



Betonirakenteiden korjaaminen 2024

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

Betonirakenteiden fysikaaliset vauriot

3/18/2024

Sisältö

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

Vaurioituminen

1. Betonin vaurioitumiseen on aina olemassa syy, vaurio itsessään on seuraus
2. Kuntotutkimuksessa havainnoidaan vaurioita
3. Vaurioiden syiden selvittäminen on tärkeämpi osa kuntotutkimusta kuin vaurioiden havaitseminen
4. Kuntotutkimuksella tulee selvittää syy / syyt niin, että vaurion aiheuttaja 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
- Rapautuminen ilmenee rakenteen lujuusominaisuuksien (erityisesti vetolujuuden) heikkenemisenä ja pintakovuuden ja eheyden heikkenemisenä

Rapautuminen

- Syitä betonin rapautumiselle voivat olla esim.
- Suuret rasitukset (pakkanen, kulutus, kemiallinen rasitus),
- Suunnitteluvirheet (väärät rasitusluokat ja väärä betonikoostumus)
- Betonimassan virheet (suuri sementtimäärä, tai vesi-sementtisuhde)
- Työvirheet (jälkihoidon laiminlyönti, betonin kovettumisen häiriintyminen jne.)
- Betonipinnan rapautuminen johtuu tyypillisesti sideaineen kulumisesta/hajoamisesta mekaanisen tai kemiallisen rasituksen seurauksena

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
- Räjähdyt
- > halkeilu, lohkeilu

Kemialliset vauriot

- Kemiallisen ilmiön tai rasituksen aiheuttamat betonin paisumis-/rapautumisilmiöt
- Raudoitteiden korroosio (käynnistyminen)
- Muut 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 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.
- Keksinnöstä 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 ja lentotuhka
- Betonin ominaisuuksia voidaan muokata säätelämällä kaikkien massan 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

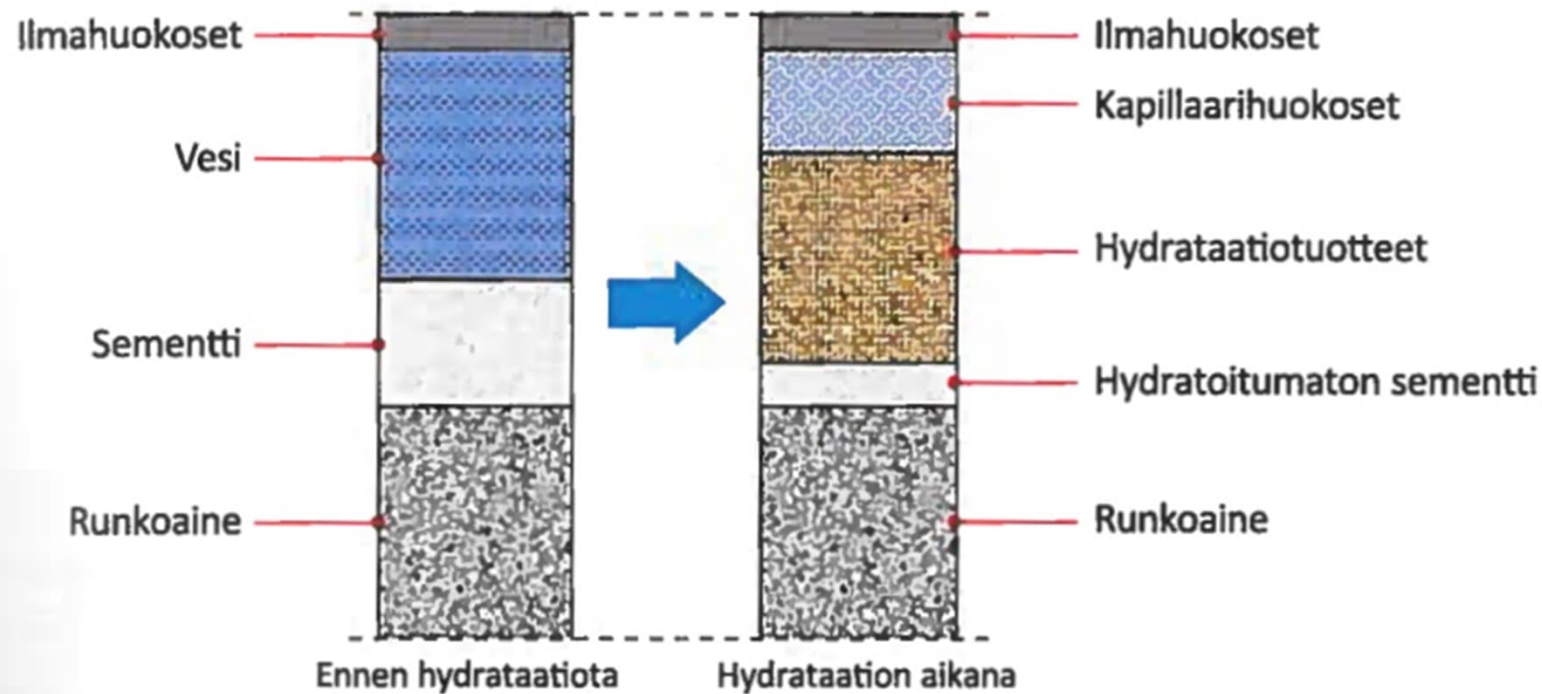
uuteen 2021
päivitykseen tulleita
arvoja

