

Nuoren ja kovettuneen betonin ominaisuudet
Betonilaborantin ja betonimylläri pätevyöitymiskurssi
11.1.2024

Kim Johansson
Erityisasiantuntija , DI
Suomen Betoniyhdistys ry

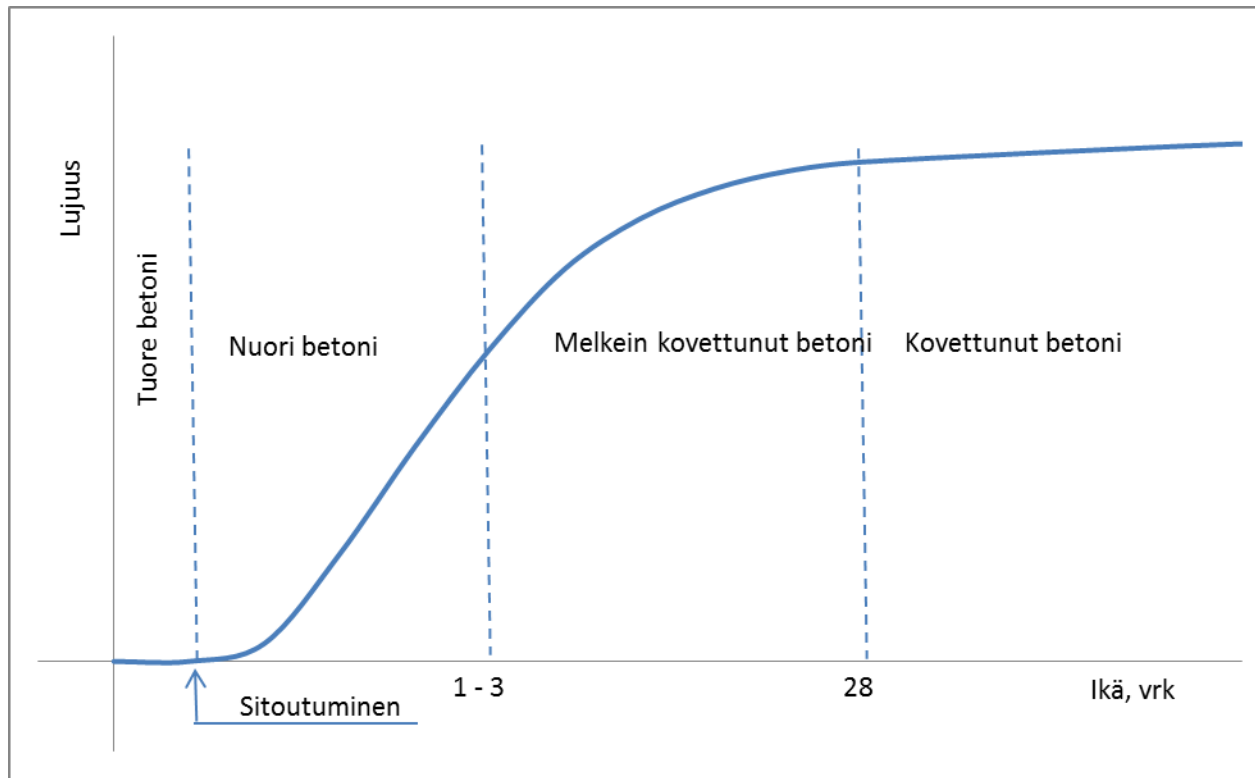


Yleistä

- ▶ **Betoni on maailmanlaajuisesti yleisin rakennusmateriaali**
- ▶ **Syitä betonin käytön yleisyyteen ovat**
 - Raaka-aineiden runsaus ja helppo saatavuus
 - Muokattavuus rakentamisvaiheessa
 - Suuri puristuslujuus
 - Hyvä säilyvyys useimmissa olosuhteissa
- ▶ **Betonin ominaisuudet riippuvat**
 - Osa-aineiden laadusta, suhteista ja valmistuksesta
 - Valitsemalla osa-aineet ja niiden suhteet oikein voidaan betonin ominaisuudet räätälöidä kuhunkin käyttötarkoitukseen
- ▶ **Haluttujen ominaisuuksien saavuttaminen edellyttää kuitenkin huolellista rakentamista**
 - Suhteellisen pienet virheet ja laiminlyönnit voivat aiheuttaa sen että suunniteltuja ominaisuuksia ei saavuteta (esim. tapaukset Kemijärvi ja Turku)

Yleistä

- ▶ Betonin ominaisuuksia voidaan tarkastella seuraavan jaottelun mukaisesti
 - Betonimassan ominaisuudet
 - Alle vuorokauden ikäisen sitoutumisvaiheessa ja varhaisessa kovettumisvaiheessa olevan betonin ominaisuudet
 - Kovettuneen betonin ominaisuudet.



Periaatekuva betonin lujuudenkehityksen etenemisestä

Yleistä

- ▶ Rakennuksen omistajan/käyttäjän kannalta kovettuneen betonin ominaisuudet ovat tärkeimmät
- ▶ Vaatimukset kovettuneen betonin ominaisuuksille esitetään suunnitelmissa
- ▶ Betonin valmistajan ja rakentajan kannalta myös tuoreen ja nuoren betonin ominaisuuksilla on suuri merkitys, sillä ne vaikuttavat merkittävästi rakenteen toteutukseen ja lopullisiin ominaisuuksiin
- ▶ Kovettumisen aikana kovettumisen aikana betonirakenteeseen syntyvät rasitukset haittaavat usein suunniteltujen ominaisuuksien saavuttamista

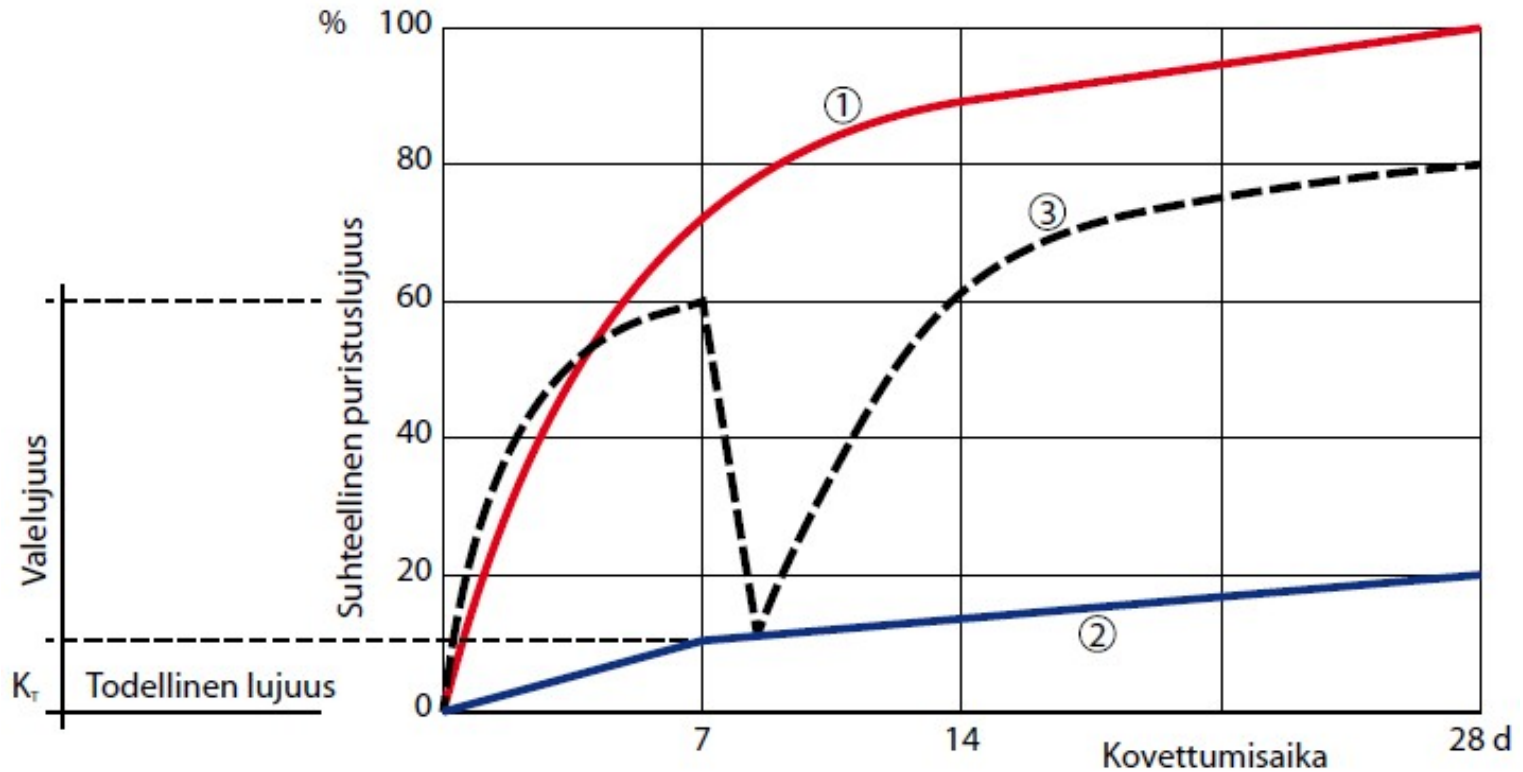
Yleistä

- ▶ Näitä rasituksia ovat esimerkiksi:
 - Valmistuksen aikaiset varhaiset kuormat
 - Liian korkeat lämpötilat
 - Jäätyminen
 - Liian nopeat lämpötilan muutokset
 - Varhainen esijännitys
 - Muottien varhainen purku
 - Eri syistä johtuva tärinä (yleensä louhinnasta tai liikenteestä)
- ▶ Liian suuret rasitukset kovettumisen aikana, kun betonin lujuus on vasta kehittymässä, voivat aiheuttaa betonissa halkeilua, sisäistä mikrohalkeilua, ja ylimääräistä lujuuskatoa. Betoni ei tällöin aina saavuta kaikilta osin toivottuja arvoja.

Yleistä

- ▶ Betonin jäätyminen ennen kuin betoni on saavuttanut nk. jäätymislujuuden, eli lujuuden jonka jälkeen betoni kestää jäätymisen aiheuttamat rasitukset aiheuttaa sen, että betoni ei saavuta suunniteltuja ominaisuuksia.
 - Puristuslujuuden kato voi olla huomattava
 - Jäätymislujuus on noin 5 MPa

Betonin jäätymisen vaikutus



- ① Käyrä 1: Betonin säilytyslämpötila + 20 °C.
- ② Käyrä 2: Betonin säilytyslämpötila -8 °C.
- ③ Käyrä 1: Betonin säilytyslämpötila seitsemän päivää -8 °C ja sitten + 20 °C.

Yleistä

- ▶ Puristuslujuuden kehittyminen on betonin ominaisuuksista käytännössä suurimman kiinnostuksen kohde
- ▶ Lujuudenkehittymisen seuraamiseksi on olemassa useita menetelmiä. Näitä ovat
 - Lämpötilan mittaus ja mittaustulosten perusteella lasketun kypsyuden tai ekvivalentin iän arviointi
 - Kypsyuden arviointi sähkövastuksen ja kypsyuden avulla
 - Ainetta rikkomattomat menetelmät kuten kimmovasara tai ultraääni
 - Olosuhdekoekappaleet
 - Porakappaleet
- ▶ Betonin muiden ominaisuuksien kehittymistä arvioidaan tarvittaessa yleensä puristuslujuuden avulla.

Betonin ominaisuudet sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen alkuvaiheessa

Betonin ominaisuudet sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen alkuvaiheessa

- ▶ Sementin ja veden kemialliset reaktiot eli hydrataatioreaktiot käynnistyvät heti sekoittamisen jälkeen
- ▶ Betoni alkaa saavuttaa lujuutta muutaman tunnin sisällä sekoituksesta.
- ▶ Betoni voi myös kovettua vedessä eli kovettuminen ei tarvitse happea tai hiilidioksidia
 - Vedenalainen valu mahdollista
- ▶ Kemiallisten reaktioiden nopeus riippuu voimakkaasti lämpötilasta, ja reaktioissa syntyy lämpöä.

- ▶ Plastisessa tilassa eli sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen alkuvaiheessa tapahtuvia ilmiöitä ovat (yleensä < 1 vrk:n ikäinen betoni)
 - Betonimassan työstettävyyden menetys noin kahden tunnin kuluessa sekoituksesta normaalilämpötilassa
 - Plastinen painuma
 - Plastinen kutistuma
 - Kemiallisista reaktioista johtuvat tilavuuden muutokset
 - Veden haihtumisesta tai veden poistumisesta johtuvat tilavuuden muutokset
 - Lämpötilan muutoksista johtuvat tilavuuden muutokset.

- ▶ Betonin sitoutumisen ja kovettumisen aikana tehdyt toimenpiteet ja valinnat ovat ratkaisevia betonirakenteen laadun ja ominaisuuksien kannalta.
- ▶ Tämän takia on tärkeätä ymmärtää, mitä betonirakenteessa tapahtuu ensimmäisen 1...2 vuorokauden aikana, ja miten eri asioihin voidaan vaikuttaa ja mitkä asiat ovat kriittisiä esimerkiksi rakenteen halkeilun kannalta.

