



Betonirakenteiden korjaaminen 2026

Hannu Pyy, TkL, Senior adviser  
AFRY Buildings Finland Oy  
Rakennusfysiikka

# Betonirakenteiden fysikaaliset vauriot

3/10/2026

# Sisältö

1. Johdantona iltapäivään käydään yleisellä tasolla läpi betonirakenteiden vaurioitumista ja eri vaurioitumismekanismien keskinäisiä vuorovaikutuksia
2. Betonin materiaalitekniikka aiheen kannalta
3. Betonirakenteiden fysikaaliset vauriot
4. Betonin pakkasrapautuminen
5. Vaurioiden vaikutus betonin ominaisuuksiin



# Vaurioituminen

1. Betonin vaurioitumiseen on aina olemassa syy, vaurio itsessään on seuraus
2. Vaurioiden syiden selvittäminen on tärkeämpi osa kuntotutkimusta kuin itse vaurioiden havaitseminen
3. Kuntotutkimuksella tulee selvittää syy / syyt niin, että vaurion aiheuttaja voidaan varmentaa ja saadaan poistettua ja rakenne korjattua niin, että korjattu rakenne ei vaurioidu heti uudestaan



# Vaurioituminen - rapautuminen

- Betonirakenne voi vaurioitua ilman että se vielä olisi rapautunut
- Pitkälle edetessään vaurioituminen johtaa betonin rapautumiseen
  - Kielitoimiston sanakirja:
    - vaurio = vahingollisen ilmiön aiheuttama vioittuma.
    - rapautua = hajota vähin erin erilaisten tekijöiden vaikutuksesta
- Kun betoni rapautuu, sen sisäinen rakenne hajoaa joko
  - 1) sideaineen hajoamisena/liukenemisena
  - 2) sideaine-kiviaineskontaktista, tai
  - 3) kiviaineksen rapautumisena



# Vaurioituminen - rapautuminen

- Rapautuminen ilmenee rakenteen lujuusominaisuuksien (erityisesti vetolujuuden) heikkenemisenä ja pintakovuuden ja eheyden heikkenemisenä
- Betonipinnan rapautuminen johtuu tyypillisesti sideaineen kulumisesta/hajoamisesta mekaanisen tai kemiallisen rasituksen seurauksena ja se johtaa betonin fysikaaliseen vaurioitumiseen

# Vaurioituminen - rapautuminen

- Syitä betonin rapautumiselle voivat olla esim.
- suuret rasitukset (pakkanen, kuormat, kulutus, kemiallinen rasitus)
- suunnitteluvirheet (esim. väärät rasitusluokat) ja
- väärä betonikoostumus (suuri sementtimäärä, tai vesi-sementtisuhde)
- työvirheet, betonin erottuminen, jälkihoidon laiminlyönti, betonin kovettumisen häiriintyminen jne.

# Vaurioitumisen luokittelu

---



- Betonivaurioita aiheuttavat tekijät voidaan jakaa

- Fysikaalisiin
- Mekaanisiin ja
- Kemiallisiin

...vaurioita aiheuttaviin tekijöihin

- Usein vauriot ovat eri tekijöiden yhdistelmä, jossa määrasuhteet vaihtelevat
- Kosteus on mukana lähes aina kaikissa betonin vauriomekanismeissa



# Betonirakenteiden vaurioituminen

## Fysikaaliset vauriot

- Fysikaalisen ilmiön aiheuttamat
- Pakkasrapautuminen
- Raudoitteiden korroosio (halkeilun muodostuminen)
- Pakkovoimien aiheuttama pinnan kuluminen tai betonin halkeilu/säröily
- Lämpöliikkeet

## Mekaaniset vauriot

- Mekaanisen rasituksen aiheuttamat
- Betonipinnan kuluminen
- Liikkuminen
- Painuminen
- Ylikuorma
- Värähtely
- Törmäys
- Räjähdys

## Kemialliset vauriot

- Kemiallisen ilmiön tai rasituksen aiheuttamat betonin paisumis-/rapautumisilmiöt
- Raudoitteiden korroosio (käynnistyminen)
- Muut erilaisten kemiallisten aineiden aiheuttamat vauriomekanismit

# Vaurioituminen vs. rasitusluokat (SFS-EN 206)

## Fysikaaliset vauriot

- Pakkasrasitus: XF1, XF3
- suola-pakkasrasitus: XF2, XF4

## Mekaaniset vauriot

- Mitoitusnormit (kuormat, raudoituksen peitepaksuudet, halkeamaleveydet jne.)
- (Pakkasrasitus XF1, XF3 suola-pakkasrasitus XF2, XF4)

## Kemialliset vauriot

- Karbonatisoituminen: (XC0, XC1, XC2, XC3, XC4)
- Merivesirasitus: XS1, XS2, XS3
- Suolarasitus muusta kuin merivedestä: XD1, XD2, XD3
- Kemiallinen rasitus: XA1, XA2, XA3

# Kaikki lähtee betonista

---

- Nykyisen kaltainen sementti keksittiin 1800-luvun alkupuolella vahingossa: Isaac Johnsonin valmistama kalkkilaastin sideaineen koe-erä ”meni piloille” liian korkean polttolämpötilan vuoksi ja uskottiin, että se olisi kelvotonta, mutta sen lujuus olikin huomattavan suuri
- >> näin keksittiin polttolämpötilan ja sintraantumisen merkitys sementin valmistuksessa.
- Siitä alkoi sementin ja betonin maailmanvalloitus



# Kaikki lähtee betonista

- Betonin pääraaka-aineet ovat:
  - Sementti
  - Vesi
  - Kiviaines
- Lisäksi betonin valmistuksessa käytetään: erilaisia **lisä- ja seosaineita**
- **Seosaineita** ovat esim. masuunikuona, lentotuhka, silika ja luonnonpozzolaanit
- Betonin ominaisuuksia voidaan muokata säätelämällä osa-aineiden suhteita = betonin suhteitus

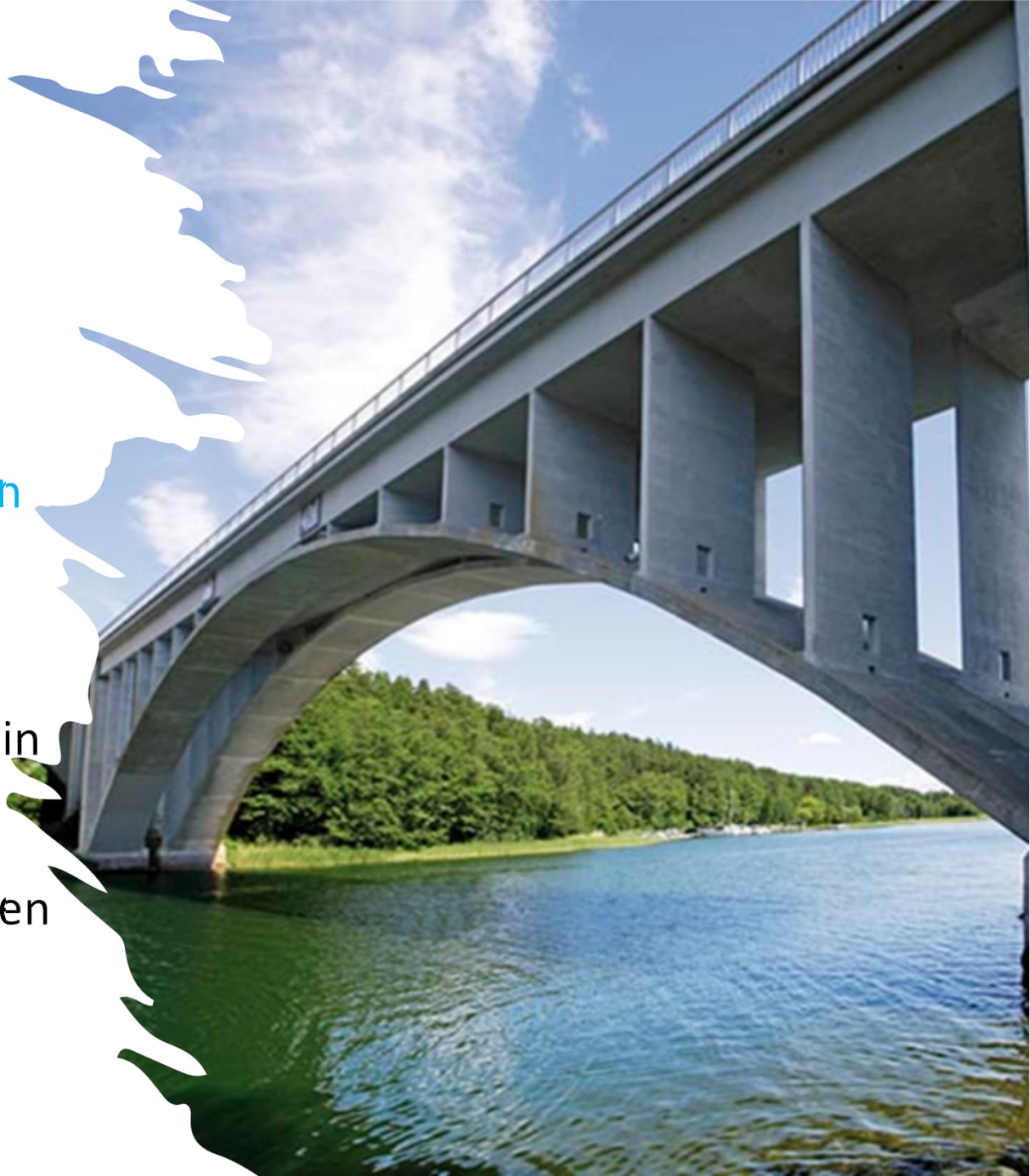


# Kaikki lähtee betonista

- **Lisäaineilla** saadaan mm. seuraavia etuja:
- Betonin työstettävyys paranee ja valaminen vaatii vähemmän työtä, kun betonista saadaan notkeampaa
- Betonin lujuus kasvaa ja säilyvyys paranee, kun betonin vesimäärää voidaan pienentää
- Betonin työstettävyysaikaa voidaan pidentää
- Betonista voidaan tehdä pakkasenkestävää, jolloin se kestää toistuvaa sulamista ja jäätymistä kosteissa olosuhteissa
- Betonin koossapysyvyys paranee

# Vaatimukset vaurioitumista vastaan

- Betonirakenteen tulee kantaa siihen kohdistuvat **kuormat** ja kestää **ympäristön aiheuttamat rasitukset** koko suunnitellun **käyttöikänsä** ajan.
- Rakennesuunnittelijan tehtäviin kuuluu määrittää rakenteessa käytettävän betonin **lujuusluokka** siihen kohdistuvien kuormitusten mukaisesti. Lisäksi suunnittelijan tulee ottaa kantaa rakenteen **suunnittelukäyttöikään ja rasitusluokkiin**, jotka määräytyvät rakenteen ympäristöolosuhteiden perusteella.



