Deformacije uslijed skupljanja betona

Grbavac, Slavko

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:673778

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

ZAVRŠNI RAD

Slavko Grbavac

Split, 2020.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DEFORMACIJE USLIJED SKUPLJANJA BETONA

Završni rad

Split, 2020.

Sažetak:

Skupljanje betona je deformacija pri kojoj dolazi do smanjenja obujma betona. Na razinu skupljanja utječe niz faktora, kao što su temperature, vlažnost, veličina betonskog elementa, sastav betonske smjese, vrsta i količina cementa, W/C omjer.

Ključne riječi:

skupljanje betona, vrste skupljanja, njega betona, ispitivanje betona

Deformations of concrete due to shrinkage

Abstract:

Shrinkage of concrete is a deformation in which the volume of concrete decreases. The level of shrinkage is affected by a number of factors, such as temperature, humidity, size of the concrete element, composition of the concrete mixture, type and amount of cement, W / C ratio.

Keywords:

concrete shrinkage, types of shrinkage, care of concrete, concrete testing

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ:	**PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	Slavko Grbavac
BROJ INDEKSA:	4516
KATEDRA:	**Katedra za građevinske materijale**
PREDMET:	Građevinski materijali 1

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Deformacije uslijed skupljanja betona.

Opis zadatka: Zadatak ovog završnog rada je prikazati vrste skupljanja betona i njihove uzorke. Pri tome naglasak staviti na pristup projektiranja sastava betona i pravilnog njegovanja za smanjenje nepovoljnih deformacija uslijed skupljanja betona. Prikazati relevantne metode ispitivanja skupljanja betona.

U Splitu, 31.03.2020.

Voditelj Završnog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Sadržaj

1.Uvod 1
2. Deformacije betona 2
2.1. Općenito beton 2
2.2. Vrste deformacija betona 2
2.2.1. Obujamske deformacije 3
2.2.2. Deformacije betona pod opterećenjem 4
3. Deformacija betona usljed skupanja 10
3.1 Utjecaji na skupljanje betona 11
3.2 Parametri sastava betona koji utječu na skupljanje 12
4.Vrste skupljanja 15
4.1. Plastično skupljanje 15
4.2. Kemijsko skupljanje 17
4.3. Autogeno skupljanje 18
4.4. Skupljanje uslijed sušenja 20
4.5. Termičko (temperaturno) skupljanje 23
4.6. Skupljanje uslijed karbonatizacije 24
5. Sastav betona 26
5.1 Aditivi 28
6. Ispitivanje betona 30
6.1. Mjerenje skupljanja pomoću LVDT kalupa za uzorke prema (ASTM C157) 30
6.2. Uređaji za mjerenje skupljanja 31
7. Proračun skupljanja betona 42
8. Zaključak 45
9. Literatura 46

1.Uvod

Beton je najkorišteniji građevinski materijal kojeg je čovjek proizveo. Zbog svojih karakteristika nalazi široku primjenu u svim područjima građevinarstva. Prilikom skrućivanja i starenja betona dolazi do njegovih deformacija. Deformacije nastaju pod utjecajem različitih čimbenika. Deformacije izazvane vanjskim utjecajima promjene temperature okoline, smanjenja ili povećanja vlažnosti nazivamo obujamske deformacije. Pored njih imamo deformacije betona pod opterećenjem izazvane kratkotrajnim ili dugotrajnim opterećenjem.

Kako su tema ovog završnog rada deformacije uslijed skupljanja betona fokus će biti na obujamskim deformacijama. Pored obrade samih deformacija izazvanih skupljanjem betona u radu su obrađeni načini umanjenja i otklanjanja utjecaja, koji dovode do deformacija betona, kako bi se one umanjile i po mogućnosti u potpunosti izbjegle. U radu su obrađena i poboljšanja samog sastava betona, korištenja raznih aditiva i povećane njege betona pri učvršćivanju. Kako bi se utvrdila razina skupljanja točno zadanog betonskog elementa u promatranom vremenu napravljen je proračun ukupnog skupljanja prema zadanoj klasi i razredu betona te relativnoj vlažnosti okoline.

2. Deformacije betona

2.1. Općenito beton

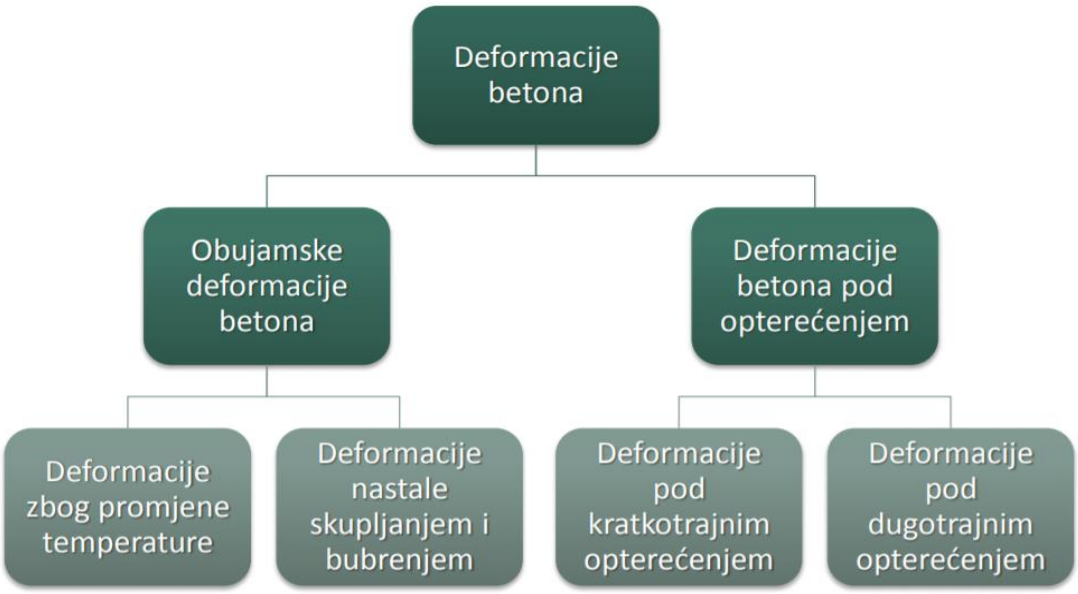
Beton je građevinski materijal koji se dobiva očvršćivanjem smjese veziva kao što su cement, sadra, bitumen ili asfalt, agregata poput pijeska, šljunka, drobljenca, tucanika, troske te vode. Spominje se već u antičko doba u djelu rimskog arhitekta Vetruvija "O graditeljstvu" oko 25.pr.Kr. Stari Rimljani su u gradnji prvo koristili gašeno vapno za vezivo, pa mljevenu opeku te naposljetku vulkanski pepeo (pucolan) koji potječe iz Pozzuolija u okolici Napulja. To se ispostavilo kao vrlo kvalitetno i trajno vezivo koje može očvršćivati i u vodi, stoga su česte Rimske građevine iz antičkog doba koje su očuvane do danas. Nakon pada Rimskog carstva to vezivo pada u zaborav te se kroz srednji vijek opet koristi gašeno vapno sve do potkraj XVIII.st kad se počinje koristiti pucolan pomiješan s kamenom plovućcem sa grčkog otoka Santorinija kojim je izgrađeni velik broj lučkih građevinama Jadranskoj obali. 1824. J.Aspdin pronalazi hidraulično vezivo kojeg je nazvao Portland-cement. Cement današnjih karakteristika otkrio je I. C. Johson. 1844.

Karakteristike betona su da se u svježem stanju lako oblikuje i taj oblik se ne mijenja nakon stvrdnjavanja, ima veliku tlačnu čvrstoći (10 do 60 N/mm²), vlačna čvrstoća mu je dosta mala (iznosi 1/11 do 1/8 tlačne), što se nadoknađuje ojačanjem betona čeličnom armaturom (armirani beton).

Postoji više vrsta betona ovisno o gustoći gotove smjese ili vrsti veziva. Najviše se koristi beton s cementnim vezivom koji nastaje kao mješavina cementa, agregata i vode.[1]

2.2. Vrste deformacija betona

Deformacije betona mogu nastati zbog djelovanja nekog vanjskog opterećenja ili zbog raznih vanjskih utjecaja. Najčešće se dijele na obujamske deformacije betona i na deformacije betona pod opterećenjem. Obujamske deformacije se dijele na deformacije zbog promjene temperature i deformacije koje nastaju skupljanjem i bubrenjem. Kod deformacije betona pod opterećenjem razlikujemo deformacije uslijed kratkotrajnog opterećenja i deformacije uslijed dugotrajnog opterećenja. [2]



Slika 1. Podjela deformacija betona [2]

2.2.1. Obujamske deformacije

1.Obujamske deformacije nastaju zbog promjena uvjeta okoline ili promjena unutar same betonske mase. Pod promjenama okoline smatramo promjene higrotermalnih uvjeta, vlage i temperature, a pod promjenama unutar betona smatramo toplinu oslobođenu hidratacijom. Deformacije izazvane ovakvim promjenama uvjeta nikada nisu jednolike jer se stvaraju toplinske i vlažne razlike između betona i njegove okoline što dovodi do naprezanja.

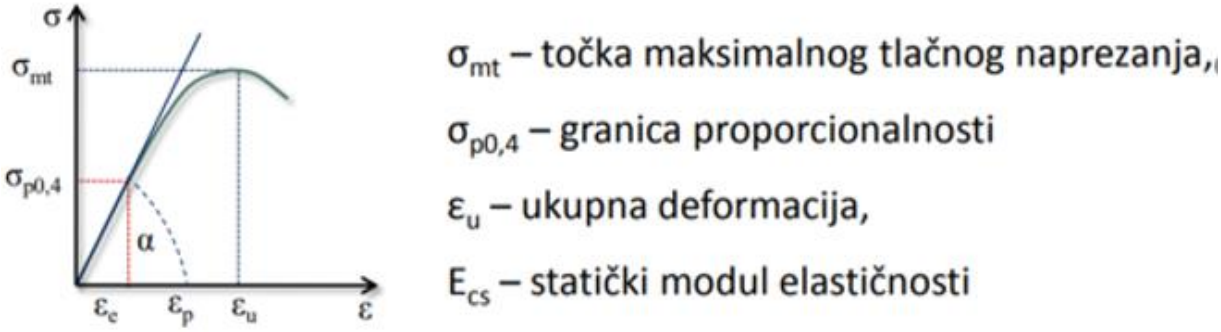
2. Deformacije na koje najviše utječu promjene uvjeta vlažnosti i temperature su skupljanje i bubrenje. Beton mijenja svoj volumen za vrijeme i nakon očvršćivanja. Ukoliko se nalazi na zraku volumen betona se smanjuje, a ukoliko se nalazi djelomično ili potpuno uronjen u vodu dolazi do povećanja volumena. Smanjenje volumena je karakterizirano kao skupljanje, a povećanje kao bubrenje.

2.2.2. Deformacije betona pod opterećenjem

U kratkotrajna opterećenja ubrajaju se sva opterećenja čije je trajanje kraće od 2 sata. Kod deformacije pod kratkotrajnim opterećenjem odnos elastičnih i plastičnih deformacija ovisi o veličini naprezanja i vremenu djelovanja opterećenja. Kod kratkotrajnog opterećenja deformacije su po karakteru elastične jer se nakon prestanka djelovanja opterećenja vraća u prvobitni oblik.

$$\varepsilon_u = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

Ukupna def.=elastična def. + plastična def.



Slika 2. Graf ukupne deformacije betona pri kratkotrajnom opterećenju [2]

Kod kratkotrajnog opterećenja deformacije su određene:

Poissonovim koeficijentom (v)
Modulom posmaka (G)
modulom elastičnosti (E_{cs})

Poissonov koeficijent (v) je omjer između poprečne i uzdužne deformacije

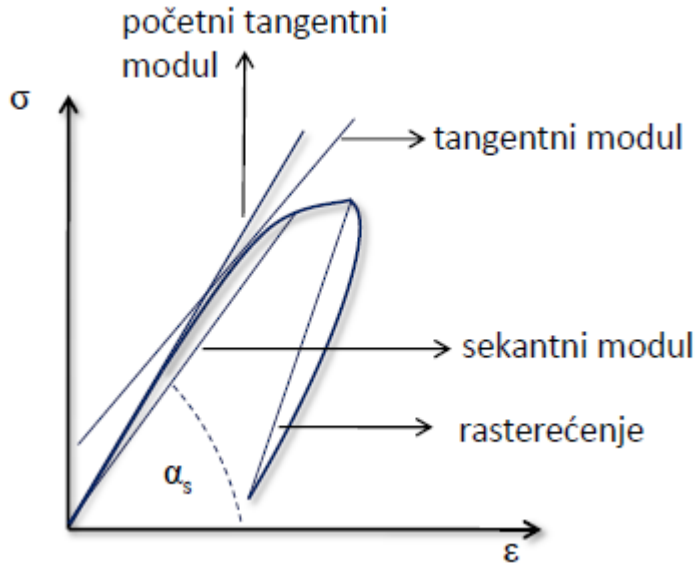
$$\nu = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_u}$$