- ▶ **Betonin tilavuus voi muuttua seuraavista syistä:**
 - **Betonista poistuu vettä**
 - veden haihtuminen
 - veden erottuminen
 - **Betonissa tapahtuu kemiallinen reaktio.**
 - **Valetun rakenteen lämpötila muuttuu.**

Betonin ominaisuudet sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen alkuvaiheessa

- ▶ Suurin osa betoniin sekoitetusta vedestä tarvitaan, jotta betoni voidaan sekoittaa homogeeniseksi massaksi sekä valaa ja tiivistää
- ▶ Hydrataatioreaktioon tarvittava kemiallisesti sitoutuva vesimäärä on noin 20 % sementin painosta, joka on alle puolet tavanomaiseen betoniin sekoitettavasta vedestä
- ▶ Osa vedestä jää pysyvästi kovettuneen betonin huokosiin (n 25 %) ja loppuosa vedestä alkaa poistua rakenteesta.
- ▶ Betonista alkaa poistua kosteutta heti, kun se on valettu. Kosteuden poistuminen jatkuu, kunnes rakenne on saavuttanut ympäristöolosuhteita vastaavan tasapainokosteuden.
- ▶ Tasapainokosteuden saavuttamiseen kuluu aikaa yleensä useita vuosia. Ääritapauksessa rakenne ei saavuta koskaan ympäristön lämpötilaa ja kosteutta vastaavaa tasapainokosteutta

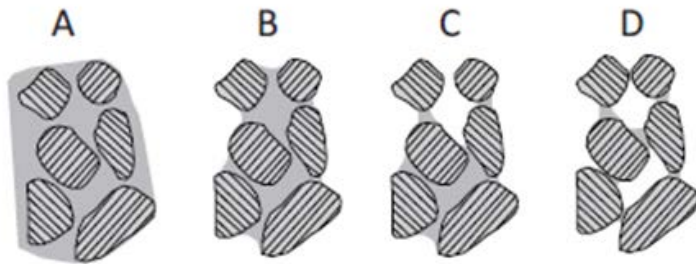
Betonin ominaisuudet sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen alkuvaiheessa

- ▶ Veden poistuminen pienentää rakenteen tilavuutta, eli betoni kutistuu
- ▶ Betonin varhaisvaiheessa tapahtuvaa kutistumaa kutsutaan *plastiseksi kutistumaksi* ja kovettuneen betonin kutistumaa kutsutaan *kuivumiskutistumaksi*.
- ▶ Sekä varhaisvaiheessa että kovettumisvaiheessa kutistumista tapahtuu myös kemiallisten reaktioiden seurauksena, mitä kutsutaan *autogeeniseksi kutistumaksi*.
- ▶ Betonin sitoutumisvaiheessa ja kovettumisen alkuvaiheessa kutistuminen voi siis johtua useasta eri syystä.
- ▶ Myöhemmin betonin kovettumisvaiheessa kutistuminen johtuu pelkästään rakenteen kuivumisesta.
- ▶ Hyvänlaatuisen tavanomaisissa talonrakenteissa käytettävän betonin kuivumiskutistuma on yleensä 0,4...0,7 mm/m.

Plastinen kutistuma

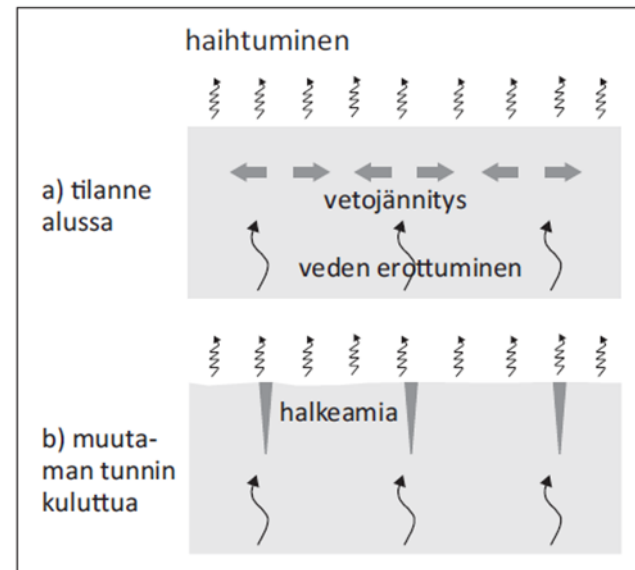
- ▶ Plastisella kutistumisella tarkoitetaan sitä betonimassan kutistumista vaakatasossa, jonka veden haihtuminen betonipinnasta aiheuttaa muutaman tunnin sisällä valusta.
- ▶
- ▶ Plastisen kutistumisen syynä on betonipinnan liian nopea kuivuminen ennen massan sitoutumista ja voi olla suuruudeltaan yli 1 mm/m
- ▶ Veden haihtuessa ja pinnan kuivuessa, pinnan lähellä olevien pienten hiukkasten, lähinnä sementtahiukkasten, välille muodostuu kaarevia vesipintoja.
- ▶ Veden pintajännityksen ja veden sekä sementtahiukkasten välisen vetovoiman vaikutuksesta pintaan muodostuu kalvojännitystila, jonka aiheuttaman vetovoiman seurauksena betonimassa kutistuu.
- ▶ Samalla kapillaarihuokosissa syntyy alipaine, joka pyrkii siirtämään syvemmällä olevaa vettä pintaan.

Plastinen kutistuma



Plastinen kutistuma. Veden haihtuminen betonin pinnasta imee betonimassan pieniä hiukkasia lähemmäksi toisiaan.

Plastisen kutistuman syntymekanismi



Plastinen kutistuma

- ▶ Veden haihtumiseen vaikuttavat
 - ilman kosteus
 - lämpötila
 - auringon säteily
 - ilmavirtaukset.
- ▶ Plastinen halkeilu on estettävissä huolellisella, ja riittävän aikaisin aloitetulla varhaisjälkihoidolla
- ▶ Jälkihoito tehdään usein varhaisjälkihoitoaineilla, jota levitetään tarvittaessa useamman kerran ennen hierontaa.
- ▶ Betonin koostumus vaikuttaa plastisen halkeilun esiintymisen todennäköisyyteen.

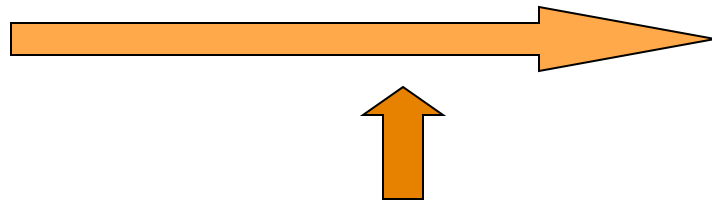
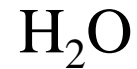
Plastinen kutistuma

- ▶ Riski on suuri kun betonin vesi-sementtisuhde on alhainen, vedenerottuminen vähäistä tai massan lämpötila korkea
- ▶ Sementin sitoutumisajan pidentyminen lisää veden haihtumista ja plastista kutistumaa. Tämä korostuu kylmissä olosuhteissa, koska lämpötilan aleneminen siirtää sitoutumisen alkua.
- ▶ Mitä pidempään betoni on plastisessa tilassa, sitä enemmän veden haihtumiselle jää aikaa.

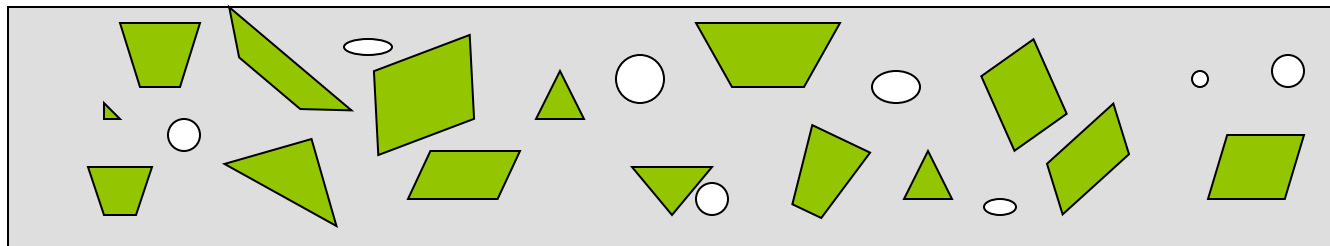
Veden haihtuminen

vettä haihtuu sitä enemmän,
mitä kovempi on tuuli

vettä haihtuu sitä enemmän,
mitä vähemmän ilmassa on
vettä

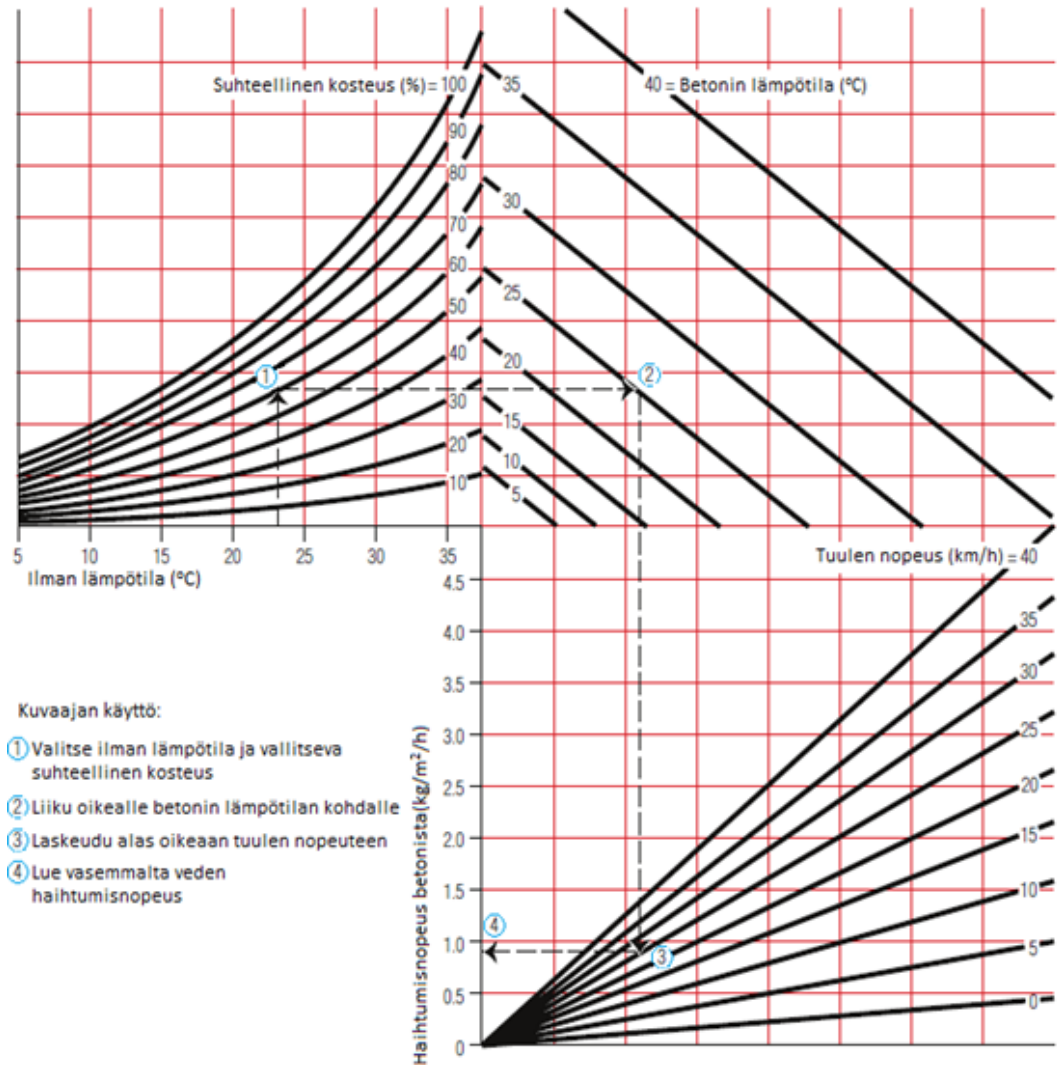


vettä haihtuu sitä enemmän,
mitä lämpimämpää betoni on



Plastinen kutistuma

Veden haihtumista avoimelta betonipinnalta voidaan arvioida, kun tunnetaan ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus, betonin lämpötila sekä tuulen nopeus betonipinnan läheisyydessä.

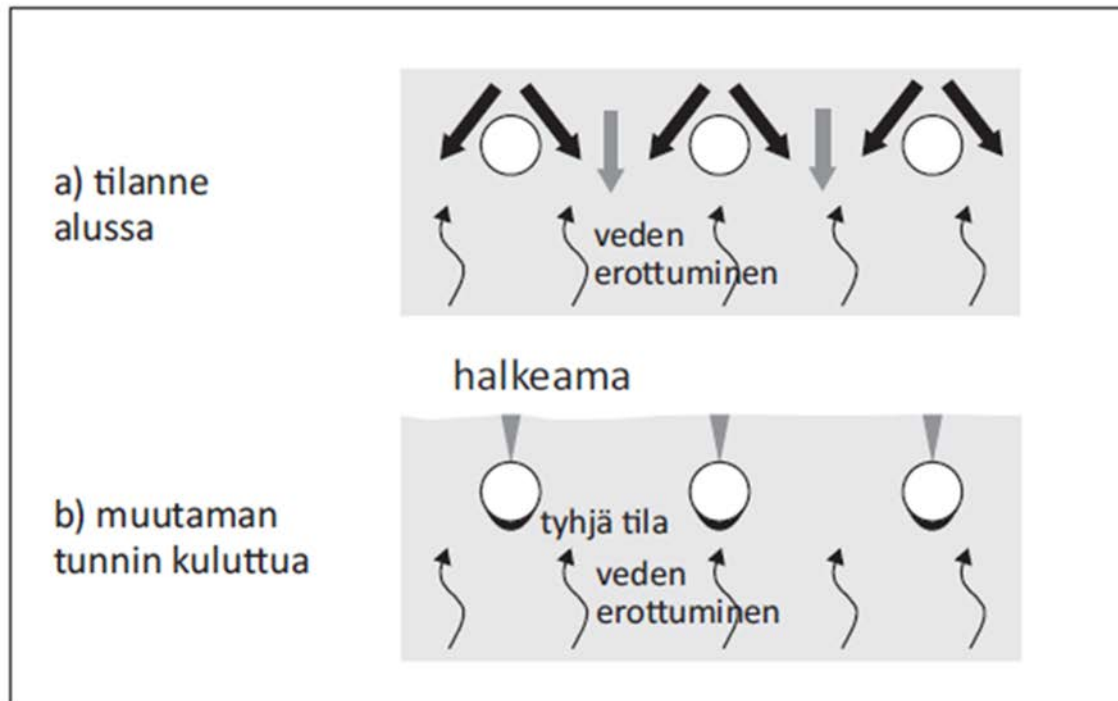


Plastinen kutistuma



Plastinen painuma

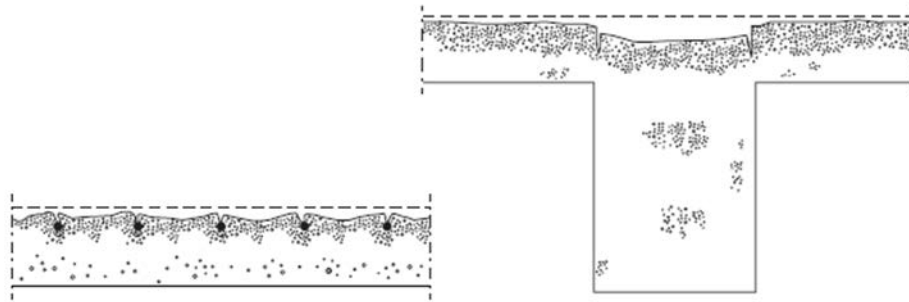
- ▶ Ennen sitoutumista tapahtuvaa pystysuuntaista kutistumista kutsutaan plastiseksi painumaksi.