# Betonin pakkasenkestävyysvaatimukset

## By 65 Betoninormit 2021

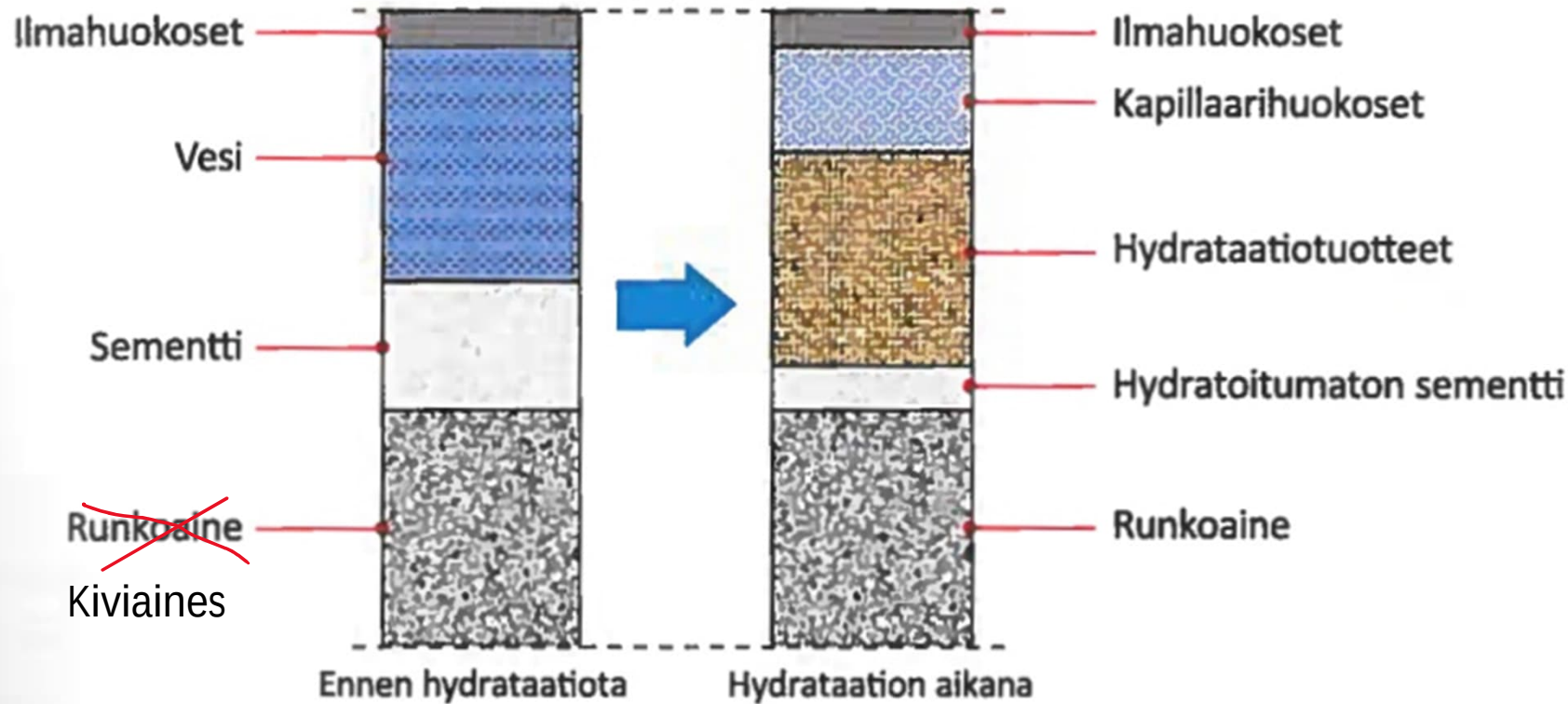
uuteen 2021  
päivitykseen tulleita  
arvoja

**Taulukko 3.8** Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta.

|                                                         | Rasitusluokat                                 |                                          |        |        |        |                                  |        |        |        |        |        |                                         |        |                    |        |                                    |        |        |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------------|--------|--------------------|--------|------------------------------------|--------|--------|
|                                                         | Ei korroosio<br>n tai<br>rasituksen<br>vaaraa | Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio |        |        |        | Kloridien aiheuttama korroosio   |        |        |        |        |        | Jäätymis-sulamisrasitus <sup>(12)</sup> |        |                    |        | Aggressiivinen kemiallinen rasitus |        |        |
|                                                         |                                               | Merivesi                                 |        |        |        | Kloridit muusta kuin merivedestä |        |        |        |        |        |                                         |        |                    |        |                                    |        |        |
|                                                         | X0                                            | XC1                                      | XC2    | XC3    | XC4    | XS1                              | XS2    | XS3    | XD1    | XD2    | XD3    | XF1 <sup>(3)</sup>                      | XF2    | XF3 <sup>(3)</sup> | XF4    | XA1                                | XA2    | XA3    |
| Tehollinen vesi/sideaine - suhde enintään               |                                               | 0,90                                     | 0,80   | 0,60   | 0,60   | 0,50                             | 0,45   | 0,45   | 0,55   | 0,55   | 0,45   | 0,60                                    | 0,50   | 0,50               | 0,45   | 0,50                               | 0,45   | 0,40   |
| Lujuusluokka vähintään                                  | C12/15                                        | C20/25                                   | C20/25 | C30/37 | C30/37 | C30/37                           | C35/45 | C35/45 | C30/37 | C30/37 | C35/45 | C30/37                                  | C30/37 | C30/37             | C35/45 | C30/37                             | C35/45 | C40/50 |
| Tehollinen sideainemäärä (kg/m <sup>3</sup> ) vähintään |                                               | 160                                      | 160    | 250    | 250    | 300                              | 320    | 320    | 300    | 300    | 320    | 270                                     | 330    | 300                | 360    | 300                                | 320    | 330    |
| Ilmamäärä (%) <sup>(6)</sup>                            |                                               |                                          |        |        |        |                                  |        |        |        |        |        | 4,0 <sup>(5)</sup>                      | 5,0    | 4,0 <sup>(5)</sup> | 5,0    |                                    |        |        |
| Seosainekertoimet                                       |                                               |                                          |        |        |        |                                  |        |        |        |        |        |                                         |        |                    |        |                                    |        |        |
| Silika v/s ≤ 0,45                                       | 2,00                                          |                                          |        | 2,00   |        |                                  | 2,00   |        |        | 2,00   |        | 2,00                                    | 2,00   | 2,00               | 2,00   |                                    | 2,00   |        |
| v/s ≥ 0,45                                              | 1,00                                          |                                          |        | 1,00   |        |                                  | 2,00   |        |        | 2,00   |        | 1,00                                    | 1,00   | 1,00               | 1,00   |                                    | 2,00   |        |
| Lentotuhka <sup>(4)</sup>                               | 1,00                                          |                                          |        | 0,40   |        |                                  | 0,40   |        |        | 0,40   |        | 1,00                                    | 0,40   | 1,00               | 0,40   |                                    | 0,40   |        |
| Masuunikuona                                            | 1,00                                          |                                          |        | 1,00   |        |                                  | 1,00   |        |        | 1,00   |        | 1,00                                    | 1,00   | 1,00               | 1,00   |                                    | 1,00   |        |

# Veden (vesi-sementtisuhteen) merkitys

- Sementin reaktio veden kanssa

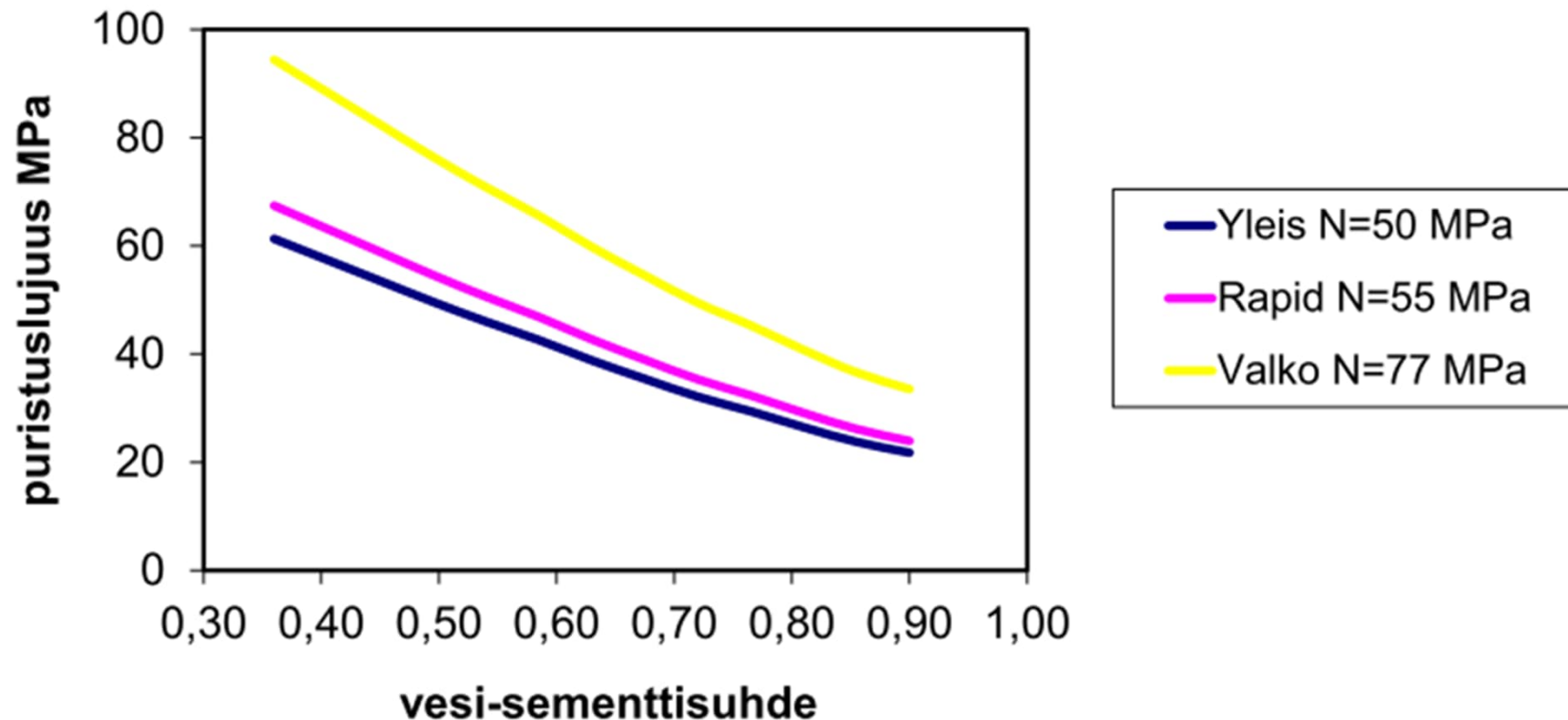


Kuva 3.4.1. Betonin osa-aineiden osuudet ennen hydrataatiota ja sen aikana. Kovettunut betoni muodostuu runkoaineesta sekä hydrataatiotuotteiden, hydratoitumattoman sementin, huokosten ja veden muodostamasta sementtikivestä.