Modul posmika (G)

$$G = \frac{E_c}{2\,(1+\nu)}$$

Statički modul elastičnosti (Ecs)

a) određivanje statičkog modula elastičnosti iz radnog dijagrama



Slika 3. Prikaz određivanja statičkog modula elastičnost iz radnog dijagrama [2]

sekantni modul elastičnosti prema HRN ENV 1992-1-1:1991

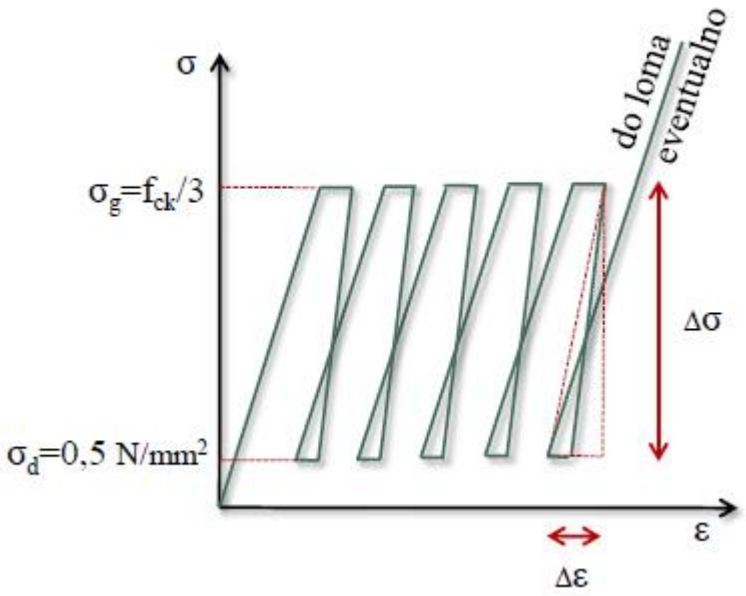
$$E_{cs} = 9{,}5 \cdot (f_{ck} + 8)^{1/3} \, (kN/mm^2)$$

fck – karakteristična tlačna čvrstoća betona

C	12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	35/45	40/50	45/55	50/60
E_{cs} (kN/mm^2)	26	27,5	29	30,5	32	33,5	35	36	37

b) određivanje statičkog modula elastičnosti treniranjem ispitnih uzoraka

$$E_{cs} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \, (kN/mm^2)$$



Slika 4. Graf određivanja statičkog modula elstičnosti treniranjem ispitnih uzoraka [2]

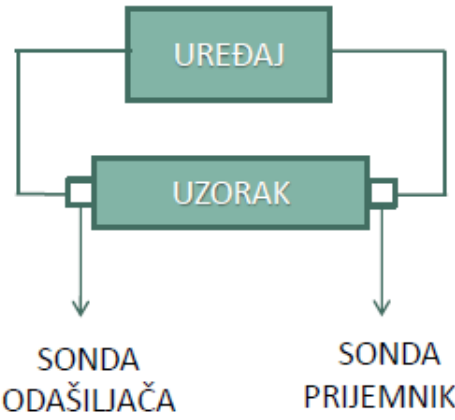
dinamički modul elastičnosti (Ecd) prema HRN EN 12504-4

$$E_{cd} = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1+v) \cdot (1-2v)}{(1-v)} (kN/mm^2)$$

ν - brzina prolaska ultrazvučnih valova

ρ - gustoća betona

υ - Poissonov omjer



Slika 5. Shematski prikaz utvrđivanja dinamičkog modula elastičnosti [2]

$$E_{cs} = 1{,}25 \cdot E_{cd} - 19\,(kN/mm^2)$$

-nedostatak metode određivanja dinamičkog modula elastičnosti preko brzine prolaska ultrazvuka je taj da za proračun moramo poznavati Poissonov koeficijent
-vrijednost Poissonovog koeficijenta u betonu kreće se od 0,15 do 0,25; te se za te vrijednosti modul elastičnosti mijenja za cca 11%
-određivanje dinamičkog modula elastičnosti mjerenjem brzine širenja uzdužnog ultrazvučnog vala koristi se samo u posebnim okolnostima npr. kod sanacija.

Dugotrajno djelovanje opterećenja na beton dovodi do deformacije puzanja betona. Puzanje betona je deformacija koja nastaje pod dugotrajnim djelovanjem opterećenja na beton bez deformacije skupljanja, bubrenja i temperaturne promjene. Općenito, dugotrajni pritisak mijenja oblik betonske konstrukcije i deformacija se odvija duž smjera opterećenja. Kada se ukloni kontinuirano opterećenje, naprezanje se odmah smanjuje. Količina smanjenog naprezanja jednaka je elastičnom naprezanju u određenoj dobi. Nakon ovog brzog oporavka slijedi kontinuirano smanjenje naprezanja, poznato kao oporavak puzanja koji je dio ukupnog naprezanja puzanja koje trpi beton. Skupljanje i puzanje mogu se odrediti teorijski prema EC 2 I eksperimentalno prema HRN U.M1.029 (obujamske deformacije) I HRN U. M1.027 (puzanje) Puzanje ovisi o parametrima , njihov utjecaj na puzanje je:

1. Vrsta cementa: Portland cement s troskom kao rezultat ima veće puzanje, visokovrijedni i aluminatni cementi doprinose smanjenom puzanju
2. Konzistencija: gušći beton s većim udjelom cementa smanjuje puzanje u odnosu na rjeđi beton s manjim udjelom cementa.
3. Vodocementni omjer: uz veći vodocementni omjer imamo veće puzanje
4. Temperatura: ako je veća temperature okoliša pridonosi bržem puzanju
5. Opterećenje: veće opterećenje izaziva veće puzanje
6. Agregat: agregat veće čvrstoće i elastičnosti smanjuje puzanje

7. Granulometrijski sastav: manje šupljine u betonu smanjuju puzanje
8. Vlažnost: manja vlažnost doprinosi većem puzanju
9. Armatura : smanjuje puzanje jer prionjivošću preuzima naprezanje [9]

$$\phi_{(t,t_o)} = \frac{\varepsilon_{p(t,t_0)}}{\varepsilon_{e(t_0)}}$$

$\Phi_{(t,t_0)}$ -koeficijent puzanja u vremenu t, pri djelovanju konstantnog naprezanja od trenutka t_0

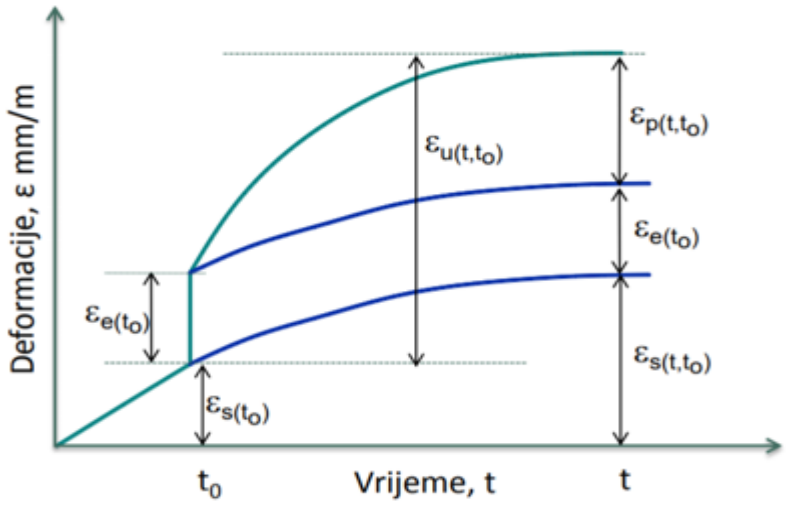
$\varepsilon_{p(t,t_0)}$ - deformacija puzanja u trokutu t, pri djelovanju konstantnog naprezanja od trenutka t_0

$\varepsilon_{e\,(t_0)}$ - elastična deformacija u t_0

$$\varepsilon_{p(t,t_o)} = \frac{\sigma(t_o)}{E_c(t_o)} \cdot \Phi(t,t_o)$$

$\sigma_{(t_0)}$ -naprezanje u trenutku stalnog opterećenja

$E_{(t_0)}$ - modul elastičnosti u trenutku stalnog opterećenja



Slika 6. Graf deformacije puzanja pri djelovanju konstantnog naprezanja [2]

$$\varepsilon_{p(t,t_0)} = \varepsilon_{u(t,t_0)} - \varepsilon_{s(t)} - \varepsilon_{e(t_0)} + \varepsilon_{s(t_0)}$$

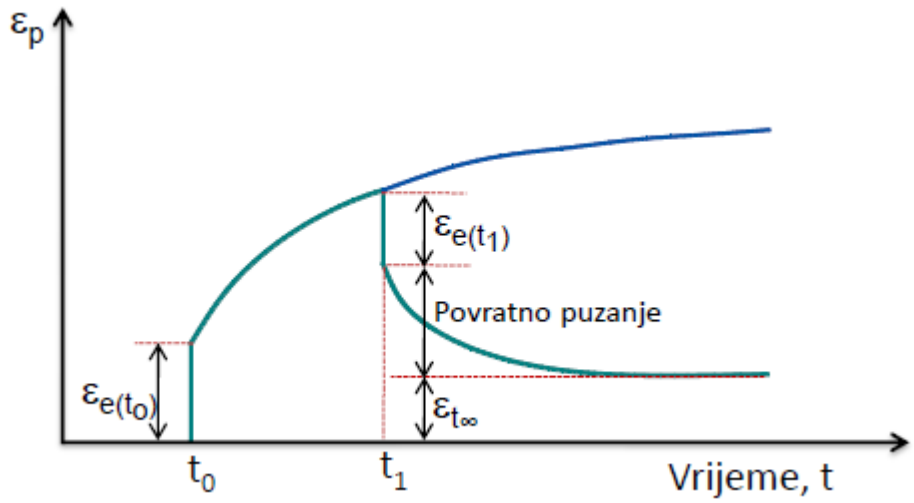
$\varepsilon_{p(t,t_o)}$ - deformacije puzanja u trenutku t, pri djelovanju konstantnog naprezanja od trenutka t_0

$\varepsilon_{u\ (t,t_o)}$ - ukupne deformacije u trenutku t, pri djelovanju konstantnog naprezanja u trenutku t_0

$\varepsilon_{s\ (t,t_o)}$ - deformacije skupljanja u trenutku t, pri djelovanju konstantnog naprezanja u trenutku t_0

$\varepsilon_{e\ (t_o)}$ - elastične deformacije u trenutku opterećenja t_0

$\varepsilon_{s(t_o)}$ - deformacije skupljanja u trenutku opterećenja t_0



Slika 7. Graf povratnog puzanja nakon prestanka opterećenja [2]

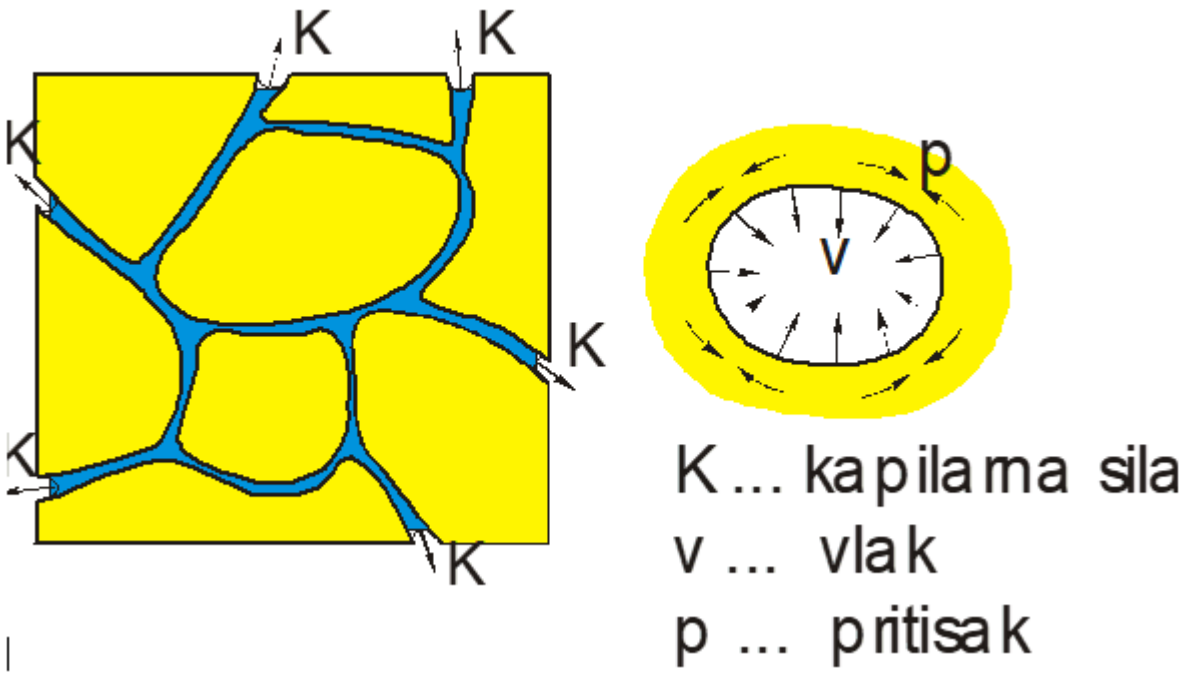
Povratno puzanje je deformacija betona koja nastaje nakon uklanjanja stalnog opterećenja .

3. Deformacija betona usljed skupanja

Sva kruta tijela satkana su od uske mreže kapilara koja je u određenom dijelu ispunjena vodom. U svakom od njih javljaju se kapilarne sile koju možemo iskazati izrazom

$$K = A\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

gdje r_1 i r_2 predstavljaju glavni radijus zakrivljenosti u dvije međusobno okomite ravnine ovisno o presjeku kapilara. Vrijednost A je kapilarna konstantna ovisna o vrsti tekućine i materijala krutog tjela. [4]



Slika 8. Shematski prikaz mehanizma skupljanja zbog sušenja, uzdužni presjek kapilarne mreže i poprečni presjek kapilare

Djelovanjem tih sila javlja se vlak u tekućini. Dok je tijelo ispunjeno vodom u kapilarama nema kapilarnih sila. Gubljenjem vode kapilarne sile se pojačavaju u krutoj tvari i tijelo se sve više skuplja. Razina skupljanja ima svoju granicu. Potpunim gubljenjem vode djelovanje kapilarnih sila nestaje, a zapremnina potpuno osušenog tijela je jednaka zapremnini tijela zasićenog vodom.[4] Deformaciju skupljanja betona definiramo kao vremensku deformaciju zbog

smanjivanja vlažnosti betona, a ona se očituje u obliku smanjenja dimenzija neopterećenih betonskih elemenata u nekom vremenu. Ta deformacija se odvija skoro pa linearno u svim pravcima. Ukoliko se betonski konstruktivni element može slobodno skupljati onda deformacija skupljanja ne izaziva skoro nikakve štetne posljedice. Kako kod većine betonskih konstrukcija nemamo slobodno skupljati zbog toga u betonu nastaju vlačna naprezanja. Kad su ta naprezanja veća od vlačne čvrstoće betona u konstruktivnom betonskom elementu nastaju pukotine, Nastajanja takvih pukotina smanjiva se odgađanjem početka sušenja vlažnom njegom do očvršćivanja betona. Količina skupljanja i njegov vremenski tok ovise o temperaturi i relativnoj vlažnosti sredine, veličini betonskog elementa, količini i vrsti cementa , vodocementnog faktora, granulaciji agregata, načinu ugradnje i njege betona, starosti betona u trenutku prestanka njege i početka sušenja betona.[3]

3.1 Utjecaji na skupljanje betona

Na skupljanje betona djeluju četiri vrste utjecaja I to:
-mehanički utjecaj od temperaturnih promjena
-termički utjecaj hidratacije cementa
-hidrološki utjecaj vezan za hidrataciju
-hidrološki utjecaj vezan za klimu

Mehanički utjecaj definira se utvrđivanjem promjene temperature u promatranom vremenu i promjene modula elastičnosti i koeficijenta toplinskog istezanja . Modul elastičnosti je deformacija betona pod kratkotrajnim opterećenjem. Na njega najveći utjecaj ima izbor agregata . Razlog je što agregat predstavlja 70-80% ukupne mase smjese. S druge strane izbor agregata određen je njegovim utjecajem na mehaničku čvrstoću betona. Linearni toplinski koeficijent istezanje također iz istog razloga više ovisi o agregatu nego cementnoj pasti. U praksi se s pouzdanom točnošću uzima koeficijent istezanja betona od 10 x 10^{-6} 1°C, jer je toplinski koeficijent istezanje nakon prvih nekoliko sati vezivanja konstantan.