Plastisen painuman syntymekanismi

Plastinen painuma

- ▶ Plastinen painuma johtuu veden erottumisesta betonimassasta ja sen seurauksena tapahtuvasta tilavuuden muutoksesta
- ▶ Tuoreesta betonista erottuu vettä, koska kiviaines ja sementti vettä painavampina pyrkivät painumaan alaspäin ja vesi pyrkii kevyempänä nousemaan ylöspäin betonin pintaan.
- ▶ Vesi voi myös siirtyä esimerkiksi muottien rajapintoja myöten ylöspäin ja muottien rakojen kautta ulos tai imeytyä huokosiin muottipintoihin.
- ▶ Jos tilavuuden muutos on estetty esimerkiksi poikkileikkauksessa olevien epäjatkuvuuskohtien, raudoitustankojen ja muottisiteiden kohdalla tai kitkan takia, kriittisiin kohtiin voi tulla plastisesta painumasta halkeamia



Plastinen painuma

- ▶ Plastisen painuman suhteellinen arvo voi olla epäedullisissa tapauksissa jopa 1 %, ja rakenteen pinnassa voi olla useiden millimetrien levyisiä halkeamia, jotka kuitenkin sulkeutuvat nopeasti rakenteen sisälle paimentäessä.
- ▶ Sementin sitoutumisajan pidentyminen lisää veden erottumista ja plastista painumaa. Tämä korostuu kylmissä olosuhteissa, koska lämpötilan aleneminen siirtää sitoutumisen alkua.
- ▶ Mitä pidempään betoni on plastisessa tilassa, sitä enemmän veden erottumiselle jää aikaa. Toinen tekijä on betonin vesimäärä, jonka kasvu lisää erottuvan veden määrää.
- ▶ Erottuvan veden määrä on yleensä suuri betoneilla, joilla sementtimäärä on pieni eikä notkistavia lisäaineita ole käytetty.

Plastinen painuma



Autogeeninen kutistuma

- Autogeenista kutistumaa kutsutaan usein myös sitoutumiskutistumaksi tai kemialliseksi kutistumaksi.
- Betonissa oleva sementti reagoi veden kanssa muodostaen hydrataatiotuotteenaan sementtikiveä, jonka tilavuus on pienempi kuin alkuperäinen sementin ja veden yhteenlaskettu tilavuus.
- Tämän reaktion seurauksena betoniin syntyy vetojännityksiä, joka kutistaa betonia.

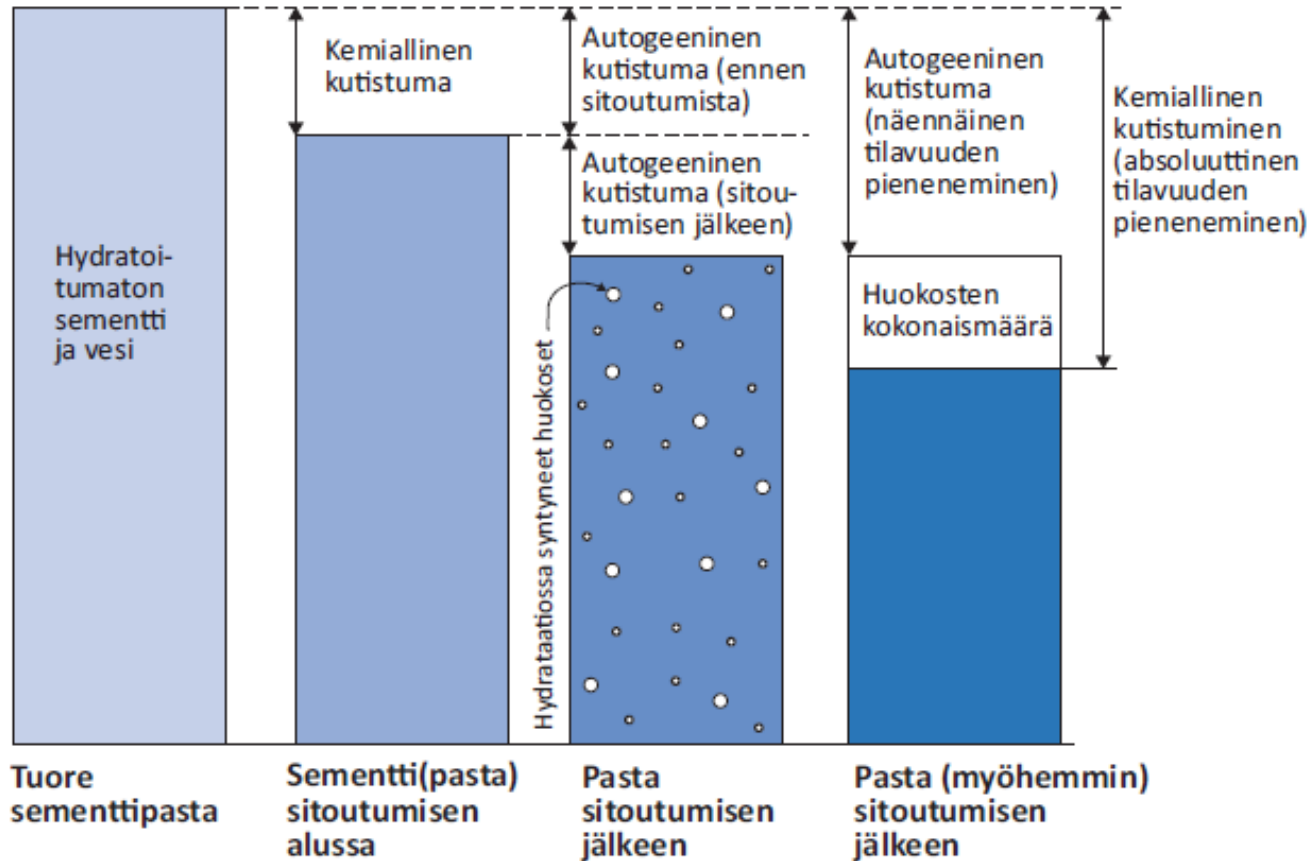
Autogeeninen kutistuma (jatkuu)

- Autogeenisen kutistuman merkitys kasvaa, kun betonin vesi-sementtisuhte laskee alle 0,45
-
- Betoneilla, joiden vesi-sementtisuhte on 0,30, autogeenisen kutistuman suuruus voi olla noin puolet kuivumiskutistuman suuruudesta.
- Autogeeninen kutistuma ei käytännössä ole ongelma tavanomaisilla betonilaaduilla joiden lujuus on C20/25 – C30/37

Autogeeninen kutistuma (jatkuu)

- Alhaisen vesi–sementtisuhteen betoneilla autogeenisen kutistuma ilmenee ensimmäisten vuorokausien aikana
- Joissain tapauksissa betoniin ilmestyy ensimmäisiä halkeamia jo jälkihoidon aikana
- Autogeenistä kutistumaa tapahtuu vaikka betoni olisi veden alla

Autogeeninen kutistuma (jatkuu)



Kuva 3.2.6. Kemiallisesta ja autogeenisestä kutistumasta johtuva tilavuuden muutos tuoreessa ja kovettuneessa sementtipastassa.

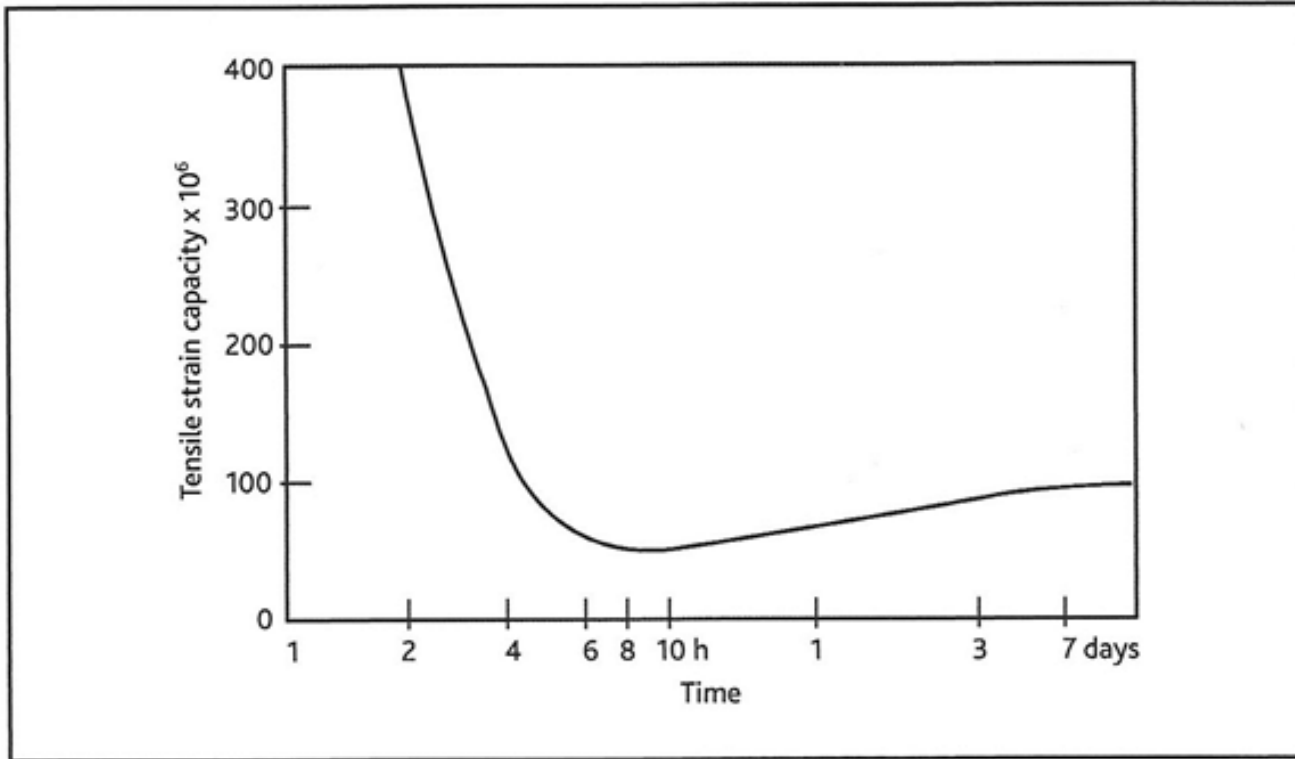
Lämpöliikkeet ja halkeilu

- ▶ Muutokset betonirakenteen lämpötilassa aiheuttavat rakenteessa tilavuuden muutoksia
- ▶ Betoni laajenee lämpötilan noustessa ja kutistuu lämpötilan laskiessa
- ▶ Kovettuneen betonin lämpölaajenemiskerroin on suuruusluokkaa $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, mikä vastaa 0,1 mm pituudenmuutosta lämpötilan muuttuessa 10 astetta.
- ▶ Betonin lämpölaajenemiskerroin on:
 - Tuore betoni noin $20 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
 - 8 – 24 h vanhan betonin noin $15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ja
 - 2 – 7 vuorokautta vanhan $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Lämpöliikkeet ja halkeilu

- ▶ Betonin kovettumisreaktiossa syntyy lämpöä joka nostaa nuoren betonin lämpötilaa. Kovettumisreaktioiden hidastuessa lämpötila laskee.
- ▶ Lämpötila nousuun vaikuttaa käytettävät sideaineet ja niiden määrä, betonimassan lämpötila, ympäristön lämpötila, muotit ja suojaus sekä rakenteen mitat.
- ▶ Lämpötila voi myös muuttua ulkoisten olosuhteiden takia (esim. ulkona olevat rakenteet)

Lämpöliikkeet ja halkeilu

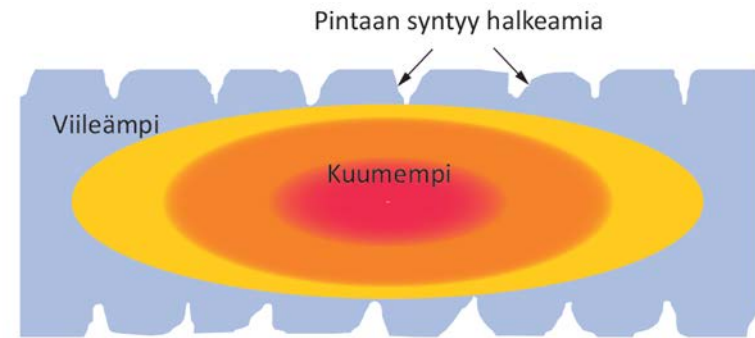
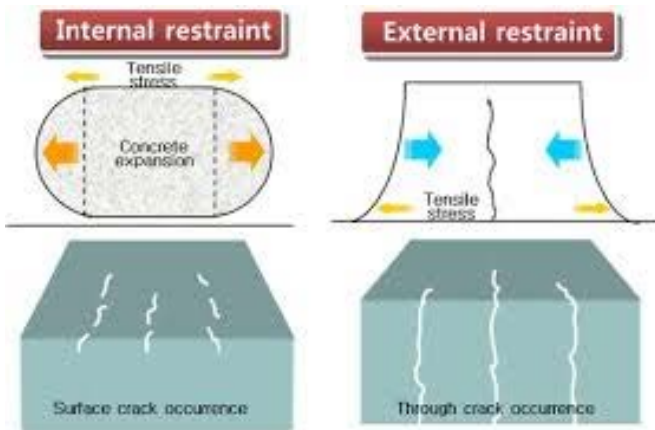