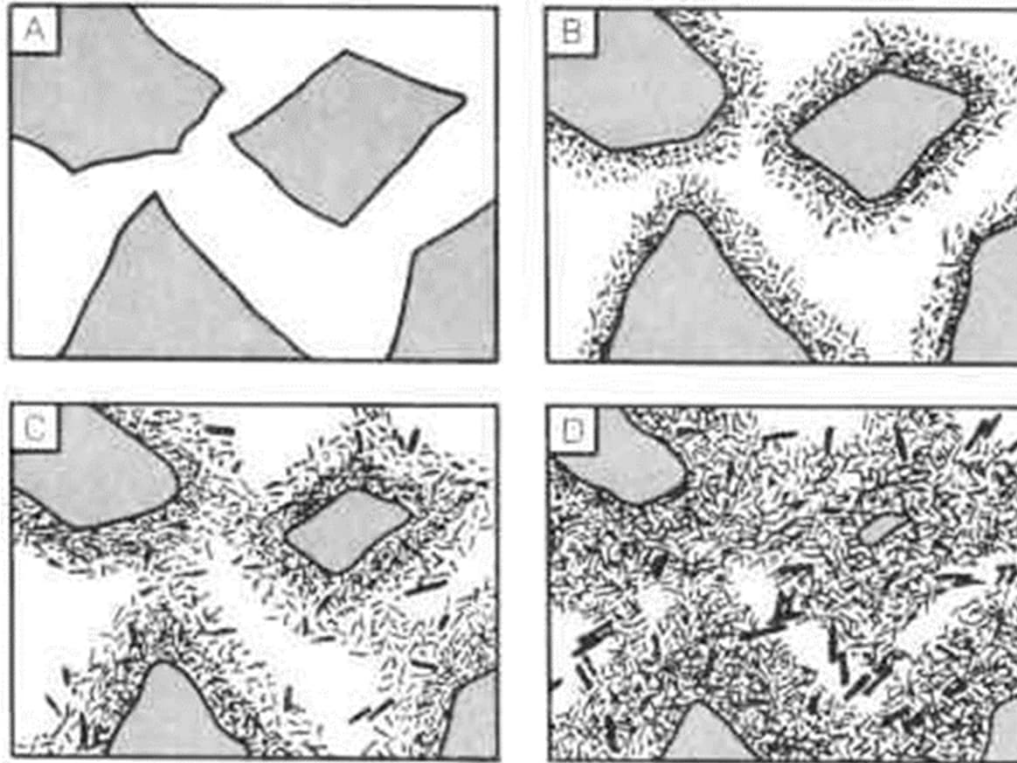
# Veden (vesi-sementtisuhteen) merkitys

**Vesi-sementtisuhteen yhteys betonin  
puristuslujuuteen eri sementeillä  
(betoni huokostamaton, ilmaa 20 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)**





# Veden (vesi-sementtisuhteen) merkitys



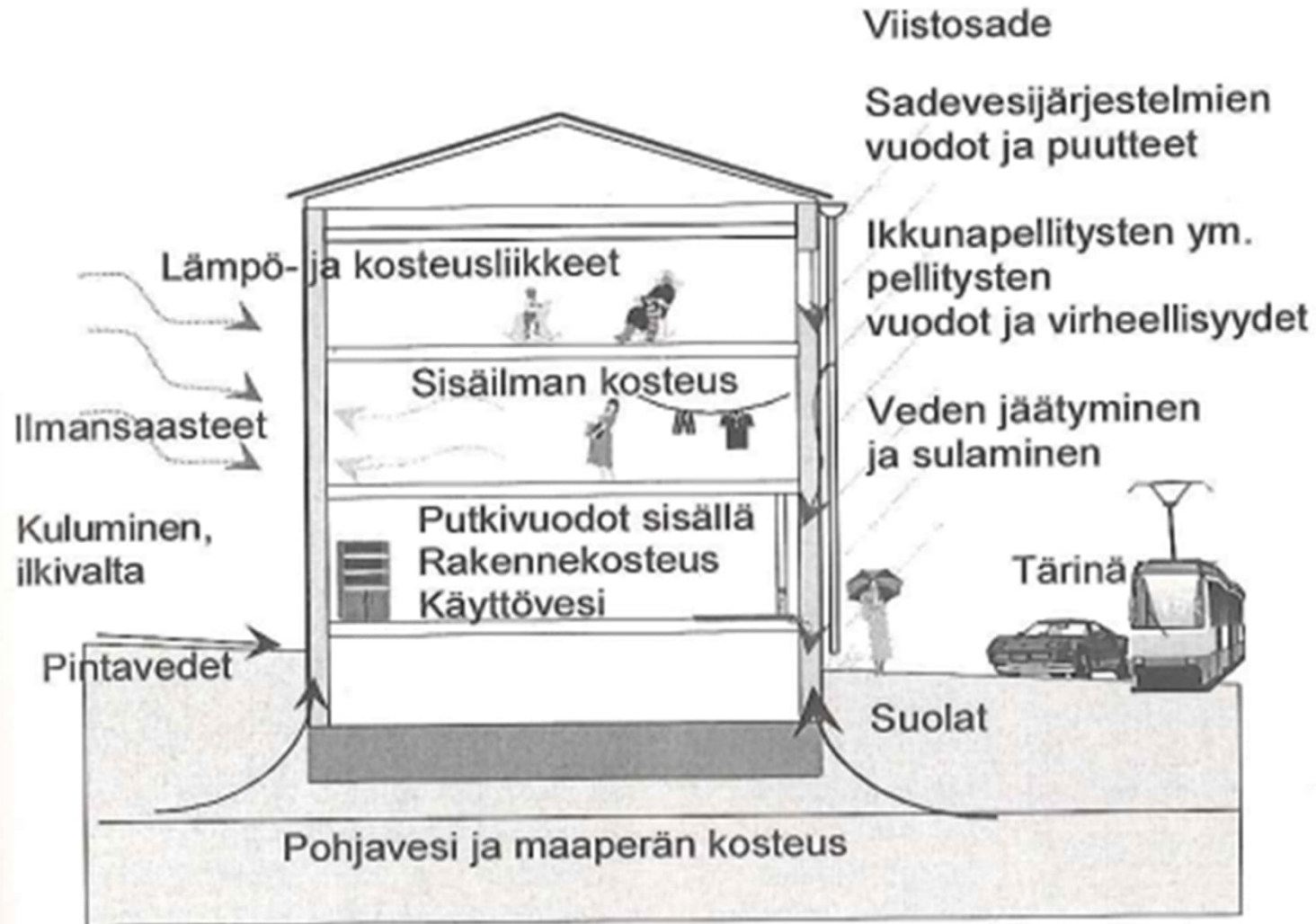
Sementin sitoutumisen ja kovettumisen neljä astetta kaavamaisesti esitettynä. a) Toistaiseksi reagoimattomia sementtirakeita veden ympäröiminä. b) Tilanne muutaman minuutin kuluttua veden lisäämisestä: hydrataatiotuotteet laajenevat joka rakeen pinnasta vesitilaan. c) Muutaman tunnin kuluttua sementtirakeet ovat silloittuneet toisiinsa kiinni, joten geeli alkaa muodostua jatkuvaksi (sitoutuminen). d) Muutaman vuorokauden kuluttua sementtigelin muodostuminen on edennyt pitkälle (kovettumisen nopea alkujakso).

# Betonin fysikaalinen vaurioituminen

---

- Vaikka rasitustekijät olisivat voimakkuudeltaan samat, mutta rakenteessa olevan betonin koostumus, ominaisuudet ja laatu vaihtelevat, vaurioituu rakenne eri asteisesti fysikaalisen (tai minkä tahansa muunkin) rasituksen vaikutuksesta
- Fysikaalisen ilmiön aiheuttamia ovat:
- Pakkasrapautuminen
- Raudoitteiden korroosio (kun korroosio niin pitkällä, että halkeilua muodostuu)
- Pakkovoimien aiheuttama pinnan kuluminen tai betonin halkeilu/säröily
- Lämpöliikkeet

# Fysikaalisten vaurioiden lähteitä



# Fysikaaliset vauriot

- Yleisimmät suomalaisissa ulkobetonirakenteissa vaikuttavat rasitukset ja niistä johtuvat vaurioitumisilmiöt ovat:
- Betonin pakkasrasitus ja siitä johtuva pakkasrapautuminen
- Raudotteiden korroosio ja siitä johtuva halkeilu ja lohkeilu betonin karbonatisoitumisen tai kloridirasituksen seurauksena.



# Fysikaaliset vauriot

- Pakkasrasitus
  - ....tai itse asiassa veden jäätymisen ja sulamisen aiheuttama toistuva rasitus
- Tyypilliset rasitetuimmat alueet
  - Rakenteiden yläosat ja nurkat
  - Ulkonevat rakenteet
  - Suojaamattomat vaakasuorat pinnat

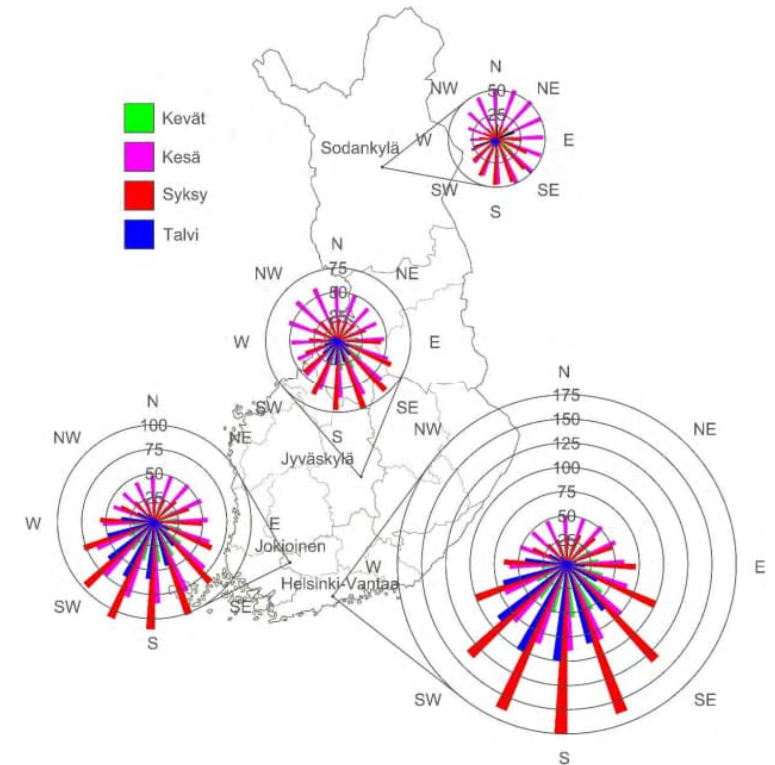


# Fysikaaliset vauriot



# Fysikaaliset vauriot

- Tyypilliset rasitetuimmat alueet rakenteissa ja rasitustekijät:
- Etelä- ja länsisivut
- Sateiden suunta, tuuli ja viistosade
- Auringon vaikutus (jäätyminen – sulaminen)
- Puut & maaston esteet
- Katukuilut
- Avoin ympäristö
- Etelä-Suomi

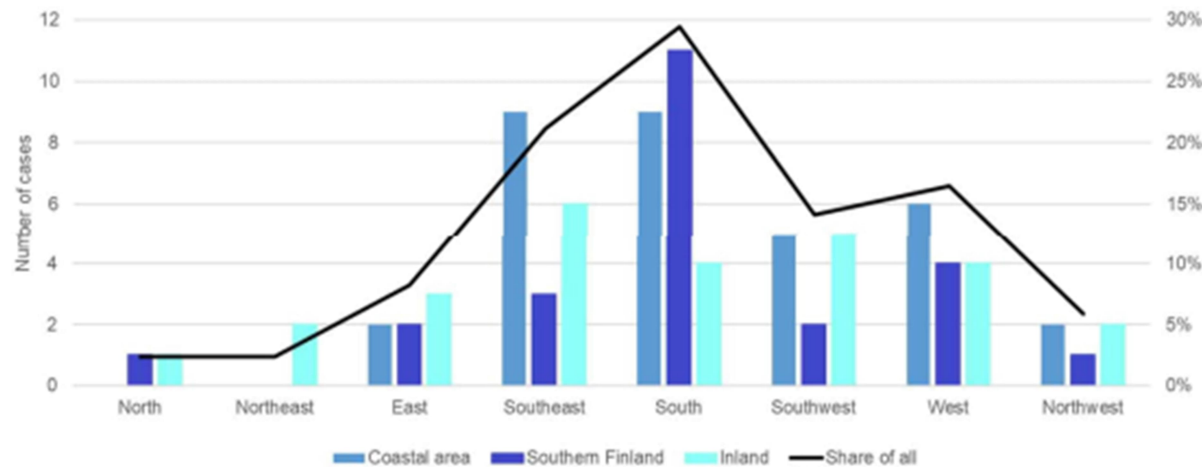


Kuva 4: Viistosaderasitus eripuolella Suomea. Kevät = maaliskuu–toukokuu, kesä = kesä–elokuu, syksy = syys–marraskuu, talvi = joulukuu–helmikuu.

