



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Smer:

Gradlbene konstrukcije

Predmet:

Izbrana poglavja iz masivnih konstrukcij

Šolsko leto: 2015/2016

Cilji predmeta so:

- nadgraditi osnovno poznavanje obnašanja masivnih konstrukcij,
- podati podlage za računsko modeliranje masivnih konstrukcij,
- podati teoretične osnove za načrtovanje zahtevnejših masivnih konstrukcij.

Pridobljene kompetence so:

- sposobnost snovanja in projektiranja zahtevnejših masivnih konstrukcij

Drago Saje

TEHNOLOGIJA BETONA

PREDAVANJA

Ljubljana, 2015

Vsebina

1. Načrtovanje betonskega elementa	5
1.1 Vrste betonov.....	6
1.2 Pogoji okolja.....	7
1.3 Specifikacija betona	9
1.4 Projektiranje sestave betona	11
2. Izdelava betonskega elementa.....	12
2.1 Sestavine betona.....	13
2.1.1 Agregat	13
2.1.2 Cement.....	15
2.1.3 Voda.....	20
2.1.4 Dodatki	20
2.2 Betonska mešanica	24
2.3 Sveži beton.....	24
2.3.1 Obdelavnost	24
2.3.2 Vgrajevanje betona	26
2.3.3 Nega.....	27
2.3.4 Toplotna obdelava betona	34
2.4 Betonski element.....	38
2.4.1 Mehanske lastnosti otrdelega betona	40
2.4.2 Reološke lastnosti otrdelega betona	50
3. Predaja betonskega elementa v uporabo	53
3.1 Trajnost betonskih konstrukcij	54

Literatura

- Ukrainczyk, Velimir, **BETON: struktura, svojstva, tehnologija**, ALCOR, Zagreb, 1994.
- Muravljov, Mihailo, **OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA**, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.
- Saje, Drago, **Posebnosti betonov visokih trdnosti**, magistrsko delo, FGG, Ljubljana, 1997.
- Saje, Drago, **Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti**, doktorsko delo, FGG, Ljubljana, 2001.
- **Beton – 1. del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost**, EN 206-1.
- Saje, Drago, Bandelj, Branko, Lopatič, Jože, Saje, Franc, **Notranja nega betona**, Zbornik 30. Zborovanja gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 2008.

Slike

Slika 1	Prostorninski deleži sestavin (a) v svežem in (b) v otrdelem betonu.....	13
Slika 2	Fullerjeve in EMPA krivulje določajo območja za izbiro optimalne skupne zrnastostne sestave pri izbranem največjem zrnju agregata. [Muravljov, M., OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA , Građevinska knjiga, Beograd, 1991.].....	14
Slika 3	Vpliv največjega zrna agregata in količine cementa na 28-dnevno tlačno trdnost betona. [Higginson, E. C., Wallance, G. B., Ore, E. L., EFFECT OF MAXIMUM SIZE OF AGGREGATE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF MASS CONCRETE , Symposium on Mass Concrete, ACI SP-6, 1963.].....	15
Slika 4	Razvoj trdnosti produktov hidratacije glavnih mineralov portland cementa. [Ukrainczyk, V., BETON: struktura, svojstva, tehnologija , ALCOR, Zagreb, 1994.].....	20
Slika 5	Vpliv superplastifikatorja in mikrosilike na razpored delcev. [Comité Euro-International du Béton: HIGH-STRENGTH CONCRETE, State of the Art Report , FIP/CEB, SR 90/1, Bulletin d'Information No 197, avgust 1990.].....	21
Slika 6	Razmerje med količino vode in razlezom pri betonu brez in s superplastifikatorjem. [Beslač, J., SUPERPLASTIFICIRANI BETON , Građevinski institut Zagreb, Monografije, Broj 1, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1980.].....	22
Slika 7	Posed stožca svežega betona.....	25
Slika 8	Razlez stožca svežega betona.....	26
Slika 9	Značilni potek spreminjanja temperature v betonskem konstrukcijskem elementu in shematični prikaz potrebnega poteka negovanja elementa. [Aitcin, P.-C., Neville, A.M., Acker, P., Integrated View of Shrinkage Deformation, Concrete International, september 1997, str. 35-41.].....	29
Slika 10	Opaž betonskega stebra, ki nosi viadukt Črni Kal.....	31
Slika 11	Kalupi za vgradnjo betonskih kock in prizem za preiskušanje tlačne in upogibne trdnosti.....	31
Slika 12	Pritisk svežega betona na opaž.....	32
Slika 13	Vodoravni pritisk svežega betona na opaž.....	33
Slika 14	Navpični pritisk svežega betona na nagnjeni opaž.....	34
Slika 15	Navpični pritisk svežega betona na nagnjeni opaž.....	34
Slika 16	Normiran potek tlačnih trdnosti betonov z različnimi vrstami cementov. [Gutiérrez, P. A., Cánovas, M. F.: THE MODULUS OF ELASTICITY OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE , Materials and Structures, Vol. 28, 1995, str. 559-568.].....	35
Slika 17	Vpliv vodocementnega faktorja na velikot tlačne trdnosti betona. [Muravljov, Mihailo, OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA , Građevinska knjiga, Beograd, 1991.].....	36
Slika 18	Različni režimi parjenja. [Muravljov, Mihailo, OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA , Građevinska knjiga, Beograd, 1991.].....	37
Slika 19	Struktura otrdelega betona – agregatna zrna zapolnjena s cementnim kamnom.....	39
Slika 20	Običajna oblika porušitve betonskega vzorca obteženega z enosno tlačno silo.....	41
Slika 21	Skica enosnega nateznega preizkusa.....	43
Slika 22	Skica preizkusa upogibne natezne trdnosti betona.....	44
Slika 23	Skica preizkusa cepitvene natezne trdnosti betona.....	44
Slika 24	Vpliv nege in vlažnosti vzorca med preiskavo na tlačno trdnost betona. [Ukrainczyk, V.: BETON: struktura, svojstva, tehnologija , ALCOR, Zagreb, 1994.].....	45
Slika 25	Tipični diagrami napetost - deformacija v tlaku. [Nevil, A. M.: SVOJSTVA BETONA , Građevinska knjiga, Beograd, 1976.].....	47
Slika 26	Odvisnost trdnosti betona od hitrosti nanosa obtežbe [Rüsch, H.: RESEARCHES TOWARD A GENERAL FLEXURAL THEORY FOR STRUCTURAL CONCRETE , ACI Journal, Proceedings, Vol. 57, No. 1, julij 1960, str. 1-28.].....	47

Slika 27	Oblika delovnega diagrama betona v nategu ($\alpha = 2.84$ in $\beta = 1.66$). [Marzouk, H., Chen, Z. W.: FRACTURE ENERGY AND TENSION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE , Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, No. 2, maj 1995, str. 108-116.].....	49
Slika 28	Časovni potek deformacij betona v suhem okolju, ki je bil v času t_1 obremenjen in v času t_2 razbremenjen. [Ukrainczyk, V.: BETON: struktura, svojstva, tehnologija , ALCOR, Zagreb, 1994.].....	52

Preglednice

0

Razredi izpostavljenosti glede na pogoje okolja v skladu s predpisom EN 206-1.....	8
Preglednica 2 Orientacijski trdnostni razredi glede na pogoje okolja v skladu s predpisom EN 206-1.....	9
Preglednica 3 Vsebina specifikacije betona.....	10
Preglednica 4 Zaporedje operacij pri projektiranju sestave betonske mešanice, dane obdelavnosti, trdnosti in trajnosti.....	11
Preglednica 5 Vrste in oznake cementov po SIST EN 197-1.....	16
Preglednica 6 Stopnje poseda stožca.....	25
Preglednica 7 Stopnje Vebe preskusa.....	25
Preglednica 8 Stopnje preskusa zbitosti.....	25
Preglednica 9 Stopnje preskusa razleza.....	26
Preglednica 10 Najmanjše dovoljene temperature glede na mere oziroma dimenzije prerezov in temperaturo okolice med vgrajevanjem ter v postopku strjevanja.	27
Preglednica 11 Najmanjši časi negovanja betona s portland cementom glede pogojev okolja – temperature in vlažnosti. [Muravljov, Mihailo, OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA , Građevinska knjiga, Beograd, 1991.].....	30
Preglednica 12 Dovoljeni padci temperature glede na najmanjšo dimenzijo prereza elementa.	30
Preglednica 13 Vrednosti koeficienta pritiska betona na opaž, dp. [Muravljov, Mihailo, OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA , Građevinska knjiga, Beograd, 1991.].....	33
Preglednica 14 Karakteristične vrednosti tlačnih trdnosti izmerjene na standardnih vzorcih. [Beton – 1. del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost , EN 206-1.].....	42
Preglednica 15 Razmerja med nateznimi trdnostmi in tlačno trdnostjo. [Marzouk, H., Chen, Z. W.: FRACTURE ENERGY AND TENSION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE , Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, No. 2, maj 1995, str. 108-116.].....	48

UVOD

V okviru predmeta *Izbrana poglavja iz masivnih konstrukcij* bomo del časa namenili delom, ki se odvrtijo, preden začne načrtovani betonski element služiti svojemu namenu.

Betonski element je umeten izdelek, pri izdelavi katerega se odvije niz del, imenovan tehnologija betona, in obsega:

- načrtovanje betonskega elementa,
- izdelavo betonskega elementa,
- predajo betonskega elementa v uporabo.

Uporabnik betonskega elementa določi namen uporabe in predvidi pogoje, ki jim bo le-ta izpostavljen. Načrtovalec glede na namen uporabe in predvidene pogoje določi vrsto, lastnosti in količino sestavin, način izdelave, prevoza in vgradnje betonske mešanice, nego svežega betona in razopaženje betonskega elementa.

Izdelovalec betonskega elementa le-tega izdela po navodilih načrtovalca. Betonska dela obsegajo dobavo in pripravo sestavin betona, izdelavo, prevoz in vgrajevanje betonske mešanice, negovanje svežega betona, razopaženje, prevoz in vgradnjo betonskega elementa.

Ko betonski element doseže načrtovane lastnosti, ga izdelovalec preda uporabniku. Ustrezno načrtovan in izveden betonski element pri pogojih predvidene uporabe preživi življensko dobo brez poškodb. V primeru nepredvidenih vplivov na element ali spremembe namembnosti je potrebno betonski element popraviti ali izboljšati.

1. Načrtovanje betonskega elementa

Uporabnik določi namen uporabe in pogoje, ki jim bo betonski element izpostavljen.

Načrtovalec – projektant določi sestavine betona. Za vsako sestavino določi vrsto, kvaliteto in količino le-te v betonski mešanici. Zbrani podatki o betonski mešanici se imenujejo receptura betona. Načrtovalec glede na namen uporabe in predvidene pogoje določi še način izdelave, prevoza in vgradnje betonske mešanice, nego svežega betona ter razopaženje betonskega elementa.

Načrtovalec izdela projekt betona, ki vsebuje:

- zahtevane lastnosti betona v času uporabe,
- pogoje za izbiro, dobavo in uporabo sestavin betona,
- predpisane postopke hranjenja in uporabe svežega betona in betona v času strjevanja,
- predpisan način, vrsto in pogostost preverjanja in zagotavljanja kvalitete.

1.1 Vrste betonov

Beton je mešanica agregata, veziva, vode in dodatkov.

Glede na stopnjo strjevanja ločimo:

- sveži beton,
- otrdeli beton.

Sveži beton je v plastičnem stanju. Lahko ga plastično oblikujemo in zgostimo.

Otrdeli beton je beton, ki ga ne moremo več plastično preoblikovati ali zgostiti.

Glede na prostorninsko maso ločimo:

- normalno težki beton,
- lahki beton,
- težki beton.

Normalno težki beton je beton, katerega specifična teža v otrdelem stanju, po segretju na 105°C, znaša več kot 2000 kg/m³, vendar pa ne več kot 2800 kg/m³.

Lahki beton je beton, katerega specifična teža v otrdelem stanju, po segretju na 105°C, znaša manj kot 2000 kg/m³. Lahki betoni vsebujejo agregat s porozno strukturo.

Težki beton je beton, katerega specifična teža v otrdelem stanju, po segretju na 105°C, znaša več kot 2800 kg/m³.

Glede na v otrdelem stanju doseženo tlačno trdnost ločimo:

- betone normalne trdnosti,
- betone visoke trdnosti,
- betone ultra visoke trdnosti.

Trdnostni razredi betonov normalne trdnosti se gibljejo med C12/15 in C50/60.

Trdnostni razredi betonov visoke trdnosti se gibljejo med C55/67 in C90/105.

Betoni ultra visoke trdnosti dosegajo tlačne trdnosti višje kot 100 MPa.

Glede na vrsto ojačitve ločimo:

- nearmirani beton,
- armirani beton:
 - z vzdolžno armaturo armirani beton,
 - vlaknasti beton,
 - z vzdolžno armaturo armirani beton z vlakni,
 - prednapeti beton.

Specialni betoni poleg osnovnih sestavin betona vsebujejo dodatke, ki vplivajo na njihove lastnosti:

- prostorninsko maso:
 - težki betoni (agregat),
 - lahki betoni (lahek agregat, penila, ...),

- tlačno trdnost:
 - betoni visoke trdnosti (nizko vodovezivno razmerje, mineralni dodatki, ...),
- natezno trdnost in žilavost:
 - vlaknasti betoni (jeklena vlakna),
 - ferocementni betoni (žične mreže),
 - polimerni betoni (lateks, akril, vinil-acetat, ...),
- trajnost:
 - impregnirani betoni (siloksan, silan, ...),
 - polimerni betoni,
 - požarno odporni betoni (požarnoodporni agregat, aluminatni cement),
- krčenje in lezenje:
 - prepakt betoni (zbit grobi agregat, injektiranje),
 - ekspanzivni betoni (ekspanzivni cement, ekspanzivni mineralni dodatki),
- hidratacijsko toploto:
 - uvaljani betoni (manjša vsebnost vode, manjša vsebnost cementa, bolj groba struktura betona),
 - betoni s pucolanskimi dodatki (elektrofilterski pepel),
- izgled:
 - dekorativni betoni (struktura betona, osnovni materiali, ...).

1.2 Pogoji okolja

Betonski element se lahko nahaja v okolju, kjer:

- ni nevarnosti agresivnega vpliva ali korozije,
- je nevarnost korozije zaradi karbonatizacije,
- je nevarnost korozije zaradi kloridov,
- je nevarnost korozije zaradi kloridov v morski vodi,
- je nevarnost cikličnega zmrzovanja in odtaljevanja,
- je nevarnost kemičnih vplivov.

V preglednici 1 so navedeni razredi izpostavljenosti betona pogojem okolja, v preglednici 2 pa njim ustrezni orientacijski trdnostni razredi.

Preglednica 1 Razredi izpostavljenosti glede na pogoje okolja v skladu s predpisom EN 206-1.

Oznaka razreda	Opis okolja	Orientacijski primeri, kjer se lahko pojavi razred izpostavljenosti
1 Ni nevarnosti korozije ali agresivnega delovanja		
X0	Pri betonu brez armature ali vgrajenih kovinskih delov: vse vrste izpostavljenosti z izjemo zmrzovanja / tajanja, obrusa ali kemičnega delovanja Pri betonu z armaturo in vgrajenimi kovinskimi deli: zelo suho	Beton v stavbah z zelo nizko vlažnostjo zraka
2 Korozija zaradi karbonatizacije		
XC1	Suho ali trajno mokro	Beton v stavbah z nizko vlažnostjo zraka Beton, stalno potopljen v vodi
XC2	Mokro, le redko suho	Betonske površine vdolgotrajnem dotiku z vodo Številni temelji
XC3	Zmerno vlažno	Beton v stavbah z zmerno ali visoko vlažnostjo zraka Zunanji beton, zaščiten pred dežjem
XC4	Izmenično mokro in suho	Betonske površine v dotiku z vodo, ki ne sodijo v razred izpostavljenosti XC2
3 Korozija zaradi kloridov		
XD1	Zmerno vlažno	Betonske površine, izpostavljene kloridom, ki jih prenaša zrak
XD2	Mokro, redko suho	Plavalni bazeni Betonski deli, izpostavljeni industrijskim vodam, ki vsebujejo kloride
XD3	Izmenično mokro in suho	Deli mostov, izpostavljeni pršcu, ki vsebuje kloride Tlaki Plošče parkirišč
4 Korozija zaradi kloridov iz morske vode		
XS1	Izpostavljeno soli, ki jo prenaša zrak, vendar ne v neposrednem dotiku z morsko vodo	Konstrukcije blizu obale ali ob njej
XS2	Trajno potopljeno	Deli morskih konstrukcij
XS3	Območja plimovanja, škropljenja in pršenja	Deli morskih konstrukcij
5 Zmrzovanje/tajanje		
XF1	Zmerna nasičenost z vodo, brez sredstva za tajanje	Navpične betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju
XF2	Zmerna nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje	Navpične betonske površine cestnih konstrukcij, izpostavljenih zmrzovanju in sredstvom za tajanje, ki se prenašajo po zraku
XF3	Velika nasičenost z vodo, ki ne vsebuje sredstev za tajanje	Vodoravne betonske površine, izpostavljene dežju in zmrzovanju
XF4	Velika nasičenost z vodo, ki vsebuje sredstvo za tajanje, ali z morsko vodo	Vozišča cest in mostov, ki so izpostavljena sredstvom za tajanje Betonske površine, izpostavljene neposrednemu pršcu, ki vsebuje sredstva za tajanje in zmrzovanje Območja škropljenja morskih konstrukcij, ki so izpostavljena zmrzovanju
6 Kemično delovanje		
XA1	Blago kemično agresivno okolje	Naravne zemljine in talna voda
XA2	Zmerno kemično agresivno okolje	Naravne zemljine in talna voda
XA3	Močno kemično agresivno okolje	Naravne zemljine in talna voda

Preglednica 2 *Orientacijski trdnostni razredi glede na pogoje okolja v skladu s predpisom EN 206-1.*

Korozija										
	Korozija zaradi karbonacije				Korozija zaradi kloridov			Korozija zaradi kloridov iz morske vode		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Orientacijski trdnostni razred	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Poškodbe betona										
	Ni nevarnostii		Zmrzovanje/tajanje				Kemično delovanje			
	X0		XF1	XF2	XF3		XA1	XA2	XA3	
Orientacijski trdnostni razred	C12/15		C30/37	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	

1.3 Specifikacija betona

Podroben opis betona, imenovan specifikacija betona, mora po predpisu upoštevati:

- uporabo svežega in strjenega betona,
- pogoje negovanja,
- dimenzije konstrukcije zaradi razvijanja hidratacijske toplote,
- vplive okolja, katerim bo konstrukcija izpostavljena,
- zahteve za agregat, izpostavljen na površini, ali za strojno obdelano površino,
- zahteve v zvezi z zaščitnim slojem nad armaturo ali najmanjšo dimenzijo prereza, kot je na primer največja nazivna zgornja velikost agregata,
- omejitve glede uporabe osnovnih materialov z ugotovljeno primernostjo, na primer zaradi stopnje izpostavljenosti.