Betonin venymäkapasiteetti varhaisvaiheessa

Lämpöliikkeet ja halkeilu

- ▶ Jos tämä liike ei pääse tapahtumaan vapaasti syntyy rakenteeseen vetojännityksiä
- ▶ Jos lämpötilamuutosten aiheuttamat vetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden rakenne halkeaa (kovettuneen betonin vetolujuus on suuruusluokkaa 1 – 3 N/mm² ja murtovenymä noin 0,1 ‰)
- ▶ Käytännössä halkeilun aiheuttaa **lämpötilaero** kovettuvan rakenteen eri osien välillä, tai kovettuvan betonin ja aikaisemmin valetun rakenteen välillä
- ▶ Kovettumisvaiheen lämpötilaerojen aiheuttamat halkeamat syntyvät yleensä 1 – 3 vuorokauden kuluttua valusta.
- ▶ Kriittinen vaihe on monesti muottien purku massiivisissa rakenteissa ja talvivaluissa

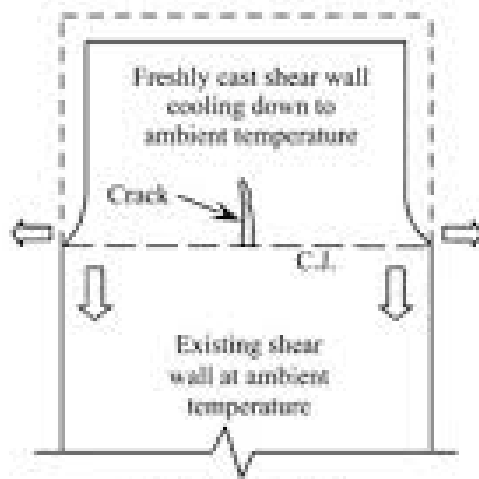
Lämpöliikkeet ja halkeilu



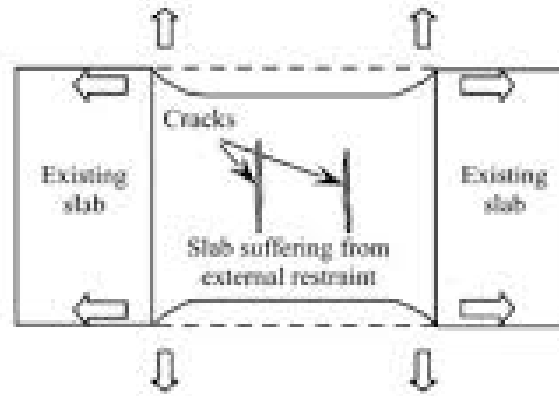
Vasemmalla rakenteen eri osien lämpötilaeroista johtuvaa halkeilua ja oikealla eri aikaan valettujen rakenteiden lämpötilaero

Rakenteen eri osien lämpötilaeroista johtuvaa halkeilua

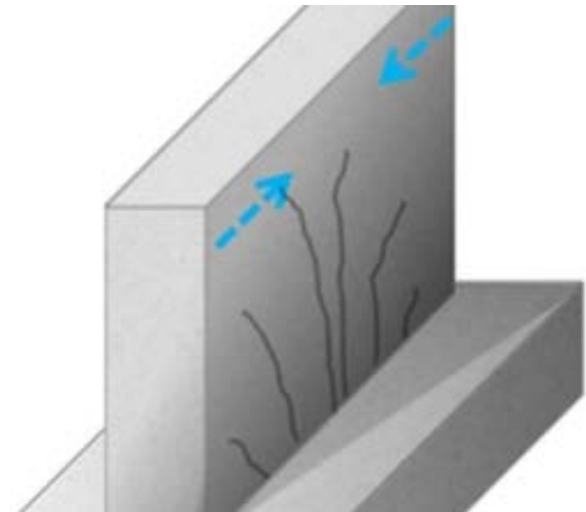
Lämpöliikkeet ja halkeilu



(a) edge restraint



(b) end restraint



Kovettuneen betonin mikrorakenne

Betonin mikrorakenne

- ▶ Betonin sisäisellä mikrorakenteella ratkaiseva merkitys betonin kaikkiin ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen
- ▶ Koostumuksen vaikutus mikrorakenteeseen on suurin, mutta myös valmistus ja olosuhteet vaikuttavat
- ▶ Päättöpäin katsoen betoni näyttää kiinteältä homogeeniseltä materiaalilta
- ▶ Todellisuudessa se on yhdistelmämateriali, jossa sementtikivi sitoo toisiinsa kiviainesrakeet
- ▶ Sementtikivellä tarkoitetaan sementin ja veden eli sementtipastan (sementtiliiman) kovettumistulosta. Sementtikivi koostuu hydrataatiotuotteista, jäljellä olevasta hydratoitumattomasta sementistä, vedestä sekä huokosista
- ▶ Sementtikivi on myös se osa betonia joka tarttuu raudoitukseen

Betonin mikrorakenne

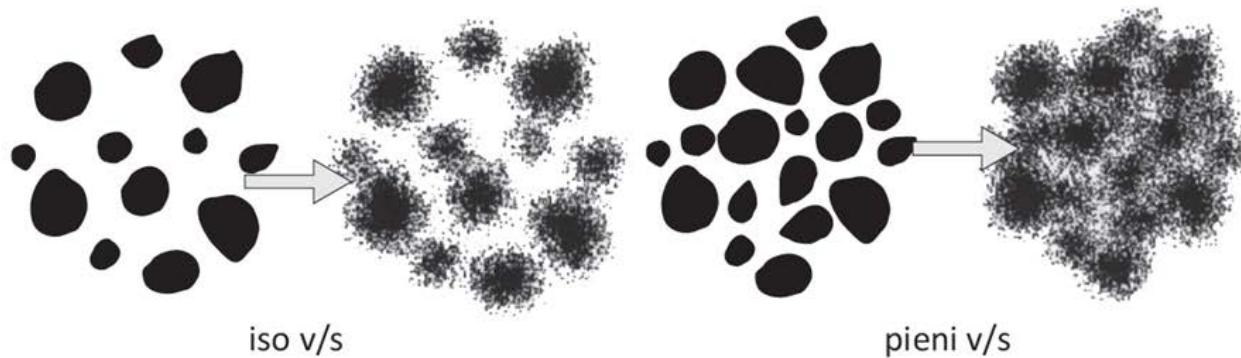
- ▶ Suomessa kiviaines on yleensä graniittia tai gneissia ja on lujaa, tiivistä, pakkasenkestävää eikä aiheuta ongelmia
- ▶ Tämän takia betonin ominaisuuksia voidaan tarkastella sementtikiven ja sen rakenteen kautta
- ▶ Betonin osa-aineiden sekoittamisen jälkeen hydrataatioreaktiot alkavat välittömästi
- ▶ Sementtirakeiden pintaan syntyy hydrataatiotuotteita (CSH, Ca(OH)_2), jotka laajenevat rakeiden pinnasta vesitilaan.
- ▶ Massa pysyy aluksi notkeana eli plastisessa tilassa, mutta alkaa muutaman tunnin kuluttua jähmettyä, kun reaktiotuotteet kasvavat kiinni toisissaan.
- ▶ Määrätyn ajan kuluttua betoni ei ole enää työstettävää ja betonin lujuudenkehitys käynnistyy.

Betonin mikrorakenne

- ▶ Tätä vaihetta kutsutaan betonin sitoutumiseksi.
- ▶ Sitoutuminen alkaa tavanomaisilla betonilaaduilla yleensä noin 2...4 tunnin kuluttua betonimassan sekoituksesta, kun massan lämpötila on +20 °C
- ▶ Matalissa lämpötiloissa sitoutumisen alku voi siirtyä useita tunteja myöhemmäksi ja toisaalta lämpimissä olosuhteissa sitoutuminen alkaa edellistä huomattavasti nopeammin.
- ▶ Esimerkiksi 10 °C:n nousu betonimassan lämpötilassa tarkoittaa sitoutumisajan puoliintumista ja vastaavasti lämpötilan lasku sitoutumisajan kaksinkertaistumista.
- ▶ Sitoutumisaikaan vaikuttavat lämpötilan ohella sementtityyppi sekä vesi-sementtisuhte Sitoutumisaikaa voidaan myös säädellä kiihdyttävillä tai hidastavilla lisäaineilla.
- ▶

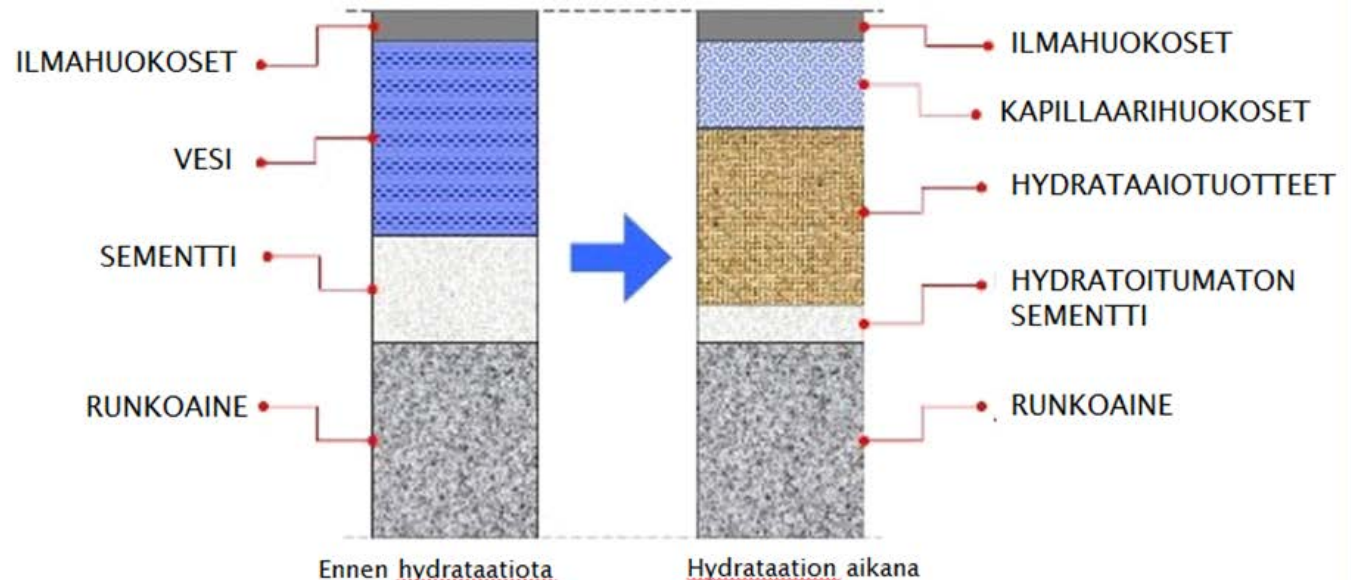
Betonin mikrorakenne

- ▶ Mitä pienempi betonin vesi–sementtisuhte (v/s) on, sitä nopeammin sementin hydrataatiotuotteet kasvavat kiinni toisiinsa ja betonimassa sitoutuu.



Betonin mikrorakenne

- ▶ Sementtikiveen sisään jää hydratoitumatonta sementtiä erityisesti betonin vesi–sementtisuhteen (v/s) ollessa alhainen (alle 0,4), koska tällöin betoni ei sisällä riittävästi vettä koko hydrataatioreaktiota varten



Betonin osa-aineiden osuudet ennen hydrataatiota ja sen aikana. Kovettunut betoni muodostuu runkoaineesta sekä hydrataatio tuotteiden, hydratoitumattoman sementin, huokosten ja veden muodostamasta sementtikivestä.

Betonin mikrorakenne

- ▶ Sementtikivessä on useita erilaisia huokosia: geelihuokosia, kapillaarihuokosia, supistumishuokosia, suojahuokosia ja tiivistyshuokosia
- ▶ Sementtigelikiteiden väliin jää vapaata vesitäytteistä tilaa, jota kutsutaan geelihuokosiksi
- ▶ Tämä tila on niin pieni (1...5 nm), että veden liikkeet huokosissa ovat hyvin hitaita eikä niissä oleva vesi (geelivesi) yleensä jäädy. Geelihuokosia on noin 25...30 % sementtigelin kokonaistilavuudesta
- ▶ Betonin työstettävyys vaatii yleensä vesi-sementtisuhdetta 0,4 suuremman vesimäärän käyttöä. Tällöin ketjuuntuneiden sementtipartikkeleiden väliin jää suurempia vesitäytteisiä tiloja, joita gelikiteet eivät voi täyttää. Näin syntyviä tiloja kutsutaan kapillaarihuokosiksi