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

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosio n tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio						Jäätymis-sulamisrasitus ⁽¹²⁾				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
		XC1	XC2	XC3	XC4	Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä			XF1 ⁽³⁾	XF2	XF3 ⁽³⁾	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 ³) vähintään		160	160	250	250	300	320	320	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä (%) ⁽⁶⁾												4,0 ⁽⁵⁾	5,0	4,0 ⁽⁵⁾	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 ⁽⁴⁾	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

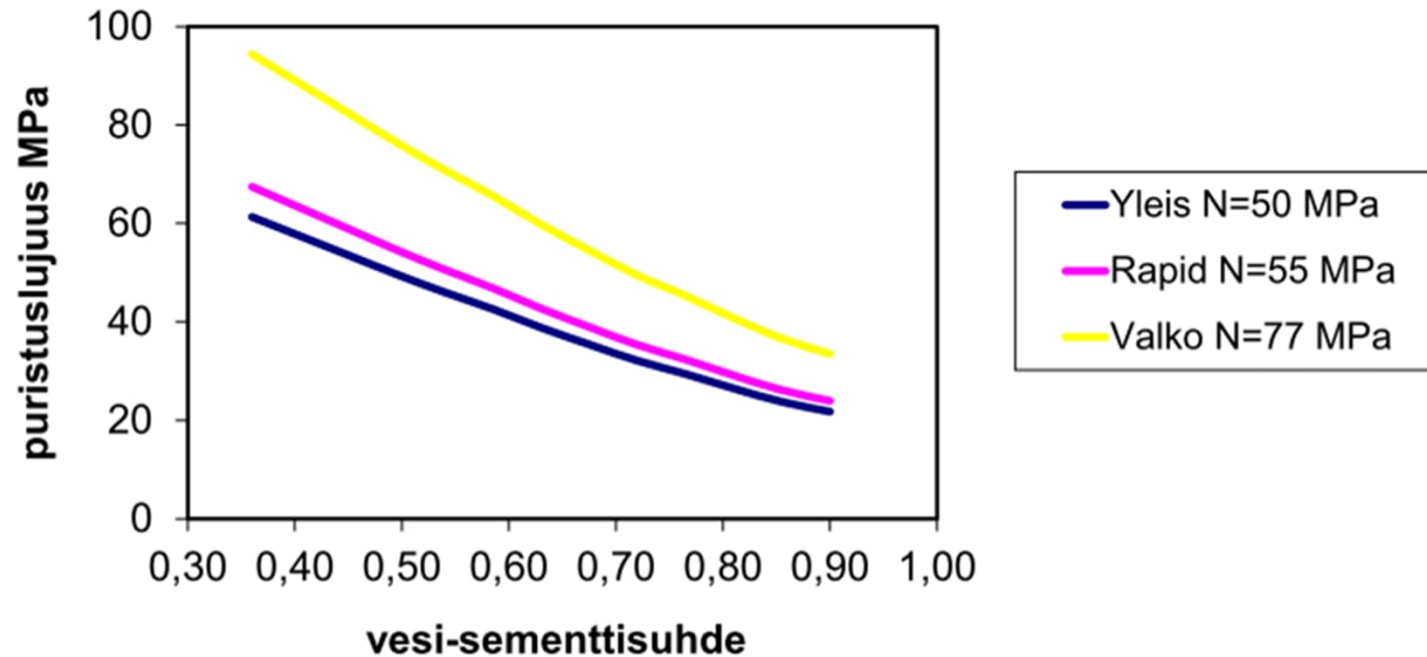
- Sementin reaktio veden kanssa



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 sementtikivistä.