Podroben opis betona – specifikacija betona je podana v obliki:

- projektiranega betona,
- predpisanega betona,
- standardiziranega predpisanega betona.

V preglednici 3 je navedeno, kaj mora vsebovati posamezna oblika podrobnega opisa betona.

Preglednica 3 Vsebina specifikacije betona.

	Projektirani beton	Predpisani beton	Standardizirani predpisani beton
Osnovne zahteve:	a) zahtevo po skladnosti z EN 206-1, b) razred tlačne trdnosti, c) stopnje izpostavljenosti, d) nazivno velikost največjega zrna agregata, e) razred vsebnosti kloridov, dodatno za lahki beton: f) razred gostote ali ciljno gostoto, dodatno za težki beton: g) ciljno gostoto, dodatno za transportni in na gradbišču zamešani beton: h) stopnjo konsistence, ali v posebnih primerih, ciljno vrednost konsistence.	a) zahtevo po skladnosti z EN 206-1, b) vsebnost cementa, c) vrsto in trdnostni razred cementa, d) vodocementno razmerje ali konsistenco izraženo s stopnjo, ali v posebnih primerih, s ciljno vrednostjo, e) vrsto in kategorije agregata ter največjo vsebnost klorida, v primeru lahkega ali težkega betona pa največjo oziroma najmanjšo gostoto agregata, f) nazivno velikost največjega zrna agregata in kakršne koli omejitve glede zrnivosti, g) vrsto in količino kemijskega ali mineralnega dodatka, če se uporabi, h) poreklo kemijskega ali mineralnega dodatka, če se uporabi, in poreklo cementa.	- veljavni standard v kraju uporabe betona, ki navaja bistvene zahteve, - označbo betona v tem standardu.
Dodatne zahteve:	- posebne vrste ali razredi cementa (na primer cement z nizko toploto hidratacije), - posebne vrste ali razredi agregata (za zmanjšanje škodljive alkalno-silikatne reakcije), - zahtevane karakteristike za odpornost proti poškodbam zaradi zmrzovanja in tajanja (na primer vsebnost zraka), - zahteve za temperaturo svežega betona, - časovni prirast trdnosti, - razvijanje toplote med hidratacijo, - upočasnjeno strjevanje, - odpornost proti prodoru vode, - odpornost proti obrusu, - cepilna natezna trdnost, - druge tehnične zahteve (na primer zahteve glede doseganja posebne površinske obdelave ali posebnih postopkov vgrajevanja).	- poreklo nekaterih ali vseh sestavin betona, - dodatne zahteve za agregate, - zahteve za temperaturo svežega betona, - druge tehnične zahteve.	
Uporaba:	- za vse vrste betonov.	- za vse vrste betonov.	- za normalno težke betone v nearmiranih in armiranih konstrukcijah, - za betone, projektirane razrede tlačne trdnosti večje ali enake kot C16/20, razen če veljavni predpisi v kraju uporabe dovoljujejo najmanjši trdnostni razred C20/25, - za betone s stopnjo izpostavljenosti X0 in XC1, razen če veljavni predpisi v kraju uporabe betona dovoljujejo druge stopnje izpostavljenosti.

1.4 Projektiranje sestave betona

Med načrtovanjem sestave betona je treba najprej zbrati podatke o:

- a) razpoložljivih sestavnih materialih:
 - cementu, kot so trdnost, specifična teža, začetek vezanja, ...,
 - agregatu, kot so mineralna in kemična sestava kamnin, zrnastostna sestava, vpijanje vode, vlažnost posamezne frakcije, ...,
 - vodi,
 - dodatkih, kot so njihove lastnosti in skladnost z ostalimi sestavinami betona,
- b) tehnologijah izdelave betonskega elementa:
 - načinu mešanja betona,
 - transportu betona,
 - načinu vgradnje,
 - postopku zgoščevanja,
 - nadzoru izvedbe,
- c) podatki iz projekta konstrukcije:
 - velikosti elementa,
 - stopnji armiranja,
 - pogojih okolja,
 - podatkih o načinu izvedbe, kot so montažne konstrukcije, posebne zahteve negovanja, težja dostopnost elementa, ...

V preglednici 4 je navedeno zaporedje operacij pri projektiranju sestave betonske mešanice, ki ga izvajamo s ponovitvami, dokler niso zadoščeni vsi zahtevani oziroma predpisani pogoji.

Preglednica 4 *Zaporedje operacij pri projektiranju sestave betonske mešanice, dane obdelavnosti, trdnosti in trajnosti.*

1. Konsistenca svežega betona	glede na predpisano obdelavnost
2. Premera največjega zrna agregata D_{max}	glede na dimenzije prereza betona in armature
3. Vsebnost zračnih por z	zajetih ali vnešenih z dodatkom
4. Količina vode V	po priporočilih
5. Vodo-vezivni oziroma vodo-cementni faktor V/C	glede na zahtevano trdnost betona ob upoštevanju pogojev okolja
6. Količina veziva oziroma cimenta C	$C = V / (V/C)$
7. Količina agregata A	$A = [1\text{m}^3 - V - C / \rho_C - z] \cdot \rho_A$
8. Zrnastostna sestava agregata	$A = \sum A_i = \sum \rho_{Ai} \cdot p_i \cdot V_{Ai}$
LABORATORIJSKE PREISKAVE	
9. Vlažnost agregata	za skupno količino zajete vode v vseh frakcijah agregata se zmanjša količina vode V , da ohranimo predpisani V/C faktor
10. Izdelava poskusne mešanice	na podlagi zgoraj določenih razmerij sestavin, za preverjanje konsistence
11. Preverjanje lastnosti svežega betona	če beton vsebuje projektirane vrednosti gostote in količine zračnih por
12. Izdelava preizkušancev	
13. Preverjanje lastnosti otrdelega betona	če beton dosega zahtevan trdnostni razred
14. Izbira količin sestavnih materialov betona	receptura betona

2. Izdelava betonskega elementa

Ko dobi izdelovalec v roke načrt betona – projekt betona, se konča niz del v okviru načrtovanja in prehajamo na niz del v okviru izdelave betonskega elementa.

Izdelovalec – proizvajalec betonskega elementa le-tega izdelava po navodilih načrtovalca glede na namen uporabe in predvidene pogoje, ki jim bo izpostavljen.

Betonska dela obsegajo:

- dobavo sestavin betona,
- pripravo sestavin betona,

- izdelavo betonske mešanice,
- prevoz betonske mešanice,
- vgrajevanje betonske mešanice,

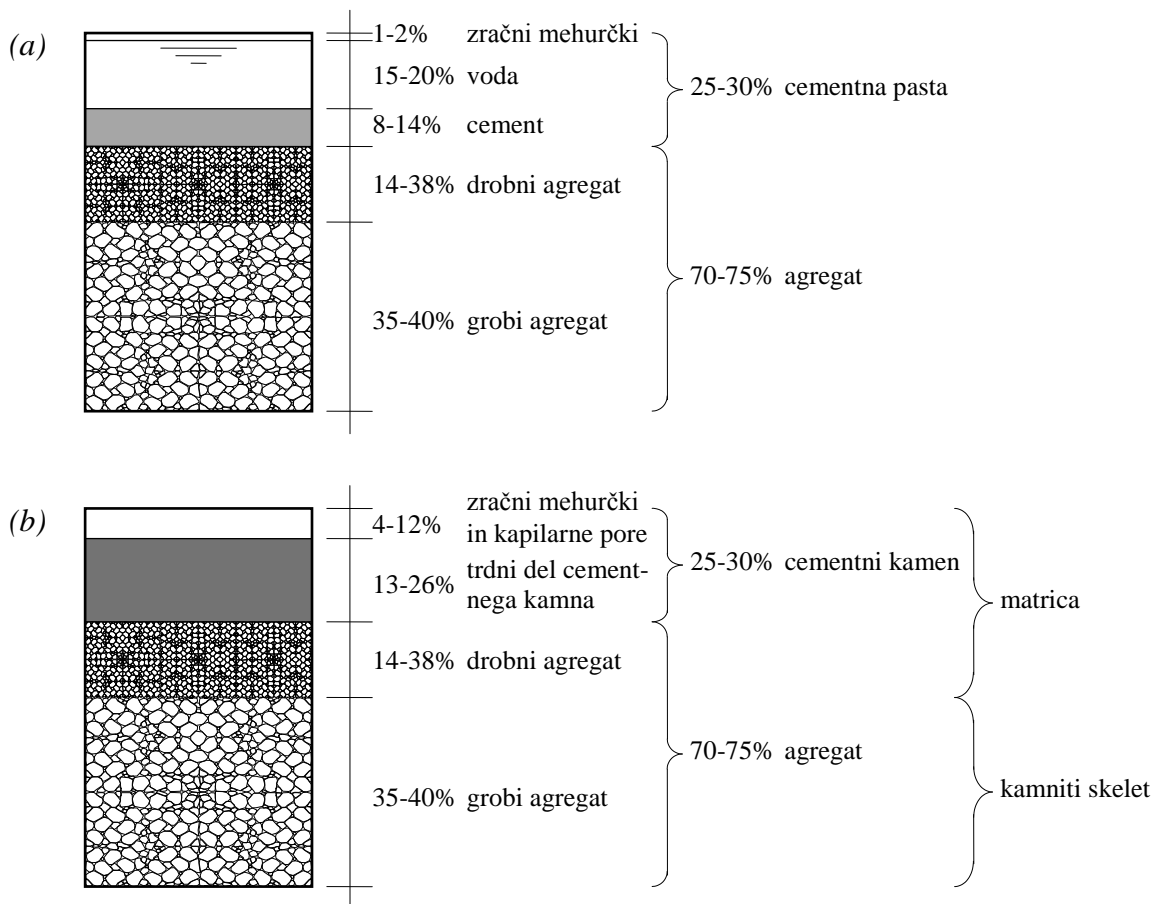
- negovanje svežega betona,

- razopažanje betonskega elementa,
- prevoz betonskega elementa,
- vgradnjo betonskega elementa.

2.1 Sestavine betona

Beton je mešanica raznovrstnih, med seboj povezanih sestavin – je heterogen material.

V širšem pomenu besede so betoni vsi umetni kamni iz agregata, ki tvori nosilni skelet, in veziva; v ožjem pomenu besede pa je beton umetni kamen iz mineralnega agregata in silikatnega veziva.



Slika 1 Prostorninski deleži sestavin (a) v svežem in (b) v otrdelem betonu.

2.1.1 Agregat

Agregat ima v betonu tri osnovne naloge:

- zrna agregata tvorijo skelet, ki daje betonu trdnost in togost,
- betonu daje dimenzijsko stabilnost, to je zmanjšuje dolgotrajne volumske spremembe značilne za cementni kamen,
- je relativno poceni, kar prispeva k ekonomičnosti betonskih konstrukcij.

Lastnosti določene vrste agregata, ki pomembno vplivajo na lastnosti betona so:

- mineraloško-petrografska sestava v prvi vrsti vpliva na mehanske karakteristike in trajnost otrdelega betona,
- zrnavostna sestava vpliva predvsem na obdelavnost svežega betona, gostoto in ekonomičnost betona,

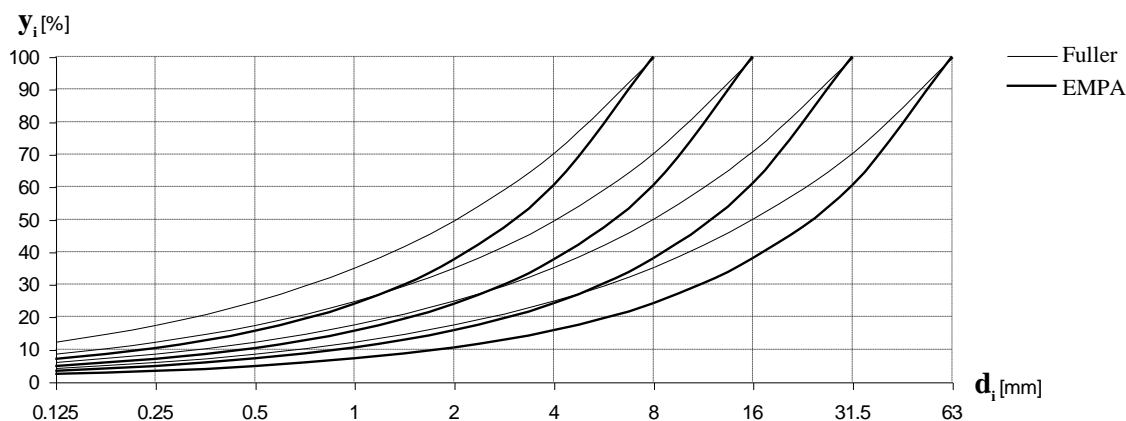
- oblika in tekstura zrn vplivata na obdelavnost svežega betona ter sprijemnost cementnega kamna in agregata v otrdelem betonu.

Agregat običajno predstavlja približno tri četrtine volumna betona, zato je razumljivo, da ima velik vpliv na lastnosti svežega in otrdelega betona.

Agregate za proizvodnjo betona delimo na naravne in umetne. Naravni agregati se pridobivajo iz rečnih nanosov ali pa v kamnolomih z drobljenjem večjih kamnitih skladov. Umetne aggregate se običajno proizvaja v določene namene, kot je na primer proizvodnja lahkoagregatnih betonov.

Groba zrna agregata tvorijo v betonu skelet. Ker ima agregat večjo togost kot cementni kamen, se preko njega prenaša večji del obremenitve. Drobna zrna pa skupaj s cementno pasto predstavljajo cementno malto.

Groba zrna agregata se v proizvodnji razvrščajo v frakcije, da med transportom ne bi prišlo do segregacije večjih zrn. Poleg tega pa se lahko sestavi agregat z optimalno zrnovostno sestavo, ki je takšna, da se doseže čim gostejšo porazdelitev zrn, ki daje v betonu najmanj praznin. Običajne nazivne frakcije pri proizvodnji agregata so 0/4, 4/8, 8/16, 16/32, 32/63, 63/125 mm.

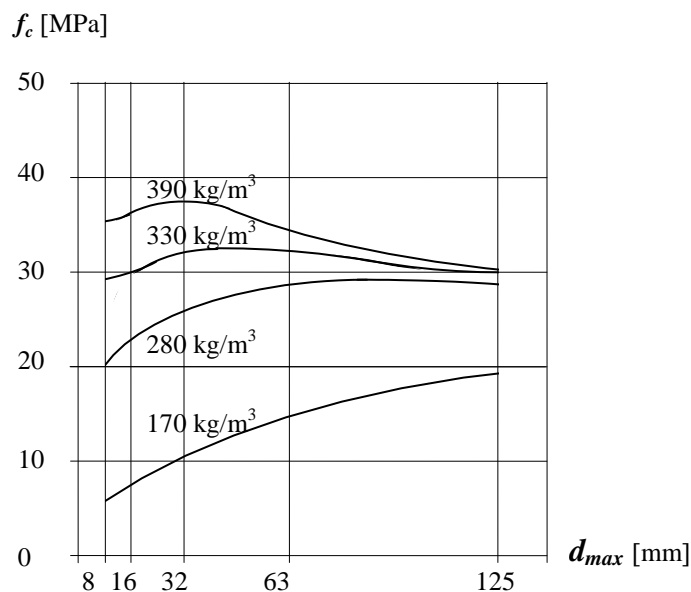


Slika 2 Fullerjeve in EMPA krivulje določajo območja za izbiro optimalne skupne zrnovostne sestave pri izbranem največjem zrnju agregata.

[Muravljov, M., OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.]

Čim večje je največje zrno agregata, tem manjša je skupna površina agregata, zaradi tega pa je tudi manjša potrebna količina cementne paste za obvitje vseh zrn. Z razširitvijo zrnovostne sestave proti večjim frakcijam agregata se pri enaki obdelavnosti svežega betona zmanjša vodocementno razmerje. Po drugi strani pa večja zrna onemogočajo dobro povezavo cementnega kamna, kar povzroča večje natezne napetosti okoli zrn, zaradi česar se poveča mikrorazpokanost še neobremenjenega betona. Posledice teh medsebojno nasprotujočih vplivov so razvidne iz eksperimentalnih rezultatov prikazanih na sliki 3.

Čeprav mineraloška in petrografska sestava pomembno vplivata na trdnost agregata, pa igrajo pri tem pomembno vlogo tudi drugi faktorji, kot sta na primer razstreljevanje in drobljenje kamnitih skladov pri pridobivanju drobljenca. Med razstreljevanjem in drobljenjem lahko pride do poškodb v mikrostrukturi, to je do mikrorazpokanosti agregata. To je eden izmed razlogov, zaradi katerega se pri betonih z manjšimi največjimi zrnji agregata dosegajo višje trdnosti.



Slika 3 Vpliv največjega zrna agregata in količine cementa na 28-dnevno tlačno trdnost betona.

[Higginson, E. C., Wallance, G. B., Ore, E. L., **EFFECT OF MAXIMUM SIZE OF AGGREGATE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF MASS CONCRETE**, Symposium on Mass Concrete, ACI SP-6, 1963.]

Drobljeni agregati imajo običajno bolj homogeno strukturo in višjo trdnost v primerjavi z rečnim agregatom. Zaradi bolj homogene strukture so v obremenjenem betonu manjše koncentracije napetosti. Pri ostrorobih zrnih je kopičenje vodnega filma manjše, kar ugodno vpliva na trdnost in strukturo stičnega območja, taka zrna pa se tudi raje zaklinjajo, zaradi česar se poveča natezna trdnost betona. Nekoliko slabšo vgradljivost betonske mešanice, ki vsebuje drobljeni agregat, pa lahko izboljšamo z uporabo kemijskih dodatkov.

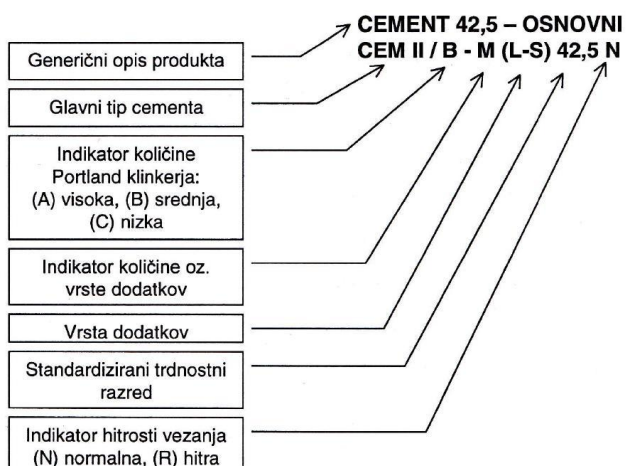
Razne primesi in nečistoče v agregatu neugodno vplivajo na kvaliteto betona, zato je v predpisih njihova količina omejena. Ker je pri visokotrdnih betonih vpliv posameznih sestavin na lastnosti betona še večji, je čistost agregata toliko bolj pomembna.