Kod objašnjenja termičkih utjecaja hidratacije cementa potrebno je odrediti parametar i zakonitosti razvoja topline pri hidrataciji. Toplina hidratacije cementa je količina topline po gramu nehidratiziranog cementa, koja se oslobodi tijekom procesa hidratacije. Ona je ovisna kemijskom sastavu cementa (raste s udjelom trikalcij aluminata C_3A) i finoći mliva. Toplina

hidraztacije je naročito važna kod masovnih konstrukcijskim elementima (brane i sl.), Kod hidratacije oslobađanjem topline dolazi do širenja betona , potom se beton hladi i skuplja. Betoni s visokom toplinom hidratacije imaju veliko autogeno skupljanje što je slučaj kod betona velike čvrstoće.

Hidrološki utjecaj vezan za hidrataciju , kod njega je potrebno utvrditi zakonitost skupljanja u slučajevima kad nemamo nikakvog hidrološkog utjecaja okoline. U tom slučaju skupljanje zbog hidratacije je ravnomjerno . Određuje se pomoću skale gdje se polazi od pretpostavke da je beton homogen materijal i predstavlja peterostruku vrijednost najkrupnijeg zrna agregata . Što znači da je skupljanje izazvano hidratacijom karakteristika materijala.

Što se tiče hidroloških utjecaja klime potrebno je znati zakone po kojima se odvija skupljanje zbog uvjeta okoline , a to je zapravo prirodno sušenje. Uvjeti okoline su temperatura i vlažnost Skupljanje koje je uzrokovano njima, odnosno sušenjem je ovisno o veličini betonskog elementa čije skupljanje pratimo.

3.2 Parametri sastava betona koji utječu na skupljanje

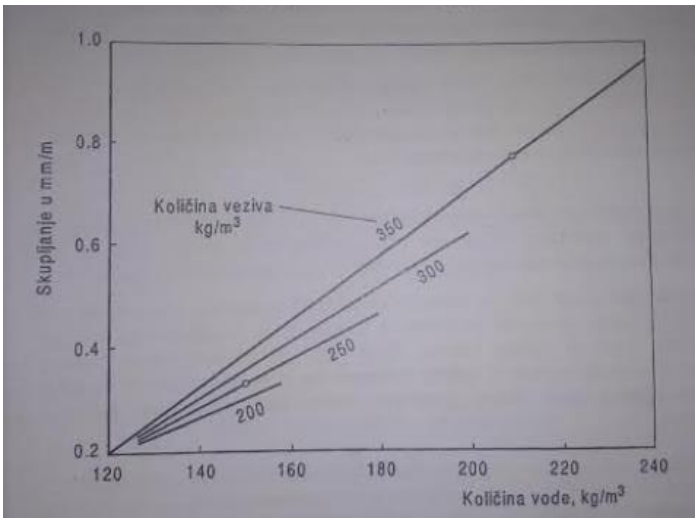
Parametri koji utječu na skupljanje su

- količina vode potrebna za pripremu betona

- vrsta i količina veziva

- granulometrijski sastav i svojstva agregata [4]

Gledajući utjecaj vode na skupljanje iz priloženog dijagrama možemo vidjeti da se skupljanje u odnosu na količinu vode ponaša praktički linearno proporcionalno. Možemo zaključiti da je količina kapilarnih pora također proporcionalna volumnoj koncentraciji vode pa je za očekivat da se i skupljanje ponaša proporcionalno za određenu količinu veziva.



Slika 9. Ovisnost skupljanja betona o sadržaju vode i veziva

Različiti betoni imaju otprilike sličan udio svih pora, ali imaju bitno različitu strukturu tih pora. Betoni koji imaju veći postotak cementa samim time imaju i veći udio gel pora koje u odnosu na ostale pore imaju veći utjecaj na veličinu deformacije skupljanja. Zbog toga betoni s većim udjelom cementa imaju i veće skupljanje. [4]

Količina cementa kg/m3	W/C	Gel pore	Ostale pore	Sve pore
424	0,41	0,073	0,044	0,117
285	0,52	0,049	0,068	0,117
175	0,75	0,030	0,093	0,123

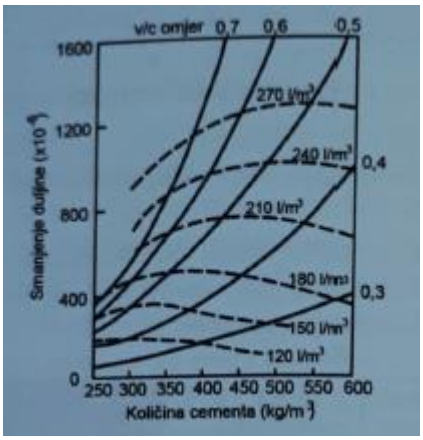
Tabela 1. Volumne koncentracije pora u uzorku očvrslog betona

Kao i kod ispitivanja ostalih svojstava betona postojala je potreba utvrditi utjecaj sastava betona na sušenje preko vodocementnog faktora (W/C). Ispitivanjem je potvrđeno da vodocementni faktor nema nikakav utjecaj na skupljanje beton. Kao dokaz uzeta su dva uzorka betona sa različitim omjerom veziva i vode kojima je iako imaju isti vodocementni faktor izmjerena različita količina skupljanja.

Primjer:

1. Uzorak betona sa sadržajem veziva 350 kg/m^3, vode 210 kg/m^3 i vodocementnim faktorom W/C=0,60 kod kog je izmjereno skupljanje 0,77 mm/m
2. Uzorak betona sa sadržajem veziva 250 kg/m^3, vode 150 kg/m^3 i vodocementnim faktorom W/C=0,60 kod kog je izmjereno skupljanje 0,33 mm/m [4]

Newman i Choo predlažu nomogram za procjenu veličine skupljanja betona, u kojem je predviđen utjecaj količine cementa i vodocementnog omjera te može poslužiti kao orijentir u nedostatku eksperimentalnih podataka u projektima i istraživanjima. [5]

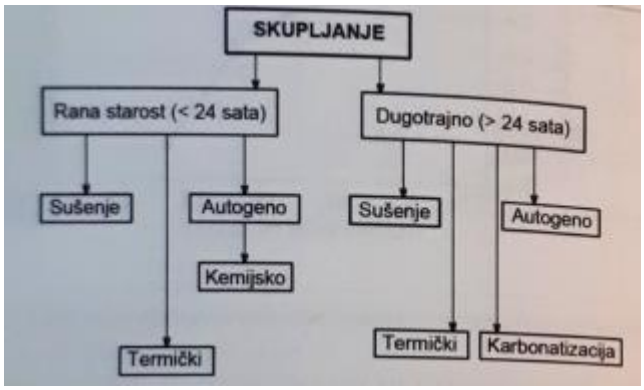


Slika 10. Dijagram za procjenu veličine skupljanja betona [5]

Provjerom utjecaja na skupljanje betona kod cementa različitog mineraloškog sastava utvrđeno je da taj sastav nema nikakav utjecaj na skupljanje betona. Isto tako je potvrđeno da finoća mliva ima veliki utjecaj na količinu skupljanja. Potvrđeno je da finije mljeveni cement ima sitnije kapilarne pore, veću hidrataciju što je uzrok većem skupljanju betona. Agregat po svom sastavu ima veću čvrstoću i modul elastičnosti u odnosu na cementni kamen i time je manje podložan skupljanju. Betoni s većom granulacijom agregata u svom volumenu sadrže manji udio cementne paste , time i manji volumen cementnog kamena u očvrslom betonu što kao rezultat ima smanjeno skupljanje betona. Isto tako mineraloško- petrogafski sastav agregata značajno utječe na razinu skupljanja betona. To je izraženo poroznošću kamena od kojeg je sačinjen agregat. Tako agregat od pješčanika ima puno veću poroznost od vapnenca , samim time i veći doprinos kod skupljanja betona u kom je sadržan.

4.Vrste skupljanja

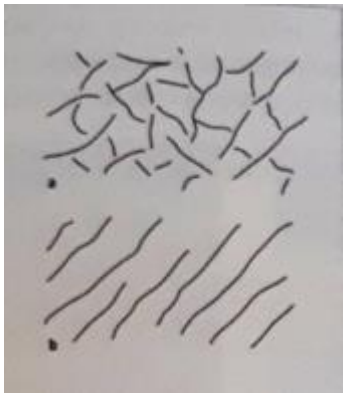
Skupljanje betona predstavlja kombinaciju više oblika skupljanja. U njemu su sadržani elementi plastičnog, kemijskog, autogenog, termičkog skupljanja, skupljanja uslijed sušenja i uslijed karbonizacije. Zajednička karakteristika svih ovih vrsta skupljanja izuzev skupljanja uslijed karbonizacije je da ona nastaju uslijed izlaska vode iz betona ili njene potrošnje pri hidrataciji, dok kod skupljanja uslijed karbonizacije skupljanje rezultat reakcije hidratizirane cementne paste s ugljikovim dioksidom. Ukupno skupljanje je zbroj svih vrsta skupljanja. Prema fazi starosti skupljanja betona razlikujemo rana koja se događaju u prva 24 sata i dugotrajna u vremenu nakon 24 sata od ugradnje betona. U rana skupljanja ulaze skupljanja uslijed sušenja, termičko, autogeno i kemijsko. U dugotrajno skupljanja uslijed sušenja, termičko, autogeno i skupljanje uslijed karbonizacije.[5]



Slika 11. Dijagram stanje i vrsta skupljanja [5]

4.1. Plastično skupljanje

Plastično skupljanje nastaje na površini svježeg betona kao posljedica isparavanja vode s površine betona ili upijanja vode od oplate ili podloge betona. Od svih vrsta skupljanja ono je najizraženije i može iznositi do 1% od volumena betona. Nastaje u prvih 12 sati po ugradnji i uglavnom ne utječu na stanje naprezanja konstrukcije jer se događa u ranoj fazi skrućivanja betona dok je masa svježeg betona fluidna. Ako sušenje bude izrazito brzo na površini se javljaju mrežaste ili kose pukotine koje su obično plitke.



Slika 12. Izgled nastale plastičnim skupljanjem [5]

Betoni većeg vodocementnog omjera (>0,50) podložniji su izdvajanju vode. Što je veći vodocementni omjer deblji je sloj izdvojene vode na površini betona . Ta voda u normalnim uvjetima okoline sprječava stvaranja pukotina. Kod manjeg vodocementnog omjera imamo manje izdvajanje vode na površini betona što dovodi do bržeg stvaranja pukotina. Pukotine od plastičnog skupljanja najčešće se javljaju na velikim betonskim površinama kao što su betonske ploče, jer dolazi do velikog gubitka vode isparavanjem. Na razinu plastičnog skupljanja i pojavu pukotina najviše utječu, vrsta cement, vodocementni omjer, količina i veličina agregata i gustoća smjese. Smjese veće gustoće imaju manje plastično skupljanje ud rjeđe smjese. Smanjenjem temperature svježeg betona dovodi do smanjenja plastičnog skupljanja.

Za procjenu rizika pojave plastičnog skupljanja koristimo se tablicom procjene rizika.

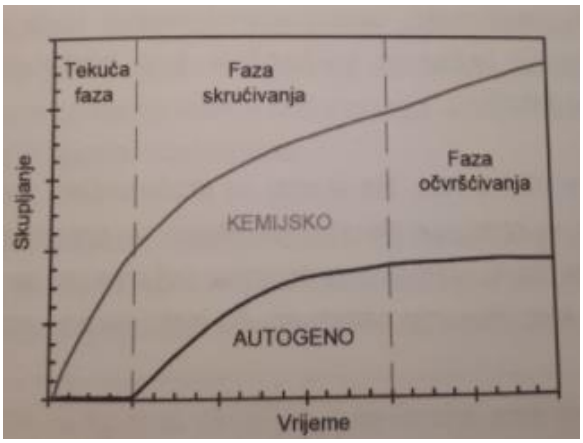
Procjena rizika pojave plastičnog skupljanja	Evaporacija vode (kg/m3)
Nema opasnosti	<0
Mala opasnost	0,0 - 1,0
Srednja opasnost	1,0 - 2,0
Velika opasnost	2,0 - 3,0

Tabela 2. Procjena rizika plastičnog skupljanja ovisno je o isparavanju vode [5]

Faktori koji pridonose plastičnom skupljanju povećaju brzini isparavanja vode s površine betona su: brzina vjetra , relativna vlažnost, temperature okoliša i betona. Male promjene u bilo kojem od njih može značajno utjecati na brzinu isparavanja .