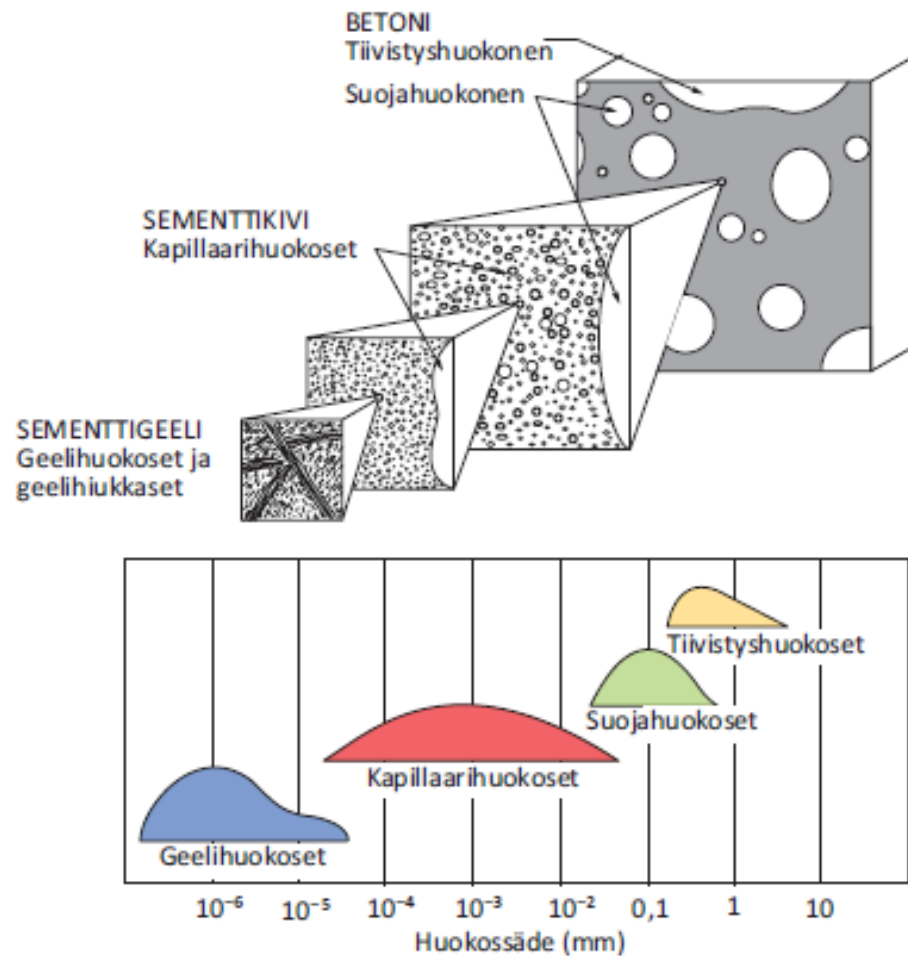
Betonin mikrorakenne

- ▶ Sementtikiven kapillaarihuokoisuus kasvaa betonin vesi-sementtisuhteen kasvaessa ja laskee hydrataation edetessä, kun yhä suurempi osuus kokonaisvedestä sitoutuu.
- ▶ Jos vesi-sementtisuhte (v/s) on alle 0,4, täysin hydratoituneessa betonissa ei ole lainkaan kapillaarihuokosia.
- ▶ Jos taas vesi-sementtisuhte on alle 0,6, kapillaarihuokosverkko täysin hydratoituneessa betonissa ei ole jatkuva eikä kapillaarinen liike siten ole mahdollinen
- ▶ Käytännössä raja-arvot ovat hieman pienemmät, koska betoni on epähomogeenistä eikä koskaan hydratoidu täysin

Betonin mikrorakenne

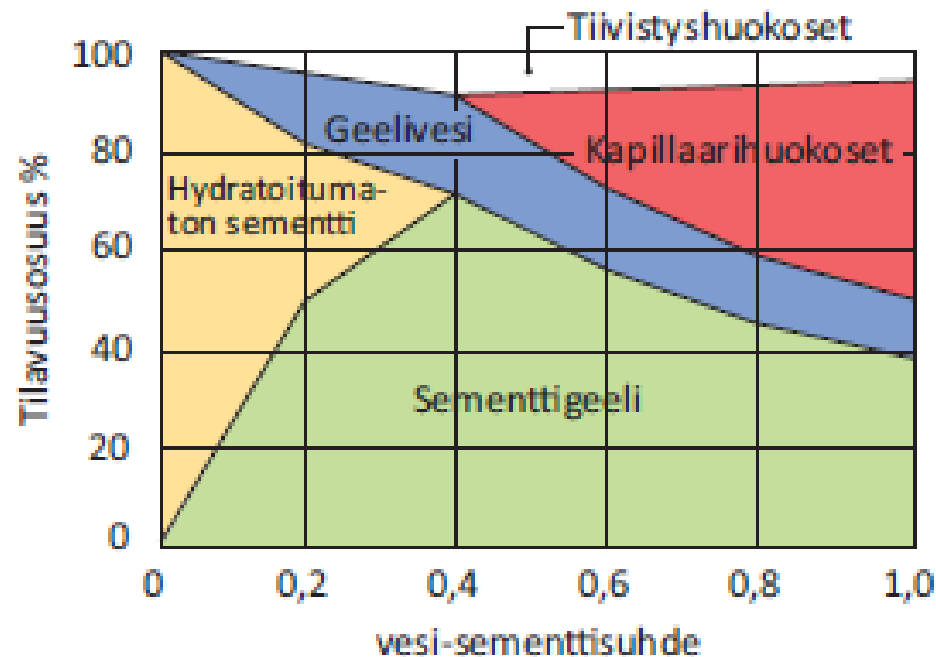
- ▶ Sementtigeeli sulkee läpimenevät kapillaarihuokokset vesi-sementtisuhteesta riippuen määrättyssä vaiheessa.
- ▶ Tämä tapahtuu vesi-sementtisuhteen arvolla 0,4 noin kolmen vuorokauden ja arvolla 0,6 noin kuuden kuukauden kuluttua veden ja sementin sekoituksesta.
- ▶ Jos vesi-sementtisuhte on suurempi kuin 0,7, kapillaarihuokosto ei sulkeudu lainkaan

Betonin mikrorakenne



Kuva 3.4.2. Kaaviokuva betonin huokosrakteesta sekä betonin sisältämien erilaisten huokosten koot huokossätein (mm) mitattuna.

Betonin mikrorakenne



Kuva 3.4.3. Täysin hydratoituneen sementtikiven eri osien tilavuusosuudet vesi-sementtisuhteen muuttuessa. Vesi-sementtisuhteen ollessa alle 0,4 täysin kovettuneessa betonissa ei ole lainkaan kapillaarihuokosia.

Betonin mikrorakenne

- ▶ Kapillaarihuokokset ovat betonille haitallisia, koska niiden kautta vesi pääsee imeytymään betoniin sekä liikkumaan ja jäätymään betonissa.
- ▶ Kapillaarisen vedenliikkeen myötä betoniin pääsee imeytymään haitallisia aineita kuten erilaisia suoloja.
- ▶ Kapillaarihuokokset eivät siis ole toivottuja. Jos betonilta vaaditaan hyviä ominaisuuksia, tulee käyttää sellaista betonia, jossa kapillaarihuokosia on mahdollisimman vähän.
- ▶ Tästä syystä säilyvyysohjeissa asetetaan rajoituksia vesi-sementtisuhteelle
- ▶ Alhainen vesi-sementtisuhte = vähän kapillaarihuokosia = tiivis betoni

Betonin mikrorakenne

- ▶ Veden ja sementin reaktioissa syntyvien lopputuotteiden (mm. CSH-geeli, Ca(OH)_2) tilavuus on hieman pienempi kuin lähtöaineiden.
- ▶ Tämä tilavuuden muutos aiheuttaa sementtikiveen niin sanottuja supistumishuokosia.
- ▶ Ne ovat sisältä tyhjiä, kun taas reagoimaton vesi muodostaa vesi- ja ilmatäytteisiä kapillaarihuokosia.
- ▶ Supistumishuokosten määrä on 25 % kemiallisesti sitoutuneen veden määrästä (tilavuudesta)

Betonin mikrorakenne

- ▶ Neljännen huokoslajin muodostavat suojahuokokset eli ilmahuokokset, jotka vaikuttavat erityisesti betonin pakkasenkestävyyteen.
- ▶ Suojahuokosten määrää voidaan lisätä betonin lisäaineena käytettävien huokostimien avulla.
- ▶ Suojahuokosten tilavuusosuus betonista on noin 2,5...8 % ja sementtikivistä noin 20 %.
- ▶ Huokosten koko on noin 0,01...0,8 mm, ja niiden välinen etäisyys noin 0,4 mm. Tällöin huokosjako, jolla tarkoitetaan huokosten etäisyyden keskimääräisen etäisyyden puolikasta, on noin 0,2 mm.

Betonin mikrorakenne

- ▶ Lyhyt etäisyys varmistaa, että jäätymissykliden aikana veden paineen ollessa korkea vesi virtaa kapillaarihuokosista ilmahuokosiin.
- ▶ Sulan vaiheen aikana vesi virtaa takaisin kapillaarihuokosiin.
- ▶ Veden kulkeutuminen kapillaarihuokosten ja ilmahuokosten välillä on pakkasenkestävyyden edellytys, ja siksi betoninormeissa on annettu vaatimukset kovettuneen betonin huokosjaolle
- ▶ Betonissa on myös tiivistyshuokosia, joita syntyy etenkin valun aikana muottia vasten olevissa pinnoissa, kun ilma ja vesi tärytyksen aikana kerääntyvät muotti- ja betonipinnan rajakohtaan.
- ▶ Kovettuneen betonin huokosrakenteen analyysia varten betonista voidaan ottaa näytteitä, joista valmistetaan ohuita mikroskooppisia leikkeitä, ohuthieitä. Näytteistä voidaan määrittää betonin kokonaishuokosmäärä sekä suojahuokosten määrä, pinta-ala ja huokosjako

Betonin lujuudenkehitys

- ▶ Työmaan näkökulmasta betonin valinnassa tuotantotekniset seikat ja taloudellisuus ovat tärkeitä
- ▶ Siten lujuudenkehitys, sen nopeus ja lujuudenkehityksen arviointi ovat keskeisiä työmaan kannalta
- ▶ Betonin lujuudenkehitykseen vaikuttavat :
 - Käytetty sementti ja sen määrä
 - Käytetyt seosaineet ja niiden määrät
 - Vesi-sementtisuhte
 - Lisäaineet
 - Massan lämpötila
 - Ulkoiset olosuhteet, suojaus ja lämmitys
- ▶ Sementti on ratkaisevaa lujuudenkehityksen nopeuden kannalta. On nopeasti kovettuvia ja hitaasti kovettuvia sementtejä

Betonin lujuudenkehitys

- ▶ Seosaineet kuten lentotuhka ja masuunikuona hidastavat betonin sitoutumista ja lujuudenkehitystä
- ▶ Mitä suurempia seosainemäärät ovat sitä enemmän sitoutuminen ja lujuudenkehitys hidastuvat
- ▶ Vesi-sementtisuhteen ollessa alhainen lyhenee sitoutumisaika ja varhaislujuus kasvaa
- ▶ Lisäaineilla voidaan vaikuttaa sitoutumisaikaan (kiihdyttimet ja hidastimet).
- ▶ Kiihdyttimet nopeuttavat lujuudenkehitystä alkuvaiheessa.
- ▶ Hidastimet siirtävät lujuudenkehityksen alkua mutta sen jälkeen lujuudenkehitys on normaali. Alhaisessa lämpötilassa lujuudenkehitys voi hidastimia käytettäessä hidastua jos massa jäähtyy paljon

Betonin lujuudenkehitys

- ▶ Monet notkistimet hidastavat lujuudenkehitystä ja sitoutumisen alkua viileässä
- ▶ Lämpimissä olosuhteissa notkistimien vaikutusaika usein lyhenee
- ▶ Lämpötilalla on keskeinen vaikutus lujuudenkehitykseen
- ▶ Nostamalla lämpötilaa nopeutuu lujuudenkehitys selvästi
- ▶ Lämpötilan nosto pienentää loppulujuutta joten tämä on huomioitava suhteituksessa
- ▶ Liian korkea lämpötila kovettumisen aikana voi vaurioittaa betonia
- ▶ Yli +70 °C lämpötila on jo vaarallinen
- ▶ Lämpötila noustessa yli + 50 °C on lujuuskato ehdottomasti huomioitava

Betonin lujuudenkehitys

- ▶ Betonin kovettumisreaktio tuottaa lämpöä
- ▶ Massiivisissa rakenteissa tämä monesti riittää varmistamaan lujuudenkehityksen mutta voi nousta myös liian korkeaksi
- ▶ Ohuissa rakenteissa joutuu suojaamaan ja lisälämmittämään

Betonin lujuudenkehitys

- ▶ Miksi betonin lujuus ei ole vaadittu?
 - Betonin koostumus on ollut virheellinen
 - Betonin kypsyys (kovettumisaika + lämpötila) ei ole ollut riittävä
 - Betoni on puutteellisesti tiivistetty
 - Huokostus on epäonnistunut (liika ilmaa)
 - Liian korkea lämpötila kovettumisen aikana (lujuuskato)
 - Betoni on jäänyt ennen kuin jäätymislujuus on saavutettu
 - Betoni on vaurioitunut (tärinää väärässä iässä)
 - Testausvirhe

Kovettuneen betonin ominaisuudet

- ▶ Kovettuneen betonin tärkeimpiä ominaisuuksia ovat:
 - Lujuus
 - Puristuslujuus
 - Vetolujuus
 - Kimmomoduuli
 - Viruma
 - Kutistuma
 - Murtovenymä
 - Halkeilu
 - Säilyvyys
 - Pakkaskestävyys
 - Suola pakkasrasituskestävyys
 - Raudoituksen korroosio
 - Kemiallinen kestävyys

Kovettuneen betonin ominaisuudet – Puristuslujuus

- ▶ Puristuslujuus on betonin tärkein ominaisuus.
- ▶ Myös betonitöiden kannalta puristuslujuuden asema on keskeisin.
- ▶ Betonin ominaisuuksia ja niiden kehittymistä tarkasteltaessa puristuslujuuden asema on myös sikäli keskeinen, että puristuslujuus antaa hyvän kuvan muista ominaisuuksista ja useat muut ominaisuudet ja niiden kehittyminen esitetään usein puristuslujuuden funktiona
- ▶ Alhaisella vesi-sideainesuhteella käynnistyy hydrataatioreaktio jonkin verran aikaisemmin kuin suuremmalla, lujuudenkehitys on nopeampaa ja loppulujuudet ovat suurempia.
- ▶ Lämpötilan nousu kiihdyttää hydrataatioreaktioita ja lujuudenkehitys nopeutuu.
- ▶ Seosaineet siirtävät sitoutumisen alkua ja hidastavat lujuudenkehitystä varhaisvaiheessa.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Puristuslujuus

- ▶ Puristuslujuuden kehityksen määrittämiseen ja seurantaan on meillä yleisesti käytetty nk. lujuudenkehityksen yleiskäyrästäjä. Mittaamalla rakenteen lämpötilaa voidaan Sadgroven kaavalla laskea betonin kypsyys ja verrata sitä yleiskäyrästäjiin
- ▶ Nykyisin käytössä on myös tietokoneohjelmia, joiden avulla kovettuvan rakenteen lujuudenkehitys voidaan ennustaa tarkemmin ja nopeammin.
- ▶
- ▶ Puristuslujuuden luokitus perustuu kuutiolujuuteen, joka testataan käyttäen sivumitaltaan 150 mm koekuutiota.
- ▶ 150 mm kuution sijasta voidaan käyttää myös 150 x 300 mm lieriöitä tai 200 mm kuutioita.
- ▶ Rakennekoekappaleina käytetään yleensä läpimitaltaan 100 mm, 75 mm ja 50 mm poralieriöitä.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Puristuslujuus

- ▶ Tuloksia arvosteltaessa on huomattava että eri muotoiset ja kokoiset koekappaleet eivät luonnollisesti anna samoja tuloksia.
- ▶ Suurempi koekappale antaa pienemmän lujuuden kuin pienempi koekappale.
- ▶ Tämän selittää nk. tilastollinen lujuusteoria, jonka mukaan "heikoin lenkki" on rakenteen murtumisessa määräävä.
- ▶ Mitä isompi koekappale on, sitä todennäköisempää on, että heikkoja kohtia on mukana.
- ▶ Lieriölujuuden kuutiolujuutta alempi arvo taas johtuu koekappaleen korkeuden ja leveyden suhteen suuremmasta arvosta, mikä johtaa erilaiseen murtumistapaan lieriöllä kuin kuutiolla, joiden poikkileikkausala on samaa suuruusluokkaa.