2.1.2 Cement

Cement je praškasti material, ki s primešano vodo, kemijskimi reakcijami in spremljajočimi fizikalnimi procesi prehaja v otrdelo cementno pasto ali cementni kamen. Pri tem postopno razvija svoje kohezijske in adhezijske lastnosti, ki omogočajo, da poveže zrna agregata v kompaktno maso betona. Obstaja veliko vrst cementov (preglednica 4).

Preglednica 5 Vrste in oznake cementov po SIST EN 197-1.

glavna vrsta	ime cementa	oznaka
CEM I	Portlandski cement	CEM I
CEM II	Portlandski cement z dodatkom žindre	CEM II/A-S CEM II/B-S
	Portlandski cement z dodatkom mikrosilike	CEM II/A-D
	Portlandski cement z dodatkom pucolana	CEM II/A-P CEM II/B-P CEM II/A-Q CEM II/B-Q
	Portlandski cement z dodatkom elektrofilterskega pepela	CEM II/A-V CEM II/B-V CEM II/A-W CEM II/B-W
	Portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca	CEM II/A-T CEM II/B-T
	Portlandski cement z dodatkom apnenca	CEM II/A-L CEM II/B-L CEM II/A-LL CEM II/B-LL
	Portlandski mešani cement	CEM II/A-M CEM II/B-M
CEM III	Žlindrin cement	CEM III/A CEM III/B CEM III/C
CEM IV	Pucolanski cement	CEM IV/A CEM IV/B
CEM V	Mešani cement	CEM V/A CEM V/B



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

V gradbeništvu se najpogosteje uporablja portland cement. Osnovne surovine za pridobivanje portland cementa morajo vsebovati okside kalcija, silicija, aluminija in železa, ki se v naravi v večjih količinah nahajajo v apnencih in glinah. V procesu transformacije osnovnih surovin v cementni kamen se odvijata dve fazi kemijskih pretvorb, to sta proizvodnja cementa in hidratacija cementa kot dela betonske mešanice. Po definiciji je portland cement hidravlično vezivo proizvedeno z mletjem klinkerja, ki se mu istočasno dodaja sadra.

Proizvodnja portland cementa

Proizvodnja cementa sestoji iz mletja surovin, ki jih v določenem razmerju zmešamo, potem mešanico pečemo v rotacijskih pečeh pri temperaturi okoli 1400 °C, pri čemer se posamezni delci kamnin zlijejo. Pri temperaturi 1100 °C nastanejo posamezne grudice, to je cementni klinker, ki ga hladimo v bobnastih hladilnikih in nato meljemo v droben prah in dodajamo surovi mavec ali sadro.

Kemijska in mineraloška sestava portland cementa

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

Portland cement ima sorazmerno konstantno kemijsko sestavo:

• vezani kalcijev oksid	CaO	62-67 %,
• silicijev dioksid	SiO ₂	19-25 %,
• dialuminijev trioksid	Al ₂ O ₃	2-8 %,
• diželezov trioksid	Fe ₂ O ₃	1-5 %,
• žveplov trioksid	SO ₃	3.5-4.5 %,
• nevezan kalcijev oksid	CaO	2 %,
• magnezijev oksid	MgO	5 %,
• baze	Na ₂ O, K ₂ O	0.5-1.3 %.

V kemiji cementa so običajne naslednje okrajšave:

C za CaO,
S za SiO₂,
A za Al₂O₃,
F za Fe₂O₃,
 \bar{S} za SO₃,
M za MgO,
H za H₂O.

Nosilci lastnosti cementa so štirje glavni minerali:

• trikalcijev silikat ali alit	3·CaO·SiO ₂ ali C ₃ S	45-60 %,
• dikalcijev silikat ali belit	2·CaO·SiO ₂ ali C ₂ S	20-30 %,
• trikalcijev aluminat ali aluminatna faza	3·CaO·Al ₂ O ₃ ali C ₃ A	4-12 %,
• tetrakalcijev aluminat ferit ali feritna faza	4·CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ ali C ₄ AF	10-20 %.

Kalcijevih silikatov je v portland cementu največ in imajo najpomembnejši vpliv na njegovo trdnost in hidratacijsko toploto. Aluminatna faza v portland cementu običajno ni zaželjena, ker veliko pripomore k zgodnji trdnosti, kasneje pa je lahko vzrok korozijskega razpadanja betona, posebno tistega, ki je izpostavljen delovanju sulfatov. Pri reakciji med aluminatno fazo in sulfati nastaja etringit $C_3A \cdot 3\bar{C}\bar{S} \cdot H_{32}$, ki raste z nadaljnjim vezanjem velikega števila molekul kristalne vode in lahko ruši beton. Feritna faza nima pomembnega vpliva na lastnosti portland cementa.

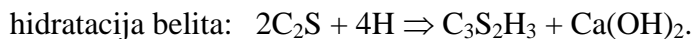
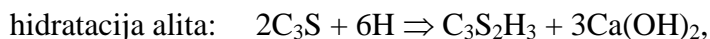
Sadra se dodaja med mletjem klinkerja sorazmerno količini aluminatne faze. Z njo uravnavamo čas vezanja cementa oziroma preprečujemo trenutni proces vezanja, dosežemo pa tudi formiranje etringita, ki ima v zgodnji fazi strjevanja cementa prostor za rast, ne da bi s tem rušil strukturo cementnega kamna. Tako ostanejo na razpolago manjše količine aluminatne faze za reakcijo z v otrdeli beton naknadno penetriranimi sulfati iz atmosfere. Pri preveliki količini dodane sadre pride do poroznejše strukture betona.

Med sestavinami cementa, ki so zastopane v manjših količinah, imajo pomembno vlogo baze. Lahko reagirajo z nekaterimi reaktivnimi agregati in s tem izzovejo razpadanje betona. V povezavi s količino sadre lahko baze pomembno vplivajo na hitrost prirastka trdnosti cementa.

Hidratacija cementa

Takoj po zmešanju cementa in vode se začne proces hidratacije, pri katerem molekule vode obvijajo ione trdnih delcev cementa in na ta način omogočajo, da se bolje uredijo v novo nastale gelske in kristalne strukture. Med tem procesom silikati in aluminati formirajo produkte hidratacije, plastična cementna pasta pa postopno prehaja v otrdelo, hidratizirano cementno pasto.

Cementi z večjo količino alita hidratizirajo hitreje kot belitni cementi. Zapisano z enačbami poteka hidratacija takole:



Oba silikata potrebujeta približno enako količino vode za hidratacijo. Pri hidrataciji alita pa nastane dvakrat toliko kalcijevega hidroksida kot pri hidrataciji belita.

Produkti hidratacije silikatov, to so kalcijevi silikat hidrati, se imenujejo tudi C-S-H gel.

Kot smo že povedali, bi bila reakcija aluminatne faze z vodo trenutna, če tega ne bi preprečeval dodatek sadre. Kljub temu pa ostaja hitrost te reakcije večja od hitrosti reakcije kalcijevih silikatov in izgleda takole:



Podobno kot aluminatna faza, vendar znatno počasneje, hidratizira tudi feritna faza.

Hidratacija aluminatne faze zahteva daleč največjo količino vode.

Hitrosti reakcij glavnih komponent cementa so zelo različne. 80 % hidratacije alita se izvrši v 10 dneh, belita v 100, aluminatne faze v 6 in feritne faze v 50 dneh.

Potek procesa hidratacije

Cementna pasta je takoj po zmešanju cementa in vode v tekočem stanju. Cementna zrnca so dispergirana v vodi, njihov razmak pa je odvisen od količine dodane vode. Zelo velika specifična površina cementa preprečuje njegovo oddvajanje od vode in tudi segregacija zrn cementa v suspenziji poteka zelo počasi. V drugi fazi, po približno dveh urah cementna pasta ni več tako tekoča, vendar pa je vgradljivost še možna. Na površini zrn so igličasti minerali etringita in

prepleteni lističi kalcijevega silikat hidrata. V tem času postane voda zasičena s kalcijevim hidroksidom in začne se kristalizacija kalcijevega hidroksida v heksagonalne oblike. Po približno enem dnevu, ko se je zaključilo vezanje cementne paste, se začne tretja faza. Takrat hidratizirana cementna pasta še nima zadostne trdnosti. S hidratacijo na površini zrn cementa se prostori med zrci zapolnjujejo s C-S-H gelom in velikimi kristali kalcijevega hidroksida. Paličice in lističi gela se medsebojno prepletajo in povezujejo ter tako tvorijo trdno stukturo, ki je ojačana tudi z drugimi produkti hidratacije. Po sedmih dneh pa doseže hidratizirana cementna pasta že znatno trdnost. Struktura se še dalje zapolnjuje, gel pa postaja vse gostejši. Mnoge pore ostanejo še naprej nezapolnjene, velik del zrn cementa pa je še vedno nehidratiziran. Hidratacija cementa lahko traja več let – dokler sta na razpolago nehidratizirani cement in voda.

Hidratacijska toplota in trdnost

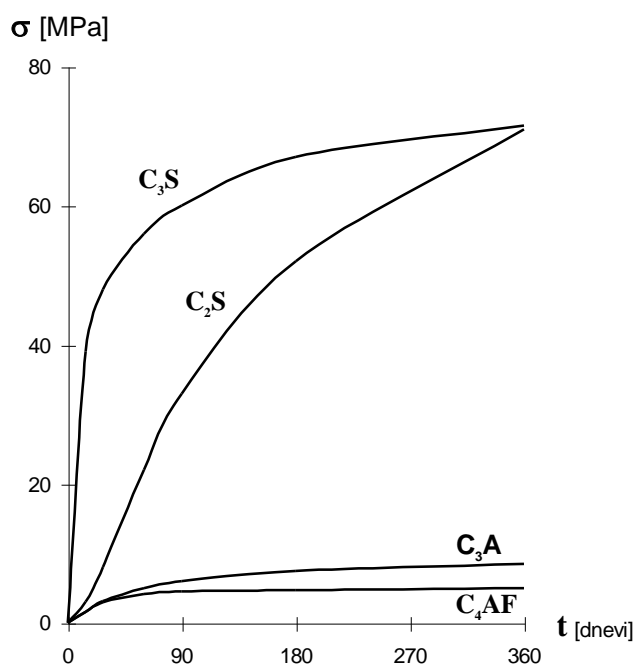
Količino toplote enega grama nehidratiziranega cementa, ki se sprosti med hidratacijo, imenujemo hidratacijska toplota. Skupna količina hidratacijske toplote cementa je približno enaka seštevku hidratacijskih toplot njegovih posameznih komponent. Tako lahko na podlagi znane mineraloške sestave cementa ocenimo njegovo hidratacijsko toploto.

Hidratacijska toplota alita je 502 J/g, belita 260, aluminatne faze 867 in feritne faze 419 J/g. Glede na to vidimo, da se lahko z zmanjšanjem količine alita in aluminatne faze zmanjša skupna hidratacijska toplota cementa, s tem pa tudi hitrost sproščanja toplote. Zmanjšanje hidratacijske toplote ima tudi ugoden vpliv na visoko končno trdnost.

Trdnost cementa in njen časovni prirastek sta odvisna od mineraloške sestave, kar je razvidno iz slike 4. Vendar se iz razmerja mineralov ne da napovedati trdnosti cementa, kot v primeru hidratacijske toplote.

Alit največ doprinese k trdnosti v prvih štirih dneh, belit pa vpliva na kasnejši prirast trdnosti. Po enem letu imata oba približno enak doprinos. Druga dva minerala pa malo vplivata na končno trdnost.

Čeprav večja količina alita prispeva k visoki začetni in visoki končni trdnosti cementne paste, pa ne smemo zanemariti razmerja belita proti alitu. Čim večje je to razmerje, tem večji je prispevek h končni trdnosti.



Slika 4 *Razvoj trdnosti produktov hidratacije glavnih mineralov portland cementa.*

[Ukrainczyk, V., **BETON: struktura, svojstva, tehnologija**, ALCOR, Zagreb, 1994.]

Velik vpliv na potrebo po vodi in na vgradljivost imata vsebnost aluminatne faze in finost mletja.

2.1.3 Voda

Voda je osnovna sestavina vsake betonske mešanice. Brez nje ne bi bil mogoč proces hidratacije cementa. Poleg tega pa omogoča potrebno viskoznost sveže betonske mešanice ter zadovoljivo vgradljivost in končno obdelavnost betona. Glede na to lahko rečemo, da je voda pomembna tako s stališča kvalitete kot tudi kvantitete.

Za izdelavo betona uporabljamo vodo, za katero je dokazano, da je primerna za izdelavo betona. Ne sme vsebovati snovi, ki bi neugodno vplivale na proces hidratacije cementa, prav tako pa ne smejo povzročati korozije armature v armiranobetonskih konstrukcijah.

Navadno pitno vodo lahko uporabljamo tudi brez posebnega dokaza o primernosti za izdelavo betona.

2.1.4 Dodatki

Dodatki betonu so snovi, ki spremenijo lastnosti svežega ali otrdelega betona. Običajno se dodajajo v promilih ali procentih glede na količino cementa v betonski mešanici, ker s svojim kemijskim ali fizikalnim delovanjem zelo učinkovito spreminjajo lastnosti cementne paste.

Naštejmo nekaj najpomembnejših možnosti spreminjanja lastnosti svežega in otrdelega betona:

- povečanje obdelavnosti svežega betona, ne da bi se pri tem povečala količina vode, ali zmanjšanje količine vode pri enaki obdelavnosti,
- pospeševanje ali zavlačevanje začetka vezanja cementa,
- zmanjševanje ali preprečevanje plastičnega krčenja ali povzročanje ekspanzije,
- sprememba hitrosti izcejanja ali skupno izcejanje vode iz betona,
- zmanjšanje segregacije,
- izboljšanje črpnosti betona,
- zmanjšanje izgube obdelavnosti,
- preprečevanje zmrzovanja svežega betona,
- zadrževanje ali zmanjševanje razvoja toplote v mladem betonu zaradi hidratacije,
- povečevanje trdnosti,
- povečevanje trajnosti betona,
- zmanjševanje propustnosti betona,
- preprečevanje škodljivih vplivov bazičnih komponent cementa na sestavine betona,
- izboljšanje povezave med starim in novim betonom,
- povečanje udarne in erozijske odpornosti,
- izboljšanje zaščite armature v betonu,
- barvanje betona ali malte.

Glede na sestavo in vpliv na lastnosti betona ločimo tri glavne skupine dodatkov, to so površinsko aktivne snovi, topne kemikalije in praktično netopni minerali.

V standardih so *kemijski dodatki* razvrščeni glede na namembnost. Ločimo aerante, plastifikatorje, superplastifikatorje, superplastifikatorje nove generacije, fluidifikatorje, zaviralce in pospeševalce vezanja, pospeševalce strjevanja, zgoščevalce, dodatke za betoniranje pri nizkih temperaturah in druge.

Mineralni dodatki se dodajajo betonu v večjih količinah. Sem lahko uvrščamo drobno mlete pucolane, granulirano žlindro visokih peči, elektrofilterski pepel, odpadni prah pri proizvodnji ferosilicija in silicija, apnenec. Pri nas se najpogosteje dodajajo v proizvodnji cementa, da se zmanjša poraba energije. Poleg tega imajo ugoden vpliv na tehnične lastnosti betona, kot so termične lastnosti, kemična odpornost, pojav razpok, izboljšanje obdelavnosti svežega betona in tudi trdnost.

Tudi *polimerni dodatki* se vse pogosteje v večjih količinah dodajajo portlandcementnemu betonu. Polimeri se dodajajo v obliki praškov, disperzij, vodotopnih polimerov, tekočih smol ali tekočih monomerov. Najbolj uporabljana polimerna dodatka sta polivinilacetat in 100% akrilni polimer. Tako dobimo betone večje žilavosti in boljše odpornosti na kemijsko korozijo.

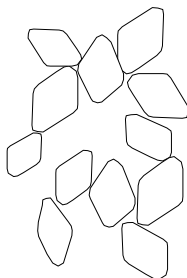
Kemijski dodatki – aeranti

Aeranti v sveži betonski mešanici ustvarjajo majhne zračne mehurčke, premera 50 do 100 μm . Prekinjajo kapilarne pore. Z dodajanjem aerantov betonu povečamo odpornost na zmrzovanje in soli.

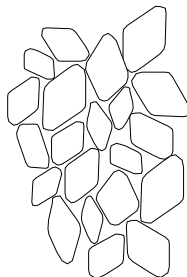
Kemijski dodatki – plastifikatorji in superplastifikatorji

Plastifikatorji in superplastifikatorji so dodatki, ki povečujejo plastičnost svežega betona in s tem zmanjšujejo potrebo po vodi. Omogočajo lažje vgrajevanje betona in hitrejši prirast trdnosti pri enaki količini cementa.

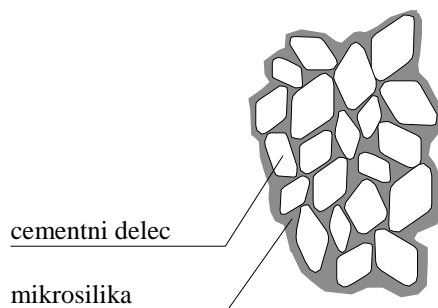
cementna pasta



cementna pasta
s superplastifikatorjem



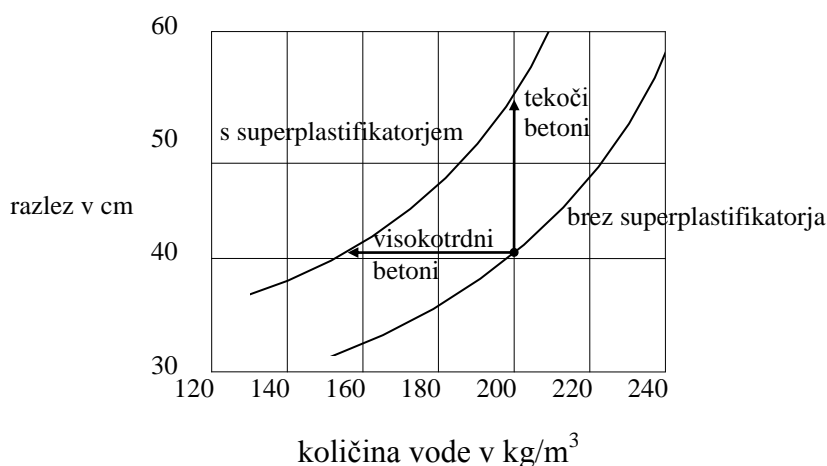
cementna pasta
s superplastifikatorjem
in mikrosiliko



Slika 5 Vpliv superplastifikatorja in mikrosilike na razpored delcev.