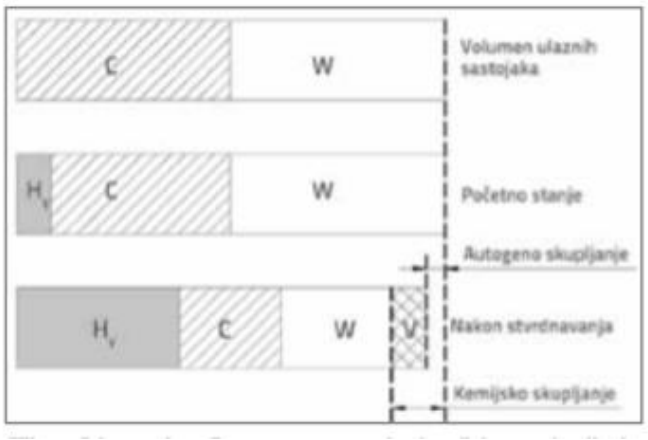
4.2. Kemijsko skupljanje

Kemijsko skupljanje predstavlja smanjenje volumena cementne paste i nastaje kemijskim vezanjem vode pri hidrataciji cementa. Kod skrućivanja cementne paste odvija se niz kemijskih promjena kao posljedica smanjivanja volumena. Upravo te kemijske promjene zaslužne su da je volumen gotove smjese manji od zbroja volumena vode i cementa jer je gustoća kemijski vezane vode veća od vode prije miješanja smjese.



Slika 13. Stanje autogenog i kemijskog skupljanja u ranoj starosti [6]

Le Chatelier i Powers utvrdili su da je hidratizirana cementna pasta za 8 do 10 % manjeg volumena od zbroja volumena vode i cementa ukupno prije miješanja. [6] Dok je cementna pasta u tekućem stanju ona se skuplja, povećanjem hidratacije nastaju fizičke veze te cementna pasta poprima karakteristike čvrstog tijela koje se odupire kemijskom skupljanju, Što za rezultat ima stvaranje pora i dovodi do povećanja ukupnog volumene pora u cementnoj pasti.



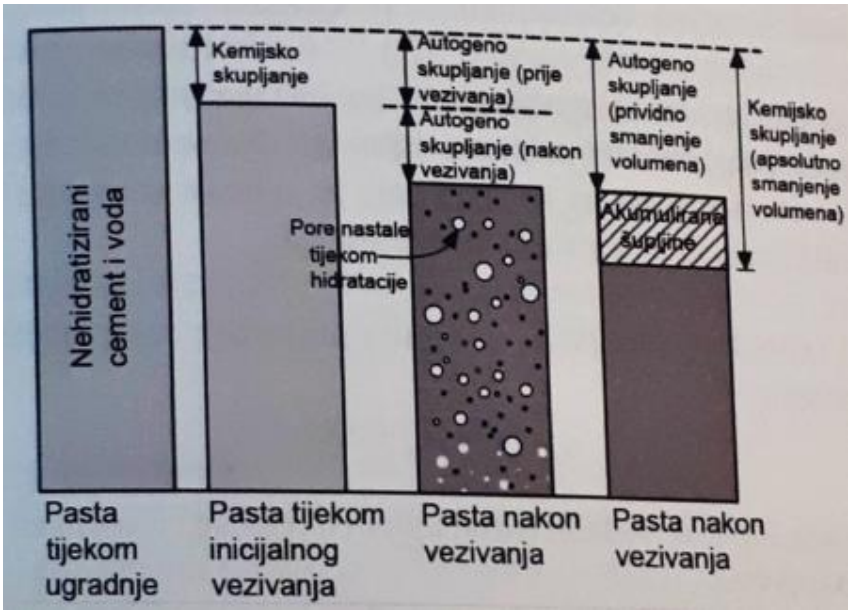
Slika 14. Odnos između autogenog I kemijskog skupljanja:
C-nehidratizirani cement, W-nehidratizirana voda, H-sastojak hidratacije, V-pore nastale hidratacijom [6]

4.3. Autogeno skupljanje

Autogeno ili hidratacijsko skupljanje betona rezultat je samoisušivanja u porama cementnog kamena pri upijanju vode kod hidratacije cementa. Kemijsko i autogeno skupljanje je usko povezano.

Prvo se odvija kemijsko skupljanje pri kojem nastaju dodatne pore u procesu hidratizacije, zatim u tim porama počinje samoisušivanje zbog procesa hidratizacije te se događa da se sva voda unutar cementnog kamena utroši na hidratizaciju a zbog guste strukture ne može dolaziti vlaga izvana. Iz tog razloga dolazi do skupljanja i mogućeg stvaranja pukotina unutar betona . Autogeno skupljanje počinje nekoliko sati nakon miješanja smjese, što se razlikuje ovisno o vrsti mješavine. Dakle samo kupljenje se događa kroz nekoliko faza. Prva faza koja traje prvih nekoliko sati je rezultat djelovanja kemijskih promjena izazvanih hidratacijom cementa. Druga faza je faza vezivanja, beton se odupire naprezanjima uzrokovanim kemijskim skupljanjem. Na kraju vezivanja razvija se kapilarni tlak koji uzrokuje skupljanje a nastalo zbog kretanja vode između pora. Gubljenje vode iz manjih pora na njihovim stjenkama izaziva dodatna naprezanja.

Na kraju vezivanja autogeno skupljanje sadrži sve manji dio kemijskog. Sva daljnja smanjenja volumena nastaju samoisušivanjem unutrašnjih pora betona.



Slika 15. Kemijsko i autogeno skupljanje [5]

Isušivanje se može smanjiti ako se pojavi dodatni izvor vode. On može biti vanjski (vanjska njega) koji može utjecati samo na smanjenje autogenih skupljanja u površinskom djelu betona i unutrašnji (unutrašnje njega).

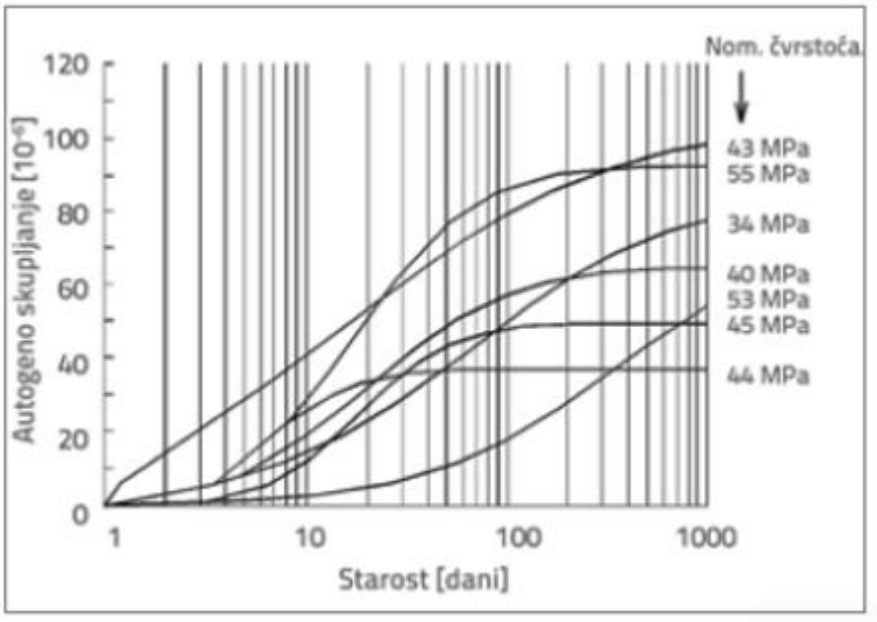
Unutrašnja njega omogućava da se voda sadržana u betonskoj smjesi postupno otpušta dok traje proces hidratacije.

Stupanj razvoja autogenog skupljanja ovisi o hidratizaciji cementa pa najveći dio skupljanja nastane u prvom mjesecu .

Faktori koji utječu na tu dinamiku skupljanja su isti oni koji djeluju na povećanje čvrstoće: vrsta i finoća mliva cementa i vodocementni omjer (W/C). Iz tog razloga se krivulja kretanja autogenog skupljanja dosta dobro podudara s krivuljom mehaničke čvrstoće.

U prvih nekoliko dana događa se 60 do 90 % vrijednosti skupljanja koja se dogode u prvih 28 dana. Sveukupno autogeno skupljanje je dosta malo. Zbog njegova razvoja u u ranom stadiju skrućivanja betona ono je dugo bilo zanemarivano.

Utvrđeno je da je autogeno skupljanje obrnuto proporcionalno vodocementnom omjeru (W/C) I kreće se od ispod 10^{-4}. u betonima čiji vodocementni omjer prelazi 0,45 i naglo se povećava kada vodocementni omjer padne ispod 0,40 i može postići vrijednost $3x10^{-4}$.



Slika 16. Autogeno skupljanje običnih betona različite čvrstoće [5]

Isto tako da je autogeno skupljanje u korelaciji s čvrstoćom betona. Potvrđeno je da je autogeno skupljanje betona visoke čvrstoće puno veće od autogenog skupljanja betona uobičajene čvrstoće, čak do 2,5 puta. Kod njihova skrućivanja posebno je bitna unutarnja njega betona jer doprinosi hidrataciji kada ispari voda iz kapilara, pridonosi povećanju čvrstoće i trajnosti betona. Omjer autogenog i kemijskog skupljanja cementne paste bez isparavanja i vanjskog izvora vode moguće je izraziti sljedećom formulom:

$$S_{hy} \approx S_p + S_{as} + A_{shy}$$

gdje je :

S_p udio volumena šupljina nastalih hidratacijom u odnosu na volumen očvrslog cementa (%)

S_{as} udio autogenog skupljanja (%)

A_{shy} udio kemijskog skupljanja u trenutku početka vezivanja

Obje strane izraza su jednake, jer je početni volumen za izračun kemijskog skupljanja deklariran kao volumen mješavine na kraju miješanja.

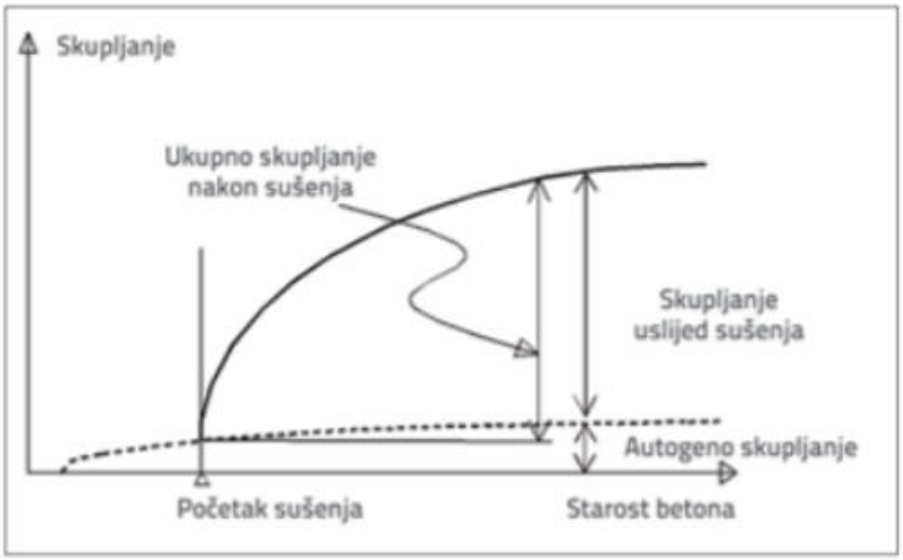
4.4. Skupljanje uslijed sušenja

Skupljanje uslijed sušenja predstavlja smanjenje zapremine betona zbog gubitka vode . Na početku procesa sušenja voda u obliku mjehurića izlazi na površinu betona. Nakon toga ta voda isparava i na taj način dolazi do izvlačenja vode iz betonske smjese. Stupanj isušivanje se razlikuje ovisno o debljini betonskog elementa, najveće isušivanje je na površini a najmanje u sredini.

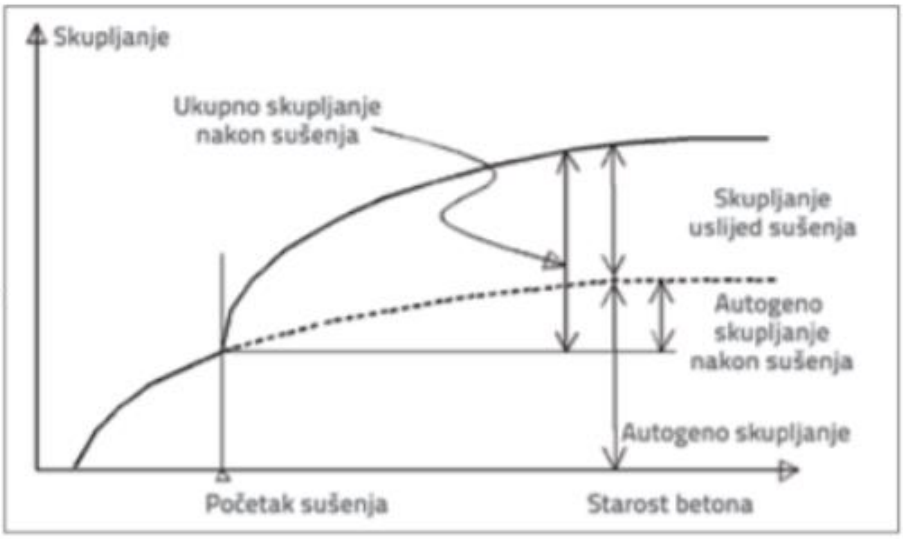
Stupanj sušenja mijenja se po debljini elementa. Mjerenjem je utvrđeno da se skupljanje sušenjem kreće od 2 do $6X10^{-4}$. Tijek procesa skupljanja od sušenja odvija se postupno. 80% ukupnog skupljanja dogodi se u prva 3 mjeseca od ugradnje. Na razinu skupljanja utječu razni faktori. Faktori koji najviše utječu na skupljanje su : debljina elementa, poroznost i količina slobodne vode u betonu, volumen paste , finoća veziva, temperature i relativna vlažnost.