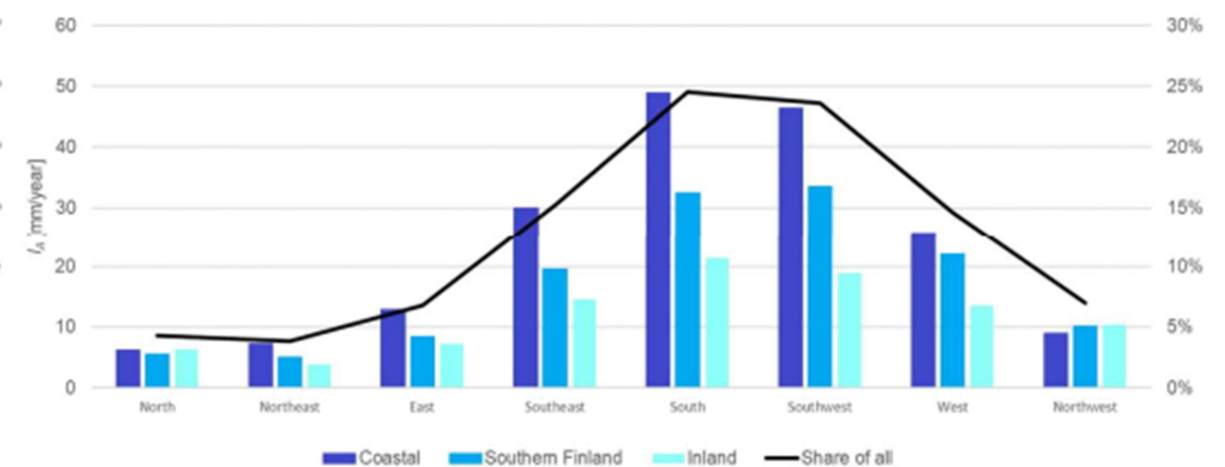


# Fysikaaliset vauriot - pakkasrapautuminen

Vasaroimalla havaittu pitkälle edennyt pakkasrapautuma



Viistosademäärä julkisivulle max. 72 h ennen pakkassykliä



Pakkala, T. A., Lahdensivu, J. Huuhka, P., Kivioja, H., Lemberg, A.-M. 2019. Freeze-thaw Damage Dependence on Wind-driven Rain of Outdoor Exposed Concrete – A Case Study. *Nordic Concrete Research*, Publication no. 61 2/2019

# Betonin pakkasrapautuminen

- T.C. Powers (1949): Veden tilavuuden kasvu sen jäätyessä aiheuttaa betonin huokosiin hydraulisen paineen, joka ylittäessään betonin vetolujuuden aiheuttaa betoniin sisäistä halkeilua.
- Täydennetty mm. jäälinsien kasvun teorialla (Powers&Helmuth 1953)
- Yksi teoria on, että myös jään lämpölaajeneminen voi aiheuttaa myös vastaavanlaista painetta. (Penttala, 1998)
- Pakkasrapautuminen edellyttää betonin (toistuvaa) jäätymistä vesitäytteisenä. Kun jäätymis-sulamiskertoja on kyllin paljon betoni alkaa vaurioitua ja lopulta rapautuu

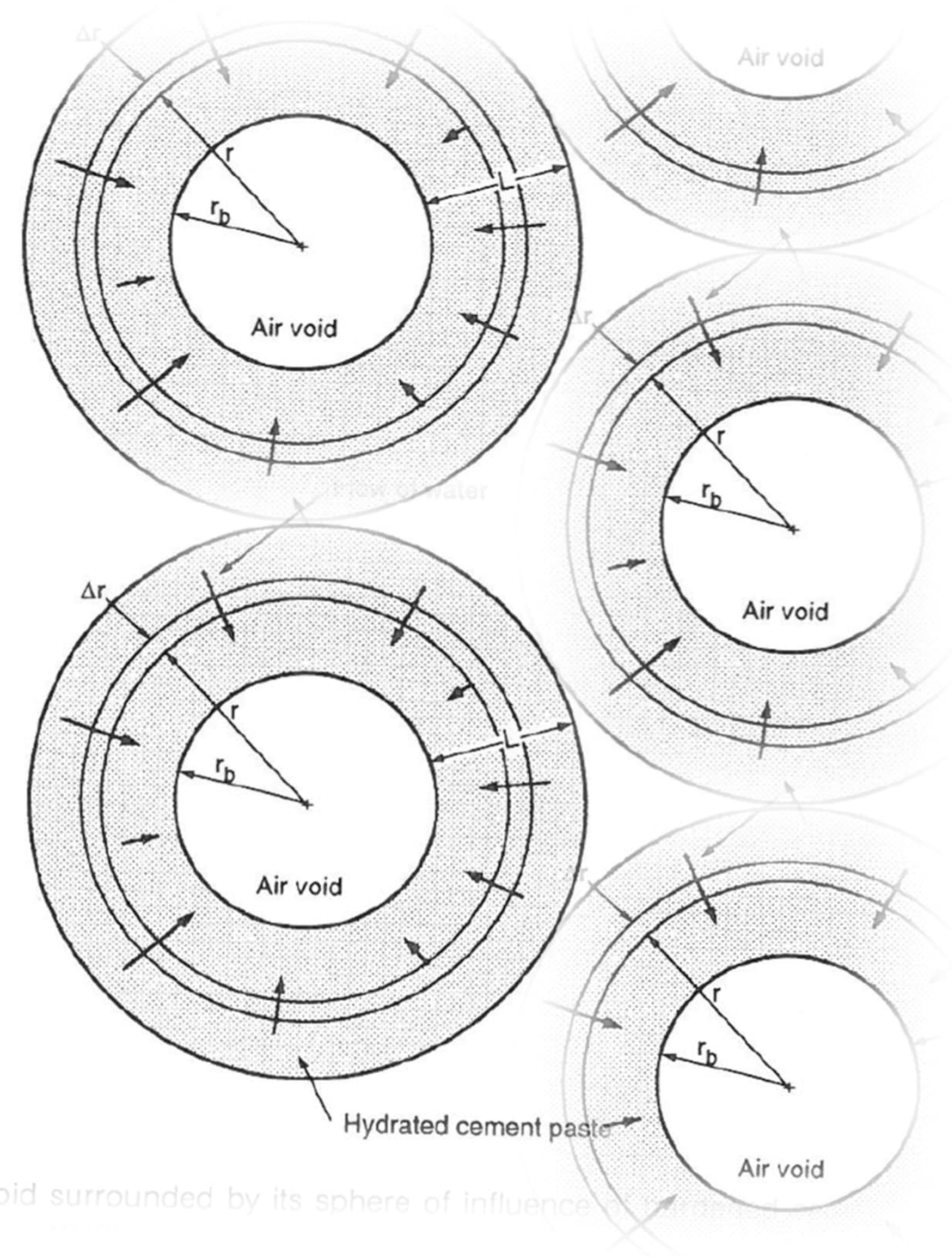
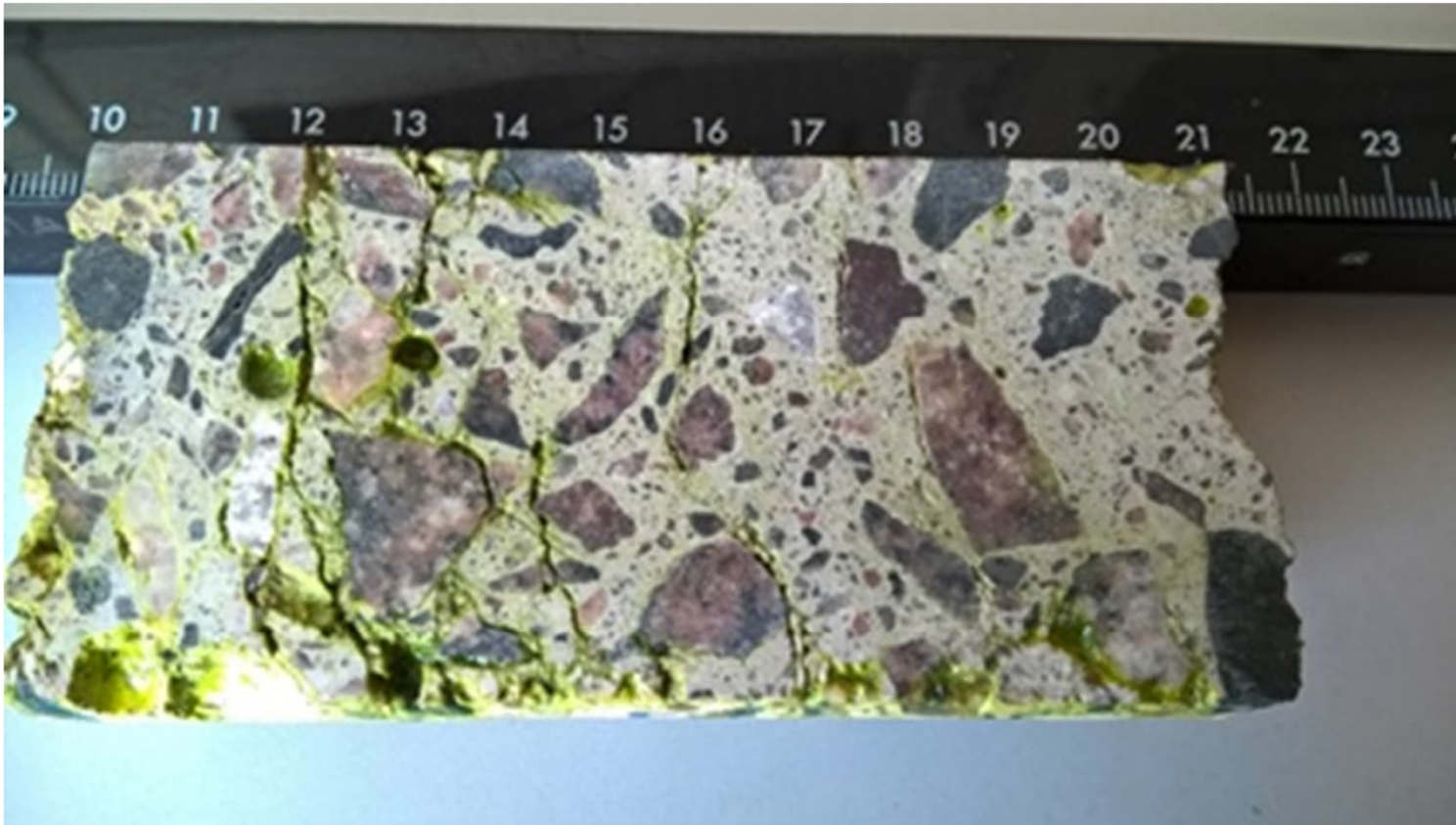


Figure 2.1 Air void surrounded by its sphere of influence of hydrated cement paste.