[Comité Euro-International du Béton: **HIGH-STRENGTH CONCRETE, State of the Art Report**, FIP/CEB, SR 90/1, Bulletin d' Information N^o 197, avgust 1990.]

Superplastifikatorji se najpogosteje uporabljajo pri proizvodnji visokotrdnih betonov in tekočih betonov.



Slika 6 Razmerje med količino vode in razlezom pri betonu brez in s superplastifikatorjem.

[Beslać, J., **SUPERPLASTIFICIRANI BETON**, Građevinski institut Zagreb, Monografije, Broj 1, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1980.]

Delovanje superplastifikatorjev je zapleten fizikalno-kemijski proces, ki še ni v celoti pojasnjen. Superplastifikator zmanjša površinsko napetost vode in s tem notranje trenje, zaradi česar se delci cementa v suspenziji lažje gibljejo. Adsorbira se na delce cementa, ki privlačijo snov z nasprotnim nabojem. Na površini delcev cementa se formira drsni film.

Superplastifikatorje glede na kemijsko sestavo delimo v štiri skupine:

- A sulfonirani melamin-formaldehid kondenzati,
- B sulfonirani naftalin-formaldehid kondenzati,
- C modificirani ligno-sulfonati,
- D ostali.

Zmanjšanje viskoznosti, ki je posledica fizikalno-kemijske interakcije med superplastifikatorjem in cementom, je običajno združeno s formiranjem etringita, katerega kristali se zaradi nizke razgradljivosti zgoščujejo v raztopini. Prosta voda v sistemu se ujame med zgoščene kristale in se nanje tudi adsorbira. Rezultat zmanjšanja proste vode je padec vgradljivosti. Zato portland cement z visoko vsebnostjo aluminatne faze kaže zelo hitro izgubo poseda v prisotnosti superplastifikatorja, ki vsebuje velike količine prostih sulfatnih ionov. Izguba poseda je višja pri povišanih temperaturah. Z zavlačevalcem vezanja modificiran superplastifikator pa se lahko koristno uporabi pri betonski mešanici z majhnim posedom.

Nekateri superplastifikatorji lahko povzročajo težave pri zavarovanju primerne sistema zračnih por, ki je potreben za zagotavljanje dobre zmrzlinke odpornosti. V prisotnosti superplastifikatorja se uvedeni zračni mehurčki združujejo med sabo in tvorijo večje praznine. Posledica tega je, da pri betonih, ki vsebujejo superplastifikatorje, znatno naraste uporaba aerantov z namenom, da se zavaruje ustrezna zmrzlinška odpornost.

Kemijski dodatki – pospeševala

Pospeševala pospešujejo hidratacijo cementa. Skrajšujejo čas negovanja in zaščitijo svežega betona ter pospešujejo razvoj trdnosti betona. Uporabljajo se za vgrajevanje betona pri nizkih temperaturah okolja.

Kemijski dodatki – zavlačevala

Zavlačevala upočasnjujejo vezanje cementa. Uporabljajo se za vgrajevanje betona pri visokih temperaturah okolja in v velikih konstrukcijah.

Kemijski dodatki – gostila

Gostila reagirajo s cementnimi minerali. Nastali produkti zapolnjujejo kapilarne pore v cementnem kamnu, kar poveča vodotesnost betona.

Mineralni dodatek – mikrosilika

Mikrosilika (v angleškem jeziku jo imenujejo silica fume ali microsilica) so kondenzirani hlapi, ki nastanejo kot stranski produkt pri proizvodnji zmesi ferosilicija v elektro obločnih pečeh. Pri temperaturi 2000°C nastajajo med pretvorbo kremena v silicij hlapi silicijevega oksida, ki se v višjem predelu peči, ki je hladnejši, mešajo s kisikom in kondenzirajo v zelo drobna zrnca. Mikrosilika običajno vsebuje več kot 90 % silicijevega dioksida SiO_2 . Povprečni premer zrnca mikrosilike se giblje med 0.1 in 0.2 μm , kar predstavlja približno 1 % premera zrna portland cementa. Zaradi majhnih dimenzij ni možno uporabljati mikrosilike v grobi obliki. Proizvajalci jo ponujajo v dveh oblikah, v suspenziji, kjer so ji lahko dodani tudi kemijski dodatki, ki zmanjšujejo potrebo po vodi v betonu, in v obliki kroglic. V obeh oblikah ju je možno uporabiti pri izdelavi betona. Mikrosilika v obliki kroglic je zgoščena do takšne točke, da se med mešanjem betona ne razprši.

Zaradi svojih izredno majhnih dimenzij mikrosilika ugodno vpliva na več različnih lastnosti betona. Znatno se povečajo predvsem kasnejše trdnosti. Mikrosilika učinkovito reagira s kalcijevim hidroksidom $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pri čemer se tvorijo novi produkti – kalcijev silikat hidrat, kar ugodno vpliva na trdnost in trajnost betona.

Mineralni dodatek – elektrofilterski pepel

Elektrofilterski pepel se pridobi z elektrostatičnim ali mehanskim izločanjem prašnih delcev iz dimnih plinov peči, kurjenih z uprašenim premogom. Po naravi je silikatno-aluminatni (silicijski) ali silikatno-apneni (kalcijski). Prvi ima pucolanske lastnosti, drugi pa ima lahko dodatno še hidravlične lastnosti.

Silicijski elektrofilterski pepel je fin prah iz pretežno kroglastih delcev, ki imajo pucolanske lastnosti. Vsebovati mora predvsem reaktivni silicijev dioksid (SiO_2) in aluminijev oksid (Al_2O_3). Ostanek mase vsebuje železov oksid Fe_2O_3 in druge spojine.

Kalcijev elektrofilterski pepel je fin prah, ki ima hidravlične in/ali pucolanske lastnosti. Vsebuje predvsem kalcijev oksid (CaO), reaktivni silicijev oksid (SiO_2) in aluminijev oksid (Al_2O_3). Ostanek mase vsebuje železov oksid (Fe_2O_3) in druge spojine.

Mineralni dodatek – granulirana plavžna žlindra

Možna sestavina cementa je tudi granulirana plavžna žlindra, ki se dobi s hitrim hlajenjem žlindre taline ob taljenju železove rude v plavžu. Granulirana plavžna žlindra je odpadki pri proizvodnji jekla (žlindra pri izdelavi jekla v elektroobločni peči), ima pomembno tehnološko vlogo in vpliva na sam metalurški postopek ter s tem tudi na kvaliteto proizvedenega jekla. Granulirana plavžna žlindra je po svojih lastnostih in mineralni sestavi povsem primerljiva z naravnimi mineralnimi surovinami vulkanskega oziroma magmatskega izvora. Glavne sestavine žlindre so oksidi kalcija, železa, magnezija, silicija, mangana in aluminija.

2.2 Betonska mešanica

Glede na mesto priprave betonske mešanice ločimo:

- beton, pripravljen na gradbišču,
- transportni beton.

Pripravo sestavin in mešanje betona, zamešanega na gradbišču, opravi izdelovalec na gradbišču, delovišču oziroma v neposredni bližini mesta, kamor bo beton vgrajen.

Pripravo sestavin in mešanje transportnega betona opravi izdelovalec v betonarni in ga v svežem stanju z avtomešalnikom dostavi do mesta, kamor bo vgrajen.

2.3 Sveži beton

2.3.1 Obdelavnost

Obdelavnost svežega betona je odvisna od njegove konsistence, ki je lahko:

- trdo plastična oziroma zemeljsko vlažna,
- srednje plastična,
- mehko plastična,
- lita ali židka.

Konsistenco betona se izmeri:

- s posedom stožca,
- z Vebe preskusom,
- s preskusom stopnje zbitosti,
- z razlezom,
- s posebnimi metodami pri betonih za posebne namene.

Priporočljivo območje uporabe metode:

- s posedom stožca svežega betona je med 10 in 210 mm,
- z Vebe preskusom je med 5 in 30 sekundami,
- s preskusom stopnje zbitosti je med 1,04 in 1,46,
- z razlezom je med 300 in 620 mm.



Slika 7 Posed stožca svežega betona.

Preglednica 6 Stopnje poseda stožca.

Stopnja	Posed v mm
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 210

Preglednica 7 Stopnje Vebe preskusa.

Stopnja	Vebe v sekundah
V0	≥ 31
V1	30 do 21
V2	20 do 11
V3	10 do 6
V4	5 do 3

Preglednica 8 Stopnje preskusa zbitosti.

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



Slika 8 Razlez stožca svežega betona.

Preglednica 9 Stopnje preskusa razleza.

Stopnja	Premer v mm
F1	≤ 340
F2	350 do 410
F3	420 do 480
F4	490 do 550
F5	560 do 620
F6	≥ 630

2.3.2 Vgrajevanje betona

Betonska dela je potrebno izvajati v času, ko temperatura ozračja na mestu vgrajevanja betona ne pade pod 5°C in ne preseže 30°C v brez veterju. Drugače so pri vgradnji betona potrebni posebni ukrepi.

Pri transportu in vgradnji betona morajo vsa zrna v plastični mešanici ostati enakomerno razporejena, brez pojava usedanja večjih in težjih zrn agregata ter prekomernega izcejanja vode. Zrak vgrajen v beton zmanjšuje pojav usedanja agregata in izcejanja vode.

Beton pripravljamo kar se da blizu mesta vgradnje ali pa ga tja pripeljemo v ustreznih mešalcih.

Transport betona

Sveži beton se mora prevažati v avto mešalnikih ali vozilih z agitatorjem. Neposredno pred vgraditvijo ga je potrebno še enkrat premešati. Z navadnimi prekucniki se sme prevažati le betone čvrste konsistence S1, V0, C0 in F1.

Avto mešalnik in agitator je treba popolnoma izprazniti najkasneje 90 minut po dodajanju vode v betonarni, navadni prekucnik pa po 45 minutah. Ta čas je treba v neugodnih vremenskih pogojih ustrezno skrajšati. Z uporabo zavlačevalca vezanja pa se sme podaljšati, kar je treba predhodno ugotoviti s poskusom.

Kontrola skladnosti betona

Za betone trdnostnih razredov $C \geq 30/37$ je obvezno na mestu uporabe, pri vgrajevanju v konstrukcijo, preiskusiti njihovo istovetnost za tlačno trdnost. Vsak dan izdelave nad 50 m^3 določene vrste betona oziroma družine betonov je treba vzeti 1 vzorec.

Vgrajevanje betona v izjemnih pogojih

Pri betoniranju v zelo hladnih ali vročih pogojih je potrebno vgrajevanju in negi betona predpisati posebne ukrepe za zaščito strjujočega se betona.

Vgrajevanje betona v vročih pogojih okolja

V vročih pogojih okolja moramo znižati začetno temperaturo svežega betona. Temperatura betona nad 20°C povzroča težave:

- pri vgradnji, kot so padec konsistence betona, povečanje vodo-cementnega faktorja,
- med strjevanjem betona, kot so pospešena hidratacija, pojav razpok, ...

Težavam se v veliki meri izognemo z dodajanjem ohlajene vode in hlajenjem posameznih sestavin betona ali dodajanjem zmletega ledu v betonsko mešanico.

Temperaturo svežega betona ocenimo z izrazom (1)

$$T_b = \frac{c_a \cdot T_a \cdot m_a + c_c \cdot T_c \cdot m_c + c_v \cdot T_v \cdot m_v + c_v \cdot T_a \cdot m_{va} + c_L \cdot T_L \cdot m_L - L \cdot m_L}{c_b \cdot [m_a + m_c + (m_v + m_{va} + m_L)]}, \quad (1)$$

pri čemer so

T_b, T_a, T_c, T_v, T_L	temperature svežega betona, agregata, cementa, vode in dodanega ledu v $^\circ\text{C}$,
c_b, c_a, c_c, c_v, c_L	specifična toplota svežega betona, agregata, cementa, vode in dodanega ledu v $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$,
$m_a, m_c, m_v, m_{va}, m_L$	masa agregata, cementa, vode, vode v agregatu in dodanega ledu,
L	specifična talilna toplota ledu v kJ/kg .

V primeru dodajanja ledu moramo paziti, da se delci ledu povsem stopijo v sveži betonski mešanici. V nasprotnem primeru obstaja nevarnost pojava »očes« vode v strukturi betona.

Vgrajevanje betona v hladnih pogojih okolja

V hladnih pogojih okolja moramo beton zaščititi pred zmrzovanjem in omogočiti ugodne temperaturno-vlažnostne pogoje v postopku hidratacije cementa, kar vodi do ustrezne projektirane trdnosti otrdelega betona. Pomembno je, da beton pred prvo obremenitvijo doseže zadostno trdnost – vsaj polovico projektirane tlačne trdnosti, da kljubuje škodljivim vplivom za nadaljnjo obstojnost betonskega elementa. Zagotoviti je potrebno primerno začetno temperaturo svežega betona, ki jo v postopku strjevanja vzdržujemo. V preglednici 11 so zbrani izkustveni podatki najmanjših dovoljenih temperatur betona glede na mere oziroma dimenzije prereзов in temperaturo okolice med vgrajevanjem ter v postopku strjevanja.

Preglednica 10 Najmanjše dovoljene temperature glede na mere oziroma dimenzije prereзов in temperaturo okolice med vgrajevanjem ter v postopku strjevanja.

Temperatura zraka	Najmanjše dimenzije prereзов betonskih elementov			
	< 30 cm	30 do 90 cm	90 do 180 cm	> 180 cm

	Najmanjša temperatura v °C pri vgradnji betona in negi vgrajenega betona			
< 5°C	13	10	7	5
> -1°C	16	13	10	7
-18°C do -1°C	18	16	13	10
< -18°C	21	18	16	13

Betone je potrebno vgraditvi v predhodno pripravljene opaže, ki so brez ledu in snega, so ustrezno ogreti. Nadalje morajo biti ustrezno zaščiteni, da ne izgubljajo toplote. Po potrebi jih je potrebno ogevat, vendar le toliko, da vzdržujemo začetno temperaturo vgrajenega betona.

2.3.3 Nega

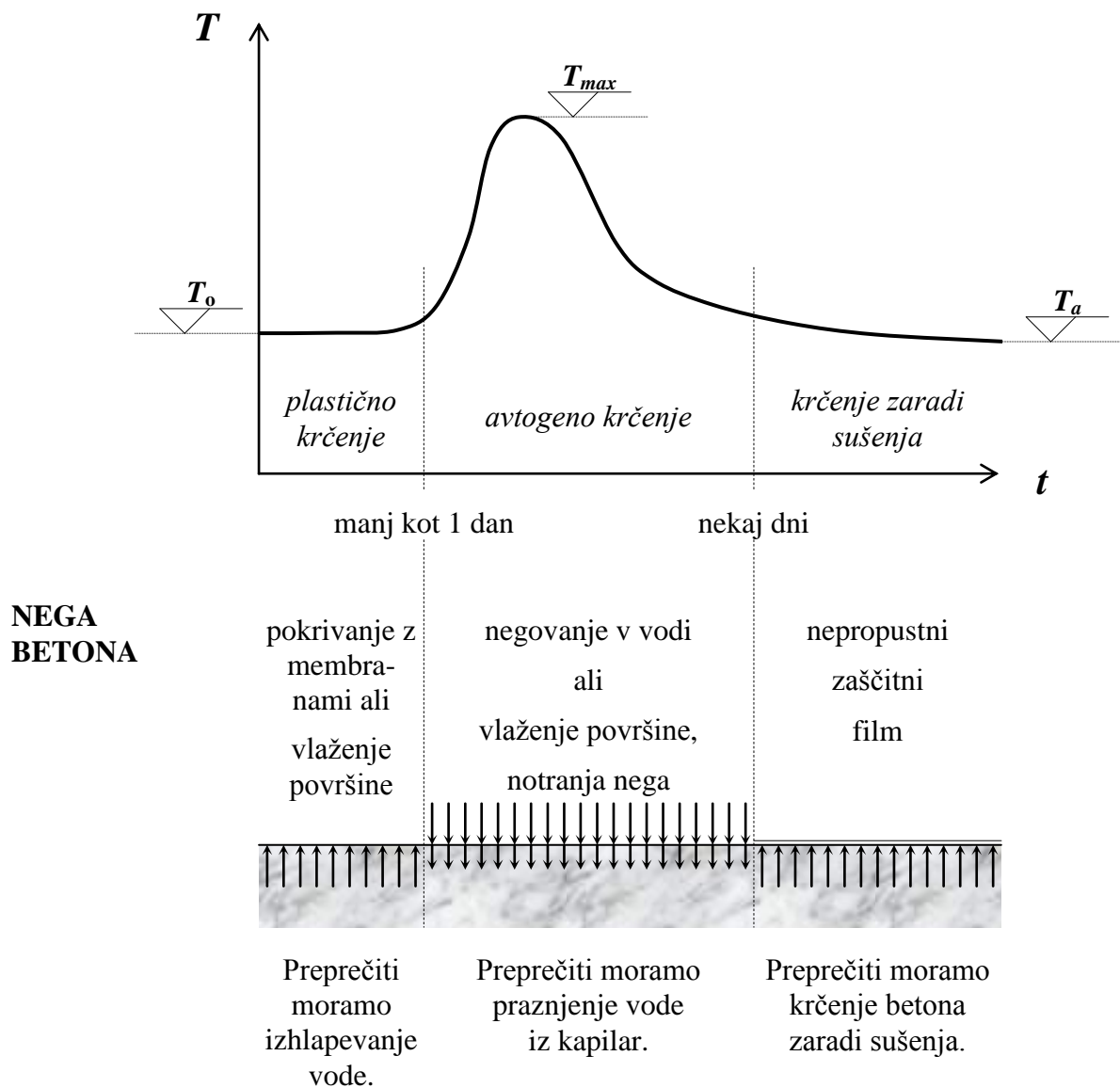
Po mešanju sestavin betona se začne prehajanje vode iz mešanice v okolico, katere relativna vlažnost je običajno nižja od relativne vlažnosti betona. Hkrati pa v procesu strjevanja betona, ki sledi po mešanju, vezivo pri hidrataciji veže vodo nase. Precejšnje sile, ki jih je potrebno premagati za premik vode iz finih praznin in slojev vode ob stenah praznin, na katere delujejo velike sile lepenja, povzročajo znatne deformacije betonskega elementa in pogosto vodijo do poškodb le-tega. Da bi v čim večji meri preprečili nastanek tovrstnih poškodb, je potrebno zmanjšati deformacije. Eden izmed načinov zmanjšanja deformacij zaradi prehajanja vode je ustrezna nega betona.

Ločimo:

- zunanjo nego betona,
- notranjo nego betona.

Zunanjo nego predstavlja vlaženje površine betona in preprečevanje izhajanja vode iz betona preko površine betonskega elementa.

Notranjo nego pa predstavljajo rezervoarji vode v betonu, ki omogočajo, da se voda iz finih kapilarnih por porablja kasneje. Kot rezervoar vode se uporablja lahki agregat, ki s svojo strukturo nudi prostor za skladiščenje vode.