Veden (vesi-sementtisuhteen) merkitys

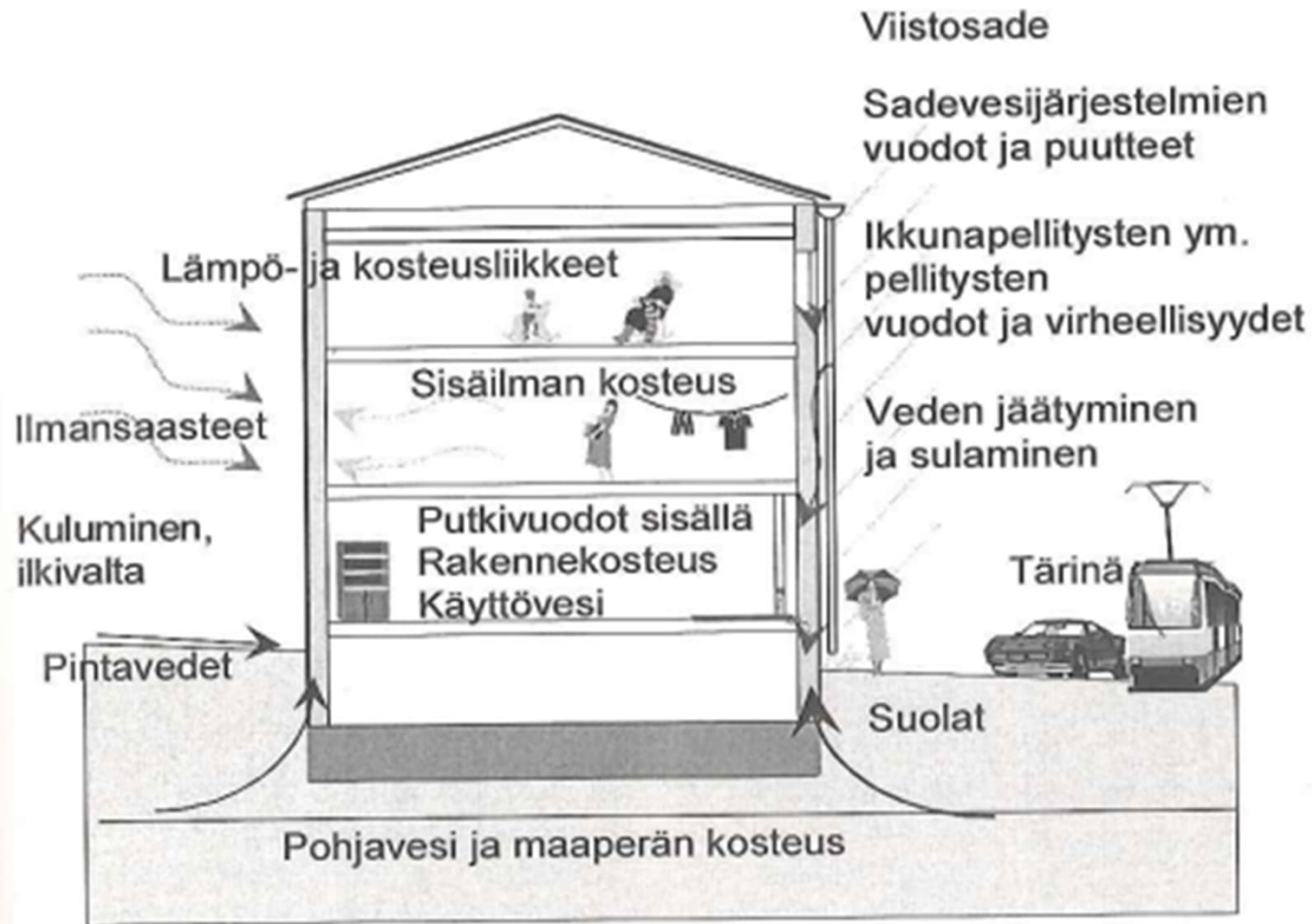
**Vesi-sementtisuhteen yhteys betonin
puristuslujuuteen eri sementeillä
(betoni huokostamaton, ilmaa 20 dm³/m³)**



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 ja muiden vaurioiden lähteitä



Fysikaaliset vauriot

- Yleisimmät suomalaisissa ulkobetonirakenteissa vaikuttavat rasitukset ja niistä johtuvat vaurioitumisilmiöt ovat:
- Betonin pakkasrasitus ja siitä johtuva pakkasrapautuminen
- Raudoitteiden 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

