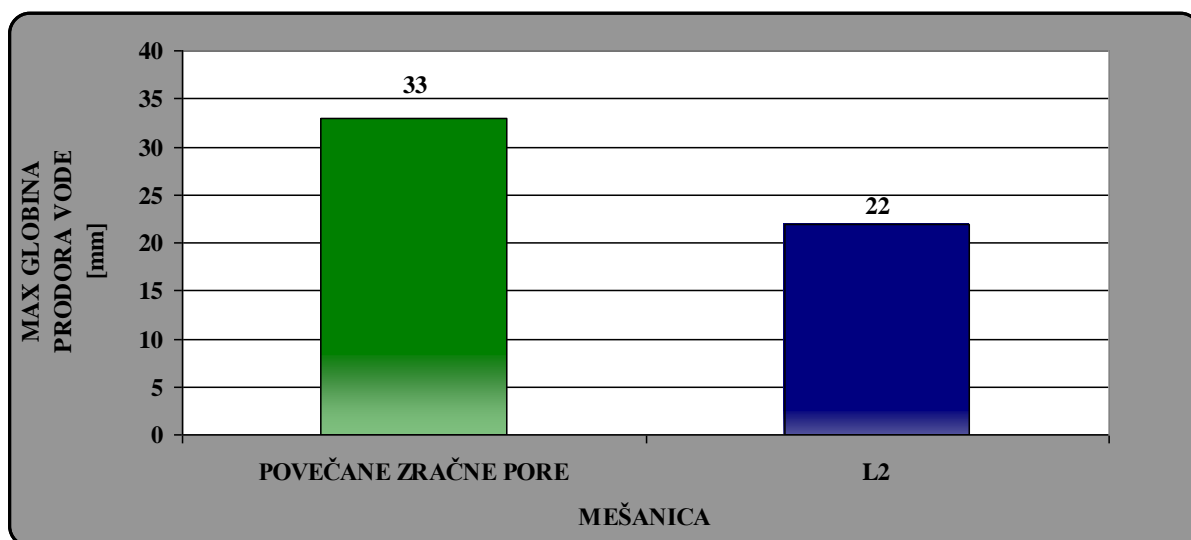
c) **Vpliv povečane poroznosti betona na njegovo vodotesnost**

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 preskušanec. Ko preskus zaključimo s cepilnim nateznim preskusom preskušane 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 preskušane, 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 gnezdami 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 gnezdami. 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 mešanici 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.