T_0 začetna temperatura svežega betona

T_a temperatura okolice

Slika 9 Značilni potek spreminjanja temperature v betonskem konstrukcijskem elementu in shematični prikaz potrebnega poteka negovanja elementa.

[Aïtcin, P.-C., Neville, A.M., Acker, P., Integrated View of Shrinkage Deformation, Concrete International, september 1997, str. 35-41.].

Čas negovanja mladega betona pogojujeta vlažnost okolice in temperatura. V preglednici 11 so navedeni najmanjši časi negovanja betona s portland cementom glede pogojev okolja.

Preglednica 11 *Najmanjši časi negovanja betona s portland cementom glede pogojev okolja – temperature in vlažnosti.*

[Muravljov, Mihailo, **OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA**, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.]

Temperatura v °C	Čas negovanja v dnevih				
40 - 50	6	5	4	3	
35 – 40	7	6	5	4	
30 – 35	6	5	4	3	
25 – 30	5	4	3	brez posebnega negovanja	
20 – 25	4	3			
15 – 20	3				
10 – 15	3				
5 – 10	3	3			
Relativna vlaga	0%	25%	50%	75%	100%

Če je srednja temperatura okolice nad 5°C, se negovanje betona izvaja v meri vzdrževanja vlažnosti betona. Površinske kapilare morajo biti stalno zasičene z vodo, kar opazimo po barvi površine betona. Površina betona, ki se začne sušiti, postane svetlejša. Pri negi je potrebno paziti na visoke temperature in veter, ki sušenje površine pospešujeta.

Negovanje betona v izjemnih pogojih

Pri betoniranju v zelo hladnih ali vročih pogojih je potrebno vgrajevanju in negi betona predpisati posebne ukrepe za zaščito strjujočega se betona.

Negovanje betona v vročih pogojih okolja

Negovanje vgrajenega betona v vročih pogojih okolja poteka skladno s predhodno opisanimi postopki.

Negovanje betona v hladnih pogojih okolja

V hladnih pogojih okolja je potrebno zagotoviti primerno začetno temperaturo svežega betona, ki jo med nego in v postopku strjevanja betona vzdržujemo:

- brez dodatne energije:
 - z izoliranimi opaži,
- z dodatno energijo:
 - s predhodno segretim opaži,
 - z ogrevanjem betonskih elementov v zaprtih ogrevanih prostorih, kot so nadstrešnice ali šotori,
 - z neposrednim segrevanjem elementov ali celotne konstrukcije z vodno paro, odprtim ognjem ali električnimi grelci.

Preprečiti moramo hitro ohlajanje betona v prvih 24 urah po zaključku betoniranja. V preglednici 12 so navedeni dovoljeni padci temperature glede na najmanjšo dimenzijo prereza elementa.

Preglednica 12 *Dovoljeni padci temperature glede na najmanjšo dimenzijo prereza elementa.*

najmanjša dimenzija prereza elementa	ΔT
zelo tanki (< 30 cm)	28°C
tanki (30 cm – 90 cm)	22°C
normalni (90 cm – 180 cm)	17°C
masivni (> 180 cm)	11°C

2.3.4 Opaži

Sveži beton vgrajujemo v opaže ali kalupe, ker še ni sposoben obdržati želene oblike. V procesu hidratacije betonski element pridobiva na trdnosti in po določenem času doseže trdnost, ko obdrži obliko. Takrat lahko opaž ali kalup odstranimo.



Slika 10 Opaž betonskega stebra, ki nosi viadukt Črni Kal.



Slika 11 Kalupi za vgradnjo betonskih kock in prizem za preiskušanje tlačne in upogibne trdnosti.

Pritisk svežega betona na opaž

Pritisk svežega betona na opaž je odvisen predvsem od konsistence svežega betona, vrste in lastnosti opaža, višine betonskega elementa in hitrosti vgrajevanja betona. Tako je navpični pritisk p_v na opaž določen z izrazom (2)

$$p_v = \gamma_{b,sv} \cdot h, \quad (2)$$

vodoravni pritisk p_h pa z izrazom (3)

$$p_h = p_h(\gamma_{b,sv}, \varphi, h, v), \quad (3)$$

pri čemer so

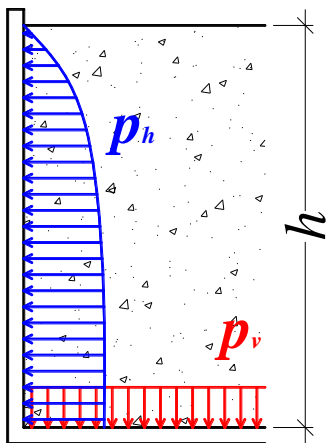
$\gamma_{b,sv}$

h

φ

v

prostorninska masa svežega betona,
višina vgrajenega svežega betona,
kot notranjega trenja svežega betona,
hitrost betoniranja.



Slika 12 Pritisk svežega betona na opaž.

Vodoravni pritiski

Vodoravni pritiski svežega betona na opaž (slika 13), če zanemarimo vplive debeline elementa, velikosti in oblike prečnega prereza, so

$$p_h(z) = \begin{cases} \gamma_{b,sv} \cdot z & 0 \leq z \leq h_1 \\ \gamma_{b,sv} \cdot \left[h_1 - (z - h_1) \cdot d_p \right] & h_1 < z \leq vt_0 \\ \gamma_{b,sv} \cdot \left[h_1 - (vt_0 - h_1) \cdot d_p \right] & vt_0 < z \end{cases} \quad (4)$$

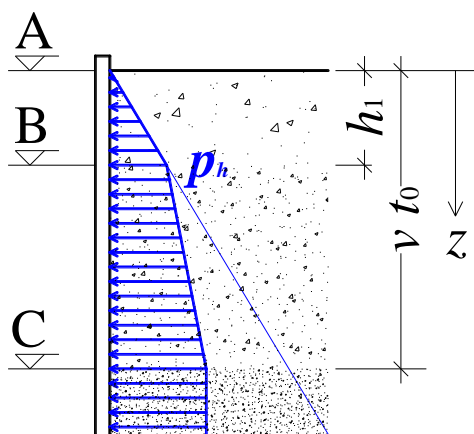
pri čemer so

h_1

t_0

d_p

globina betona, ki se v obravnavanem času vgrajuje in v okviru katere potekajo postopki zgoščevanja betona (največ 1 m),
čas prehoda betona iz plastičnega v vezano stanje,
koeficient pritiska betona na opaž, podan v preglednici 13.



- A zgornja površina svežega betona
 B površina, do katere se v obravnavanem času izvajajo postopki zgoščevanja betona
 C zgornja površina vezanega betona, ki je bil vgrajen pred dvema do šestimi urami in je iz plastičnega stanja prešel v stanje vezanega materiala

Slika 13 Vodoravni pritisk svežega betona na opaž.

Preglednica 13 Vrednosti koeficienta pritiska betona na opaž, d_p .[Muravljov, Mihailo, **OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA**, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.]

		φ – kot notranjega trenja svežega betona, glede na konsistenco svežega betona		
		20°	30°	50°
β – kot trenja med betonom in opažem, glede na vrsto površine opaža		uliti beton	plastični beton	naknadno vibrirani beton
25°	grobno obdelana deska	0,42	0,3	0,13
18°	furnirni les	0,43	0,3	0,13
16°	gladka površina, premaz s slojem sintetične smole	0,44	0,3	0,13

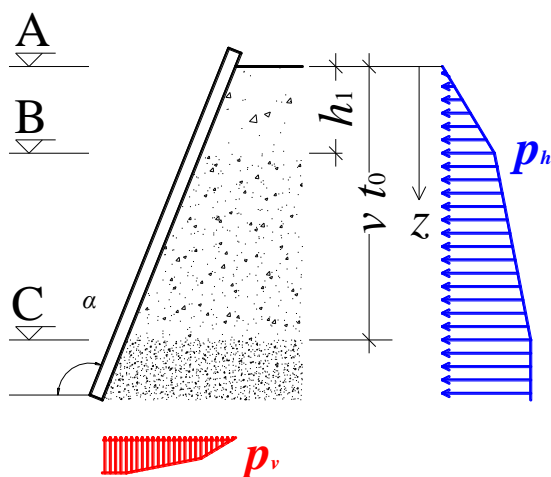
Navpični pritiski

Pri nagnjenih opažih (slika 14), ki se naslanjajo na površino svežega betona, se poleg vodoravnega pritiska pojavi tudi navpični, ki želi privzdigniti opaž in je enak

$$p_v = p_h \cdot \operatorname{ctg} \alpha = \begin{cases} \gamma_{b,sv} \cdot z \cdot \cos \alpha & 0 \leq z \leq h_1 \\ \gamma_{b,sv} \cdot [h_1 - (z - h_1) \cdot d_p] \cdot \cos \alpha & h_1 < z \leq \nu t_0, \\ \gamma_{b,sv} \cdot [h_1 - (\nu t_0 - h_1) \cdot d_p] \cdot \cos \alpha & \nu t_0 < z \end{cases} \quad (5)$$

pri tem je vodoravni pritisk enak

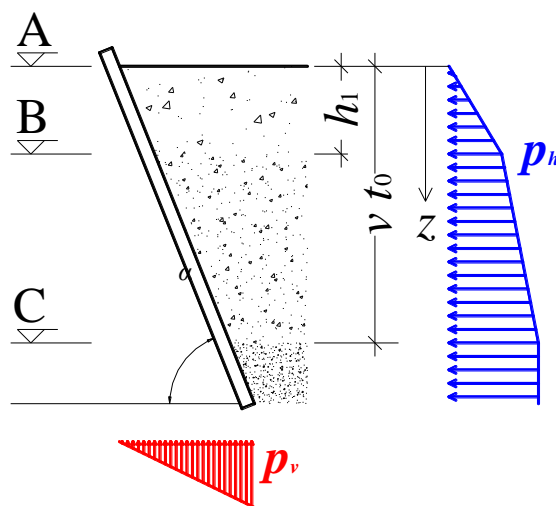
$$p_h(z) = \begin{cases} \gamma_{b,sv} \cdot z \cdot \sin \alpha & 0 \leq z \leq h_1 \\ \gamma_{b,sv} \cdot [h_1 - (z - h_1) \cdot d_p] \cdot \sin \alpha & h_1 < z \leq \nu t_0, \\ \gamma_{b,sv} \cdot [h_1 - (\nu t_0 - h_1) \cdot d_p] \cdot \sin \alpha & \nu t_0 < z \end{cases} \quad (6)$$



Slika 14 Navpični pritisk svežega betona na nagnjeni opaž.

Pri nagnjenih opažih (slika 15), na katerih je beton, je navpični pritisk enak

$$p_v = \gamma_{b,sv} \cdot z. \quad (7)$$



Slika 15 Navpični pritisk svežega betona na nagnjeni opaž.

2.3.5 Posebne tehnologije betona

Pospešeno strjevanje betona

Pospešeno strjevanje betona izvajamo v primerih, ko želimo doseči čim višji prirast zgodnjih trdnosti betona in/ali čim hitrejšo odstranitev opaža ali kalupa, v katerega je betonski element vgrajen.

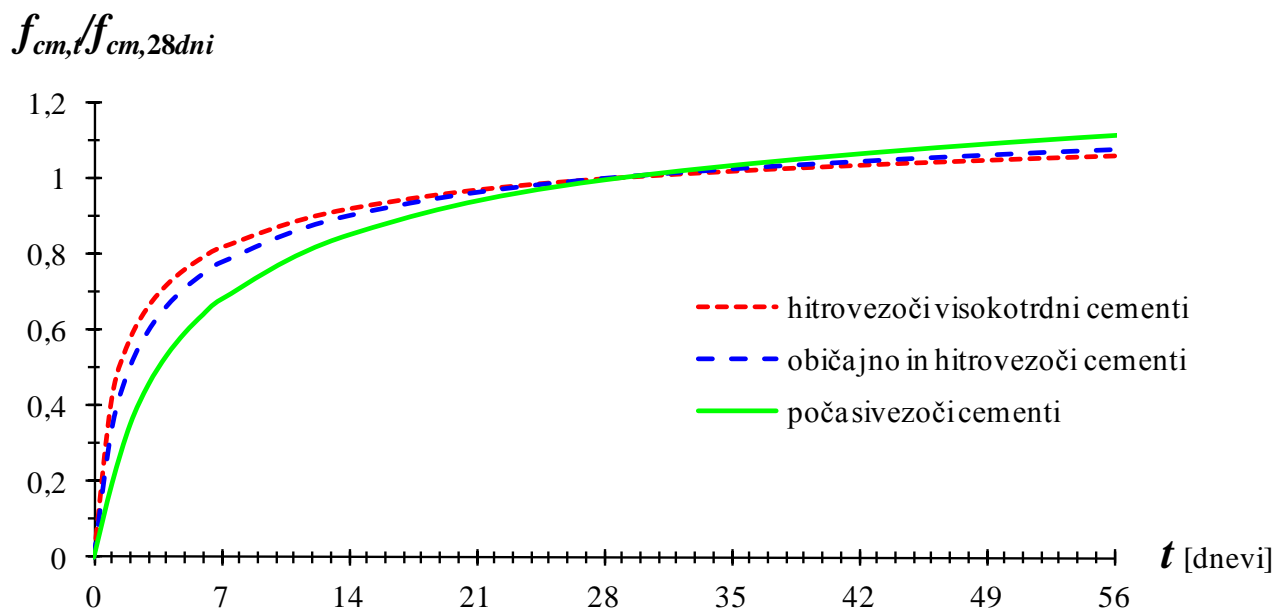
Za doseganje hitrejšega prirasta zgodnjih trdnosti betona imamo na voljo:

- tehnološke metode:
 - uporaba ustrezne vrste in količine cementa,
 - nižji vodocementni oziroma vodovezivni faktorji,
 - revibriranje betona,
- kemijske metode:

- uporaba ustreznih kemijskih dodatkov – pospeševalcev,
- fizične metode:
 - toplotna obdelava.

Uporaba ustrezne vrste in količine cementsa

Betoni, ki vsebujejo cemente višjega trdnostnega razreda (slika 16), imajo hitrejši prirast zgodnjih trdnosti. Uporaba večjega deleža cementsa na enoto betona tudi pospeši prirast trdnosti.

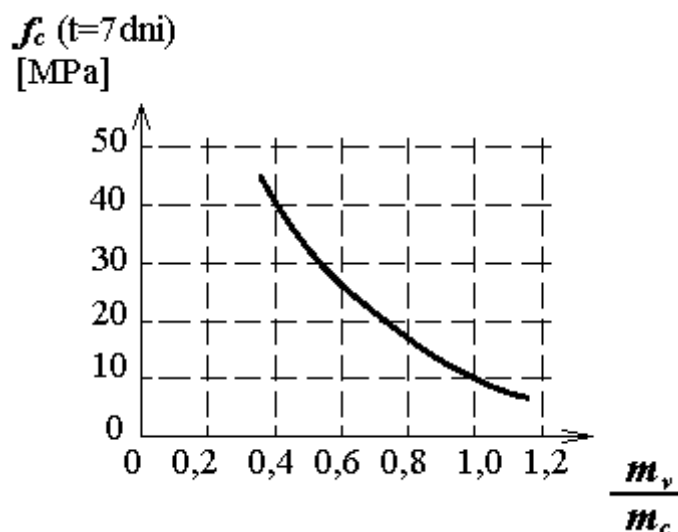


Slika 16 Normiran potek tlačnih trdnosti betonov z različnimi vrstami cementov.
 [Gutiérrez, P. A., Cánovas, M. F.: **THE MODULUS OF ELASTICITY OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE**, Materials and Structures, Vol. 28, 1995, str. 559-568.]

Nižji vodocementni oziroma vodovezivni faktorji

V betonskih mešanicah z nižjim vodocementnim oziroma vodovezivnim faktorjem je ob slabši vgradljivosti proces hidratacije hitrejši in razvijejo se višje tlačne trdnosti betona. Potrebno vgradljivost betonov z nizkim vodocementnim oziroma vodovezivnim faktorjem dosežemo:

- z uporabo kemijskih dodatkov, plastifikatorjev in superplastifikatorjev,
- z vakuumiranjem ali centrifugiranjem, pri čemer iz že vgrajene betonske mešanice odvezamo odvečno vodo,
- z uporabo betonskih mešanic, zelo suhih, zemeljsko vlažnih konsistenc.



Slika 17 Vpliv vodocementnega faktorja na velikot tlačne trdnosti betona.
[Muravljov, Mihailo, OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.]

Revibriranje betona

Revibriranje je naknadno vibriranje betona, ki ga izvedemo nekaj časa po vgrajevanju betona oziroma po prvem vibriranju. S tem se poveča gostota betona in zapro se fine pore, kar prispeva k višji tlačni in strižni trdnosti betona.

Uporaba ustreznih kemijskih dodatkov – pospeševalcev

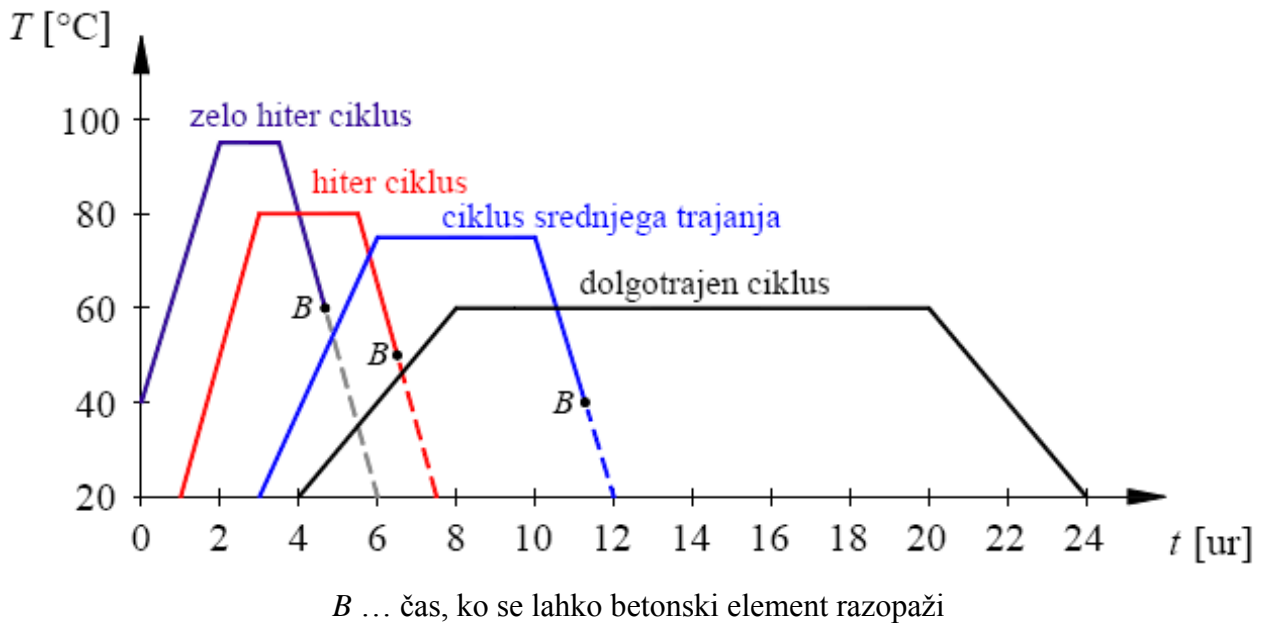
Kalcijev klorid pospešuje proces strjevanja betona.