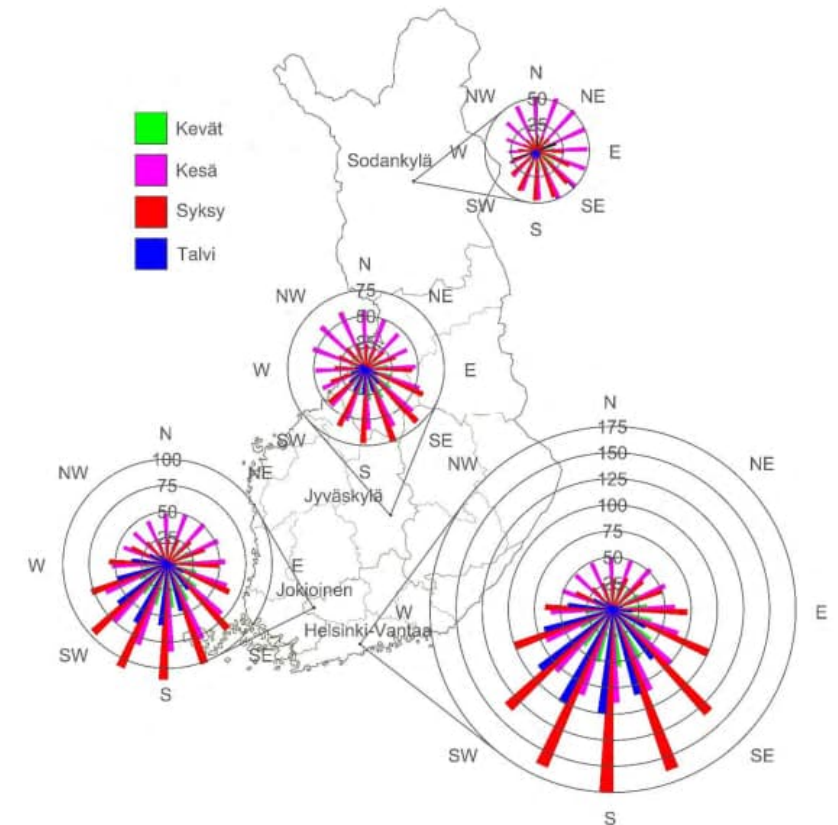


Fysikaaliset vauriot



Fysikaaliset vauriot

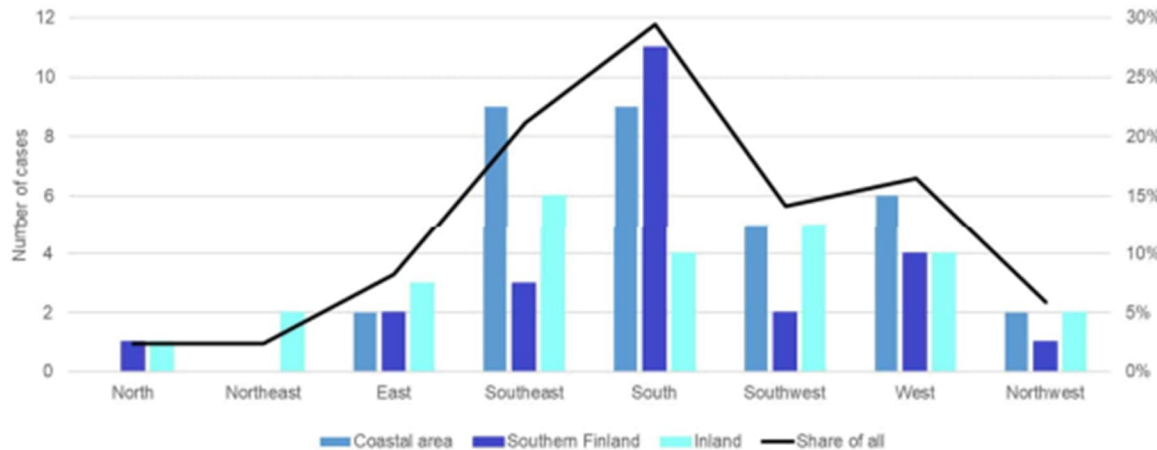
- Tyypilliset rasitetuimmat alueet rakenteissa ja rasitustekijät:
- Etelä- ja länsisivut
- Sateiden suunta, tuuli ja viistosade
- Auringon vaikutus (jäätyminen – sulaminen)
- Puut & maaston esteet
- Katukuilut
- Avoin ympäristö
- Etelä-Suomi - rannikkoseutu



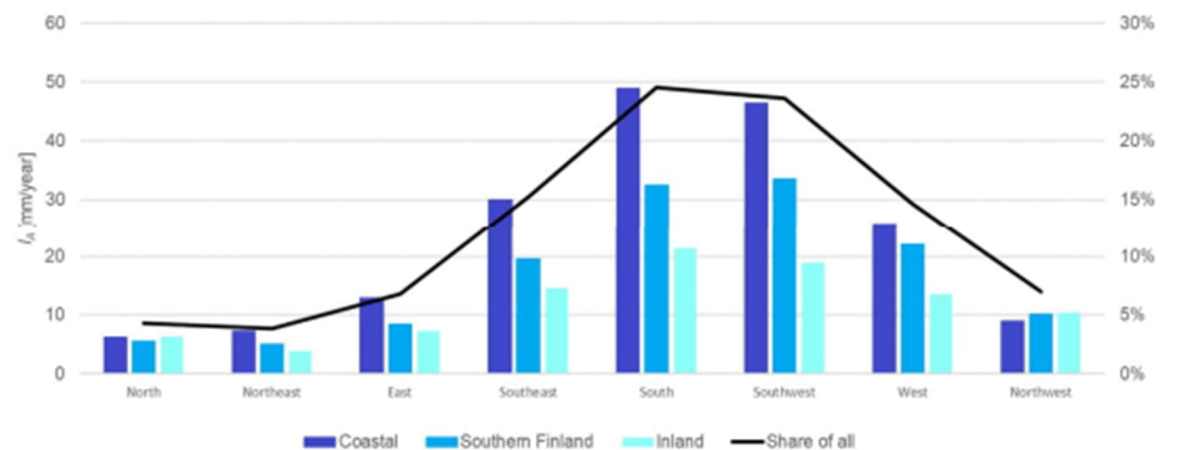
Kuva 4: Viistosaderasitus eripuolella Suomea. Kevät = maaliskuu-toukokuu, kesä = kesä-elokuu, syksy = syys-marraskuu, talvi = joulukuu-helmikuu.