Bitnu ulogu pri skupljanju betona imaju vodocementni omjer i mala propusnost betona visoke čvrstoće. Kada je vodocementni omjer mali hidratacija cementa utroši većinu vode i relativna vlažnost između betona i okoline padne ispod 80% praktički dođe do prestanka razmjene vlage

betona s okoliša. Mala propusnost betona visoke čvrstoće ima znatno manje isušivanje od betona uobičajene čvrstoće. Odnos autogenog i sušenja uslijed skupljanja u ukupnom sušenju uobičajenog i betona visoke čvrstoće pokazano je u dijagramima ispod:



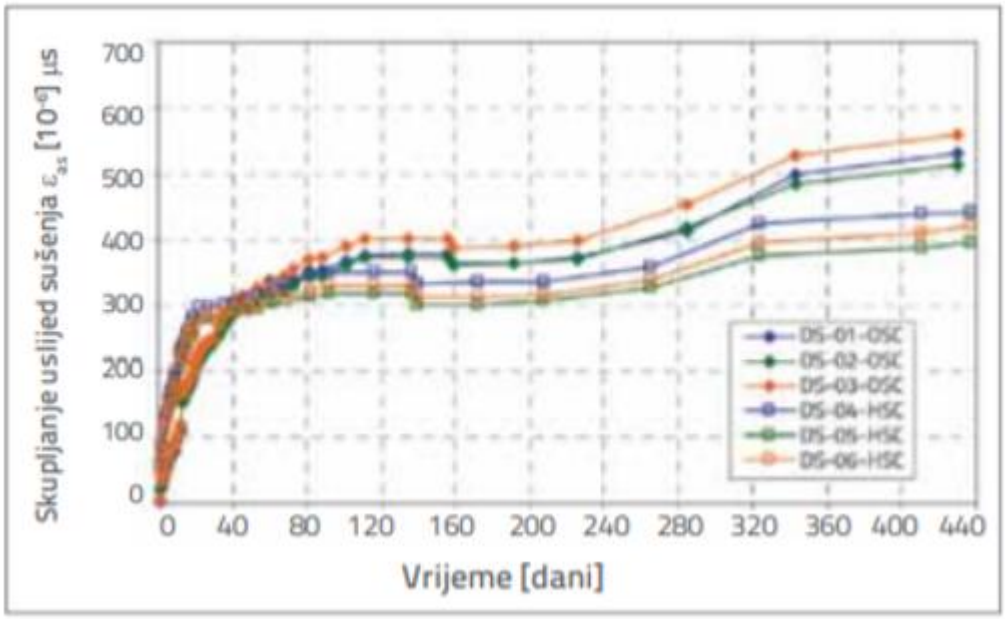
Slika 17. Skupljanje u običnom betonu [5]



Slika 18. Skupljanje betona visoke čvrstoće [5]

Ispitivanje koje su proveli Le Roy i de Larrard pokazali su da smanjenjem vodocementnog omjera sa 0,41 na 0,33 skupljanjem uslijed sušenja se smanji za 54%. Kod samozbijajućih betona primijećeno je povećanje skupljanja pri povećanju vodocementnog omjera. Također je potvrđeno da se na razinu skupljanja može utjecati dodavanjem mikrosilka kod betona visoke čvrstoće , koji utječe na smanjenje pozornosti hidratizirane cementne paste naročito u uskim dodirnim područjima između cementne paste I agregata , gdje se voda zbog finih uskih pora teže prebacuje. Navedeno kompaktna povezanost cementne paste i agregata u betonima visoke čvrstoće s mikrosilkom daju veći otpor skupljanju, što za rezultat ima manje skupljanje. Pons tvrdi da se dodavanjem mikrosilka skupljanje uslijed sušenja može smanjiti za 50%. Le Roy i de Larrard pokazali su da se dodavanje 8% mikrosilka u masu cementa kao rezultat ima smanjenje skupljanja uslijed sušenja od 25%. Ispitivanje provedeno od strane Šehinagić-Isović potvrdilo je veliki utjecaj čvrstoće betona na skupljanje uslijed sušenja. Dokazno je da beton visoke čvrstoće ima 27% manje sušenje u odnosu na beton uobičajene čvrstoće.

Srednja vrijednost skupljanja uslijed sušenja za običan je beton iznosila 535 x 10^{-6}, a za beton visoke čvrstoće 419 x 10^{-6}



Slika 19. Skupljanje usljed sušenja običnog betona (OSC) i betona visoke čvrstoće (HSC) [5]

4.5. Termičko (temperaturno) skupljanje

Temperaturno deformiranje betona se javlja u ranoj starosti (u prvim danima) zbog promjene temperature uslijed procesa hidratacije. Kemijskom reakcijom cementa s vodom u betonu se oslobađa toplina, to izaziva temperaturno širenje betona, nakon toga dolazi do hlađenja smjese pri čemu nastaje deformacija skupljanja. Na razina promjena temperature betona utječu uvjeti okoline i sastav betona. Naglasak treba staviti na odabir cementa odgovarajućih svojstava. Pri projektiranju konstrukcija obično se traži ili rana čvrstoća betona ili niska toplina hidratacije ili poboljšana otpornost na kemijski agresivnu okolinu. Niža temperature smjese svježeg betona dovodi do sporijeg porasta temperature i ravnomjernijim hlađenjem, tj., ravnomjernijom predajom topline u okolinu. Iz tog razloga je u uvjetima jako visokih temperatura okoline neophodno hlađenje smjese svježeg betona, poželjno je sniziti temperature smjese ispod 10°C. Temperatura okoline u kojoj se događa hidratacija ima veći utjecaj na razinu skupljanja nego sama toplina izazvana procesom hidratacija. Na termičko skupljanje utječe udio i vrsta cementa u cementnoj smjesi. Praksa s gradilišta potvrdila je vrlo veliki utjecaj debljine betonskog elementa na termičko sušenje betona .Pokazano je da debljina betonskog elementa do 30 cm ima vrlo male ili nikakve termičke učinke, debljina od 50 cm od najbliže površine izložene hlađenju dostiže temperature unutar betona od 30-50°C , što u slučajevima većeg udjela cementa dovodi do neizbježnog pucanja betona. Termičko skupljanje za razliku od plastičnog koje prouzrokuje plitke pukotine na površini betonskog elementa izaziva duboke pukotine.



Slika 20. Izgled pukotine uzrokovane toplinskim skupljanjem [5]

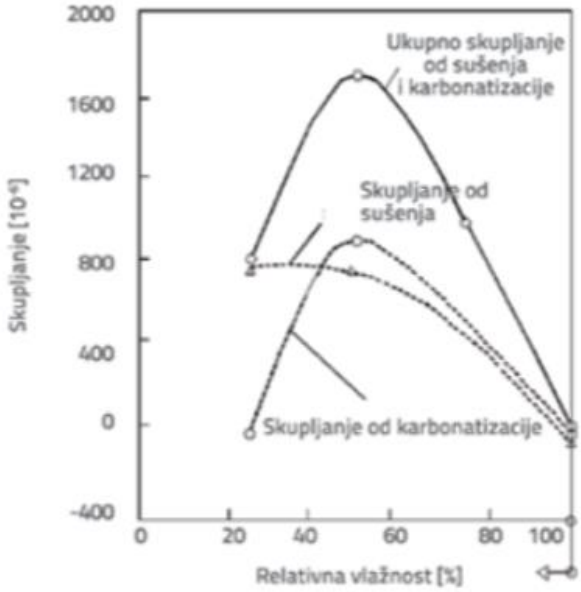
Termičko skupljanje počinje krajem vezivanja betonske smjese, maksimalan temperatura dostiže se između 20 I 40 sati. Hlađenje je razmjerno kvadratu debljine betonskog elementa. Povećanje temperature u masivnom betonu može se kontrolirati : izborom vrste i količine veziva – upotreba cementa male topline hidratacije , upotreba mješavine cementa koja sadrži bar 50% dodataka, upotreba betona s velikim udjelom letećeg pepela, prethodno hlađenjem smjese i zaštitom od direktne insolacije, programiranjem veličine blokova, rasporedom betoniranja i zaštitom od prenaglog hlađenja. [5] Najčešće od svih se koristi prethodno hlađenje svježeg betona i komponenti betonske smjese.

4.6. Skupljanje uslijed karbonatizacije

Skupljanje uslijed karbonatizacije događa se zbog kemijske reakcije koja se događa djelovanjem CO_2 (ugljikova dioksida) iz okoline na cementni kamen. Međudjelovanjem CO_2 (ugljikova dioksida) iz okoline s vodom na cementni kamen dolazi do kemijskih reakcija.

$$CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$$

Ugljikov dioksid s vodom tvori ugljičnu kiselinu koja reagira s kalcijevim hidroksidom ($Ca(OH)_2$) u cementnom kamenu stvarajući kalcijev karbonat ($CaCO_3$), pri čemu se razgrađuju i drugi spojevi cementnog kamena. Pri ovoj reakciji se oslobađa voda. U nezagađenoj atmosferi ugljikova dioksida ima 0,03 %, ali u gradovima i na autocestama ima ga do 0,3 %. Brzina napredovanja korozije cementnog kamena ovisi o strukturi pora, ali još više o njihovoj ispunjenosti vodom [5]



Slika 21. Skupljanje cementnog morta uslijed sušenja i karbonatizacije [5]

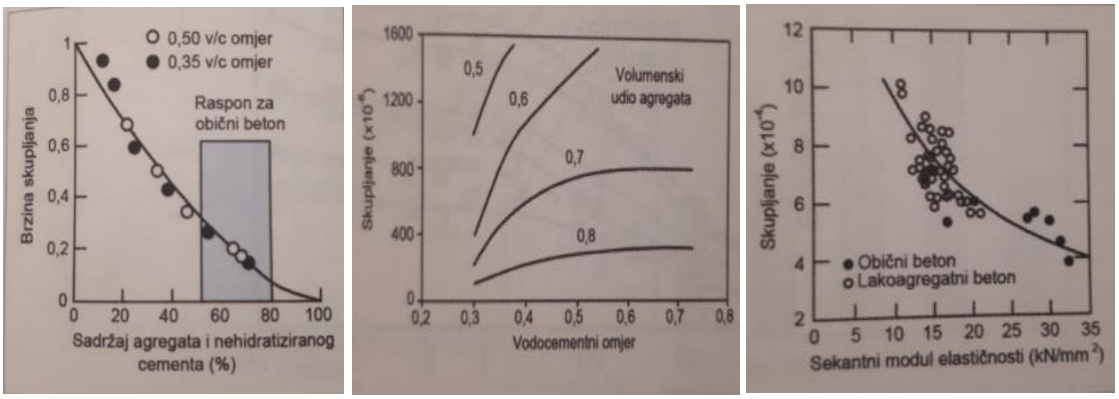
Napredovanje ugljikova dioksida bit će najsporije ako su pore ispunjenje vodom. Međutim, ako u porama nema vode, ne nastaje ugljična kiselina, tj. ne dolazi do reakcije s kristalima vapna. Dakle, optimalni uvjeti za karbonatizaciju cementnog kamena su u djelomično vlažnom betonu. Osim skupljanja, posljedica karbonatizacije cementnog kamena od običnog portlandskog cementa može biti povećanje čvrstoće, jer se kristali vapna zamjenjuju čvršćim kalcijevim karbonatom, koji popunjava strukturu, a voda koja se oslobađa može intenzivirati proces hidratacije. Uslijed karbonatizacije naročito se povećava čvrstoća betona, tako da tanki površinski sloj kore betona postane znatno tvrđi i krući. Najveće skupljanje od karbonizacije događa se pri relativnoj vlažnosti od 50%. Skupljanje karbonatizcijom najizloženiji su loše zbijeni betoni velike propusnosti.

5. Sastav betona

Beton je kompozitni, umjetni, kameni građevinski materijal. Smjesa svježeg betona sastoji se od morta i agregata kao ispune. Mort se je kombinacija cementne paste i sitnog pijeska koja veže i obavija krupnija zrna agregata. Glavni je nosilac čvrstoće i drugih svojstava betona stoga je određivanje njegovog sastava vrlo bitno. Pri projektiranju sastava betona treba biti pažljiv s obzirom da premala količina morta povećava poroznost i otežava ugradnju odnosno zbijanje, a prevelika količina morta povećava skupljanje i samim time mogućnost pojave pukotina.[7]

Odabir korektne smjese betona je najbolji način da postignemo što bolja svojstva betona tako da zadovoljava postavljene zahtjeve. U pogledu smanjenja deformacije uslijed skupljanja jedan od najboljih i najjednostavnijih načina je povećanje količine agregata u smjesi betona. Skupljanje cementne paste ostaje isto s obzirom na audio agregata. Dakle povećanjem udjela agregata smanjiva se skupljanje betona, ali ne i skupljanje cementne paste koju ograničava agregat. Cementna pasta svojim skupljanjem proizvodi mikropukotine no one su male I jednoliko raspoređene. Količina paste u sastavu betona ovisi o vodocementnom faktoru. Udio agregata je jedan od najbitnijih faktora koji utječe na veličinu skupljanja što se I vidi iz prikaza utjecaja vodocementnog faktora faktora i volumnog udjela agregata. Najpovoljnija količina agregata u sastavu betona se dobiva uravnoteženjem reoloških svojstava to jest obradivosti te utjecaja na skupljanje.[5]

Na slikama su prikazani utjecaji agregata na veličinu deformacije skupljanja betona.