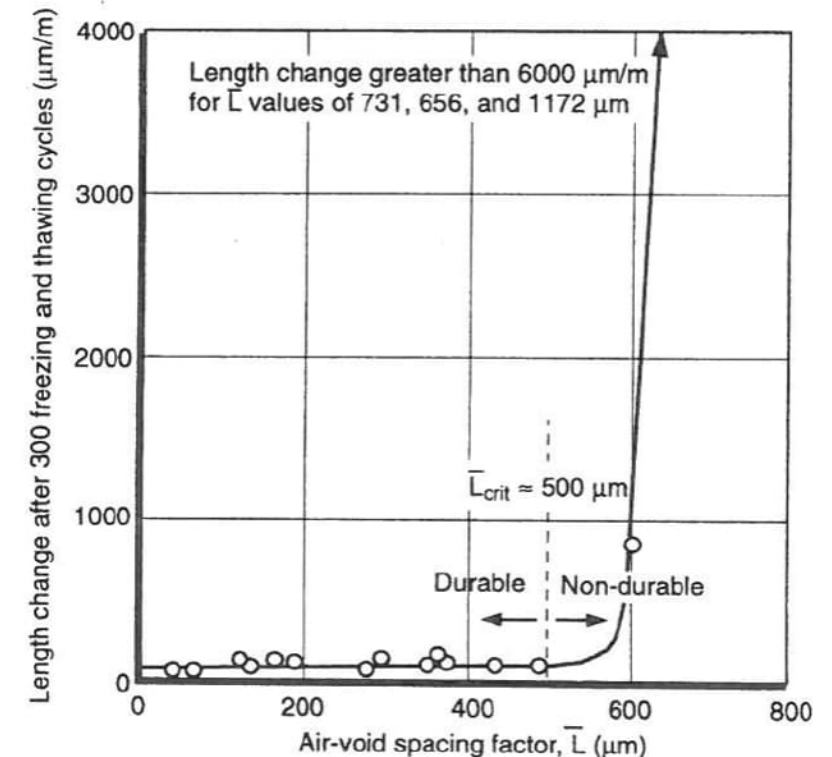
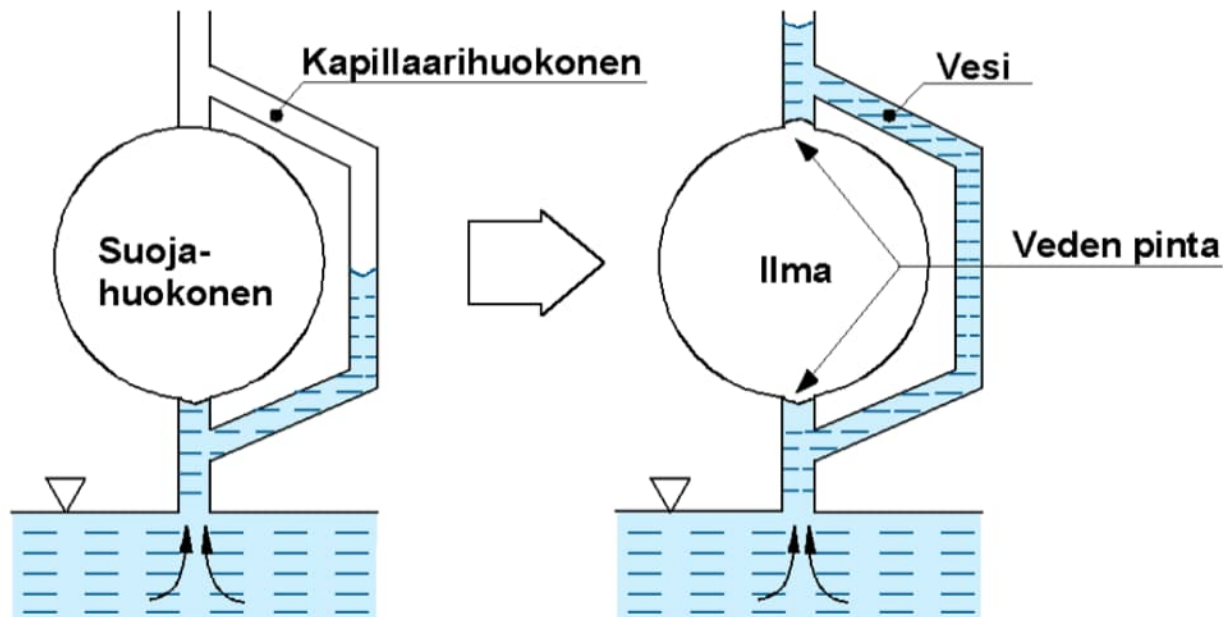


# Betonin pakkasrapautuminen



# Betonin pakkasenkestävyys

- Betonia voidaan suojata pakkasrapautumiselta muodostamalla huokosten verkosto, johon jäätymisen aiheuttama paine voi vapautua
- Tasainen suojuhuokostus (halkaisijaltaan luokkaa 10...800  $\mu\text{m}$ , etäisyys  $< 540 \mu\text{m}$ )



# Betonin pakkasenkestävyyden todentaminen

## By 65 Betoninormit 2016 ja 2021

**Taulukko 1** Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden vaatimukset, kun suunnit-  
telukäyttöikä on 50, tai 100 vuotta.

| Suunniteltu käyttöikä [a] | Rasitusluokka     | 1                                                                                       |            | 2                                              |                                                     |                                               | 3                                                                                                                                                       |                                               |
|---------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                           |                   | Huokosjako<br>VTT TEST-R003-00-<br>2010 tai SFS-EN 480-<br>11:2005 mukaan <sup>1)</sup> |            | Jäädytys-sulatuskoe,<br>SFS 5447 <sup>3)</sup> |                                                     |                                               | Laattakoe<br>CEN/TR 15177 luokissa<br>XF1 ja XF3 <sup>4)</sup> ,<br>CEN/TS 12390-9 luokissa<br>XF2 ja XF4,<br>jälkimmäisessä väliaine<br>3 % NaCl-liuos |                                               |
|                           |                   | Enimmäisarvo [mm]                                                                       |            | Sykliä lukumäärä                               | Taivutus- tai halkaisu-<br>vetolujuuksien suhde [%] | Suhteellinen dynaaminen<br>kimmokerroin γ [%] | Rapauma m [g/m <sup>2</sup> ]                                                                                                                           | Suhteellinen dynaaminen<br>kimmokerroin γ [%] |
|                           |                   | w/c > 0,40                                                                              | w/c ≤ 0,40 |                                                |                                                     |                                               |                                                                                                                                                         |                                               |
| 50                        | XF1               | 0,27                                                                                    | 0,27       | 100                                            | ≥ 67                                                | ≥ 75                                          | m <sub>56</sub> ≤ 500                                                                                                                                   | γ <sub>56</sub> ≥ 67                          |
|                           | XF2               | 0,25                                                                                    | 0,30       | -                                              | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 650                                                                                                                                   | -                                             |
|                           | XF3               | 0,23                                                                                    | 0,23       | 300                                            | ≥ 67                                                | ≥ 75                                          | m <sub>56</sub> ≤ 200                                                                                                                                   | γ <sub>56</sub> ≥ 75                          |
|                           | XF4               | 0,25                                                                                    | 0,30       | -                                              | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 350                                                                                                                                   | -                                             |
| 100                       | XF1               | 0,25                                                                                    | 0,25       | 300                                            | ≥ 67                                                | ≥ 75                                          | m <sub>56</sub> ≤ 200                                                                                                                                   | γ <sub>56</sub> ≥ 75                          |
|                           | XF2 <sup>2)</sup> | 0,25                                                                                    | 0,30       | -                                              | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 250                                                                                                                                   | -                                             |
|                           | XF3               | 0,22                                                                                    | 0,22       | -                                              | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 100                                                                                                                                   | γ <sub>56</sub> ≥ 85                          |
|                           | XF4 <sup>2)</sup> | 0,25                                                                                    | 0,30       | -                                              | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 150                                                                                                                                   | -                                             |

Lukuarvon puuttuminen ruudusta merkitsee, että kyseinen koemenetelmä ei sovellu rivin osoittamaan rasitusluokkaan.

<sup>1)</sup> Referenssimenetelmänä käytetään VTT TEST-R003-00-2010. Huokosjako voidaan selvittää ohut- tai pintahieistä myös muulla soveltuvalla menetelmällä, jonka korrelaatio suhteessa referenssimenetelmään on todettu testauslaitosten välisellä tasokokeella.

<sup>2)</sup> InfraRYL kohdan 42020.1.2 mukaiset vaatimukset.

<sup>3)</sup> Vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa joko betonin vetolujuuksien tai dynaamisten kimmokertoimien perusteella, joista toisen vaatimuksen tulee täytyä.

<sup>4)</sup> Rasitusluokissa XF1 ja XF3 vaatimuksenmukaisuus on osoitettava sekä kimmokertoimen että pinnan rapauman osalta, joista kummankin on täyttyvä.

<sup>5)</sup> Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaatimuksenmukaisuus osoitetaan pinnan rapauman perusteella.

2021  
päivitykseen  
tulleita  
muutoksia

| Suunniteltu käyttöikä [a] | Rasitusluokka | 1                                                                                                                                                                          |            | 2                                               |                                                     |                                               | 3                                                                                                                                                                        |                                               |
|---------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                           |               | Huokosjako<br>by 72 Betonin<br>laadunvarmistus Osa 1 -<br>Betonin<br>ilmahuokosparametrien<br>määrittäminen ohuthieistä tai<br>SFS-EN 480-11:2005<br>mukaan <sup>1a)</sup> |            | Jäädytys-sulatuskoe,<br>SFS 5447 <sup>3b)</sup> |                                                     |                                               | Laattakoe<br>CEN/TR 15177 luokissa<br>XF1 ja XF3 <sup>4c)</sup> ,<br>CEN/TS 12390-9 luokissa<br>XF2 ja XF4 <sup>4d)</sup> ,<br>jälkimmäisessä väliaine<br>3 % NaCl-liuos |                                               |
|                           |               | Enimmäisarvo [mm]                                                                                                                                                          |            | Sykliä lukumäärä                                | Taivutus- tai halkaisu-<br>vetolujuuksien suhde [%] | Suhteellinen dynaaminen<br>kimmokerroin γ [%] | Rapauma m [g/m <sup>2</sup> ]                                                                                                                                            | Suhteellinen dynaaminen<br>kimmokerroin γ [%] |
|                           |               | v/s > 0,40                                                                                                                                                                 | v/s ≤ 0,40 |                                                 |                                                     |                                               |                                                                                                                                                                          |                                               |
| 50                        | XF1           | 0,27                                                                                                                                                                       | 0,27       | 100                                             | ≥ 67                                                | ≥ 75                                          | m <sub>56</sub> ≤ 500                                                                                                                                                    | γ <sub>56</sub> ≥ 67                          |
|                           | XF2           | -                                                                                                                                                                          | -          | -                                               | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 650                                                                                                                                                    | -                                             |
|                           | XF3           | 0,23                                                                                                                                                                       | 0,23       | 300                                             | ≥ 67                                                | ≥ 75                                          | m <sub>56</sub> ≤ 200                                                                                                                                                    | γ <sub>56</sub> ≥ 75                          |
|                           | XF4           | -                                                                                                                                                                          | -          | -                                               | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 350                                                                                                                                                    | -                                             |
| 100                       | XF1           | 0,25                                                                                                                                                                       | 0,25       | 300                                             | ≥ 67                                                | ≥ 75                                          | m <sub>56</sub> ≤ 200                                                                                                                                                    | γ <sub>56</sub> ≥ 75                          |
|                           | XF2           | -                                                                                                                                                                          | -          | -                                               | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 500                                                                                                                                                    | -                                             |
|                           | XF3           | 0,22                                                                                                                                                                       | 0,22       | -                                               | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 100                                                                                                                                                    | γ <sub>56</sub> ≥ 85                          |
|                           | XF4           | -                                                                                                                                                                          | -          | -                                               | -                                                   | -                                             | m <sub>56</sub> ≤ 250                                                                                                                                                    | -                                             |

Lukuarvon puuttuminen ruudusta merkitsee, että kyseinen koemenetelmä ei sovellu rivin osoittamaan rasitusluokkaan.

<sup>1a)</sup> Referenssimenetelmänä käytetään by 72 Betonin laadunvarmistus Osa 1 - Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthieistä. Huokosjako voidaan selvittää ohut- tai pintahieistä myös muulla soveltuvalla menetelmällä, jonka korrelaatio suhteessa referenssimenetelmään on todettu testauslaitosten välisellä tasokokeella.

<sup>3b)</sup> Vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa joko betonin vetolujuuksien tai dynaamisten kimmokertoimien perusteella, joista toisen vaatimuksen tulee täytyä.

<sup>4c)</sup> Rasitusluokissa XF1 ja XF3 vaatimuksenmukaisuus on osoitettava sekä kimmokertoimen että pinnan rapauman osalta, joista kummankin on täyttyvä.