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

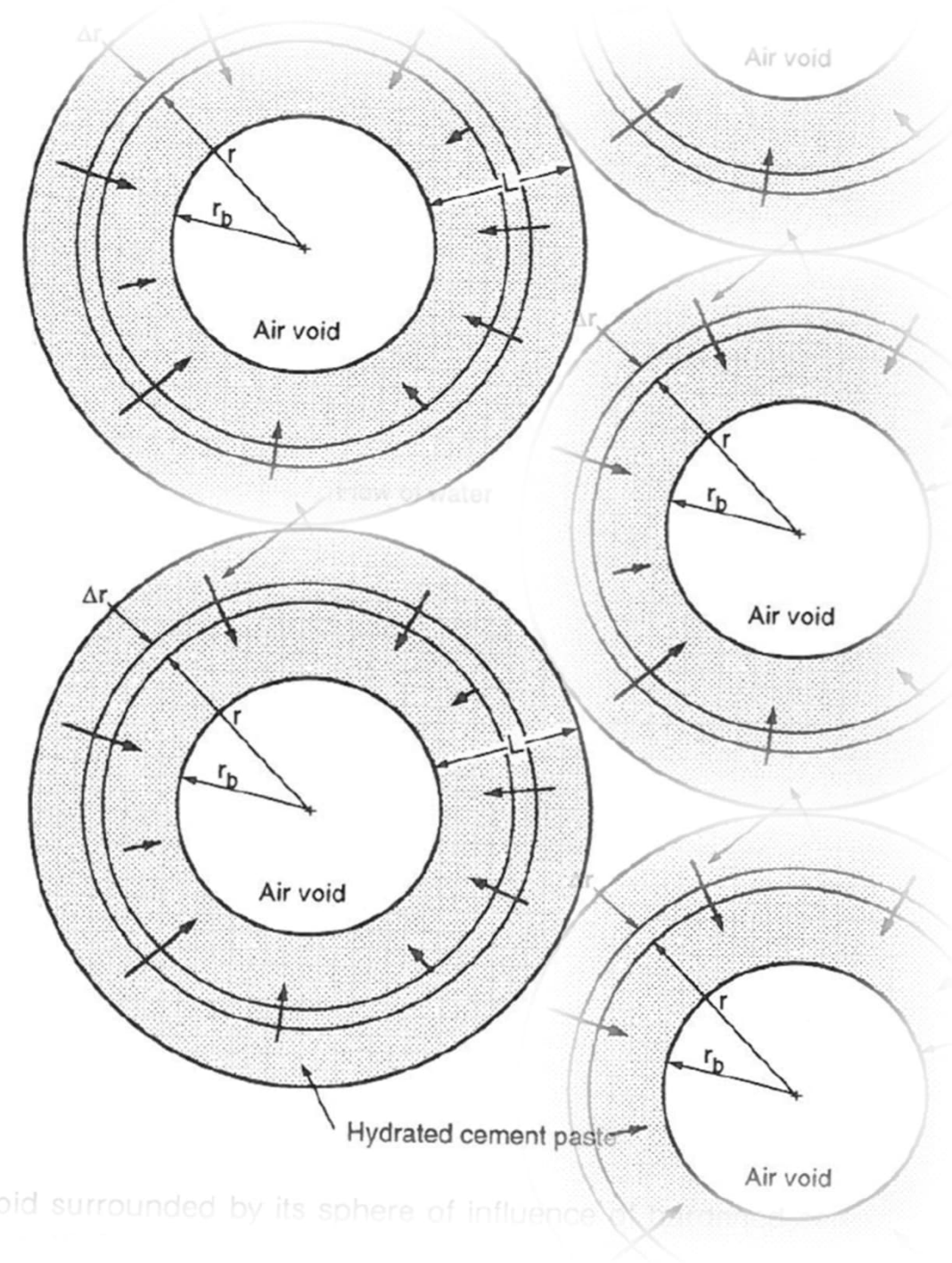
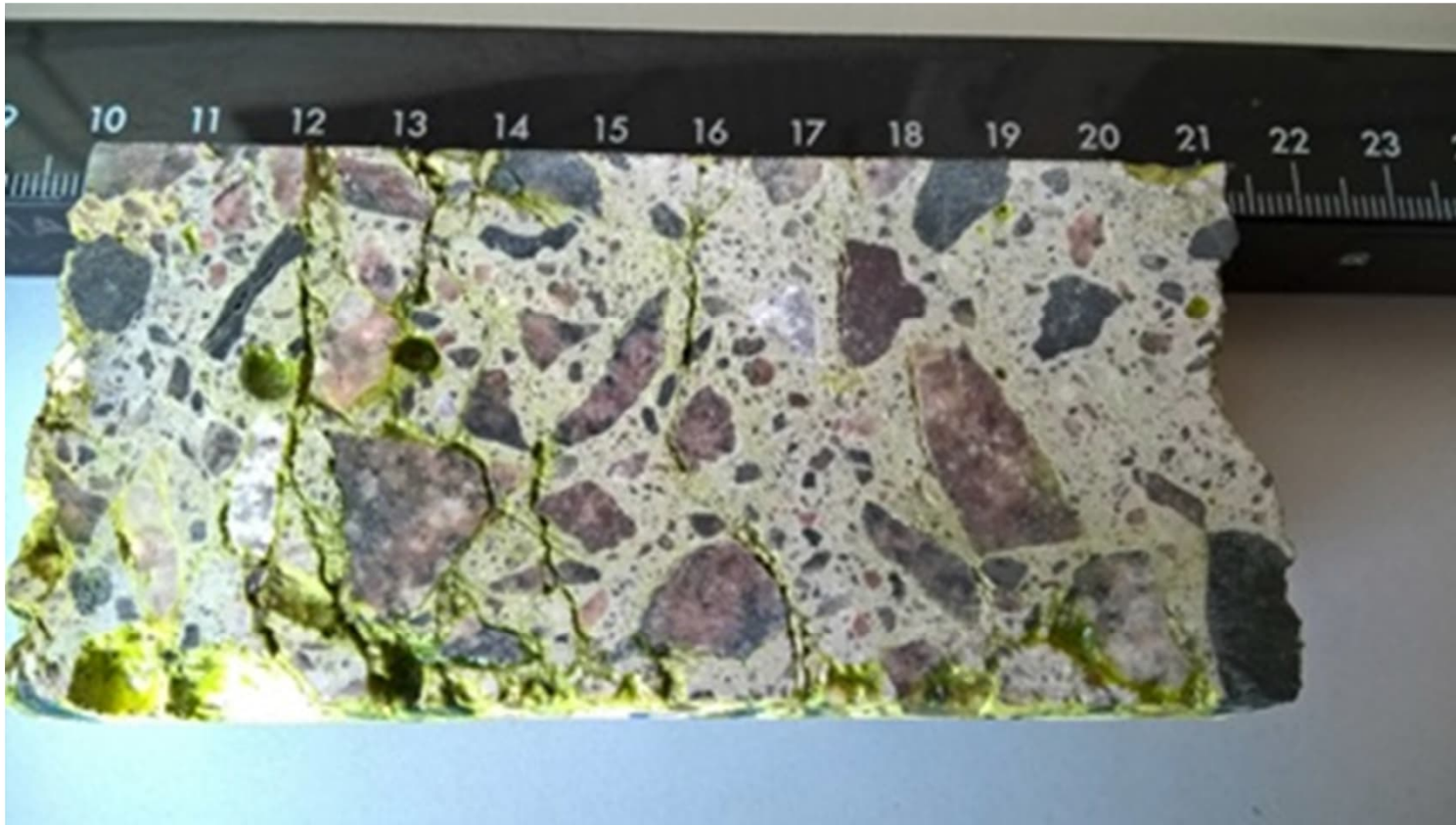