Toplotna obdelava betona

Strjevanje betona se lahko pospeši s povišanjem temperature v dovolj vlažnem okolju, da je preprečeno izparevanje vlage iz betona. Toplotno obdelavo lahko izvajamo:

- pri normalnem tlaku in temperaturi do 100°C, kar imenujemo parjenje:
 - v posebnih komorah,
 - s pokrivanjem elementov,
- pri povišanem tlaku, med 8 in 12 bari, in temperaturi med 130°C in 180°C.

Elementi se segrevajo od 60 do 95°C. Režim parjenja je odvisen predvsem od lastnosti uporabljenega cementa.



Slika 18 Različni režimi parjenja.

[Muravljov, Mihailo, OSNOVI TEORIJE I TEHNOLOGIJE BETONA, Građevinska knjiga, Beograd, 1991.]

Betoni iz portland cementa v času parjenja običajno dosežejo 70 % nominalne tlačne trdnosti, ki jo imajo običajni betoni pri starosti 28 dni.

Parjeni betoni dosežejo po 28 dneh vsega 85 % nominalne trdnosti, celotno nominalno trdnost pa dosežejo šele po 3 mesecih ali pa celo nikoli.

V primeru parjenja prefabriciranih betonskih elementov se lahko povprečna tlačna trdnost betona $f_{cm}(t)$ pri času t ($t < 28$ dni) izračuna z izrazom (8)

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot e^{\left[13,65 - \frac{4000}{273 + \frac{T(\Delta t_i)}{T_0}} \right]}, \quad (8)$$

pri čemer so

t_T	učinkovita starost betona v dnevih,
Δt_i	časovni interval v dnevih,
$T(\Delta t_i)$	temperatura v i -tem časovnem intervalu [°C],
$T_0 = 1^\circ\text{C}$.	

Razvoj tlačne trdnosti betona po procesu parjenja do starosti 28 dni je

$$f_{cm}(t) = f_{cmp} + \frac{f_{cm} - f_{cmp}}{\log(28 - t_p + 1)} \cdot \log(t - t_p + 1), \quad (9)$$

pri čemer so

$f_{cm}(t)$	povprečna tlačna trdnost betona pri starosti t po procesu parjenja,
f_{cmp}	povprečna tlačna trdnost betona takoj po parjenju, v času t_p ,
t_p	čas zaključka procesa parjenja v dnevih.

Prepaktirani beton

Prepaktirani beton vgrajujemo v dveh fazah. Najprej med opaž nasujemo agregat, ustrezne granulometrijske sestave, in ga zbijemo. V naslednjem koraku med agregat injektiramo cementno pasto z dodatki. Granulacija agregata, diskontinualne granulometrijske sestave, je sestavljena tako, da je med zrni agregata 40% praznin, ki jih zapolni cementna pasta. Injekcijska masa je sestavljena iz cementa, vode, dodatkov in finih frakcij, večinoma med 1,25 mm in 2 mm. Groba zrna so vgrajena tako, da se medsebojno točkasto stikujejo, zaradi česar sta krčenje in lezenje betona bistveno manjša. Poraba cementa se giblje med 120 in 150 kg/m³ betona. Razmeroma majhna količina vgrajenega cementa v procesu hidratacije sprosti manjšo količino hidratacijske toplote. Tovrstni betoni se uporabljajo za vodonepropustne konstrukcije, masivne konstrukcije, sanacijska dela, stebre mostov, podvodne objekte, izdelavo zaslonov, ki ščitijo pred žarčenjem, ... Prepaktiranim betonom se lahko v visokogradnji zaradi arhitekturno-estetskih učinkov, kmalu po njihovi vgradnji spere površino.

Vgrajevanje betona pod vodo

Beton, tekoče konsistence, se pod vodo vgrajuje skozi cevi, po katerih pada zaradi svoje lastne teže. Konec cevi mora biti ves čas betoniranja potopljen v beton, da ne pride do mešanja betona in vode. Beton tekoče konsistence mora biti primerno koheziven, da ne segregira med transportom, se dobro zbije brez vibriranja in se ne meša z vodo med vgradnjo. Imeti mora veliko količino drobnih delcev – drobnega peska, kamene moke in cementa, s premerom manjšim od 0,25 mm. Primerna je uporaba pucolanov, kot dodatki pa se uporabljajo aeranti in stabilizatorji.

Vakuimirani beton

Eden izmed načinov za izdelavo betona z nizkim vodovezivnim faktorjem, ki je dobro vgradljiv, je postopek vakuumiranja betona. Sveži beton, ki je dobro obdelaven, se vgradi in zbije. Nato se na površino betona postavi zaboje, s tkanino propustno za vodo in zrak, ne prepušča pa drobnih delcev cementa in peska. Iz zaboja se izsesava zrak, ki preko tkanine iz betona vleče zrak in vodo. S tem postopkom zmanjšamo količino vode v betonu, a ne enakomerno. Največji vpliv ima postopek na površini betona. Uporablja se za tanke betonske elemente, prefabricirane elemente in betonske tlake.

2.4 Betonski element

Lastnosti otrdelega betona delimo na:

- mehanske:
 - tlačna trdnost,
 - upogibna trdnost,
 - natezna trdnost,
- reološke:
 - deformacije zaradi obremenitve,
 - krčenje,
 - lezenje.



Slika 19 *Struktura otrdelega betona – agregatna zrna zapolnjena s cementnim kamnom.*

Pomembnejše lastnosti otrdelega betona so:

- tlačna trdnost,
- upogibna trdnost,
- natezna trdnost,
- modul elastičnosti.
- odpornost proti vdoru vode,
- odpornost proti obrabi,
- odpornost proti agresivnemu kemijskemu delovanju,

- odpornost proti cikličnemu zmrzovanju in odtaljevanju,
- odpornost proti cikličnemu zmrzovanju in odtaljevanju in solem.

Glede na površinsko obdelanost oziroma izgled betona ločimo:

- vidne betone,
- površinsko zaščitene betone.

Vidni betoni ostanejo po odstranitvi opaža neobdelani – njihova površina je gladka ali reliefna – ali so ustrezno obdelani neposredno po vgraditvi – so metlani ali prani – oziroma po odstranitvi opaža – so štokani.

Površinsko zaščiteni betoni so zaščiteni s kemijskimi sredstvi – kot so epoksidne smole, akrilni premazi, hidrofozna sredstva – z namenom izboljšanja površinskih lastnosti otrdelega betona.

2.4.1 Mehanske lastnosti otrdelega betona

Trdnost betona

Ker sta natezna in strižna trdnost znatno manjši od tlačne, je otrdeli beton krhek material. Celo pri preizkušanju tlačne trdnosti pride do porušitve vzorcev zaradi prekoračitve natezne ali strižne trdnosti, kar lahko sklepamo iz oblike porušitve betonskega vzorca obteženega z enoosno tlačno silo na sliki 20. Naklonski kot strižne ravnine je odvisen od velikosti kohezije in kota notranjega trenja betona.

Pri projektiranju konstrukcij si vedno prizadevamo izkoristiti čim večjo tlačno trdnost. Temu se prilagaja vzdolžna in prečna geometrija nosilnih elementov ter robni pogoji oziroma podpiranje konstrukcije. V nosilnih elementih je beton lahko obremenjen s čisto natezno napetostjo ali čistim upogibom, vendar pa je najpogostejša oblika obremenitve prostorsko napetostno stanje. Različne obremenitve povzročajo različne oblike porušitev, zato je pri projektiranju pomembno, da izberemo ustrezno trdnost. Podatki za projektiranje so lahko dobljeni z določanjem nosilnosti na konstrukcijah ali pa na standardnih laboratorijskih vzorcih.

Trdnost se kot vse druge lastnosti otrdelega betona s časom spreminja in je odvisna od pogojev okolja, v katerem se beton nahaja v času strjevanja in tudi med samo preiskavo.



Slika 20 Običajna oblika porušitve betonskega vzorca obteženega z enoosno tlačno silo.

Projektirane vrednosti trdnosti imajo pomen iskane kvalitete betona, ki bo vgrajen v konstrukcijo, numerične vrednosti preiskav kontrolnih vzorcev med proizvodnjo betona pa kažejo, v kakšni meri je dosežena zahtevana kvaliteta. Po predpisu Eurocode 2 se trdnostni razred betona označuje s črko C, ki ji sledita dve številki. Prva označuje 28-dnevno karakteristično tlačno trdnost valja, ki ima premer osnovne ploskve 15 cm in višino 30 cm, druga pa označuje 28-dnevno karakteristično tlačno trdnost kocke z robom 15 cm. Glede na heterogenost strukture betona in velik raztros rezultatov preiskav se trdnostni razred določa po postopkih statistike na podlagi dobljenih rezultatov.

Glavna funkcija večine betonskih konstrukcij je prenašanje obremenitve, zato je trdnost osnovno merilo kvalitete betona. Dosežena trdnost betona je pogosto tudi dober pokazatelj za to, da so dosežene tudi druge lastnosti betona. To je posledica dejstva, da so vse lastnosti otrdelega betona odvisne od strukture cementnega kamna, na katero imata največji vpliv vodocementno oziroma vodovezivno razmerje in stopnja hidratacije.

Preiskave tlačne trdnosti

Tlačno trdnost betona določamo na standardnih vzorcih, to je na valjih, ki imajo premer osnovne ploskve 15 cm in višino 30 cm, in na kockah z robom 15 cm.

Karakteristične vrednosti tlačnih trdnosti izmerjene na standardnih vzorcih.
 [Beton – 1. del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost, EN 206-1.]

običajno težki betoni			lahki betoni		
trdnostni razred	$f_{ck, valj}$ [MPa]	$f_{ck, kocka}$ [MPa]	trdnostni razred	$f_{ck, valj}$ [MPa]	$f_{ck, kocka}$ [MPa]
C8/10	8	10	LC8/9	8	9
C12/15	12	15	LC12/13	12	13
C16/20	16	20	LC16/18	16	18
C20/25	20	25	LC20/22	20	22
C25/30	25	30	LC25/28	25	28
C30/37	30	37	LC30/33	30	33
C35/45	35	45	LC35/38	35	38
C40/50	40	50	LC40/44	40	44
C45/55	45	55	LC45/50	45	50
C50/60	50	60	LC50/55	50	55
C55/67	55	67	LC55/60	55	60
C60/75	60	75	LC60/66	60	66
C70/85	70	85	LC70/77	70	77
C80/95	80	95	LC80/88	80	88
C90/105	90	105			
C100/115	100	115			

Če tlačno trdnost določamo na vzorcih drugačnih dimenzij, je potrebno dobljene rezultate korigirati s pretvorbenimi faktorji, ki so odvisni od trdnosti betona, zrnastostne sestave agregata in ostalih lastnosti sestavin betona.

Vzorci izdelujemo z vgrajevanjem betonske mešanice v jeklene in plastične kalupe, ki so zelo natančno izdelani. Vzorec betona v kalupu dobro zgostimo, zgornjo površino pa zgladimo. Zaščitimo ga pred možno izgubo vlage, tako da kalup prekrijemo in hranimo v laboratoriju. Naslednji dan vzamemo vzorec iz kalupa in ga do preiskave hranimo pri temperaturi 20 ± 4 °C in relativni vlažnosti večji od 95 %, ponavadi ga kar potopimo v vodo.

Vzorci za preiskavo morajo biti zasičeni z vlago, da ne pride do izsuševanja. Ko jih vzamemo iz bazena, jih samo obrišemo, postavimo na prešo in začnemo obremenjevati. Obremenitev nanašamo na vzorce preko dveh togih, težkih, ravnih jeklenih plošč, od katerih je spodnja nepremična, zgornja pa je narejena tako, da se na začetku obremenjevanja enakomerno uleže na zgornjo površino vzorca. Vzorec mora biti dobro centriran. Obremenitev nanašamo postopoma s predpisano hitrostjo do porušitve.

Tlačna trdnost betona f_c je največja dosežena sila P deljena z nominalno površino prečnega prereza vzorca A

$$f_c = \frac{P}{A}. \quad (10)$$

Dobljeni rezultat se imenuje enoosna tlačna trdnost betona, čeprav je v vzorcu zaradi trenja med površino jeklene plošče in površino vzorca prostorsko napetostno stanje. Trenje preprečuje širjenje tlačno obremenjenega vzorca. Če bi lahko to trenje zmanjšali ali celo izničili, bi bili dobljeni rezultati manjši. K trenju doprinese tudi deformiranje jeklenih plošč, čeprav imajo relativno veliko togost. Zaradi tega je napetostno stanje v srednji tretini višine valja bližje enoosnemu tlačnemu

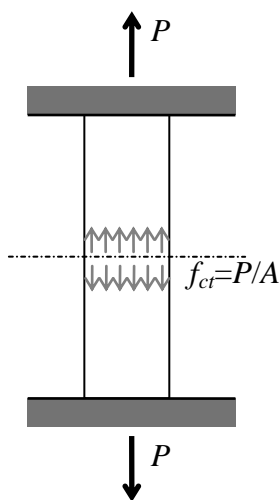
napetostnemu stanju kot pri kocki. Če obremenitev nanašamo prehitro, dobimo večjo trdnost betona.

Preiskave natezne trdnosti

Natezno trdnost betona preiskujemo na tri načine:

- z enoosnim nateznim preizkusom,
- z upogibnim preizkusom,
- s preizkusom cepitvene natezne trdnosti.

Zaradi težav pri vpenjanju in krhkega obnašanja betona pod vplivom nateznih napetosti, se enoosni natezni preizkus v praksi redko izvaja.

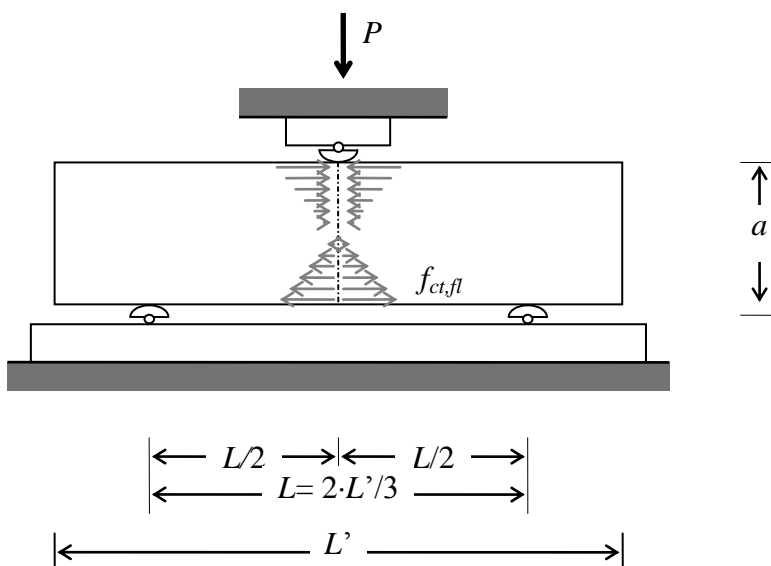


Slika 21 Skica enoosnega nateznega preizkusa.

Upogibno natezno trdnost betona običajno določamo na betonskih prizmah dimenzij $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$. Izračunamo jo ob predpostavki, da je obnašanje betona vse do porušitve linearno elastično in da je modul elastičnosti v nategu enak modulu elastičnosti v tlaku, po izrazu (11)

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot a^3}, \quad (11)$$

pri čemer je P največja dosežena sila, L razdalja med podporama, a pa stranica kvadratnega prečnega prereza prizme.

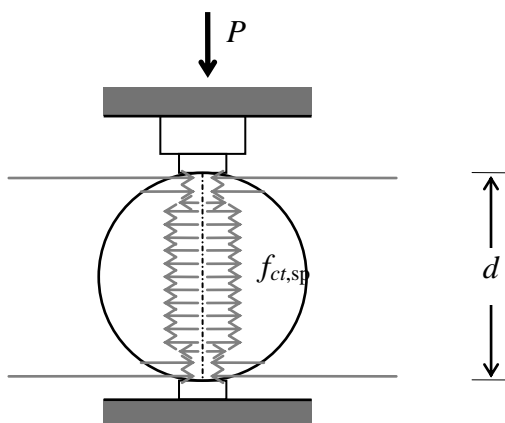


Slika 22 Skica preizkusa upogibne natezne trdnosti betona.

Upogibna natezna trdnost betona je večja od natezne trdnosti pri čistem nategu, ker so pri čistem nateznem preizkusu po celotnem preizkušancu dosežene največje napetosti, s tem pa gotovo tudi na mestih največjih nepopolnosti. Pri upogibni obremenitvi pa je z velikimi nateznimi napetostmi obremenjen le zelo majhen del prečnih prereзов pa še to ne po vsej dolžini, zato je verjetnost, da bodo največje nepopolnosti v območju največjih nateznih napetosti, manjša.

Cepitveno natezno trdnost običajno določamo na valjih, ki imajo premer osnovne ploskve $d=15$ cm in dolžino $L=30$ cm. Vzorec obremenimo z linijsko obtežbo vzdolž dveh nasprotnih si tvorilk (slika 23) in jo postopoma povečujemo vse do porušitve. Cepitveno natezno trdnost izračunamo iz največje sile P in dimenzij valja po izrazu (12)

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (12)$$



Slika 23 Skica preizkusa cepitvene natezne trdnosti betona.

Tudi cepitvena natezna trdnost betona je običajno večja od enoosne, kar si razlagamo z manjšo verjetnostjo, da so nepopolnosti betona ravno v območju največjih nateznih napetosti, ki nastopajo v ravnini linijskih prečnih obtežb.