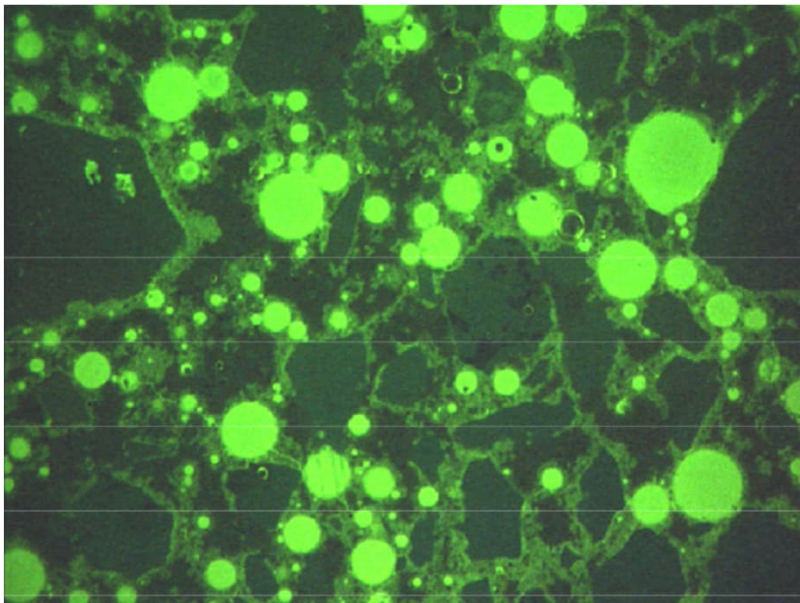
<sup>4d)</sup> Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaatimuksenmukaisuus osoitetaan pinnan rapauman perusteella.



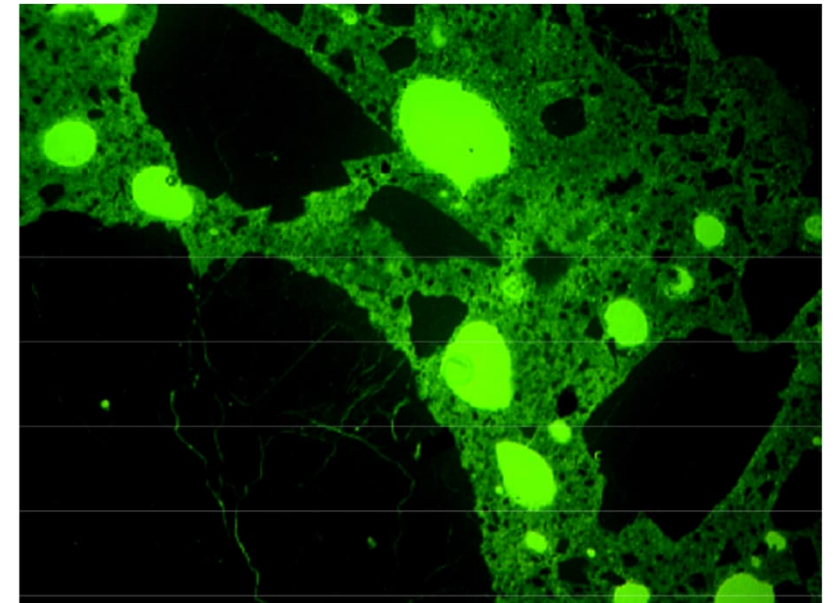
# Betonin pakkasenkestävyys - huokosjako

| Näyte | Suoja-huokokset<br>til-% | Tiivistys-<br>huokokset<br>til-% | Kokonaisilmamäärä<br>til-% | Suojahuokosten<br>ominaispinta-ala<br>mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup> | Suoja-huokosten<br>huokosjako<br>mm |
|-------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| "A"   | 4,6                      | 1,9                              | 6,5                        | 36                                                                     | 0,15                                |
| "B"   | 4,1                      | 0,8                              | 4,9                        | 17                                                                     | 0,35                                |

A



B





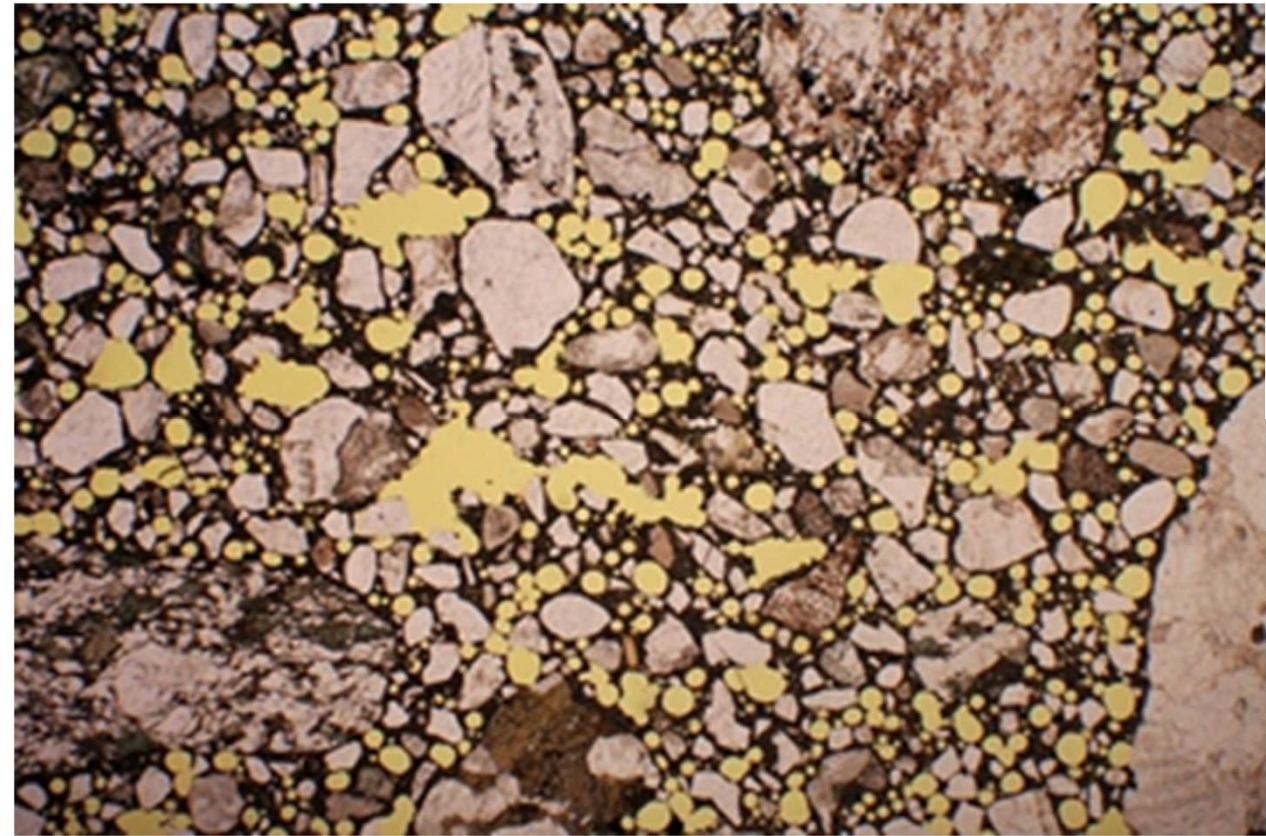
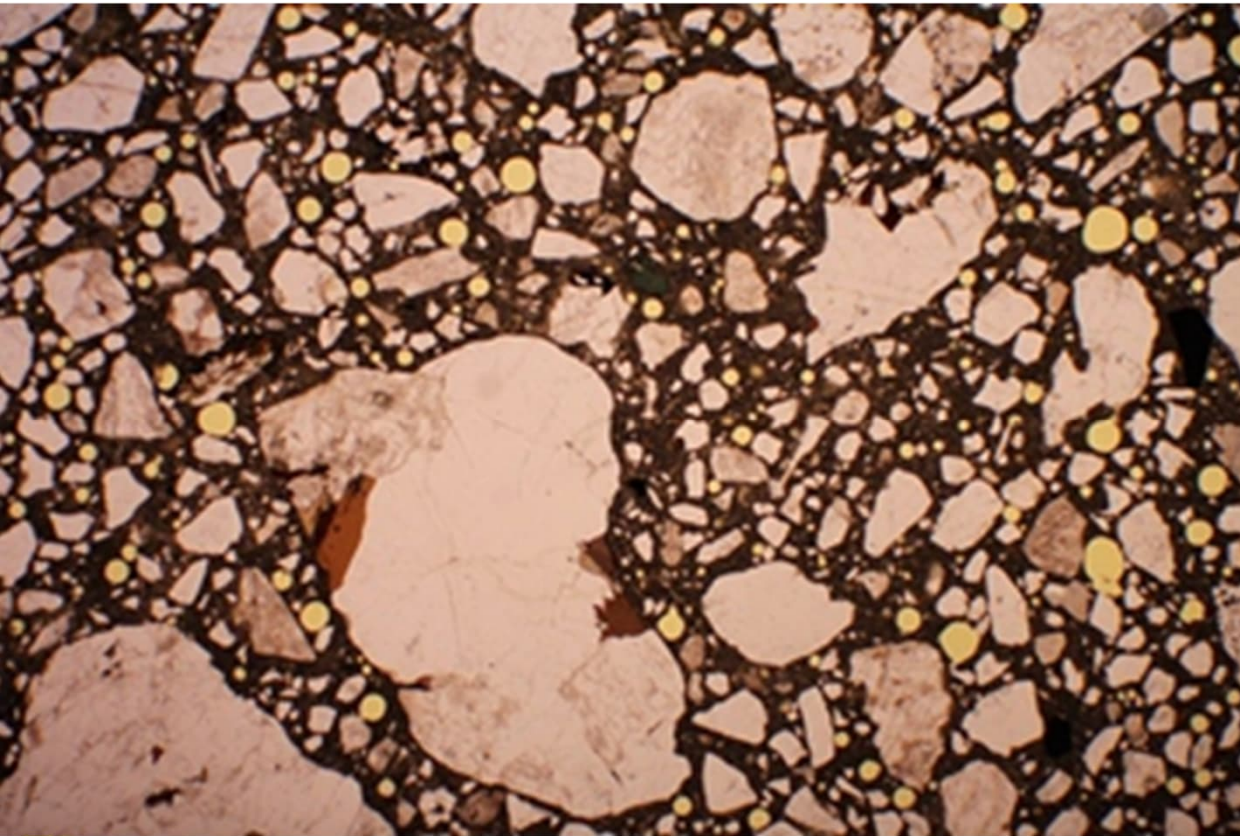
# Betonin pakkasenkestävyys vs. huokostus

- Kuntotutkimussarja, kohteita (rakennuksia) n. 60 kpl samasta kaupungista, 1970-1980 -luvun pesubetonisia sandwich-julkisivuja,

| Ilmansuunta | Huokostamaton pesubetoni, 53 kohteessa, Pakkasvaurioiden määrä, % | Huokostettu pesubetoni, 40 kohteessa, Pakkasvaurioiden määrä, % |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Pohjoinen   | nn                                                                | nn                                                              |
| Koillinen   | 22                                                                | 0                                                               |
| Itä         | 75                                                                | 0                                                               |
| Kaakko      | 70                                                                | 0                                                               |
| Etelä       | 83                                                                | 0                                                               |
| Lounas      | 67                                                                | 0                                                               |
| Länsi       | 80                                                                | 0                                                               |
| Luode       | 17                                                                | 0                                                               |