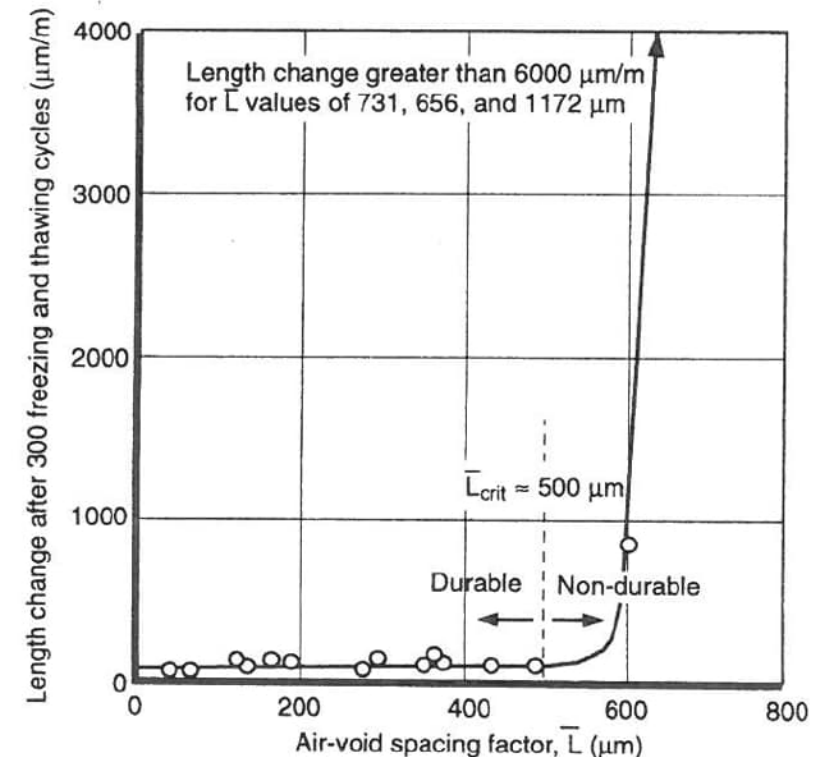
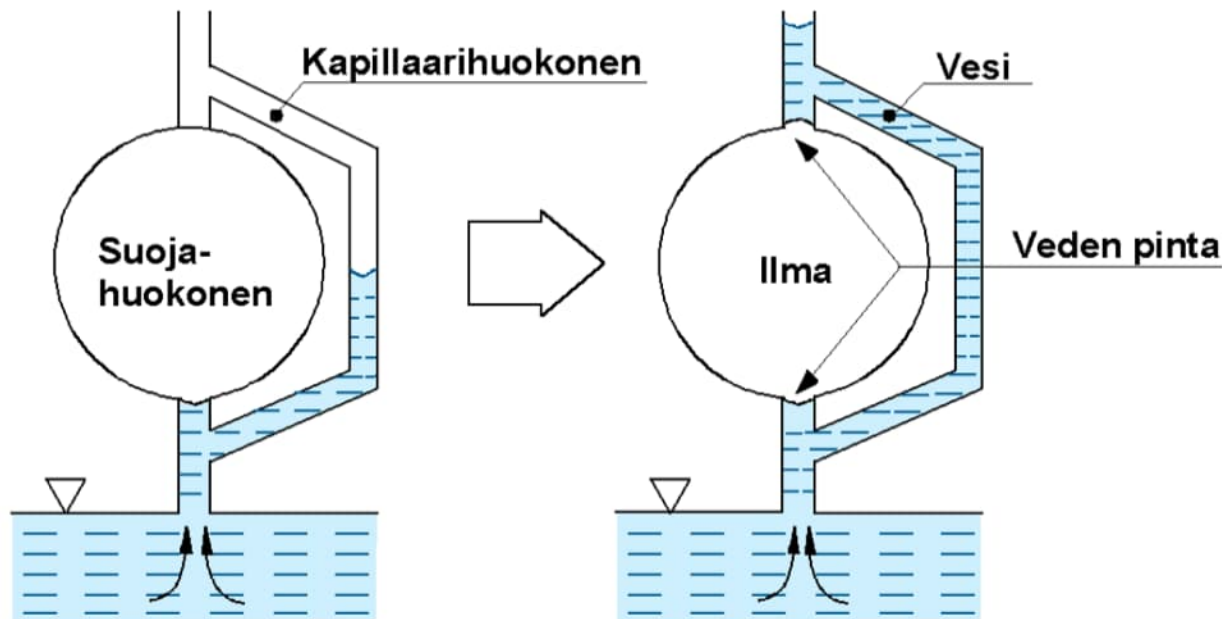
Figure 2.1 Air void surrounded by its sphere of influence of hydration