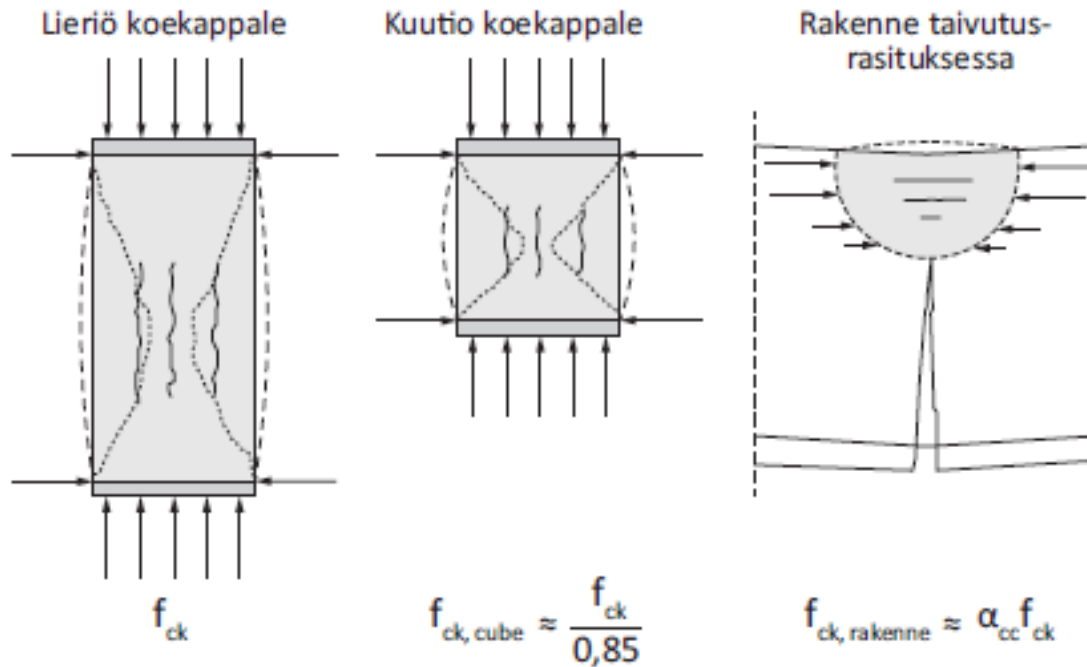
Kovettuneen betonin ominaisuudet

Puristuslujuus

- ▶ Koekappaleen muodon ja koon lisäksi puristuslujuuden suuruuteen vaikuttavat myös koekappaleen kosteus ja kuormitusnopeus.
- ▶ Kuiva koekappale antaa puristuslujuuskokeessa suuremman arvon kuin märkä koekappale.
- ▶ Myös suurempi kuormitusnopeus antaa korkeamman puristuslujuuden kuin pienempi.
- ▶ Mainittujen seikkojen vaikutuksen poistamiseksi on standardissa määrätty, milloin koekappale on otettava pois kosteasäilytyksestä ja millä nopeudella kuormituksen on tapahduttava.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Puristuslujuus



Kuva 3.5.2. Koekappaleen muodon vaikutus betonin puristuslujuuteen. Lieriökoekappaleella saatu tulos on 0,78...0,85 kertaa kuutiokoekappaleella saatu tulos.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Puristuslujuus

- ▶ Betonin puristuslujuusluokat ilmaistaan eurokoodin mukaan kirjaimella C (cylinder) ja numeroyhdistelmällä $f_{ck}/f_{ck,cube}$ (lieriölujuus/kuutiolujuus).
- ▶ Alin lujuusluokka on C12/15 ja ylin C90/105. Lujuuden yksikkönä käytetään MN/m² tai vaihtoehtoisesti MPa
- ▶
- ▶ Lujuusluokat on porrastettu alapäässä 4...5 MN/m²:n välein ja yläpäässä 10 MN/m²:n välein.
- ▶ Tavanomaisessa talonrakennustekniikassa betonin lujuusluokat ovat yleensä välillä C20/25...C50/60 ilmoitettuna viiden yksikön välein. Erikoistapauksissa ja elementtituotannossa käytetään korkealujuusbetoneita, joiden lujuusluokat ovat C55/67...C90/105.
- ▶ Esimerkki: Lujuusmerkintä C30/37 tarkoittaa, että betonin lieriölujuuden ominaisarvo on 30 MN/m² ja kuutiolujuuden ominaisarvo 37 MN/m².

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Vetolujuus

- ▶ Betonin vetolujuus vain noin 1 / 10 puristuslujuudesta.
- ▶ Käytännössä on suhteellisen vähän rakenteita, joiden mitoitus perustuu betonin vetolujuuteen, koska yleensä rakenteessa esiintyvät vetojännitykset otetaan raudoituksella.
- ▶ Tähän sääntöön on kuitenkin poikkeuksia. Yksi esimerkki ovat betonitiet, joiden mitoitus perustuu täysin betonin vetolujuuteen. Suomessa betoniteitä ei juurikaan tehdä.
- ▶ Betonirakenteen halkeilu merkitsee aina vetolujuuden ylittymistä. Se voi johtua rakenteen ulkoisista kuormista tai sisäisistä jännityksistä, esimerkiksi lämpötilan epätasaisesta jakautumasta rakenteen kovettumisen aikana tai valmiissa rakenteessa.

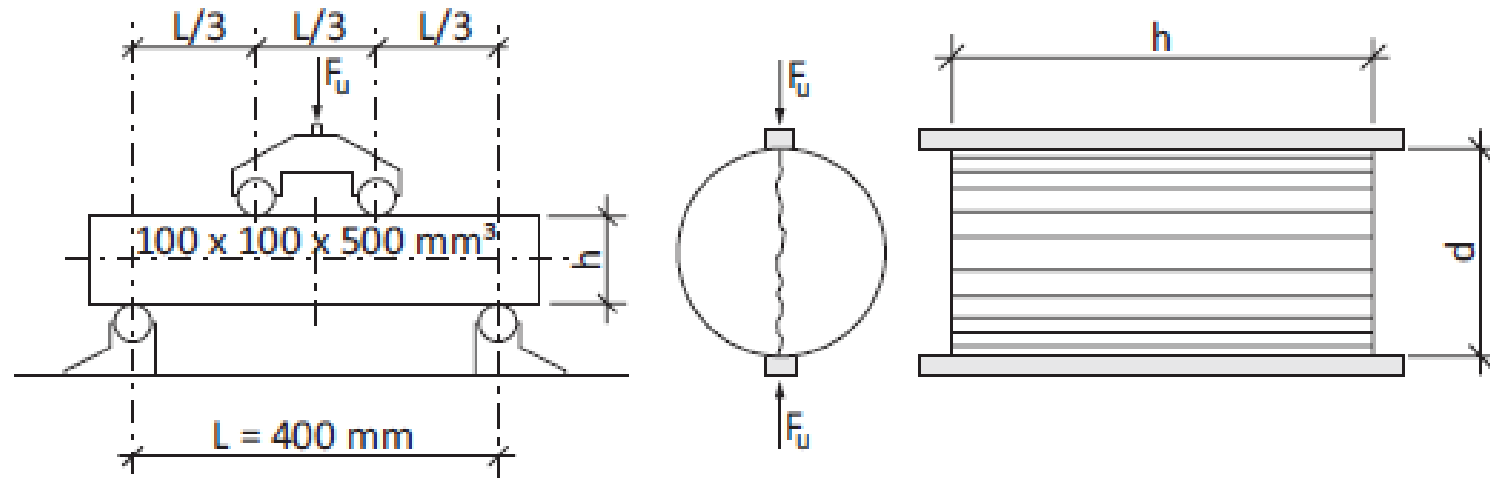
Kovettuneen betonin ominaisuudet

Vetolujuus

- ▶ Teräsbetonirakenteen halkeilu sinänsä on luonnollinen asia, mutta rakenteen suunnittelijan ja rakentajan tulee hallita halkeamien muodostuminen niiden esiintymispaikkojen, määrän ja halkeamaleveyksien suhteen niin, etteivät rakenteen toiminta ja säilyvyys vaarannu.
- ▶ Koska betonin vetolujuuden f_{ct} määrittäminen on hankala toimenpide, määritetään sen sijasta useimmiten taivutusvetolujuus $f_{ct,f}$ tai halkaisuvetolujuus $f_{ct,sp}$.
- ▶ Näistä edellinen määritetään yleensä 100 mm x 100 mm x 500 mm palkeilla ja jälkimmäinen halkaisemalla koelieriö tai -kuutio
- ▶ Taivutusvetolujuus ei ole mikään selvä materiaaliominaisuus, vaan sen arvo on riippuvainen koekappaleen suuruudesta, sisäisistä jännityksistä (lähinnä epätasaisesta kutistumisesta) ja kuormitusjärjestelyistä.
- ▶ Kappaleen kostuttaminen alentaa epätasaisen kutistumisen aiheuttamia pinnan lähellä olevia vetojännityksiä ja nostaa tällä tavalla vetolujuutta

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Vetolujuus



Kuva 3.5.5. Taivutusvetolujuuden ja halkaisuvetolujuuden koejärjestely. F_u on halkaisukuorma.

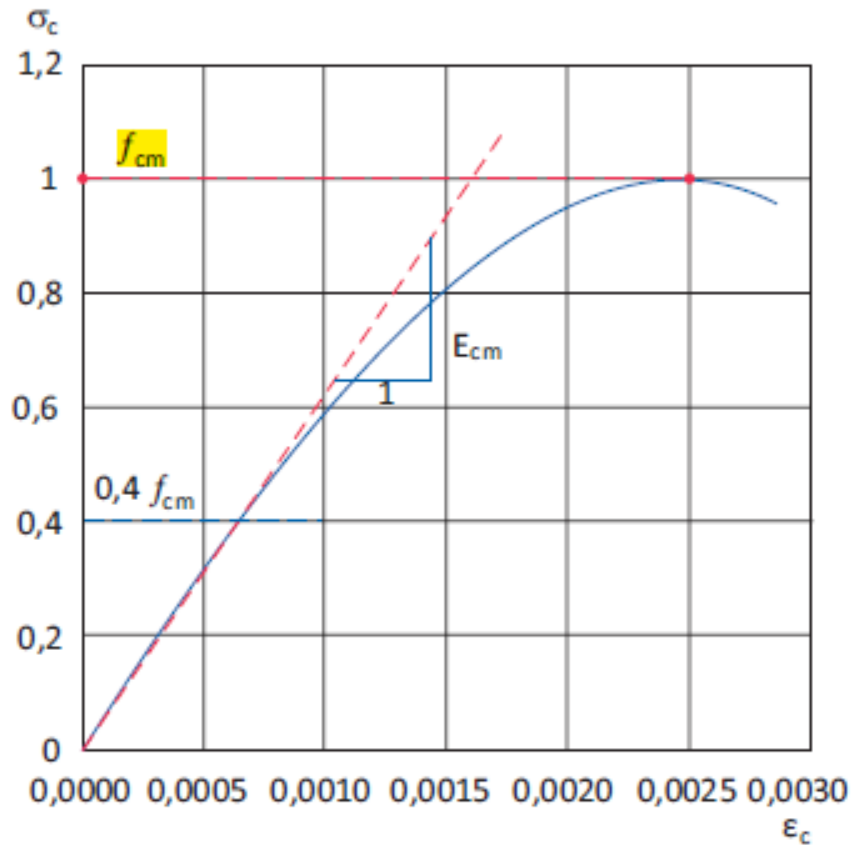
Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kimrokerroin

- ▶ Kun kiinteää kappaletta kuormitetaan, sen muoto muuttuu. Jos kuormituksen poistuessa kappaleen muoto palaa ennalleen, on kyseessä kimmainen muodonmuutos.
- ▶ Lyhytaikaisessa kuormituksessa betonin muodonmuutokset (ϵ_c) ovat palautuvia eli kimmoisia jännitystasolle $\sigma_c \approx 0,3 \dots 0,4 f_c$ saakka. Tällä jännitystasolla jännityksen σ_c ja muodonmuutoksen (ϵ_c) suhdetta kuvataan kimmokertoimella E_{cm} , joka on jännitys–muodonmuutosriippuvuutta kuvaavan käyrän kaltevuus.
- ▶ Rasituksen kasvaessa muodonmuutokset kasvavat nopeammin ja riippuvuutta kuvaava käyrä pyöristyy.
- ▶ Kimmokerrointa käytetään pääsääntöisesti käyttörajatilatarkasteluissa, joissa jännitystaso on alhainen. Kimmokertoimesta käytetään myös nimitystä kimmomoduuli.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kimmo kerroin



Kuva 3.5.8. Betonin jännitys-
muodonmuutosriippuvuus. Jännityksen (σ_c) ja muodon-
muutoksen (ϵ_c) suhdetta
kimmoisalle jännitystasolle
saakka kuvataan kimmo-
kertoimella E_{cm} .