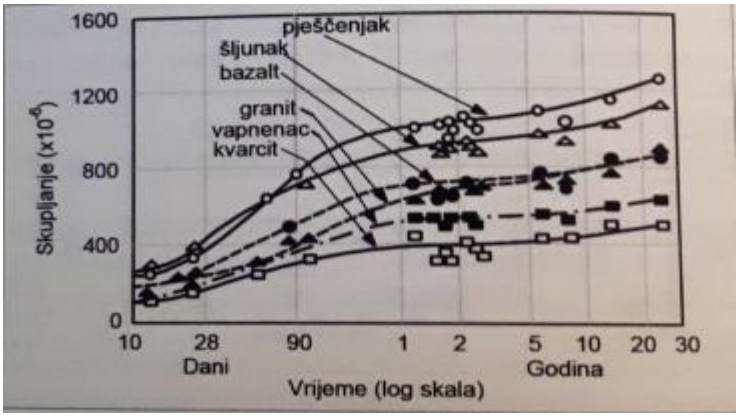


Slika 22. Utjecaj agregata na veličinu skupljanja betona
a) utjecaj vodocementnog omjera 0,35 i 0,50 i volumenskih udjela agregata (1),
b) utjecaj vodocementnog omjera 0,5-0,8 i volumenskih udjela agregata (2),
c) utjecaj modula elastičnosti [5]

Postoji dosta teorijskih izraza koji za skupljanje od sušenja pretpostavljaju da je mjera koja sprječava stupanj skupljanja betona, modul elastičnosti i da je on određen modulom elastičnosti agregata. Skupljanje zbog sušenja uzoraka betona Powers je istraživao sa dvije vrste različitih agregata te sa dvije vrijednosti vodocementnih faktora 0.35 i 0.50. U tom istraživanju je došao do izraza kojim je opisana ovisnost između skupljanja betona (Sc), skupljanja cementne paste (Sp) i volumnog udjela agregata (g), a (n) je konstanta koja je ovisna o krutosti agregata.[5]

$$\frac{Sc}{Sp} = (1 - g)^n$$

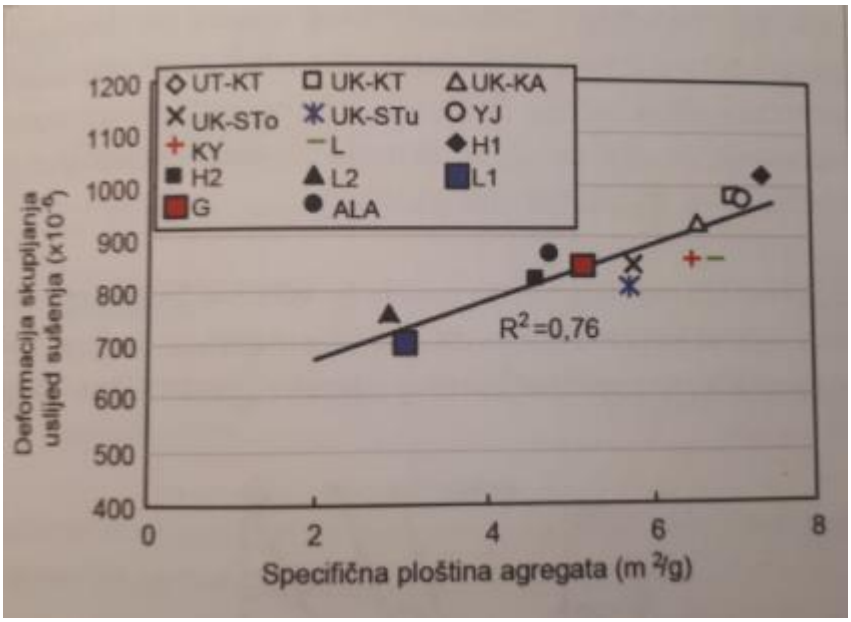
Po Powersu se još i nehidratizirani cement promatra kao dio agregata u sastavu betona, a L`Hermite je dokazao da vrijednost konstante n između 1.2 i 1.7 koja ovisi o krutosti agregata ovisi i o modulu elastičnosti agregata. Istraživanja Troxella i drugih su još više dokazala važnost agregata u pogledu deformacijskih svojstava betona. Ta istraživanja su pokazala da se kod sušenja skupljanje povećava 2.5 puta ukoliko zamijenimo beton s većim modulom elastičnosti sa agregatom koji ima mali modul elastičnosti. Kada je udio postotak agregata u betonu 50% tada se skupljanje umanjiva za jednu trećinu. Ukoliko je postotak agregata smanjen na 30% onda se deformacija skupljanja smanjiva na polovicu. Modul elastičnosti je jedan od najvažnijih faktora za skupljanje betona , ali važno je napomenuti i granulometirjski sastav koji diktira veličinu, oblik i teksturu zrna te samim time i količinu cementne paste koja je potrebna da obavije zrna krupnog i sitnog agregata. Optimalizacijom sastava agregata se smanjiva potrebna cementna pasta pa se tako smanjiva i pojava skupljanja u ranijim fazama očvršćivanja betona. Kod odabira agregata treba paziti i na neke vrste agregata koji imaju veći postotak glina i škriljevac, bazalt te pješčenjaci. Veći postotak gline znači i veće skupljanje. Vrste agregata koje imaju nešto manje skupljanje su vapnenac, granit te feldspati.[5]



Slika 23. Skupljanje betona istih satava ali različitih agregata [5]

Na priloženoj slici su prikazane vrijednosti skupljanja betona u ovisnosti o vremenu za određene vrste agregata.

Jedno od svojstava agregata koje utječe na deformaciju skupljanja je i specifična površina agregata SSA čijim se povećanjem povećava i tlak razdvajanja, a samim time i vrijednost skupljanja.



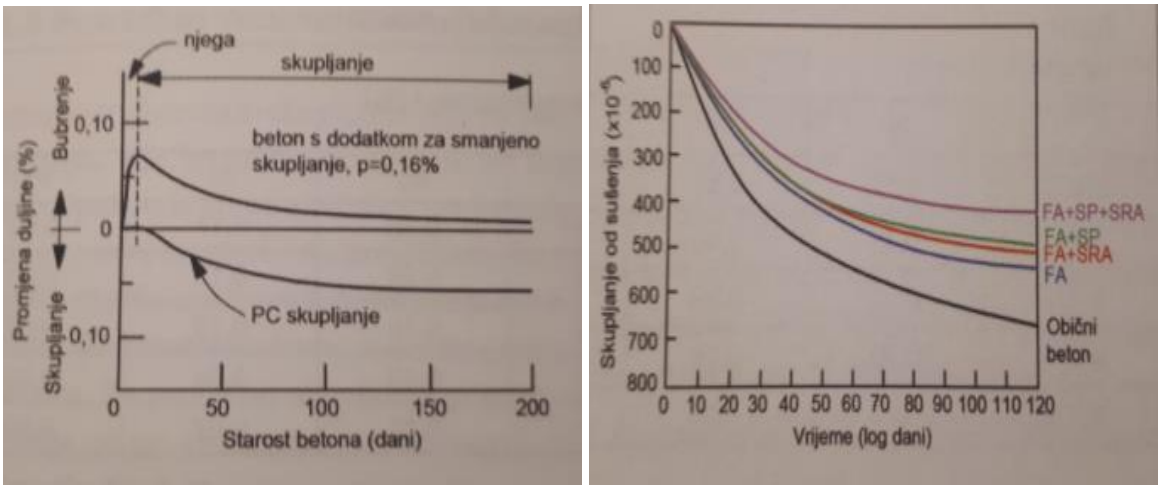
Slika 24. Utjecaj specifične površine agregata. SSA na skupljanje betona sušenjem [5]

Prikaz utjecaja specifične ploštine agregata SSA na skupljanje betona zbog sušenja. Što se tiče agregata raznim istraživanjima je ustanovljenjo da kod upotrebe reciklažnih agregata, povećanje skupljanja betona i dalje ovisi o udjelu reciklažnog agregata u mješavini betona. Promjene glede finoće mliva i samog sastava imaju utjecaj na brzinu hidratacije , ali ne i na produkt hidratacije što znači da utječu na skupljanja nekih manjih uzoraka paste ili morta, a njihov utjecaj na skupljanje betona je zanemariv.

5.1 Aditivi

Kalcijev klorid, granulirana zgura i pucolani su neki dodatci betonu koji povećavaju udio finih pora u cementnoj pasti. Fine pore veličine 3 do 20nm koje sadrže vodu kao što je već dokazano povećavaju skupljanje od sušenja kod betona koji ih sadrže. Dodatci koji se koriste za smanjivanje vode i kod usporavanja vezivanja slično utječu na skupljanje jer dovode do boljeg raspršivanja čestica cementa u vodi što dovodi do stvaranja većeg broja finih pora u strukturi

betona. Kod autogenog skupljanja smo već spomenuli kemijske dodatke koji služe za smanjivanje skupljanja (SRA) i kako bi se smanjila mogućnost pojave pukotina i deformacija uslijed skupljanja od sušenja. Takvi dodatci su na osnovi propilen glikola i oni povećavaju površinsku napetost vode te smanjuju naprezanja tokom otpuštanja vode. Na sljedećim slikama su prikazani utjecaji kemijskog dodatka, utjecaji mineralnog dodatka letećeg pepela (FA), utjecaji superplastifikatora (SP) te njihove kombinacije. Dodatkom letećeg pepela kao jednog dijela cementa i kombinacijom letećeg pepela sa kemijskim dodatcima skupljanje se znatno smanjiva.



Slika 25. Utjecaj na smanjenje skupljanja
a) utjecaj kemijskog dodatka
b) utjecaj mineralnog dodataka letećeg pepela i kemijskih dodataka na skupljanje betona. [5]

6. Ispitivanje betona

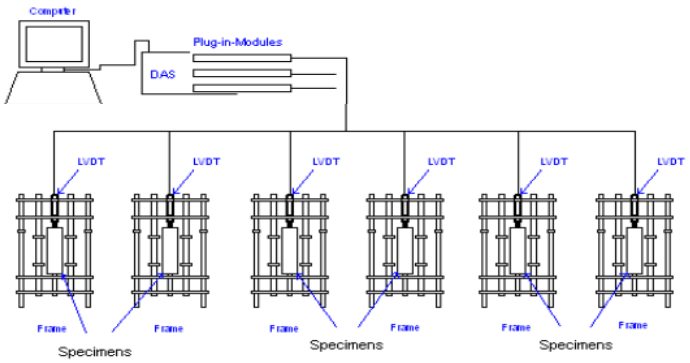
6.1. Mjerenje skupljanja pomoću LVDT kalupa za uzorke prema (ASTM C157)

Ovaj test skupljanja provodi se po sljedećim koracima. Prvo se površina kalupa premaže uljem za prijenos. Nakon toga se na bočnim stranama kalupa postave mjerne točke održavajući kalup čistim od ulja, masti i stranih tvari. Po završetku miješanja betona stavimo svježi beton u kalupe, u dva jednaka sloja. Potom se kalupi postave na vibracijski stol gdje svaki sloj vibrira 30 sekundi. Uzorci se nakon toga prekriju plastičnom folijom i tako stoje jedan dan. Nakon jednog dana uzorci betona se izvade iz kalupa i stave u okvir za testiranje skupljanja.



Slika 26. Prikaz više istovremenih testova skupljanja koristeći LVDT [12]

Na LVDT se očitanje postavi na nulu promatrajući izlazne zaslone na DAS-u. Kako je zbog velike osjetljivosti teško postaviti očitanje na nulu potrebno ga je postaviti što bliže nuli. Nakon što se očitanje na LVDT postavi na nulu ili blizu nule namjesti se DAS da kontinuirano bilježi očitanja svakih 15 minuta. Nakon 7 do 14 dana ta očitanja se mogu preuzeti pomoću softvera “Bench Link Data Logger”.



Slika 27. Shematski prikaz više istovremenih testova skupljanja pomoću LVDT [12]

6.2. Uređaji za mjerenje skupljanja

Uređaji za ispitivanje očvrslog betona prema normi EN 12390-16: 2019 dio 16 služi za određivanje skupljanja betona i drugih promjena.

Koristi se za uzorke maksimalne duljine 500 mm. Pomoću digitalne sonde postiže rezultate točnosti +/- 2,6 mikrona.



Slika 28. Uređaj za mjerenje skupljanja betona [11]

Schleibingerovi sustavi za ispitivanje

Odvod za skupljanje

Izrađen je od nehrđajućeg profila u obliku slova u obliku slova u koji sadrži uzorak. Kako bi se izbjeglo trenje zida, odvod je prekriven uklonjivim Neopren limom. Na jednoj je strani pričvršćeno uklonjivo sidro. S druge strane ovo sidro je pomično i klizno na tri kotača. Kretanje ovog sidra registrira visoko osjetljiva digitalna sonda.



Slika 29. Odvod za mjerenje skupljanja betona [11]

Kao senzor pomaka koristi se digitalna sonda koja je povezana s elektronikom sučelja sonde koja pretvara analogne signale s glave sonde u digitalni format. Preko sustava digitalne sabirnice može se povezati do 10 sondi. Udaljenost između sondi i registra podataka može biti nekoliko

stotina metara. Registar podataka se isporučuje sa sustavom, podaci skupljanja više odvoda registriraju se i pohranjuju u zapisnik kao standardne ASCII tekstualne datoteke. Po želji je moguća sinkrona registracija temperature i vlage.

Maksimalna duljina uzorka je 1000 mm, promjera 60*40 mm.

Konus za skupljanje s dvostrukom metalnom posudom

Koristi se za mjerenje grijanja i hlađenja pomoću vanjske jedinice za kontrolu temperature tekućine.

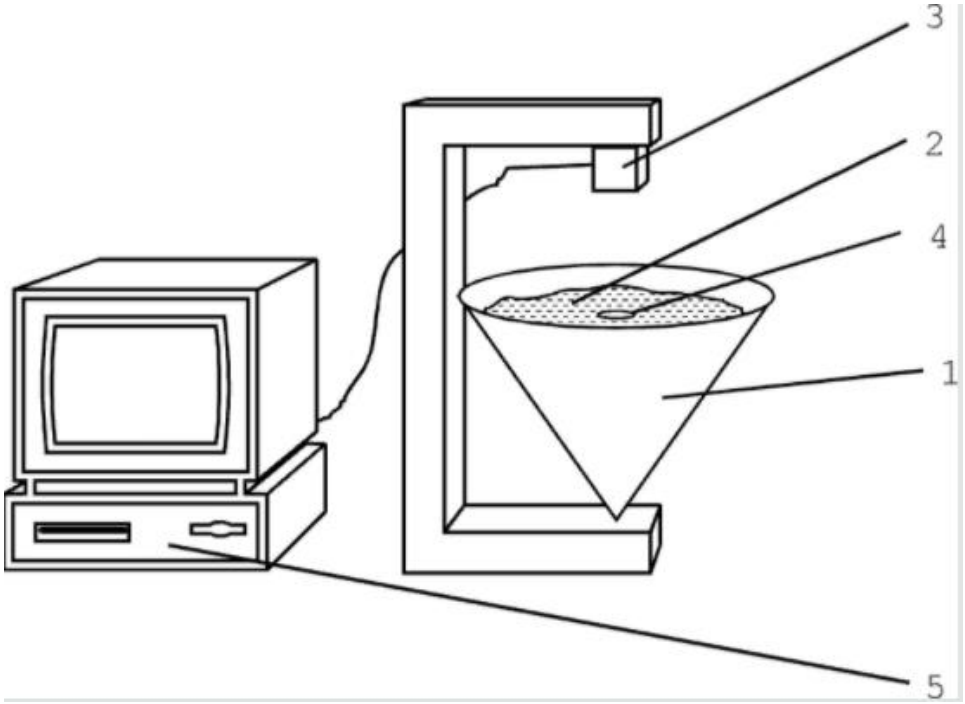


Slika 30. Uređaj konus za mjerenje skupljanja betona [11]

Laserska greda mjeri vrlo rano skupljanje i širenje građevinskih materijala: bez dodira. Inovativnim Schleibinger skupljajućim konusom deltaEL moguće je izmjeriti skupljanje ili širenje tekućih građevinskih materijala u prvim minutama i satima. Širenje građevinskog materijala registrira se bez dodira i vrlo precizno laserskom zrakom. Nije potrebna mehanička sprega između tekućine i senzora. Promjena duljine registrira se s razlučivošću 1/10 mikron. Vrijednosti mjerenja digitaliziraju se i pohranjuju u softver isporučen sa sustavom. Sinkronizirano s promjenom duljine, temperature i vlage.