Betonin pakkasrapautuminen



Betonin pakkasenkestävyys

- Betonia voidaan suojata pakkasrapautumiselta muodostamalla huokosten verkosto, johon jäätymisen aiheuttama paine voi vapautua
- Tasainen suojahuokostus (halkaisijaltaan luokkaa 10...800 μm , 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 VTT TEST-R003-00- 2010 tai SFS-EN 480- 11:2005 mukaan ¹⁾		Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447 ³⁾			Laattakoe CEN/TR 15177 luokissa XF1 ja XF3 ⁴⁾ , CEN/TS 12390-9 luokissa XF2 ja XF4, jälkimmäisessä väliaine 3 % NaCl-liuos	
		Enimmäisarvo [mm]		Syklien lukumäärä	Taivutus- tai halkaisu- vetolujuuksien suhde [%]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ [%]	Rapauma m [g/m ²]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ [%]
		w/c > 0,40	w/c ≤ 0,40					
50	XF1	0,27	0,27	100	≥ 67	≥ 75	m ₅₆ ≤ 500	γ ₅₆ ≥ 67
	XF2	0,25	0,30	-	-	-	m ₅₆ ≤ 650	-
	XF3	0,23	0,23	300	≥ 67	≥ 75	m ₅₆ ≤ 200	γ ₅₆ ≥ 75
	XF4	0,25	0,30	-	-	-	m ₅₆ ≤ 350	-
100	XF1	0,25	0,25	300	≥ 67	≥ 75	m ₅₆ ≤ 200	γ ₅₆ ≥ 75
	XF2 ²⁾	0,25	0,30	-	-	-	m ₅₆ ≤ 250	-
	XF3	0,22	0,22	-	-	-	m ₅₆ ≤ 100	γ ₅₆ ≥ 85
	XF4 ²⁾	0,25	0,30	-	-	-	m ₅₆ ≤ 150	-

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

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

²⁾ InfraRYL kohdan 42020.1.2 mukaiset vaatimukset.

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

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

⁵⁾ Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaatimuksenmukaisuus osoitetaan pinnan rapauman perusteella.

2021
päivitykseen
tulleita
muutoksia

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

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

^{1a)} Referenssimenetelmänä käytetään by 72 Betonin laadunvarmistus Osa 1 - Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthieistä. Huokosjako voidaan selvittää ohut- tai pintahieistä myös muulla soveltuvalle menetelmällä, jonka korrelaatio suhteessa referenssimenetelmään on todettu testauslaitosten välisellä tasokokeella.

^{3b)} Vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa joko betonin vetolujuuksien tai dynaamisten kimmokertoimien perusteella, joista toisen vaatimuksen tulee täytyä.

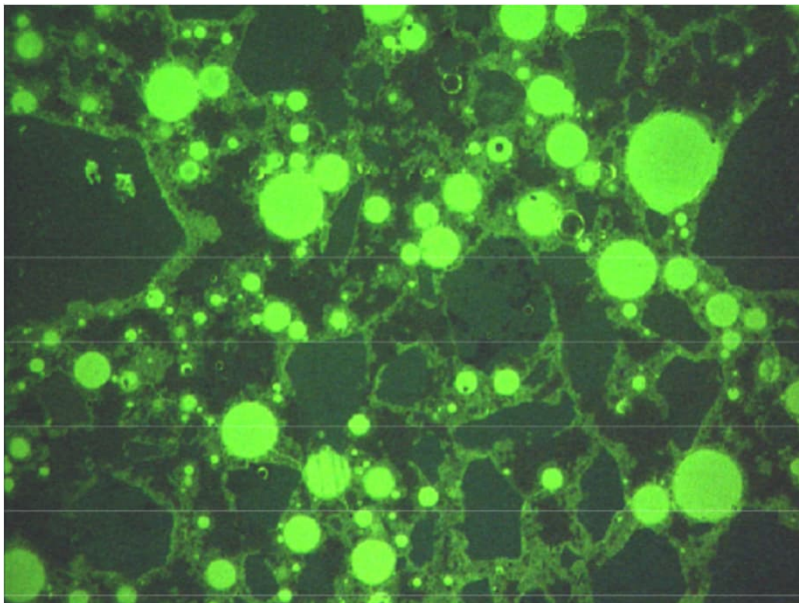
^{4c)} Rasitusluokissa XF1 ja XF3 vaatimuksenmukaisuus on osoitettava sekä kimmokertoimen että pinnan rapauman osalta, joista kummankin on täyttyvä.