Vpliv strukture betona, pogojev okolja in starosti betona na njegovo trdnost

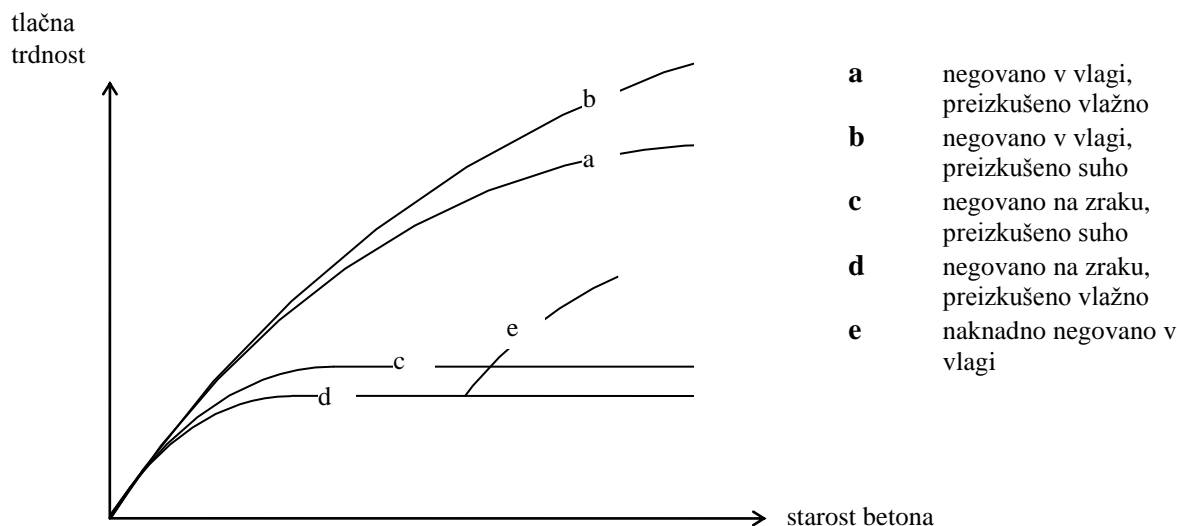
Zaradi zelo heterogene strukture betona, je težko napovedati vpliv posameznih komponent in vplivov na trdnost betona. Agregatna zrna imajo zelo različne fizikalne lastnosti. Heterogena in porozna struktura cementnega kamna se s časom in glede na pogoje okolja spreminja, prav tako pa tudi struktura stičnega območja med agregatnimi zrnji in cementnim kamnom, ki je večinoma najšibkejši del betona.

Že pri teoretični razlagi natezne trdnosti, ki jo dosežemo pri najenostavnejši obliki porušitve v betonu, naletimo na težave. Zato se pogosto omejimo na inženirski in fenomenološki nivo informacij. Vendar pa so teoretične razlage in proučevanje strukture ter stanja betona zelo pomembni za razumevanje lastnosti, ki vplivajo na trdnost betona.

Poroznost betona, velikost vodocementnega oziroma vodovezivnega razmerja in agregatno-cementno razmerje imajo velik vpliv na trdnost betona.

V ugodnih pogojih okolja poteka proces hidratacije cementne paste zelo dolgo, pri čemer trdnost betona v začetku hitro narašča, potem pa vse počasneje. Če se beton izsuši in v kapilarah zmanjka vode, se tudi naraščanje trdnosti ustavi. Trdnost pa začne zopet naraščati, če beton navlažimo.

Pri preizkušanju trdnosti je vlažnost betona zelo pomembna. Če se beton negovan v vodi pred preizkusom kratek čas suši, se trdni sloji v cementnem kamnu zaradi izhlapevanja vode zbližajo, v porah se naredijo meniskusi, aktivirajo se kapilarne sile, ki povečajo krčenje zunanjšega dela betona, kar povzroči v betonu tlačne napetosti. Čim bolj se voda umika v tanjše kapilare, tem bolj so meniskusi zakrivljeni, privlačne sile med sloji pa tem večje. Zaradi tega se trdni sloji betona pod obremenitvijo težje razmikajo, kar se kaže v povečani trdnosti.



Slika 24 Vpliv nege in vlažnosti vzorca med preiskavo na tlačno trdnost betona.

[Ukrainczyk, V.: **BETON: struktura, svojstva, tehnologija**, ALCOR, Zagreb, 1994.]

Povišane temperature v začetku pospešujejo proces hidratacije in s tem naraščanje trdnosti, vendar pa so kasnejše trdnosti nižje. Produkti hidratacije nimajo dovolj časa, da bi prodrli v praznine, ampak se zbirajo kar okoli zrnca cementa, s tem pa preprečujejo njihovo nadaljnjo hidratacijo.

Obnašanje betona pri enosnem tlaku

Pri obremenjevanju betona s tlačnimi napetostmi obstajajo štiri značilna območja:

- začetni pogoji,
- območje majhnih obremenitev,
- območje srednjih obremenitev,
- območje visokih obremenitev.

Še preden je beton obremenjen, so v stičnem območju že mikrorazpoke. Izhlapevanje vode iz svežega betona, trdnost stičnega območja in nega betona vplivajo na njihovo število in velikost. Razlike v modilih elastičnosti agregata in cementnega kamna ter krčenje, ki je posledica sušenja in temperaturnih sprememb, povzročajo v stičnem območju diferenčne deformacije, zaradi katerih pride do mikrorazpok.

V območju majhnih obremenitev se povečuje število, širina in dolžina mikrorazpok v stičnem območju. Te razpoke se med seboj ne povezujejo. Pri razbremenitvi so zelo majhne povratne deformacije. Če je obremenitev kratkotrajna, se beton obnaša elastično do napetosti, ki znaša približno 30 do 40 % tlačne trdnosti betona, z naraščanjem napetosti se naklon delovnega diagrama betona spremeni in daljica preide v krivuljo.

Do približno 50 % tlačne trdnosti betona je širjenje mikrorazpok v stičnem območju stabilno, kar pomeni, da se pri odstranitvi obremenitve ustavi.

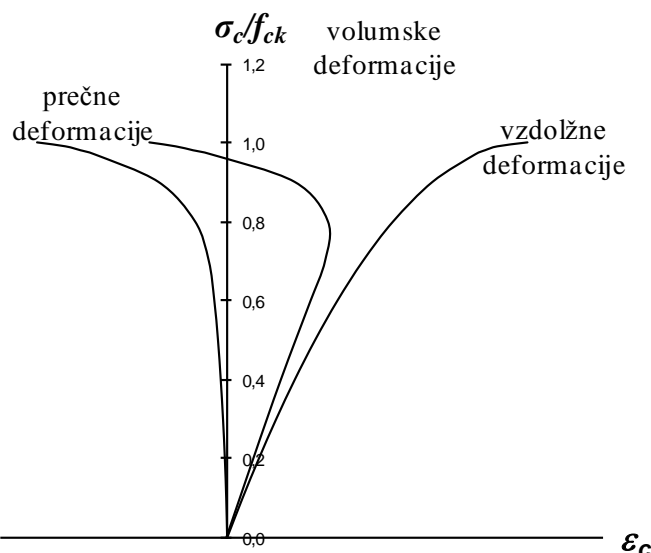
V območju srednjih obremenitev je širjenje razpok v stičnem območju z naraščanjem napetosti vse bolj nestabilno. Razpoke pa se začnejo širiti tudi v matrico cementnega kamna, zaradi česar se diagram napetost – deformacija še bolj ukrivi.

Kritična napetost, pri kateri ima beton najmanjšo prostornino, nastopi približno pri 70 do 80 % tlačne trdnosti in od tu naprej lahko pride pri dolgotrajnih obremenitvah do porušitve, ne da bi bila dosežena kratkotrajna tlačna trdnost.

Ko se začnejo napetosti v betonu približevati tlačni trdnosti betona, to je v območju visokih napetosti, postane širjenje razpok nestabilno. V tem območju pride pri konstantni napetosti do spontanega naraščanja razpok, čemur sledi porušitev. Ta pa nastopi tem prej, čim bolj se obremenitev približa tlačni trdnosti.

Volumske deformacije v betonu se z naraščanjem obremenitve zmanjšujejo vse do kritične obremenitve, kjer dosežejo minimum. Od tu naprej začno naraščati in pred porušitvijo tudi spremenijo predznak, zaradi česar se začne prostornina povečevati. Prostornina se lahko pred porušitvijo tudi toliko poveča, da preseže prostornino neobremenjenega betona.

Pri visokotrdnem betonu pride v delovnem diagramu do precejšnih sprememb. Nelinearno obnašanje se začne veliko kasneje kot pri betonih običajnih trdnosti, lahko tudi šele pri 80 % kratkotrajne trdnosti. Prav tako pa je trdnost pri dolgotrajnih obremenitvah nižja kot pri kratkotrajnih.



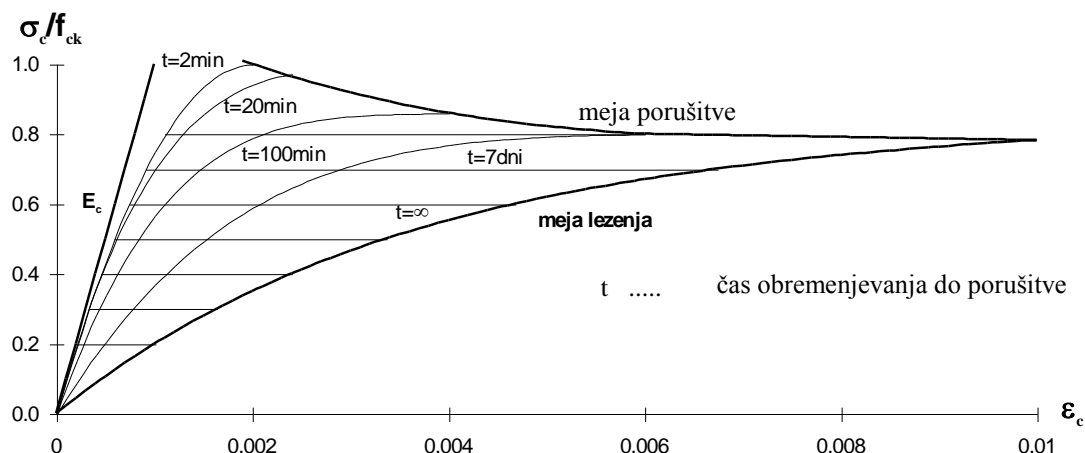
Slika 25 Tipični diagrami napetost - deformacija v tlaku.

[Nevil, A. M.: SVOJSTVA BETONA, Građevinska knjiga, Beograd, 1976.]

Rüsch [Rüsch, H.: **RESEARCHES TOWARD A GENERAL FLEXURAL THEORY FOR STRUCTURAL CONCRETE**, ACI Journal, Proceedings, Vol. 57, No. 1, julij 1960, str. 1-28] je objavil eksperimentalne rezultate raziskav enosnih tlačnih trdnosti betona glede na hitrost obremenjevanja (slika 24). Ugotovil je, da rezultate omejujejo tri krivulje:

- premica z naklonom, ki je enak modulu elastičnosti pri kratkotrajni obremenitvi,
- meja lezenja, ki povezuje deformacije, do katerih se lahko deformira beton pri napetostih manjših od trajne trdnosti betona,
- meja porušitve, ki povezuje deformacije, pri katerih se beton pri napetostih višjih od trajne trdnosti poruši.

Če je beton izpostavljen dolgotrajni tlačni obremenitvi manjši od trajne trdnosti, ne bo prišlo do porušitve. Drugače pa je, če obremenitev preseže to mejo. V betonu se razpoke nestabilno širijo in slej ko prej bo prišlo do porušitve.



Slika 26 Odvisnost trdnosti betona od hitrosti nanosa obtežbe

[Rüsch, H.: **RESEARCHES TOWARD A GENERAL FLEXURAL THEORY FOR STRUCTURAL CONCRETE**, ACI Journal, Proceedings, Vol. 57, No. 1, julij 1960, str. 1-28.]

Preizkus za določanje standardne tlačne trdnosti betona traja od začetka obremenjevanja pa do porušitve od 2 do 4 minute.

Obnašanje betona pri enoosnem nategu

Oblika diagrama napetost – deformacija, elastični modul in Poissonovo število so pri enoosnem nategu podobni kot pri enoosnem tlaku, obstaja pa nekaj pomembnih razlik v obnašanju. Območje stabilnega širjenja razpok je pri enoosnem nategu zelo majhno. Smer širjenja razpok je pravokotna na smer napetosti. Nastanek in širjenje vsake nove razpoke zmanjša območje, preko katerega se prenaša obremenitev, zaradi česar se v okolici kritične razpoke povečajo napetosti. Ker se hitrost širjenja razpok ne umiri hitro, pride do porušitve betona že, ko se poveže manjše število razpok.

V poročilu ACI Committee 363 [ACI Committee 363: **STATE-OF-THE-ART REPORT ON HIGH-STRENGTH CONCRETE**, ACI Journal, Proceedings, Vol. 81, No. 4, julij-avgust 1984, str. 364-411.] je napisano, da se giblje cepitvena natezna trdnost betonov običajnih trdnosti okoli 10 % tlačne trdnosti, pri višjih tlačnih trdnostih do okoli 85 MPa pa se lahko zniža na 5 %. Carasquillo in njegovi sodelavci [Carrasquillo, R. L., Nilson, A. H., Slate, F. O.: **PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE SUBJECT TO SHORT-TERM LOADS**, ACI Journal, Vol. 78, No. 3, maj-junij 1981, str. 171-178.] so predlagali za določanje cepitvene natezne trdnosti betona izraz (13)

$$f_{ct,sp} = 0,54 \cdot \sqrt{f_{cm}} [\text{MPa}], 32 \text{ MPa} < f_{cm} < 83 \text{ MPa}. \quad (13)$$

V norveškem predpisu za beton [Gjörv, O. E.: **HIGH-STRENGTH CONCRETE**, First International CANMET/ACI Conference on Advances in Concrete Tehnology, Atene, junij 1992, str. 21-77.], kjer se uporablja enoosna natezna trdnost namesto cepitvene, je privzeto, da je enoosna natezna trdnost enaka približno dvem tretjinam cepitvene natezne trdnosti. Thorenfeldt [Gjörv, O. E.: **HIGH-STRENGTH CONCRETE**, First International CANMET/ACI Conference on Advances in Concrete Tehnology, Atene, junij 1992, str. 21-77.] je podal za oceno karakteristične enoosne natezne trdnosti betona izraz (14)

$$f_{ctk} = 0,3 \cdot f_{ck}^{0,6} [\text{MPa}]. \quad (14)$$

Khan in njegovi sodelavci [Khan, A. A., Cook, W. D., Mitchell, D.: **TENSILE STRENGTH OF LOW, MEDIUM, AND HIGH-STRENGTH CONCRETES AT EARLY AGES**, ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 5, september-oktober 1996, str. 487-493.] za določitev upogibne natezne trdnosti betona predlagajo izraz (15)

$$f_{ct,fl} = 0,4 \cdot (f_{cm} [\text{MPa}])^{\frac{2}{3}}, f_{cm} < 100 \text{ MPa}. \quad (15)$$

Leta 1995 sta Marzouk in Chen [Marzouk, H., Chen, Z. W.: **FRACTURE ENERGY AND TENSION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE**, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, No. 2, maj 1995, str. 108-116.] objavila rezultate raziskav nateznih trdnosti visokotrdnih betonov (preglednica 15), katerih tlačne trdnosti izmerjene na valju s premerom 15 cm in višino 30 cm so se gibale od 70 do 78 MPa.

Preglednica 15 *Razmerja med nateznimi trdnostmi in tlačno trdnostjo.*

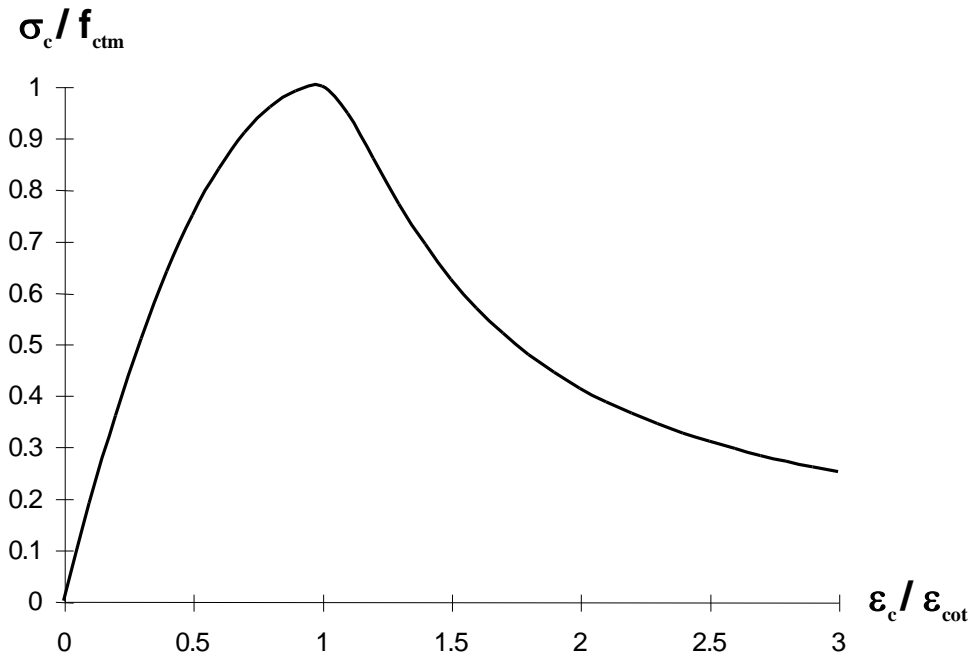
[Marzouk, H., Chen, Z. W.: **FRACTURE ENERGY AND TENSION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE**, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, No. 2, maj 1995, str. 108-116.]

enoosna natezna trdnost	$f_{ct} \cong$	$0.048 \cdot f_{cm}$		
cepitvena natezna trdnost	$f_{ct,sp} \cong$	$0.072 \cdot f_{cm}$	$f_{ct,sp} \cong$	$1.5 \cdot f_{ct}$
upogibna natezna trdnost	$f_{ct,fl} \cong$	$0.094 \cdot f_{cm}$	$f_{ct,fl} \cong$	$2.0 \cdot f_{ct}$
			$f_{ct,fl} \cong$	$1.3 \cdot f_{ct,sp}$

Predlagala sta tudi izraz (16) za izračun delovnega diagrama betona v nategu

$$\frac{\sigma_c}{f_{ctm}} = \begin{cases} 2 \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cot}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cot}} \right)^2 & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cot}} \leq 1 \\ \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cot}} & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cot}} > 1 \end{cases}, \quad (16)$$

pri čemer sta α in β parametra odvisna od materiala.



Slika 27 Oblika delovnega diagrama betona v nategu ($\alpha = 2.84$ in $\beta = 1.66$).

[Marzouk, H., Chen, Z. W.: **FRACTURE ENERGY AND TENSION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE**, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 7, No. 2, maj 1995, str. 108-116.]