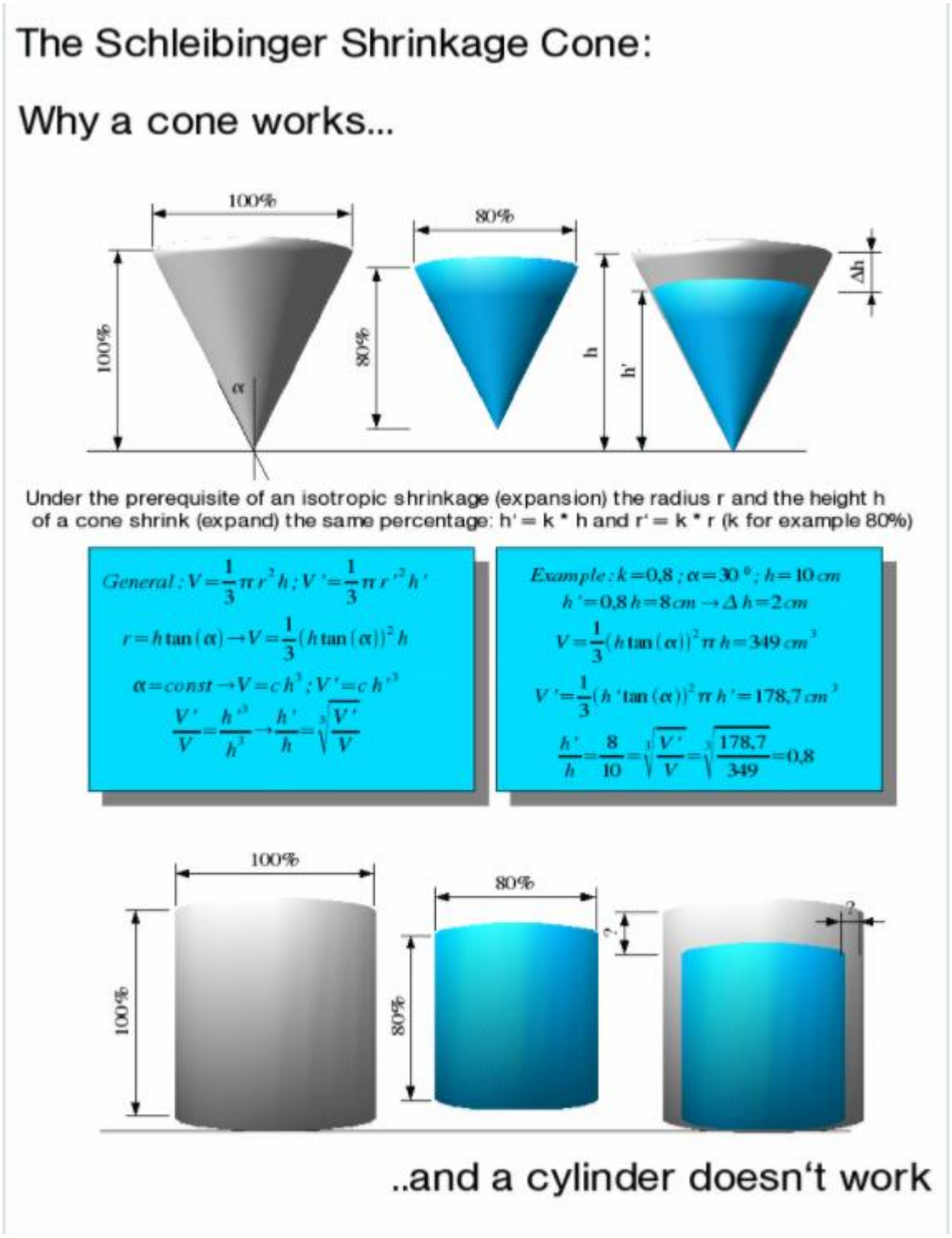
Postupak mjerenja

Tekući građevinski materijal se napuni (2) u konusnu posudu za uzorke (1). Spremnik je postavljen ispod laserske jedinice (3) koja je postavljena na postolje nosača visokih performansi. Kod letve i zupčanika udaljenost je unaprijed postavljena na oko 0 um. Automatsko podešavanje pomaka vrši se preko računala (5). Autonomni zapisnik podataka registrirat će podatke nekoliko tjedana na integriranoj memoriji CF-kartice. Registar podataka ima mrežno sučelje. Podatci se mogu lako očitati bilo kojim softverom preglednika, poput Internet-Explorera ili Firefoxa.



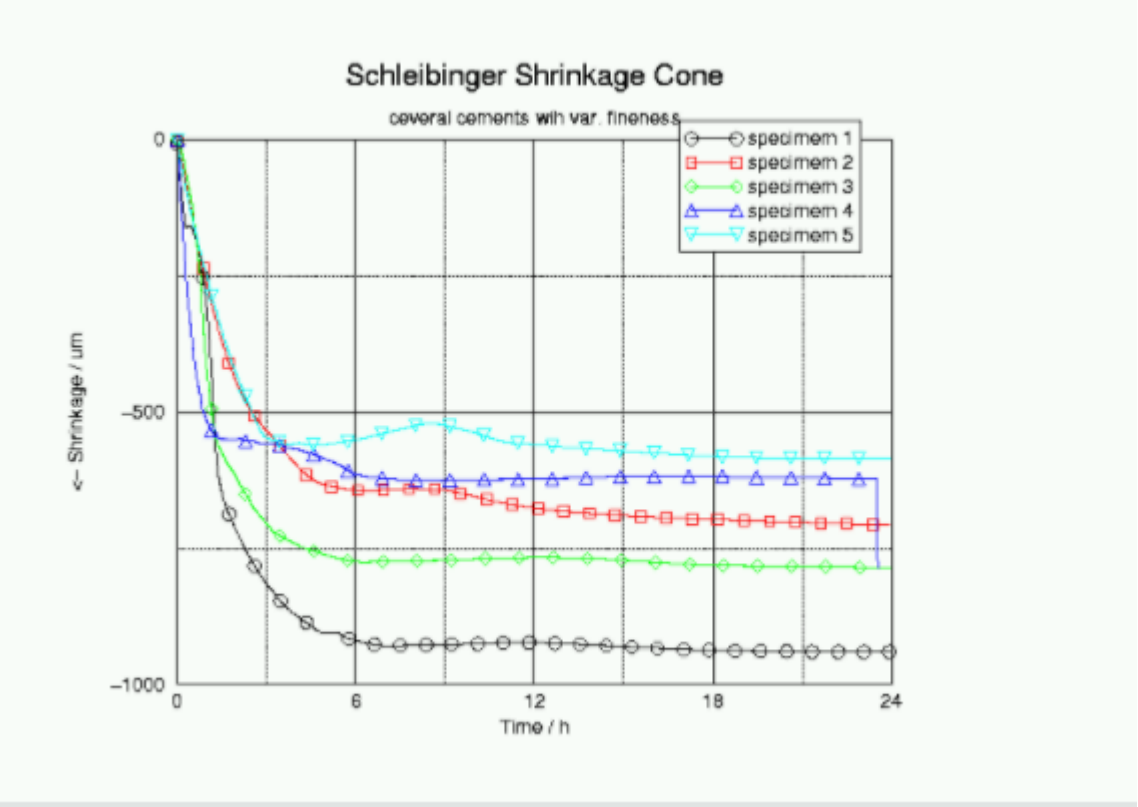
Slika 31. Shema postupka mjerenja [11]

Teorijsko objašnjenje rada:



Za kut od 60 ° volumen V = 1/9 * pi * h³. S h = 100 mm V = 349 cm

Primjer mjerenja
Sljedeća grafika prikazuje različite vrste cementa, s različitom finoćom



Slika 32. Usporedba skupljanja betona izrađenog od različitih vrsta cementa i različite finoće [11]

Tankoslojni sustav skupljanja



Slika 33. Uređaj za mjerenje skupljanja tankih slojeva betona[11]

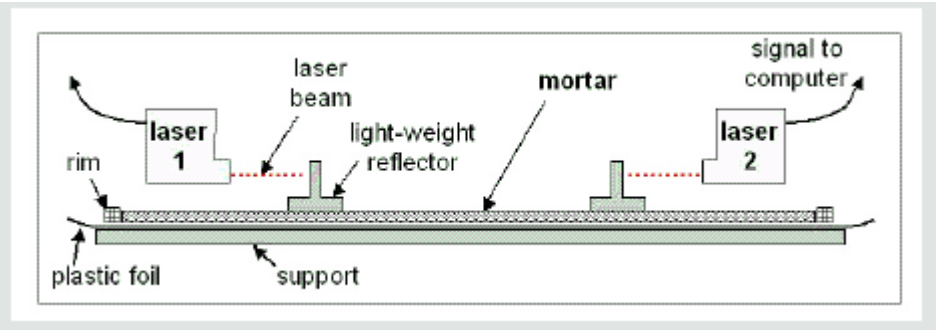
Neki građevinski materijali poput samorazlivnih podnih smjesa ili žbuke nanose se u tankim slojevima. Ovi brzovezujući mortovi se stvrdnjavaju u roku od nekoliko sati, a naknadno sušenje takvog tankog sloja obično prestaje nakon prvog dana. Kako bi se istražila dinamika ranog skupljanja i širenja, razvilo se posebnu postavku od dvije laserske jedinice koje su vodoravno poravnate. Ova postavka omogućuje istraživanje različitih parametara formulacije i njihovih utjecaja na različite faze skupljanja i širenja, odnosno plastičnog skupljanja, stvrdnjavanja i skupljanja uslijed sušenja. Ponašanje skupljanja / širenja snažno je povezano s vanjskim (klima) i unutarnjim čimbenicima (sastav). S obzirom na navedeno početak, intenzitet i trajanje postavljanja ključni su za cjelokupno ponašanje skupljanja / širenja.

Kod građevinskih materijala primijenjenih u tankim slojevima skupljanje je jedno od glavnih problema iz dva razloga: Visok omjer površine i volumena uzrokuje isparavanje izraženo snažnim i brzog fizičkog skupljanja, a intenzivne reakcije hidratacije mogu izazvati izraženo kemijsko skupljanje , ili u slučaju stvaranja etringita snažno širenje.

Princip mjerenja:

Kako bi se istražili mehanizmi ranog skupljanja / širenja u slojevima tankog maltera koji se brzo vežu, razvijena je posebna postavka koja se sastoji od dvije laserske jedinice. Dva lasera usmjerena su vodoravno na par lakih reflektora koji se postavljaju na svježi mort. Tada se registrira promjena udaljenosti između reflektora s rezolucijom od 0,15 μm. Beskontaktni laserski uređaj omogućuje započinjanje mjerenja odmah nakon postavljanja svježeg betona.

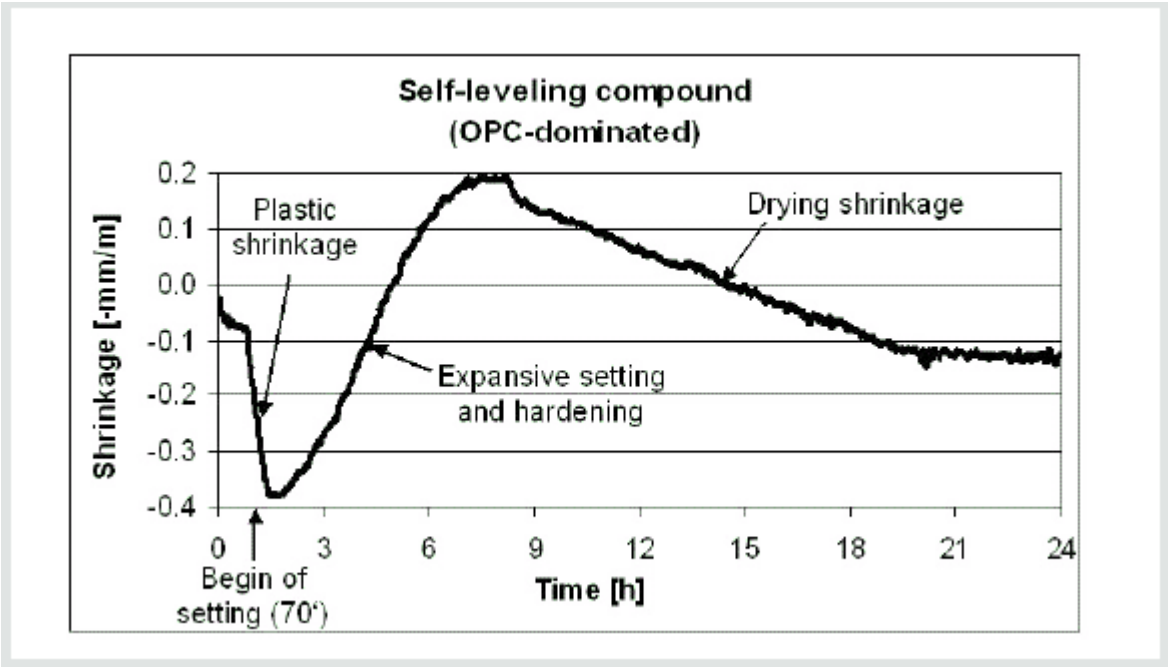
Registar podataka isporučen sa sustavom bilježi podatke i pohranjuje ih u zapisnik kao standardne ASCII datoteke. Moguća je istovremeno praćenje temperature i vlage. Uređaj je umrežen, te se pomoću standardnog softvera web-preglednika možete očitati podatke i prikazati ih.