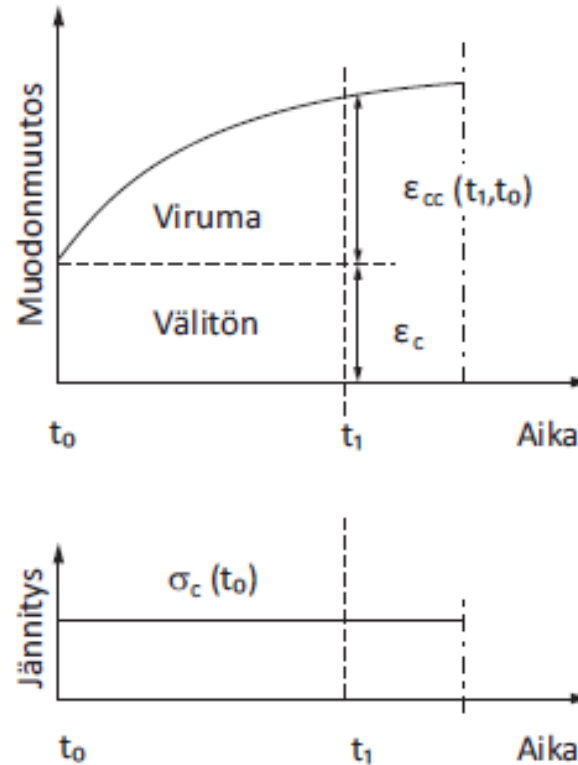
Kovettuneen betonin ominaisuudet

Viruma

- ▶ Viruma on muodonmuutos (ϵ_{cc}), joka tapahtuu kuormitetussa betonissa ajan kuluessa
- ▶ Käytännön rakenteissa viruma ilmenee vähitellen lisääntyvänä taipumana.
- ▶ Taipumat voivat kasvaa muutamassa kymmenessä vuodessa 2...3-kertaisiksi välittömään kimmoisaan muodonmuutokseen verrattuna.
- ▶ Viruma on yleensä haitallinen ilmiö muodonmuutosten lisääntymisen takia, mutta joissakin tapauksissa se saattaa pienentää jännityshuippuja, vähentää halkeilua ja parantaa kestävyyttä.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Viruma



Kuva 3.5.9. Viruma (ϵ_{cc}) on muodonmuutos, joka tapahtuu kuormitetussa betonissa ajan kuluessa.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Viruma

- ▶ Viruman suuruuteen vaikuttavat
 - betonin ikä kuormitus hetkellä
 - betonin lujuusluokka
 - ympäristön kosteus
 - rakenteen mitat
 - kuormituksen aiheuttama jännitystaso
 - kuormituksen kesto.
- ▶ Virumista esiintyy kaikkien jännitystapausten yhteydessä (puristus, veto, taivutus, leikkaus, vääntö).
- ▶ Viruman vaikutus kokonaismuodonmuutokseen on huomattava.
- ▶ Kuivissa sisätiloissa viruma on kimmoiseen muodonmuutokseen nähden noin kolminkertainen, mutta ulko-olosuhteissa yhtä suuri.
- ▶ Rakennesuunnittelija ottaa viruman huomioon normien mukaisesti.
- ▶ Virumasta aiheutuva muodonmuutos määritetään virumaluvun (ϕ) avulla.
- ▶ Myös rakenteen poikkileikkauksen koko vaikuttaa. Ison poikkileikkauksen viruma tapahtuu hitaammin kuin pienen.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Viruma

- ▶ Vaikka rakennesuunnittelija ottaa omalta osaltaan viruman huomioon laskelmissaan, myös työmaan on oltava tietoisia sen vaikutuksista ja määrätyissä tapauksissa ryhdyttävä toimenpiteisiin.
- ▶ Kovettumisvaiheessa olevan betonin viruma on huomattavasti suurempi kuin täysin kovettuneen betonin.
- ▶ Kuormittaminen 7 vuorokauden iässä voi johtaa jopa 30...40 % suurempiin virumasta johtuviin muodonmuutoksiin kuin kuormittaminen 14 vuorokauden iässä.
- ▶ Näin ollen esimerkiksi varhain purettavien taivutettujen rakenteiden muottien alle on syytä laittaa väliaikaiset tuet liian suuren taipumisen estämiseksi.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Viruma

- ▶ Toisaalta ei-kantavien väliseinien halkeiluvaaran pienentämiseksi voi kuitenkin olla parempi jättää välituenta tekemättä, sillä kokonaisviruma muodostuu tällöin nopeammin.
- ▶ Näin ollen on suositeltavaa, että betonityönjohtaja varmistaa välituennan tarpeellisuuden rakennesuunnittelijalta.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

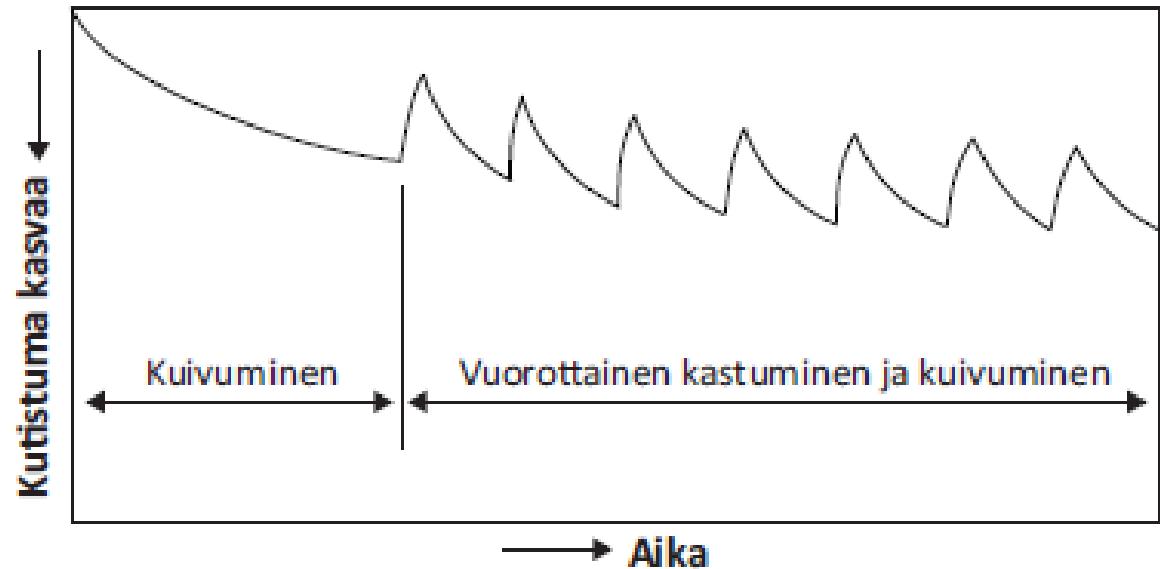
Kuivumiskutistuma

- ▶ Kovettunut betoni kutistuu kuivuessaan ja laajenee jälleen kostuessaan
- ▶ Yleensä nämä tapahtumat ovat palautuvia lukuun ottamatta osaa ensimmäisen kuivumisen aikana tapahtuvasta kutistumasta
- ▶ Kuivumiskutistuma kovettuneessa betonissa johtuu veden poistumisesta rakenteesta ja sen seurauksena tapahtuvasta tilavuuden muutoksesta eli kutistumasta
- ▶ Kutistuminen on suorassa suhteessa rakenteesta poistuvaan kosteuteen. Kosteus, joka ei sitoudu kemiallisesti eikä jää pysyvästi betonin pienimpiin huokosiin, voi poistua rakenteesta.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuma

Kuva 3.5.10. Rakennekosteuden poistuminen aiheuttaa betonin kutistumista, joka hidastuu aikaa myöten. Kuivumiskutistuminen on palautumatonta. Betonin kastumien ja kuivuminen myöhemmällä iällä aiheuttaa kutistumista ja paisumista, joka on palautuvaa.



Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuma

- ▶ Rakenteen mitat ja muoto sekä vallitsevat olosuhteet vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti kosteutta voi poistua.
- ▶ Kosteus poistuu ensin rakenteen pintakerroksista ja viimeiseksi rakenteen sisäosista.
- ▶ Kosteus jakaantuu rakenteessa epätasaisesti ja aiheuttaa pintaosiin vetojännityksiä ja vastaavasti sisäosiin puristusjännityksiä.
- ▶ Massiivisissa rakenteissa on mahdollista, että kosteus ei poistu rakenteen sisäosista koskaan rakenteen käyttöiän aikana. Näin ollen rakenne ei myöskään kutistu sisäosistaan.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuma

- ▶ Betonin kutistumisen määrään vaikuttavat betonin koostumus ja ympäristöolosuhteet.
- ▶ Mitä enemmän betonimassassa on vettä ja sementtiliimaa, sitä suurempi on kutistuma.
- ▶ Rakenteen kuivuminen voi myös tapahtua vain yhdeltä sivulta, esimerkiksi maanvaraisissa laatoissa, jolloin kosteuden jakautuminen rakenteessa on epätasaista.
- ▶ Tästä voi olla seurauksena laatan reunojen käyristyminen ja nurkkien nousu, jotka voivat edelleen johtaa halkeiluun, kun rakennetta kuormitetaan (omapaino, ulkoiset kuormat).
- ▶ Nurkkien nousua tapahtuu yleensä noin 1...2 metrin alueella nurkasta, ja nurkan nousu voi olla useita millimetrejä.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuma

- ▶ Kosteuden poistuminen rakenteesta käynnistyy heti, kun muotit puretaan tai avoimilta pinnoilta haihtumista estävät suojapeitteet poistetaan.
- ▶ Jos kutistuminen on estetty eikä betonin vetolujuus ole riittävä vastaanottamaan syntyviä jännityksiä, rakenteeseen syntyy halkeamia.
- ▶ Kutistumishalkeilulle erityisen riskialttiita rakenteita ovat ohuet laatat, seinät sekä maanvaraiset ja kelluvat lattialaatat.
- ▶ **Betonin kutistumista lisää**
 - betonin vesimäärän lisääminen
 - hienoainesmäärän (sementin ja fillerin) lisääminen
 - betonin huokostaminen
 - ympäristön kuivuus
 - kevytsoran käyttö

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuman aiheuttama halkeilu

- ▶ Betonin kuivumiskutistumisen aiheuttamia halkeamia syntyy, kun kutistuminen ei voi tapahtua vapaasti.
- ▶ Betoni kuivuu hitaasti, minkä vuoksi kuivumiskutistumisen aiheuttamia halkeamia syntyy pitkän ajan kuluessa.
- ▶ Kuivumiskutistuminen johtuu sementtikiven tilavuuden pienenemisestä, kun vesi haihtuu sen huokosista.
- ▶ Kutistumista tapahtuu sitä vähemmän, mitä enemmän betonissa on kiviainesta, joka vastustaa kutistumista
- ▶ Kuivumiskutistuminen pienenee myös, jos betonimassan vesimäärää vähennetään.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuman aiheuttama halkeilu

- ▶ Koska vesi haihtuu betonista pinnalta, halkeamia syntyy usein rakenteen pintaosaan
- ▶ Syntyvät halkeamat ovat yleensä verkkomaisia, ja niitä on usein vaikea erottaa kovettumisvaiheen lämpötilaerojen aiheuttamista halkeamista.
- ▶ Kuivumiskutistuminen voi aiheuttaa halkeamia myös, jos toisissaan kiinni olevat rakenneosat kutistuvat eri nopeudella tai niiden loppukutistumat ovat erikokoiset.



Kuva 4.1.3. Plastisesta kutistumasta (vasemmalla) ja kuivumiskutistumasta (oikealla) aiheutunutta betonilattian halkeilua (kuvat Pentti Lumme).

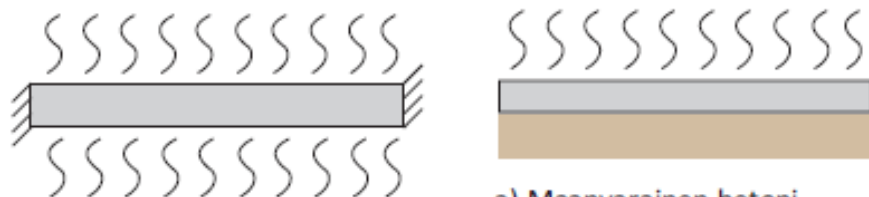
Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuman aiheuttama halkeilu

- ▶ Koska vesi haihtuu betonista pinnalta, halkeamia syntyy usein rakenteen pintaosaan
- ▶ Syntyvät halkeamat ovat yleensä verkkomaisia, ja niitä on usein vaikea erottaa kovettumisvaiheen lämpötilaerojen aiheuttamista halkeamista.
- ▶ Kuivumiskutistuminen voi aiheuttaa halkeamia myös, jos toisissaan kiinni olevat rakenneosat kutistuvat eri nopeudella tai niiden loppukutistumat ovat erikokoiset.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

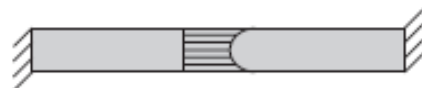
Kuivumiskutistuman aiheuttama halkeilu



a) Betonirakenne kuivuu molempiin suuntiin.



b) Kuivussa rakenne kutistuu.



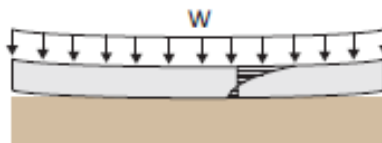
c) Koska vapaa kutistuma on estetty, rakenteeseen syntyy vetojännitys.



a) Maanvarainen betonirakenne kuivuu yhteen suuntaan.



b) Rakenne kutistuu yläpinnasta enemmän kuin alapinnasta.