Delovna skupina za visokotrjne / visokovredne betone pri združenju CEB-FIP [Comité Euro-International du Béton: **HIGH PERFORMANCE CONCRETE, Recommended Extensions to the Model Code, Research Needs**, Report of the CEB-FIP Working Group on High Strength / High Performance Concrete, Bulletin d' Information N° 228, julij 1995.] pa priporoča, da se karakteristične vrednosti natezne trdnosti betona računajo po izrazih (17)

$$\begin{aligned} f_{ctm} &= f_{ctko,m} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{f_{cko} + \Delta f} \right)^{0,6}, \\ f_{ctk,min} &= f_{ctko,min} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{f_{cko} + \Delta f} \right)^{0,6}, \\ f_{ctk,max} &= f_{ctko,max} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{f_{cko} + \Delta f} \right)^{0,6}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$f_{cko} = 10 \text{ MPa}, \Delta f = 8 \text{ MPa}, f_{ctko,min} = 1.22 \text{ MPa}, f_{ctko,max} = 2.38 \text{ MPa}, f_{ctko,m} = 1.80 \text{ MPa}.$$

Razmerje med natezno in tlačno trdnostjo betona

Čeprav sta natezna in tlačna trdnost betona medsebojno tesno povezani, med njima ni neposredne povezave. Z naraščajočo tlačno trdnostjo narašča tudi natezna trdnost betona, vendar pa razmerje med trdnostima ni konstantno, ampak z naraščajočo tlačno trdnostjo pada.

Ker je razmerje med enoosno natezno trdnostjo in enoosno tlačno trdnostjo zelo majhno, se večina betonskih elementov dimenzionira ob predpostavki, da je beton sposoben prenesti le tlačne napetosti. Vendar pa natezne trdnosti betona ne smemo zanemariti, saj nastanejo razpoke običajno zaradi nateznih napetosti.

2.4.2 Reološke lastnosti otrdelega betona

Pri kratkotrajnih obremenitvah manjših od dopustnih napetosti se beton, kot večina drugih nosilnih gradbenih materialov, obnaša elastično, kar pomeni, da se material deformira takoj po obremenitvi in se povrne v začetno stanje takoj po razbremenitvi, ni pa nujno, da je delovni diagram tudi linearen. Pod dolgotrajno obremenitvijo pa beton leze. Deformacije se s časom postopoma povečujejo, čeprav se napetosti v betonu ne spreminjajo in so lahko tudi relativno majhne.

Poleg deformacij, ki so posledica delovanja zunanje obtežbe, v enaki meri vpliva na spremembe prostornine tudi krčenje betona. Krčenje betona je pogosto ovirano, zaradi česar se pojavijo natezne napetosti, ki v primeru, ko dosežejo natezno trdnost betona, povzročijo razpoke.

Ne glede na vrsto deformacij lahko spremembo prostornine opišemo z volumsko deformacijo, ki je enaka vsoti deformacij v treh poljubnih med seboj pravokotnih smereh.

Krčenje betona

Krčenje betona je lahko posledica

- izhlapevanja vode iz betona,
- hidratacije cementa,
- karbonatizacije.

Krčenje betona zaradi sušenja

Pri kemijskih procesih, ki spremljajo hidratacijo, pride do krčenja cementne paste. To krčenje se imenuje *avtogeno krčenje* in je posledica samoizsuševanja v porah cementne paste. Ta oblika krčenja se, s poviševanjem temperature, z zniževanjem vodo-vezivnega razmerja, s povečevanjem količine cementa, finosti mletja in zelo drobnih delcev, kot je mikrosilika, povečuje.

Že v svežem betonu prihaja do izgub vode s površine in s tem do krčenja površinskega sloja betona. To krčenje se imenuje *plastično krčenje*. Notranji del betona, ki se ne krči, pa to krčenje ovira, zato pride do nateznih napetosti, ki lahko hitro dosežejo natezno trdnost mladega betona, in s tem do plitkih in dokaj širokih razpok v površinskem sloju. S povečevanjem količine cementa se to krčenje poveča. Krčenje se lahko zmanjša, razpoke pa prepreči z ustrezno nego svežega betona.

S sušenjem otrdelega betona izhlapeva voda iz kapilar, kar povzroči krčenje betona. Del deformacij zaradi krčenja je nepovraten, del pa je pri ponovnem navlaženju povraten.

Krčenje betona zaradi karbonatizacije

Ogljikov dioksid, ki se nahaja v atmosferi, povzroča v cementnem kamnu kemijske reakcije. Z vodo tvori ogljikovo kislino, ki reagira s kalcijevim hidroksidom, zaradi česar nastajata v cementnem kamnu kalcijev karbonat in voda, razgrajuje pa tudi druge produkte hidratacije.

Hitrost napredovanja korozije cementnega kamna zaradi karbonatizacije je odvisna od strukture por, še bolj pa od njihove zapolnjenosti z vodo. Ogljikov dioksid ima najmanjši vpliv, če so pore povsem zapolnjene z vodo ali pa če v njih ni vode. Najboljši pogoji za karbonatizacijo cementnega kamna so v delno vlažnem betonu.

Zaradi nizke propustnosti so visokotrdni betoni odpornejši proti koroziji zaradi karbonatizacije kot betoni običajnih trdnosti.

Poleg krčenja pride zaradi karbonatizacije tudi do povečanja trdnosti površinskega sloja betona, saj kristale kalcijevega hidroksida zamenja trdnější kalcijev karbonat, voda pa pospeši proces hidratacije še nehidratiziranih zrn cementa.

Parametri, ki vplivajo na velikost krčenja betona

Krčenje betona je posledica krčenja cementnega kamna. Največji vpliv na velikost krčenja ima agregat, ki deformiranje cementnega kamna ovira.

Zrnavostna sestava in velikost največjega zrna agregata na velikost krčenja nimata neposrednega vpliva. Z izbiro večjih zrn agregata zadošča, pri enaki vgradljivosti in enakem vodocementnem oziroma vodovezivnem razmerju, manj cementa, zaradi česar bo krčenje betona manjše.

Krčenje betona je v začetku največje, potem pa se postopoma zmanjšuje. V splošnem velja, da se v prvih dveh tednih izvrši od 14 do 34 % dvajsetletnega krčenja, po treh mesecih od 40 do 80 % in v prvem letu od 66 do 85 %.

Preiskave krčenja betona

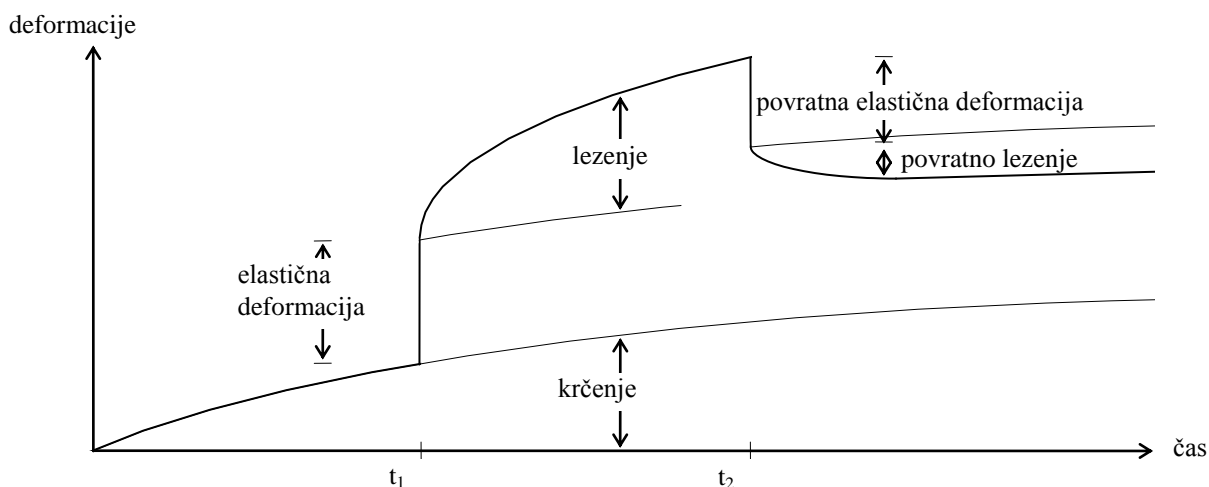
Ker je največji del krčenja posledica izhlapevanja vode iz betona, bo imela velikost in oblika preizkušancev velik vpliv na rezultate preiskav. Običajno so preizkušanci prizmice dimenzij 10 cm × 10 cm × 40 cm. Ker je raztros rezultatov precejšen, se vzporedno preizkuša vsaj tri vzorce.

Deformacije betona zaradi temperaturnih sprememb

Deformiranje betona zaradi temperaturnih sprememb je sorazmerno temperaturnemu koeficientu betona, ki je odvisen predvsem od temperaturnega koeficienta agregata in vlažnosti betona. Pri ohlajanju se beton krči, pri segrevanju pa razteza. Ker je krčenje običajno ovirano, se v betonu pojavijo natezne napetosti, ki povzročijo razpoke, ko je presežena natezna trdnost betona.

Deformacije betona zaradi obremenitve

Struktura betona je zelo raznolika in zapletena, s številnimi porami in razpokami, zato je težko napovedati, kako se bo beton obnašal pod vplivom zunanjih sil.



Slika 28 Časovni potek deformacij betona v suhem okolju, ki je bil v času t_1 obremenjen in v času t_2 razbremenjen.

[Ukrainczyk, V.: **BETON: struktura, svojstva, tehnologija**, ALCOR, Zagreb, 1994.]

Že pri relativno zelo majhnih napetostih deformacije niso v celoti povratne, kar je razvidno iz delovnega diagrama betona, kjer se linija razbremenitve ne vrača po liniji obremenitve. Poleg tega pa so deformacije odvisne še od časa, kar pomeni, da se pod dolgotrajno obremenitvijo postopno povečujejo, od sestave betona, njegove zrelosti in pogojev okolja.

Modul elastičnosti betona

Modul elastičnosti betona je mera njegove togosti. Zveza med napetostmi in deformacijami je pri zelo hitrem nanosu obtežbe skoraj linearna. Diagram pa je toliko bolj ukrivljen čim počasnejše je obremenjevanje, kar je predvsem posledica lezenja betona in mikrorazpok v betonu. Kljub temu, da je obnašanje betona pod obremenitvijo nelinearno, saj ne obstaja linearna zveza med napetostmi in deformacijami in tudi deformacije po razbremenitvi niso popolnoma povratne, služi modul elastičnosti za ovrednotenje napetosti zaradi deformacij, ki so posledica vplivov okolja.

Modul elastičnosti betona je funkcija gostot osnovnih sestavin in karakteristik stičnega območja.

Med karakteristikami grobih zrn agregata, ki vplivajo na modul elastičnosti betona je najpomembnejša poroznost. S povečevanjem deleža grobih zrn agregata z visokim elastičnim modulom v betonski mešanici modul elastičnosti betona v splošnem narašča. Na modul elastičnosti betona pa vplivajo še velikost največjega zrna agregata, oblika in tekstura površine ter zrnastostna in mineraloška sestava agregata.

Modul elastičnosti cementnega kamna je odvisen od poroznosti le tega, ta pa od vodocementnega oziroma vodovezivnega razmerja, količine zraka, mineralnih dodatkov cementu in stopnje hidratacije cementa.

Ker so v stičnem območju orientirani kristali kalcijevega hidroksida in večje kapilarne pore ter mikrorazpoke kot v ostalem cementnem kamnu, ima le to pomemben vpliv na zvezo med napetostmi in deformacijami, s tem pa tudi na modul elastičnosti betona.

Modul elastičnosti se s povečevanjem trdnosti betona povečuje, vendar ne linearno.

Poissonov količnik betona

Poissonov koeficient cementnega kamna se s spreminjanjem vodocementnega oziroma vodovezivnega razmerja rahlo spreminja, s sušenjem pada.

Pri visokih obremenitvah Poissonov količnik betona zelo hitro narašča (slika 25), kar je posledica razpokanosti vzorca.

Poissonov količnik betonov višjih trdnosti je običajno nižji.

Pri linijskih konstrukcijah lahko Poissonov količnik betona zanemarimo, pri ploskovnih in prostorskih konstrukcijah pa zanj običajno upoštevamo vrednost 0,2.

Lezenje betona

Glavni vzrok lezenja betona je gibanje adsorbirane vode in vode v majhnih kapilarah, kar je posledica napetosti zaradi zunanje obtežbe. Nelinearna sovisnost med napetostmi in deformacijami, ko napetosti presežejo 30 % tlačne trdnosti, jasno kaže, da mikrorazpoke v stičnem območju prispevajo k lezenju betona. Prirastek deformacij zaradi lezenja betona, ki nastopi v primeru, ko je beton poleg obremenitve izpostavljen tudi sušenju, je posledica dodatnih mikrorazpok v stičnem območju. Naslednji vzrok za lezenje pa je tudi zapoznelo elastično deformiranje agregata, do česar pride, zato ker se napetosti s cementnega kamna postopno prenašajo na agregat.

Celotne deformacije zaradi lezenja betona so vsota osnovnega lezenja in lezenja zaradi sušenja. Osnovno lezenje betona je definirano kot lezenje, ki se pojavi v pogojih, ko ni krčenja betona zaradi sušenja oziroma ni izmenjave vlage med betonom in okolico.

Prav tako kot pri krčenju zaradi sušenja je tudi pri lezenju del deformacij povraten, del pa nepovraten. Pri razbremenitvi betona v primeru lezenja je trenutna povratna elastična deformacija nekoliko manjša kot deformacija pri obremenitvi, sledi pa ji upadanje deformacije, kar se imenuje povratno lezenje betona, ki je hitrejše kot lezenje betona pod obremenitvijo, vendar pa povratek ni popoln. Trajna preostala deformacija se imenuje nepovratno lezenje betona.

Na lezenje betona vplivajo struktura cementnega kamna, sejalna krivulja in največje zrno agregata, vodocementno oziroma vodovezivno razmerje, relativna vlaga in temperatura okolice, nega betona, geometrija betonskega elementa in nivo obremenitve. Lezenje betona se z naraščajočo tlačno trdnostjo zmanjšuje.

Hitrost lezenja betona je v začetku največja, potem pa se postopoma zmanjšuje. Podobno kot v primeru krčenja velja, da se v prvih dveh tednih izvrši okoli 25 % dvajsetletnega lezenja, po treh mesecih okoli 50 % in v prvem letu okoli 75 %.

3. Predaja betonskega elementa v uporabo

Ko betonski element doseže ustrezne lastnosti, ga izdelovalec preda uporabniku. Ustrezno načrtovan in izveden betonski element pri pogojih normalne, predvidene uporabe preživi načrtovano življenjsko dobo brez poškodb. V primeru nepredvidenih vplivov na element ali spremembe namembnosti je potrebno betonski element popraviti ali izboljšati – sanirati.

3.1 Trajnost betonskih konstrukcij

Poroznost in propustnost

Poroznost in propustnost sta najpomembnejša parametra pri določanju trajnosti betona. Propustnost vključuje različne transportne mehanizme skozi pore in razpoke betona, po katerih se lahko prenašajo plini, tekočine in vodne raztopine. Transportni mehanizmi obsegajo konvekcijo, difuzijo in kapilarni dvig. Transport je možen v odprtih kapilarnih porah, v sistemu makropor, ki je posledica slabe zgostitve betona pri vgrajevanju, in v razpokah. Na količino kapilarnih por v glavnem vpliva velikost vodocementnega razmerja. Iz tega sledi, da sta trdnost in propustnost betona odvisni od poroznosti. To pomeni, da se lahko s stališča trajnosti visokotrdni beton v splošnem šteje med visokovredne betone.

Kemijska korozija

Kemijska korozija se lahko razdeli v tri skupine: raztapljanje produktov hidratacije, transformacija trdnih komponent, nabrekanje. Pri vseh naštetih oblikah korozije je propustnost ključni parameter, ki vpliva na stopnjo poškodovanosti betona. Poleg tega pa je kalcijev hidroksid lahko topna komponenta betona, ki je zelo občutljiva na kemijske vplive.

V splošnem velja, da je odpornost visokotrdnih betonov na kemično korozijo večja kot pri običajnih betonih. Cementna matrika visokotrdnih betonov pogosto vsebuje pucolanske dodatke, kot je mikrosilika, ki z zgostitvijo strukture zmanjšajo propustnost, kar onemogoča prodiranje agresivnih snovi v beton.

Kalcijev hidroksid reagira s sulfati, pri čemer nastaja sadra, ki lahko nadalje reagira z aluminatno fazo in tvori etringit. Zaradi tega pride do nabrekanja in kasneje tudi do porušitve betona. Z dodajanjem mikrosilike se velik del kalcijevega hidroksida pretvori v kalcijev silikat hidrat, zaradi česar se poveča odpornost betona na vplive sulfatov.

Odpornost proti zmrzovanju

Že pri betonih običajnih trdnosti je izdelava betona z dobrim in stabilnim sistemom zračnih praznin običajno problematična. Pri visokotrdnih betonih pa se ta problem zaradi dodajanja superplastifikatorja še poveča. Vnos zračnih mehurčkov lahko pri visokotrdnih betonih povzroči tudi zmanjšanje trdnosti, zato se vedno več pozornosti posveča izdelavi zmrzlinsko odpornega visokotrdnega betona brez dodatnega vnosa zračnih mehurčkov.

Korozija armature

Beton ščiti jeklo pred korozijo s svojo bazičnostjo. Če je pH vrednost porne vode višja od 12,5, se na površini jekla formira oksidna plast, ki ga ščiti pred korozijo. Beton ni več sposoben ščititi armature, če pH vrednost pade pod 9 ali če vsebuje velike količine kloridov. Prodiranje kloridov v visokotrdni beton ne predstavlja problemov zaradi nizke propustnosti le teh. Karbonatizacija zmanjšuje bazičnost betona. Pri visokotrdnih betonih to ni problematično, saj so odpornejši proti prodiranju ogljikovega dioksida CO₂ kot običajni betoni. Če se poškoduje oksidni film na površini armature in se je že začela korozija, bo hitrost napredovanja le te odvisna od vlažnosti, dostopa kisika in električne upornosti krovne sloja betona. Dodajanje mikrosilike poveča upornost in s tem upočasni proces korozije.

Odpornost proti obrusu in eroziji

Prevladujoča oblika obrusa betonskih voziščnih plošč je mehanski obrus, pri hidrotehničnih objektih pa erozija in kavitacija. Ne glede na obliko obrusa se je pri laboratorijskih preizkusih in tudi v praksi pokazalo, da je trdnost najpomembnejši faktor, ki vpliva na odpornost betona proti obrusu. Odpornost proti obrusu pa se lahko znatno izboljša tudi z uporabo trdnega in gostega agregata v zgornjem in spodnjem delu presejne krivulje.

Temperaturni vplivi in požarna odpornost

Diederichs in njegovi sodelavci [Comité Euro-International du Béton: **HIGH-STRENGTH CONCRETE, State of the Art Report**, FIP/CEB, SR 90/1, Bulletin d' Information N° 197, avgust 1990.] so na podlagi raziskav ugotovili, da so visokotrdni betoni veliko bolj občutljivi na povišane temperature kot betoni običajnih trdnosti. Pri visokotrdnih betonih se začne s poviševanjem temperature trdnost kmalu zmanjševati. Pri 150 °C se zmanjša že za okoli 30 %. Trdnost običajnih betonov pa začne padati šele pri približno 350 °C.