# Betonin huokostus vs. lujuus

- C25/30 –betoni: 45 ja 16 MPa



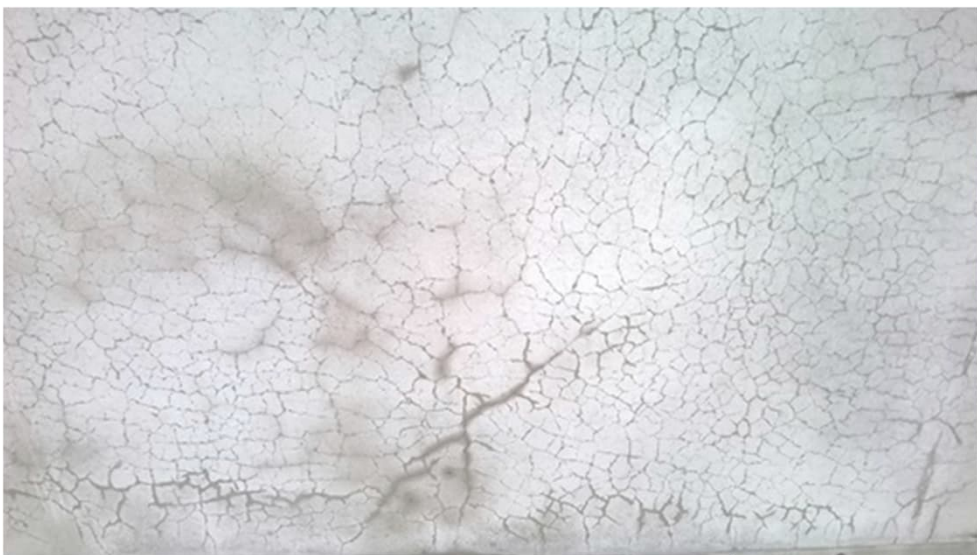
# Betonin säröily ja halkeilu

- Halkeilu on betonilla ja betonirakenteille ominaista. Käytännössä betoniin syntyy aina mikrohalkeilua varhaisvaiheen plastisen painuman ja kutistuman seurauksena.
- Leveä ja/tai runsas halkeilu heikentää aina betonin lujuutta ja laatua.
- Betonirakenteen käyttöikämitoitus määrittelee suurimman sallitun halkeamaleveyden, joka vaihtelee 0,1-0,3 mm välillä, kun suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta.
- Suunnitellun käyttöiän ollessa korkeampi halkeamaleveysvaatimukset ovat tiukemmat.
- Haitallisimmat halkeamat ovat leveydeltään yli 0,3 mm, joiden kautta betonirakenteeseen pääsee imeytymään kosteutta sekä kulkeutumaan haitallisia aineita.



# Betonin fysikaalinen vaurioituminen

- Betonin koostumuksen merkitys halkeilulle
- Punkki & Ojala, Betoni 1/2018



| v/s-suhde | Tyypillinen lujuusluokka                    |                                               |                                           |                                             | Huomioitavaa |                  |               |           |            |
|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------|------------------|---------------|-----------|------------|
|           | Huokostamaton betoni                        |                                               | Huokostettu betoni                        |                                             | Pumpattavuus | Kulutuskestävyys | Lämmönkehitys | Kutistuma | Kuivuminen |
|           | Huokostamaton CEM IIB 42.5 "Plus" tai vast. | Huokostamaton CEM II A 42.5 "Rapid" tai vast. | Huokostettu CEM IIB 42.5 "Plus" tai vast. | Huokostettu CEM II A 42.5 "Rapid" tai vast. |              |                  |               |           |            |
| 0,35      |                                             |                                               | C40/50                                    | C45/55                                      | 1            | 3                | 5             | 6         |            |
| 0,40      | C50/60                                      |                                               | C35/45                                    | C40/50                                      | 1            | 3                | 5             | 6         |            |
| 0,45      | C40/50                                      | C50/60                                        | C35/45                                    | C35/45                                      | 2            |                  |               |           |            |
| 0,50      | C35/45                                      | C40/50                                        | C30/37                                    | C30/37                                      |              |                  |               |           |            |
| 0,55      | C30/37                                      | C35/45                                        | C25/30                                    | C30/37                                      |              |                  |               |           |            |
| 0,60      | C30/37                                      | C30/37                                        | C25/30                                    | C25/30                                      |              | 4                |               |           |            |
| 0,65      | C25/30                                      | C30/37                                        |                                           | C25/30                                      |              | 4                |               | 7         | 9          |
| 0,70      | C25/30                                      | C25/30                                        |                                           |                                             |              | 4                |               | 7         | 9          |
| 0,75      |                                             | C25/30                                        |                                           |                                             |              | 4                |               | 8         | 10         |

■ = v/s-suhteen alue, joka saattaa tuottaa ongelmia

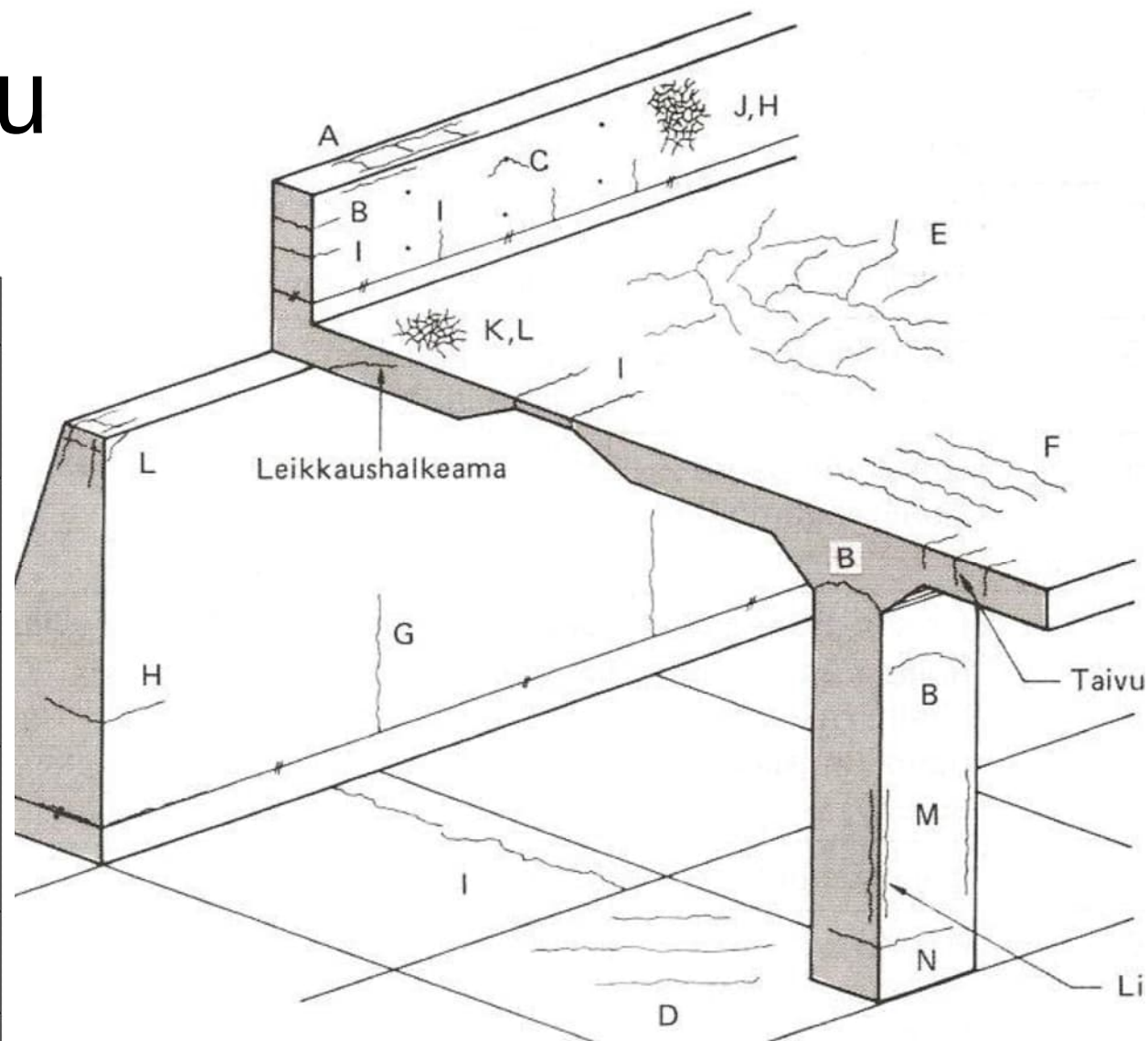
■ = v/s-suhteen alue, joka todennäköisemmin tuottaa ongelmia

- v/s-suhteen ollessa < 0,40 pumpattavuus vaikeaa, harkitse suurempaa v/s-suhdetta.
- v/s-suhteen ollessa < 0,50 pumpattavuus voi tuottaa ongelmia.
- Alhaisilla v/s-suhteilla sirotepinnoituksen teko ei ole mahdollista.
- Korkeilla v/s-suhteilla itse betonin kulutuskestävyys on huono. Kulutuskestävyys hoidettava muilla tavoin.
- Alhaisilla v/s-suhteilla betonin lämmöntuotto saattaa nousta liian korkeaksi.
- Alhaisilla v/s-suhteilla autogeeninen kutistuma saattaa olla ongelmallinen.
- Korkeilla v/s-suhteilla vesimäärä on korkea ja siten kuivumiskutistuma kasvaa. v/s-suhdetta tärkeämpää on pitää vesi- ja sideainemäärät kohtuullisina.
- Riski korkeaan kuivumiskutistumaan.
- Korkeilla v/s-suhteilla betonin kuivuminen hidasta, harkitse tarvittaessa alhaisempaa v/s-suhdetta.



# Betonin säröily ja halkeilu

| Halkeilun aiheut-taja         | Kir-jain | Pääsyy                                                                             | Toissijainen syy                                                                       | Esiintymisajan-kohta                                 |
|-------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Plastinen painuma             | A, B, C  | Veden erottuminen                                                                  | Nopea kuivuminen, liian myöhään aloitettu jälkihoito                                   | 0,5...4h<br>(T=20...30°C),<br>4...8h<br>(T=7...20°C) |
| Plastinen kutistuma           | D, E     | Pinnan nopea kuivuminen                                                            | Hidas haihtuvan veden korvautuminen (tiivis massa), liian myöhään aloitettu jälkihoito | 0,5...4h<br>(T=20...30°C),<br>4...8h<br>(T=7...20°C) |
|                               | F        | Lisäksi raudoitus yläpinnassa                                                      |                                                                                        |                                                      |
| Hydrataatiolämpö tai lämmitys | G        | Rakennusosien välinen lämpötilaero                                                 | Rakenteen liian nopea jäähtyminen                                                      | 1...3d                                               |
|                               | H        | Rakennusosan sisäinen lämpötilaero                                                 |                                                                                        |                                                      |
| Kuivumis-kutistuminen         | I        | Iso v/s, huono jälkihoito, väärin suunnitelturakenne (kutistumis-liikkeet estetty) | Huono tartunta työsaumassa                                                             | Viikko...useita kuukausia                            |
| Pintahalkeilu                 | J        | Huono muotti                                                                       | Suuri sementti- ja vesimäärä, huono jälkihoito                                         | Yleensä 1...7d, joskus myöhemmin                     |
|                               | K        | Huono tai liian aikainen pinnan hierto                                             |                                                                                        |                                                      |
| Pakkas-rapautuminen           | L        | Vesi, jäätyminen ja sulaminen                                                      | Liian vähän suojahuokosia, betoni vedellä kyllästynyt                                  | Ensimmäiset talvet ... useita vuosia                 |
| Raudoituksen ruostuminen      | M        | Liian pieni betonipeite                                                            | Liian huokoinen betoni                                                                 | Useita vuosia                                        |
|                               | N        | Kloridit                                                                           |                                                                                        |                                                      |