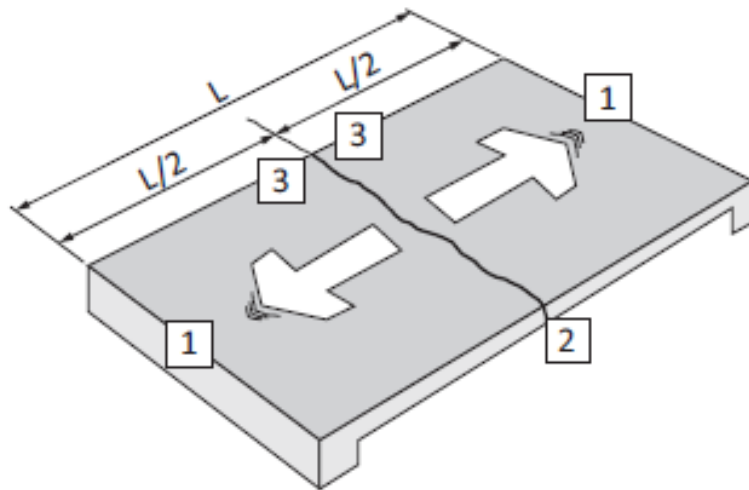


c) Laatta käyristyy kutistumakeron vaikutuksesta, ja rakenteeseen syntyy sen omasta painosta jännitys.

Kuva 4.1.6. Periaatekuva betonin kuivumiskutistuman aiheuttamista jännityksistä välipohjalaatassa ja maanvaraisessa laatassa.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuivumiskutistuman aiheuttama halkeilu



- 1 Betonilaattojen halkeamat johtuvat yleensä laatan kuivumiskutistumasta, kun kutistuminen ei voi tapahtua vapaasti.
- 2 Ilman kunnollista raudoitusta ja huolellista valutyötä jälkihoitoineen rakenteeseen syntyy ainakin yksi halkeama.
- 3 Halkeama syntyy yleensä pitkän sivun puoleenvälin jakaen laatan kahteen osaan.

Kuva 4.1.7. Periaatekuva halkeaman synnystä betonilaattaan.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Pakkasenkestävyys

- ▶ Betonin pakkasenkestävyydellä tarkoitetaan sen kykyä kestää vaurioitumatta toistuvaa jäätymistä ja sulamista.
- ▶ Betonilta vaadittava pakkasenkestävyys riippuu rakenteen käyttöolosuhteista
- ▶ Pakkasrasituksen voimakkuuteen vaikuttaa erityisesti betonin kosteuspitoisuus ja suolat
- ▶ Pakkasrasituksen aiheuttama vaurioituminen ilmenee aluksi betonin pintaosien rapautumisena (ulkoinen pakkasvaurio) tai sisäisenä halkeiluna (sisäinen pakkasvaurio).
- ▶ Jäätyvä vesi aiheuttaa betonin pakkasrasituksessa syntyvät voimat kapillaarihuokosissa, joiden määrä riippuu ratkaisevasti vesisementtisuhteesta.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Pakkasenkestävyys

- ▶ Geelihuokosissa oleva vesi ei käytännössä jäädy lainkaan johtuen näiden huokosten pienestä koosta.
- ▶ Betonin lämpötilan laskiessa, jäätyy ensin sen suurimpien kapillaarihuokosten sisältämä vesi.
- ▶ Koska veden tilavuus kasvaa sen jäätyessä 9 %, työntyy kapillaarihuokosissa oleva ylimääräinen vesi jäätyvän veden tieltä
- ▶ Tämä aiheuttaa betoniin sisäistä hydraulista painetta. Jäätymisen toistuessa tämä sisäinen paine rikkoo vähitellen betonin pinnasta alkaen.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Pakkasenkestävyys

- ▶ Pakkasrasituksen vaikutusta lisäävät huomattavasti merivedessä olevat suolat tai jään ja lumen sulatukseen käytettävä tiesuola.
- ▶ Tämän johdosta suolaisen veden kanssa tekemisiin joutuviissa rakenteissa on erityistä huomiota kiinnitettävä betonin pakkasenkestävyyteen.
- ▶ Tällaisia rakenteita ovat mm. merirakenteet, sillat ja pysäköintitalot
- ▶ Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan parhaiten parantaa säätelämällä betonin huokosrakennetta
- ▶ Pyrittäessä hyvään pakkasenkestävyyteen tulee betoni tehdä käyttäen mahdollisimman pientä vesi-sementtisuhdetta, jotta kapillaarihuokoisuus jäisi mahdollisimman alhaiseksi, ja hyvää jälkihoitoa, jotta hydrataatioaste saataisiin mahdollisimman korkeaksi.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Pakkasenkestävyys

- ▶ Kun vesi–sementtisuhteen arvo on yli 0,60...0,65, kapillaarihuokosverkostosta muodostuu yhtenäinen.
- ▶ Tämä alentaa merkittävästi betonin lujuutta, lisää sen läpäisevyyttä ja heikentää säilyvyyttä.
- ▶ Betonin pakkasenkestävyyttä voidaan parantaa myös lisähuokostamalla.
- ▶ Huokostavia lisäaineita käyttämällä sementtikiveen saadaan syntymään läpimitaltaan noin 0,01...0,5 mm olevia huokosia eli niin sanottuja *suojahuokosia*, jotka eivät kapillaarisen imun vaikutuksesta täyty vedellä.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Pakkasenkestävyys

- ▶ Kapillaarihuokosissa olevan veden jäätyessä syntyneiden jääkiteiden kasvun aiheuttama paine pääsee purkautumaan näihin täyttymättömiin ilmahuokostiloihin (hydraulisen paineen teoria), tai jääkiteet voivat kasvaa näissä ilmahuokosissa painetta aiheuttamatta (jääkiteen kasvun teoria), ja jos ilmahuokosia on riittävästi, pakkasvaurioita ei pääse syntymään
- ▶ Ilmatäytteisiä suojahuokosia tulee olla riittävän tiheässä, jotta pakkasvaurioita ei pääse syntymään.
- ▶ Suojahuokostuksen tavoitearvot riippuvat siitä, miten hyvin muu huokosrakenne säätelee pakkasenkestävyyttä.
- ▶ Jos kapillaarihuokoisuus on alhaisella vesi-sementtisuhteella onnistuttu saamaan vähäiseksi, jäätyvän veden määrä on myös vähäinen ja näin ollen alhaisempi suojahuokostuksen määrä riittää.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Pakkasenkestävyys

- ▶ Riittävä pakkas-suolakestävyys ja pakkasenkestävyys voidaan saavuttaa jo varsin pienelläkin suojuhuokostuksella, kun käytetään korkealujuuksia betoneita ($> C55/67$)
- ▶ Kuitenkin tavanomaisella lujuustasolla ($\leq C50/60$) betonin suojuhuokostaminen on tarpeellista pakkasenkestävyyden varmistamiseksi.



Kuva 4.5.1. Vasemmalla pakkasrapautunut betoniantura ja oikealla pakkas-suolarapautuneet betonirappuset (kuvat Risto Mannonen).

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Raudoituksen korroosio

- ▶ Teräksen ruostuminen kosteassa ilmatilassa kuuluu sen luonteeseen
- ▶ Ruostuessaan rauta pyrkii muuttumaan takaisin niiksi yhdisteiksi, joina sitä luonnossa esiintyy.
- ▶ Ruostuminen on sähkökemiallinen tapahtuma, mikä tarkoittaa, että kemiallisten ainekomponenttien lisäksi myös sähkövaraukset ottavat osaa reaktioihin.
- ▶
- ▶ Korroosion seurauksena raudoituksen pinnasta liukenee materiaalia, mikä johtaa raudoitteiden poikkileikkauksen pienenemiseen heikentäen rakenteen kantavuutta.
- ▶ Teräsbetonirakenteissa betoni antaa raudoitukselle ruostumista estävän kemiallisen ja fysikaalisen suojan.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Raudoituksen korroosio

- ▶ Betonin raudoitusta kemiallisesti suojaava vaikutus johtuu betonin emäksisyydestä – betonin huokosveden pH-arvo on noin 13...14 – sekä terästen ominaisuudesta muodostaa pinnalleen emäksisessä ympäristössä oksidikalvo.
- ▶ Ilmiötä kutsutaan passivoitumiseksi, koska oksidikalvo estää korroosion etenemisen teräksessä.
- ▶
- ▶ Betonin antama fysikaalinen suoja perustuu siihen, että korroosiolle välttämättömien aineiden tai sitä edistävien aineiden pääsy raudoituksen pinnalle hidastuu (betonipeitteen tiiviys ja paksuus).
- ▶
- ▶ Raudoituksen korroosio voi alkaa, jos ympäröivässä betonissa tapahtuu muutoksia, jotka poistavat raudoitukselta betonin sille antaman fysikaalisen ja kemiallisen suojan.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Raudoituksen korroosio

- ▶ Fysikaalisia muutoksia ovat esimerkiksi betonin rapautuminen tai halkeilu.
- ▶ Kemiallinen suoja puolestaan häviää, kun betoni ilman hiilidioksidin vaikutuksesta karbonatisoituu. Tällöin betonin pH-arvo laskee, jolloin raudoitusta suojaava oksidikalvo voi tuhoutua.
- ▶ Myös korroosiota aiheuttavien aineiden, erityisesti kloridien, tunkeutuminen betoniin poistaa betonilta sen suojaavan vaikutuksen.
- ▶ Kloridipitoisessa betonissa raudoitteiden passiivikalvo tuhoutuu, vaikka betonin emäksisyys olisi korkea
- ▶ Korroosion estämiseksi raudoitusta suojaavan betonipeitteen tulee olla riittävän paksu.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Raudoituksen korroosio

- ▶ Betonipeitteen paksuuden antama suoja kasvaa suuremmassa suhteessa kuin itse betonipeitteen paksuus, koska korroosioon vaikuttavien aineiden tunkeutuminen betoniin hidastuu syvemmälle mentäessä.
- ▶ Vaadittava betonipeitteen paksuus riippuu betonin laadusta ja ympäristön olosuhteista.
- ▶ Betonin raudoitusta suojaava vaikutus riippuu myös betonin sideaineen tyypistä ja määrästä.
- ▶ Betonipeitteen paksuudelle on määritetty vähimmäisarvot eri rasitusluokissa.
- ▶ Kun vaadittuun vähimmäisarvoon lisätään sallittu mittapoikkeama, saadaan rakenteen raudoituksen suunnittelussa käytettävä betonipeitteen nimellisarvo.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Raudoituksen korroosio

- ▶ Korroosion edellytyksenä ovat riittävä hapen kulkeutuminen betonipeitteen läpi raudoituksen läheisyyteen sekä betonin sopiva kosteus.
- ▶ Betonin ollessa kuivissa sisätiloissa korroosiovaara on pieni.
- ▶ Korroosionopeus on suurimmillaan ilman suhteellisen kosteuden ollessa noin 95 %.
- ▶ Vedessa korroosio on hidasta, koska happea on saatavilla vahan.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kemiallinen kestävyys

- ▶ Betonin kemiallisella kestävyydellä ymmärretään sen kykyä vastustaa sisäistä ja ulkoista korroosiota.
- ▶ Kemialliset rasitukset aiheuttavat betoniin joko sisäistä tai ulkoista korroosiota.
- ▶ Esimerkkejä sisäisestä korroosiosta ovat kiviaineksen sisältäminen humus, alkalirunkoainesreaktion ja joko runkoaineesta tai sementistä peräisin olevan sulfaatin aiheuttamat paisumisreaktiot.
- ▶ Betonin ulkoista korroosiota aiheuttavat erilaiset aineet joutuessaan kosketuksiin betonin kanssa. Talloin ne saattavat reagoida betonin osa-aineiden kanssa tai liuottaa niitä ja siten vaurioittaa betonia.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kemiallinen kestävyys

- ▶ Sisäinen korroosio ei ole Suomessa yleinen ongelma.
- ▶ Jonkin verran reaktiivisia runkoaineita löytyy mutta runkoaineista peräisin olevia betonia rapauttavia alkali-, alkali-karbonaatti ja alkali silikaattireaktioita ei ainakaan toistaiseksi ole esiintynyt laajalti
- ▶ Sisäisen sulfaattikorroosion muodoista meillä on esiintynyt lämpökäsittelyn aiheuttamaa paisumiskorroosiota.
- ▶ Nyttemmin käsittelylämpötiloja on rajoitettu turvalliseen 60 C:een, joten todennäköisesti uusien vaurioiden esilletulo hidastuu.
- ▶ Voimakkaiden happojen aiheuttamaa ulkoista liuotuskorroosiota vastaan sivutuotebetoneista ainakin silika- ja kuonabetonit toimivat portlandsementtibetonia paremmin.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kemiallinen kestävyys

- ▶ Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että ne ovat ainakin nuorella iällä porlandsementtibetoneita tiiviimpiä ja sen lisäksi niiden hydrataatiotuotteet sisältävät vähemmän helposti liukeneviä yhdisteitä kuten kalsiumhydroksidia.
- ▶ Ulkoista sulfaattirasitusta esiintyy meriveteen kosketuksissa olevissa rakenteissa ja eräissä osissa maata maaperän kanssa kosketuksissa olevissa rakenneosissa.
- ▶ Sulfaatinkestävyyttä vaativiin rakenteisiin on käytettävä sulfaatinkestävää portlandsementtiä, masuunisementtiä tai erillisjauhatettua masuunikuonaa.
- ▶ Ohjeet betonin koostumuksen vähimmäisarvoille eri rasitusluokissa on annettu Betoninormeissa.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kemiallinen kestävyys

- ▶ Rasitusluokka määräytyy kohteen ja vaikuttavien aggressiivisten aineiden määrän mukaan.
- ▶ Rasitusluokka määrää suurimman vesisideainesuhteen, vähimmäislujuusluokan ja vähimmäissementtimäärän.
- ▶ Kemiallisen korroosion estämiseksi on ennen kaikkea pyrittävä betoni tekemään tiiviiksi.
- ▶ On käytettävä alhaista vesisementtisuhdetta, tiivistettävä betoni hyvin ja huolehdittava jälkihoidosta.
- ▶ Vaihtoehto on myös betonin pinnoittaminen