Slika 34. Shematski prikaz postupka mjerenja skupljanja tankih slojeva betona [11]

Primjer mjerenja:

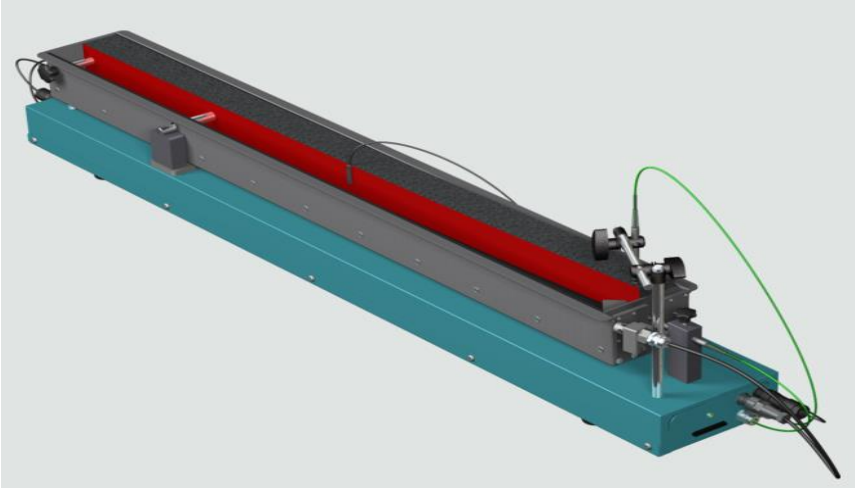
Na donjoj je slici prikazano jako plastično skupljanje u prvih sat vremena. Odmah nakon postavljanja, plastično skupljanje može se naglo pretvoriti u širenje. Trenutna radna hipoteza glasi da je ovo čisti strukturni učinak povezan s kritičnom koncentracijom hidrata, zbog čega mineralna zrna (cement, pijesak i sitnozrnasta punila) postaju podržana matricom hidrata. Od ovog trenutka daljnja hidratacija uzrokuje razdvajanje (širenje) mineralnih zrna. Trajno kemijsko skupljanje (uzrokovano kontinuiranom hidratacijom), koje je prije pridonijelo plastičnom skupljanju, sada proizvodi poroznost. Kako se brzina hidratacije usporava, isparavanje postaje dominantan mehanizam i prisiljava sloj žbuke da se opet smanji. U većini slučajeva to se skupljanje uslijed sušenja izravna tijekom prvog dana i sloj žbuke postaje stabilan u volumenu.



Slika 35. Graf pokazuje razinu plastičnog skupljanja betona nakon ugradnje [11]

Odvod za savijanje

Odvod za savijanje je takozvani "uređaj za uvijanje profila" prema EN 13892-9: 2018 Metode ispitivanja materijala za estrihe. Sa Schleibingerovim savitljivim odvodom mjeri se skupljanje i uvijanje građevinskog materijala. Također može se ugrađenim električnim grijanjem simulirat podno grijanje u stvarnom svijetu. Mjerenje visoke preciznosti zajamčeno je pomoću dva statična nosača i masivnom čeličnom pločom u obliku slova U. Neoprenska folija između obloge i materijala izbjegava trenje i blokiranje materijala, također kada se koriste materijali koji se šire.



Slika 36. Odvod za savijanje uređaj za mjerenje skupljanja estriha [11]

Uređaj je umrežen i svi podaci prikupljeni tjednima ili mjesecima pohranjuju se u trajnu memoriju. Odatle možete podatke učitati izravno u .xls formatu.

Moguće je spojiti nekoliko odvoda za savijanje, ali svaki od njih radi neovisno. Daju visoko pouzdane rezultate. Jedan RTD mjeri temperaturu na dnu obloga. Temperatura uzorka mjeri se termoelementom ugrađenim u uzorak. Dodatni senzor vlage / temperature mjeri vlažnost i temperaturu na površini uzorka.

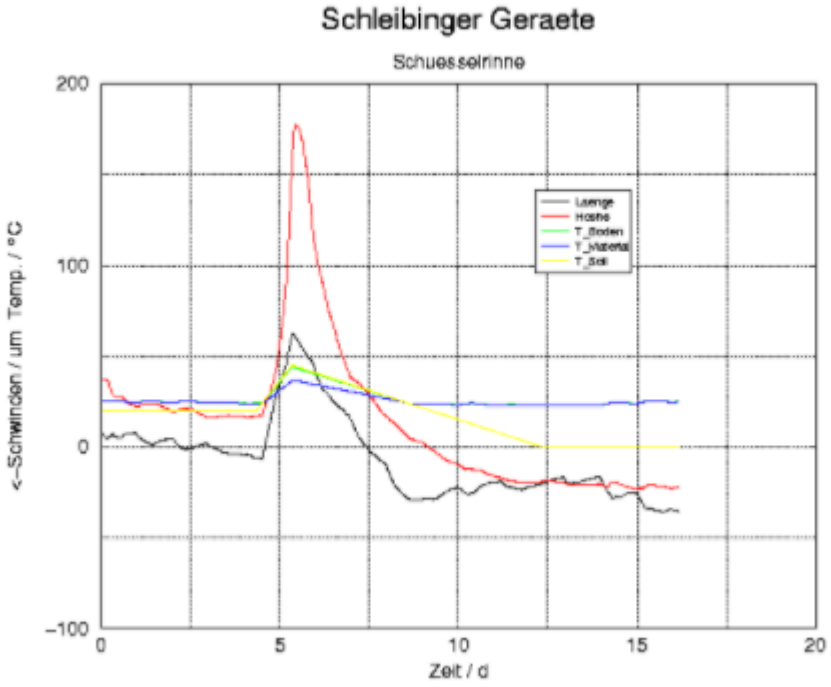
Tehničke karakteristike uređaja:

Koristi se za EN 13892-9: 2018 Metode ispitivanja materijala za estrihe.
Maksimalne dimenzije uzorka kog može mjeriti je 1000*100*50 mm.
Točnost mjerenja +/- 3 mikrona.

Primjer mjerenja:

U grafikonu ispod su prikazani podatci gdje na os x prikazuje vrijeme u danima, na osi y temperaturu u ° C i promjenu duljine u mikronima. Nakon 4 i pol dana aktivirano je podno grijanje.

Zelena linija prikazuje temperaturu na dnu uzorka. Plava linija je temperatura u jezgri uzorka. Crvena linija prikazuje savijanje, crna promjenu duljine. Mjerenje je izvršeno u laboratoriju Hasit (http://www.hasit.de)



Slika 37. Grafički prikaz rezultata mjerenja [11]

7. Proračun skupljanja betona

Mehanizam skupljanja kao i parametri koji utječu na njega su poznati, ali nije jednostavno procijeniti vrijednost skupljanja betona pogotovo kod posebnih betona. Moguće je iz kratkotrajnih istraživanja s dovoljno dobrom točnošću predvidjeti skupljanje betona nakon dužeg vremena no za projektante su često bitnije vrijednosti skupljanja u ranijim fazama. Postoje različiti modeli kojima se procjenjuje količina skupljanja i oni su uključeni u propise, a zasnivaju se na analizama i detaljnim eksperimentalnim istraživanjima iz literature.

Prema HRN EN 1992-1-1 ukupna deformacija zbog skupljanja betona jednaka je zbroju dviju komponenti, a to su deformacija skupljanja zbog sušenja te deformacija autogenog skupljanja. Deformacija skupljanja zbog sušenja je kao što je već objašnjeno zasnovana na kretanju vode kroz beton i odvija se polagano, dok se deformacija uslijed autogenog skupljanja odvija tokom očvršćivanja većinom u početku. Ukupna vrijednost deformacije skupljanja se dobiva iz jednadžbe [5]

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

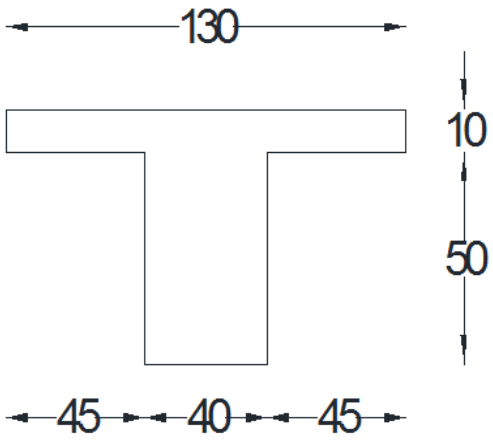
ε_{cs} - ukupna deformacija skupljanja

ε_{cd} - deformacija skupljanja zbog sušenja

ε_{ca} - deformacija autogenog skupljanja

PRIMJER PRORAČUNA

U ovom primjeru je proračunata vrijednost deformacije skupljanja za betonski element raspona 16 m poprečnog presjeka tipa T izrađen od betona klase C40/50 i razreda R u trajanju od 3 mjeseca pri relativnoj vlažnosti 50%.



-Veličina deformacije skupljanja zbog sušenja dobiva se izrazom

$$\varepsilon_{cd,0} = 0{,}85[(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp\left(-\alpha_{ds2}\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)]10^{-6}\beta_{RH} = 6\text{x}10^{-4}$$

gdje je:

f_{cm} = 48 (MPa)

f_{cm0} = 10 (MPa)

Tip cementa	S	N	R
α_{ds1}	3	4	6
α_{ds2}	0,13	0,12	0,11

Tabela 3. Vrijednosti koeficijenata ovisno o tipu cementa [5]

α_{ds1}= 6

α_{ds2}= 0,11

RH – relativna vlažnost okoline, u ovom primjeru 50%

RHo= 100%

exp - e^0

$$\beta_{RH} = 1{,}55[1 - \left(\frac{RH}{RHo}\right)^3] = 1{,}36$$

-Porast deformacije skupljanja zbog sušenja s vremenom se dobija izrazom

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s)k_h\varepsilon_{cd,0} = 2{,}3\text{x}10^{-4}$$

k_h- koeficijent koji ovisi o prividnoj veličini h_0 iz tablice

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Tabela 4. Popis vrijednosti k_h [5]

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0{,}04\sqrt{h_0^3}} = 0{,}45$$

t – starost betona u trenutku koji se promatra, t= 90 dana

t_s- starost betona na početku skupljanja zbog sušenja, t_s= 15 dana

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = 173{,}69$$

Ac – površina poprečnog presjeka betona, Ac= 330000 mm^2

u – opseg površine poprečnog presjeka, u= 3800 mm

-Veličina deformacije zbog autogenog skupljanja dobija se izrazom

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t)\varepsilon_{ca}(\infty) = 6{,}4\text{x}10^{-5}$$

$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0{,}2t^{0{,}5}) = 0{,}85$

$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2{,}5(f_{ck} - 10)10^{-6} = 7{,}5\text{x}10^{-5}$

Ukupna vrijednost deformacije zbog skupljanja

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} = 2{,}3\text{x}10^{-4} + 6{,}4\text{x}10^{-5} = 2{,}94\text{x}10^{-4} = 0{,}294\ ‰$$

Skraćenje betonskog elementa

$$\Delta L = 16 \times 0{,}294 = 4{,}704\ mm$$

8. Zaključak

U ovom radu su data objašnjenja deformacija betona nastalih skupljanjem. Prema dostupnoj literaturi napravljena je analiza svih utjecaja koji pridonose skupljanju, kao i načina njihova djelovanja. Prema uzrocima nastajanja, razlikujemo više vrsta skupljanja: temperaturno, kemijsko, autogeno, plastično, skupljanje uslijed sušenja, skupljanje uslijed karbonizacije. Uzrok svih skupljanja izuzev skupljanja uslijed karbonizacije je gubitak vode u betonu. Gubitak vode može nastati samim procesom hidratacije cementa ili isparavanjem vode u okolinu. Skupljanje uslijed karbonizacije nastaje međudjelovanjem CO_2 (ugljikova dioksida) iz okoline s vodom na cementni kamen, pri čemu dolazi do kemijskih reakcija. Ukupno skupljanje betona predstavlja zbroj svih spomenutih vrsta skupljanja. Udio pojedine vrste skupljanja u ukupnom skupljanju razlikuje se ovisno dimenzijama betonskih elemenata, sastavu betonske smjese (udjelu i vrsti veziva, udjelu vrsti i granulaciji agregata), gustoći smjese, načinu i temperaturi ugradnje, vodocementnom omjeru, utjecajima okoline. Što se tiče razine skupljanja najveće od svih po svom obujmu je plastično skupljanje. Kako se ono događa neposredno nakon ugradnje, dok je betonska smjesa još svježa, te na taj način nema utjecaja na naponsko stanje betonske konstrukcije ono se uglavnom ne primijeti. Da bi se skupljanja spriječila ili barem smanjila njihovo nastajanja poduzimaju se razne mjere dodatne njege betona ili promjenama u samom sastavu betonske smjese prilikom izrade, bilo izmjenom omjera veziva i agregata ili dodavanjem raznih aditiva koji mijenjaju hidratacijska svojstva betona.

9. Literatura

[1] https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=7337

[2] http://www.gfos.unios.hr/download/6-deformacije-betona.pdf

[3] M. Muravljov: Građevinski materijali (udžbenik), Građevinska knjiga, Beograd, 2007.

[4] P. Krstulović: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 2000

[5] Bjegović, D., Štirmer, N., Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, 2015.

[6] https://hrcak.srce.hr/file/130476, Merima Šahinagić-Isović, Goran Markovski, Marko Ćećez

Deformacije skupljanja betona - uzroci i vrste

[7] Beslać J.: Materijali u arhitekturi i građevinarstvu, Školska knjiga, Zagreb, 1989.

[8] Betoni posebnih namjena, doc.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša, dipl.ing.građ., Osijek, šk. god. 2017/2018.

[9] http://gfosweb.gfos.hr/portal/images/stories/studij/strucni/masivne-konstrukcije-i/4-5-deformacije-dugotrajne-i-volumenske.pdf

[10] https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2005_08_101_1960.html

[11] http://www.schleibinger.com/cmsimple/en/?Shrinkage:Measurement_Gauge

[12] Evaluation of shrinkage cracking potential of concrete used in decks in Florida, M.Tia, R.Subramanian, D.Brown, C.Broward, 2005.