# Betonin säröily ja halkeilu

| Halkeilun aiheut-taja         | Kir-jain | Pääsyy                                                                             | Toissijainen syy                                                                       | Esiintymisajan-kohta                           |
|-------------------------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Plastinen painuma             | A, B, C  | Veden erottuminen                                                                  | Nopea kuivuminen, liian myöhään aloitettu jälkihoito                                   | 0,5...4h (T=20...30°C),<br>4...8h (T=7...20°C) |
| Plastinen kutistuma           | D, E     | Pinnan nopea kuivuminen                                                            | Hidas haihtuvan veden korvautuminen (tiivis massa), liian myöhään aloitettu jälkihoito | 0,5...4h (T=20...30°C),<br>4...8h (T=7...20°C) |
|                               | F        | Lisäksi rauditus yläpinnassa                                                       |                                                                                        |                                                |
| Hydrataatiolämpö tai lämmitys | G        | Rakennusosien välinen lämpötilaero                                                 | Rakenteen liian nopea jäähtyminen                                                      | 1...3d                                         |
|                               | H        | Rakennusosan sisäinen lämpötilaero                                                 |                                                                                        |                                                |
| Kuivumis-kutistuminen         | I        | Iso v/s, huono jälkihoito, väärin suunnitelturakenne (kutistumis-liikkeet estetty) | Huono tartunta työsaumassa                                                             | Viikko...useita kuukausia                      |
| Pintahalkeilu                 | J        | Huono muotti                                                                       | Suuri sementti- ja vesimäärä, huono jälkihoito                                         | Yleensä 1...7d, joskus myöhemmin               |
|                               | K        | Huono tai liian aikainen pinnan hierto                                             |                                                                                        |                                                |
| Pakkas-rapautuminen           | L        | Vesi, jäätyminen ja sulaminen                                                      | Liian vähän suojahuokosia, betoni vedellä kyllästynyt                                  | Ensimmäiset talvet ... useita vuosia           |
| Raudituksen ruostuminen       | M        | Liian pieni betonipeite                                                            | Liian huokoinen betoni                                                                 | Useita vuosia                                  |
|                               | N        | Kloridit                                                                           |                                                                                        |                                                |





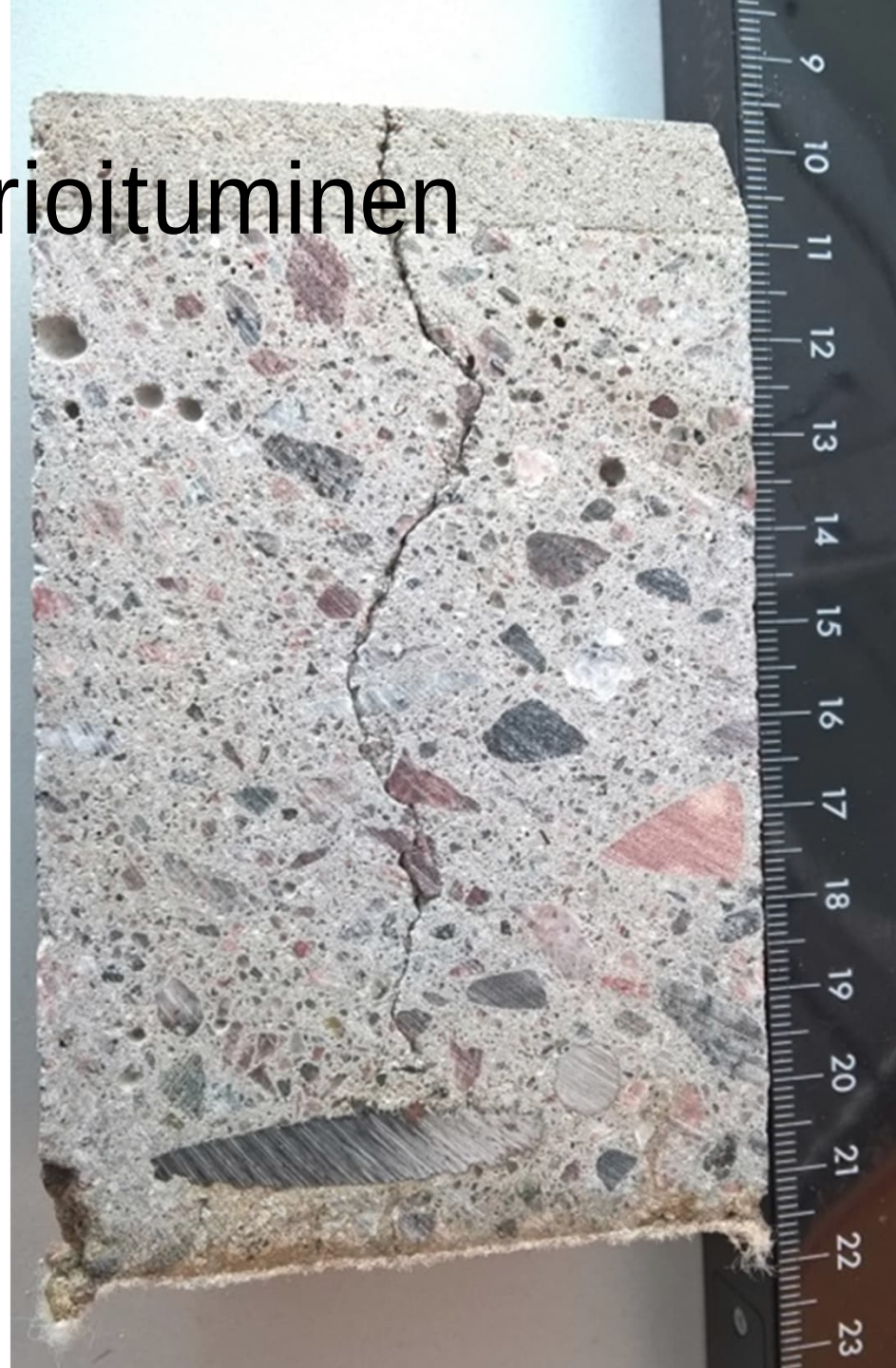
# Betonin fysikaalinen vaurioituminen

- Varhaisjäätymä
- ...ja vieläpä "vetinen betoni"



# Betonin fysikaalinen vaurioituminen

- Halkeilun taustalla työvirhe
- Todetut poikkeamat:
- Laatan paksuus
- Keskeisen verkon sijainti
- Betonin lujuus
- Maksimiraekoko





# Betonin fysikaalinen vaurioituminen

- Muun kuin veden aiheuttama kiteytymispaine
  - Nousevan kosteuden aiheuttama suolarasitus





# Betonipinnan rapautuminen

– osittain fysikaalista,  
osittain mekaanista

- Säärasituksen (sade, tuuli, auringonsäteily) aiheuttama
- Kulutuksen (abraasio) aiheuttama
- Virtaavan veden (kavitaatio) aiheuttama
- Ilmenee silloin, kun betonirakenteen pintakerrokset ovat jääneet heikoiksi tai kulutus on voimakasta



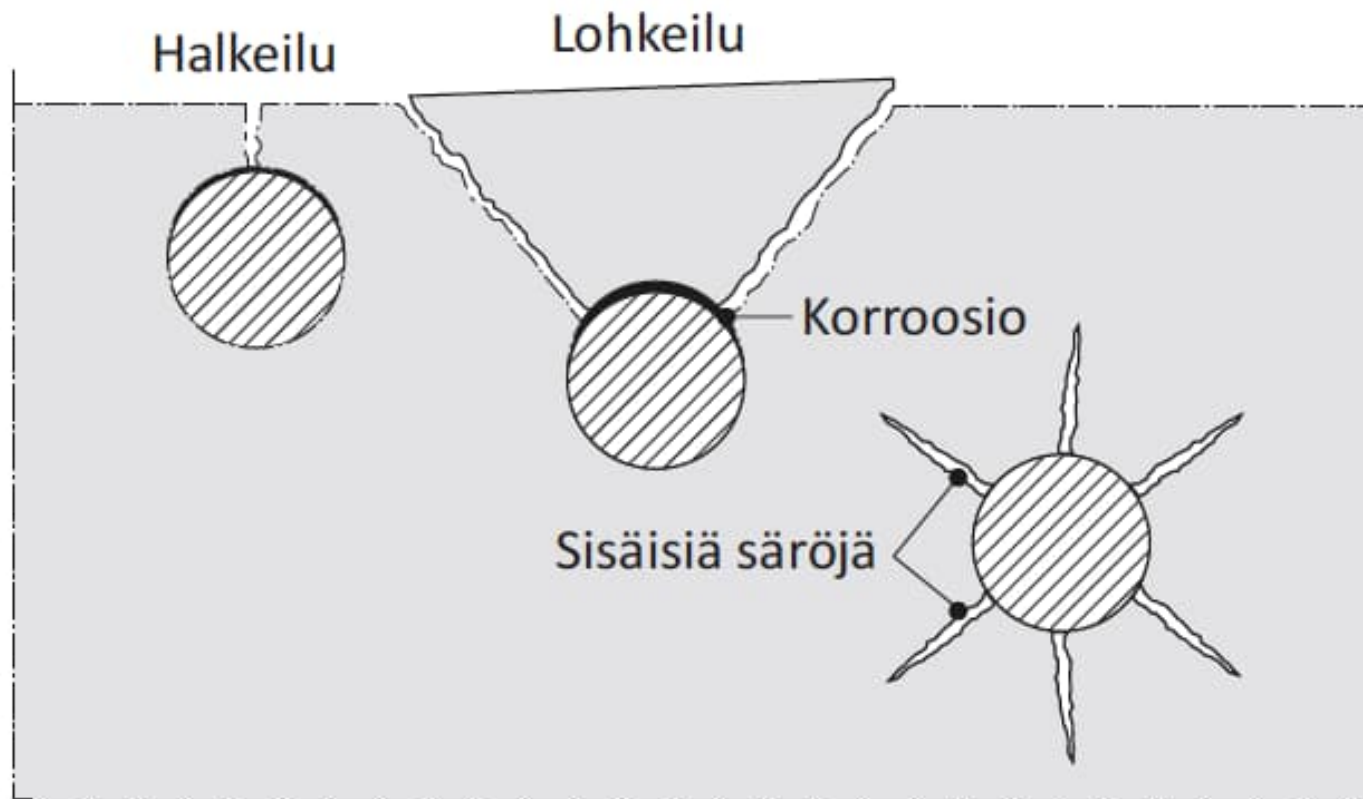
# Betonipinnan rapautuminen

- Betonin valupinnan laatu puutteet
- Vähäinen kiviaineksen määrä pinnassa
- Paksu sementtiliimakerros
- Suuri sementtipastan määrä
- Suuri w/c-suhde
- Erottuminen
- Betonin tiiveys
  
- Osittain fysikaalista, osittain mekaanista





# Raudoitteiden korroosion aiheuttama halkeilu



# Betonipinnan rapautuminen

- Vaikutukset:
  - Vaurioittaa betonipintaan asennettuja pinta-/pinnoitekerroksia
  - Kosteuden ja muiden haitallisten aineiden imeytyminen nopeutuu
  - Karbonatisoituminen nopeutuu
  - Betonipinnan lujuus ja tartuntalujuus heikkenee
    - Betonin pinnoitettavuus heikkenee
    - Uusien pintakerrosten tartunta heikkenee
  - Betonipinnan ulkonäkö heikkenee

# Betonin säröily ja halkeilu

- Vaikutukset:
  - Halkeilu vaurioittaa pinnoite- ja vedeneristekerroksia
  - Haitallisten aineiden ja veden imeytyminen rakenteeseen kiihtyy
  - Halkeilu voi kiihdyttää muita vaurioita/vauriomekanismeja
  - Betonipinnan ulkonäkö ja käytettävyys heikkenee
  - Betonirakenteen tiiviys heikkenee
  - Korroosioperäinen halkeilu etenee verrattain nopeasti korroosion käynnistyttyä
  - Korroosioperäisen halkeilun seurauksena terästen ankkurointikapasiteetti heikkenee



Hannu Pyy

Senior adviser, Tekn.lis.  
AFRY Buildings Finland Oy  
Rakennusfysiikka

Puh. 040 507 2071

[hannu.pyy@afry.com](mailto:hannu.pyy@afry.com)