^{4d)} Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vaatimuksenmukaisuus osoitetaan pinnan rapauman perusteella.

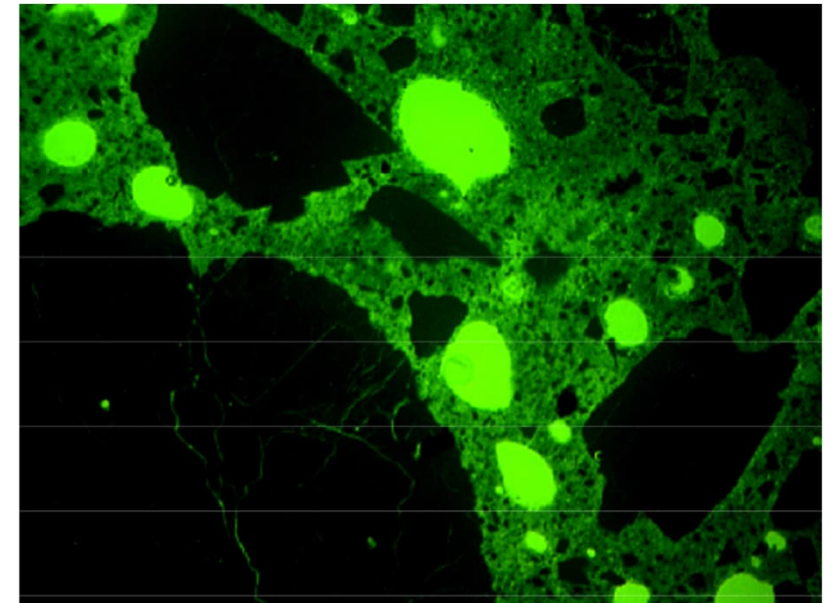
Betonin pakkasenkestävyys - huokosjako

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

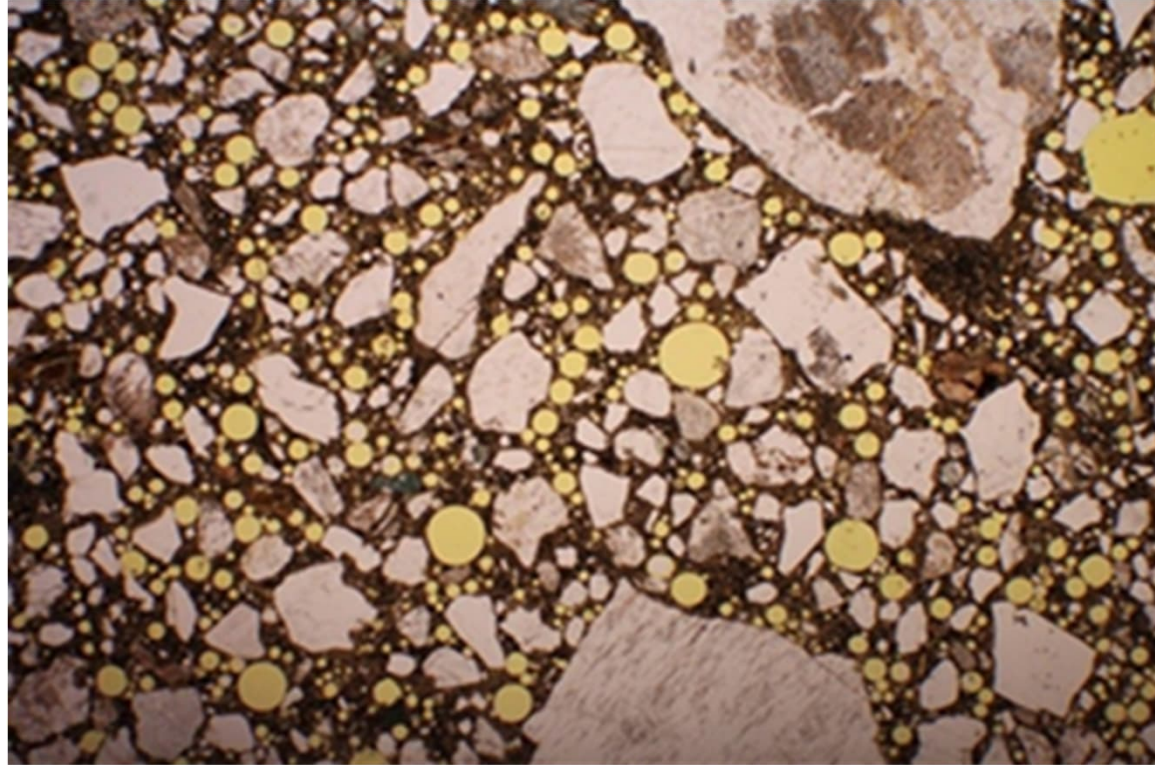
A



B



Betonin pakkasenkestävyys - huokosjako



Näyte	Suojahuokoset (A) til- %	Tiivistys- huokoset (B) til- %	Koknaisilma- määrä (A+B) til- %	Ominais- pinta-ala mm ² /mm ³	Huokosjako mm
A	7,0	0,9	7,9	31	0,14

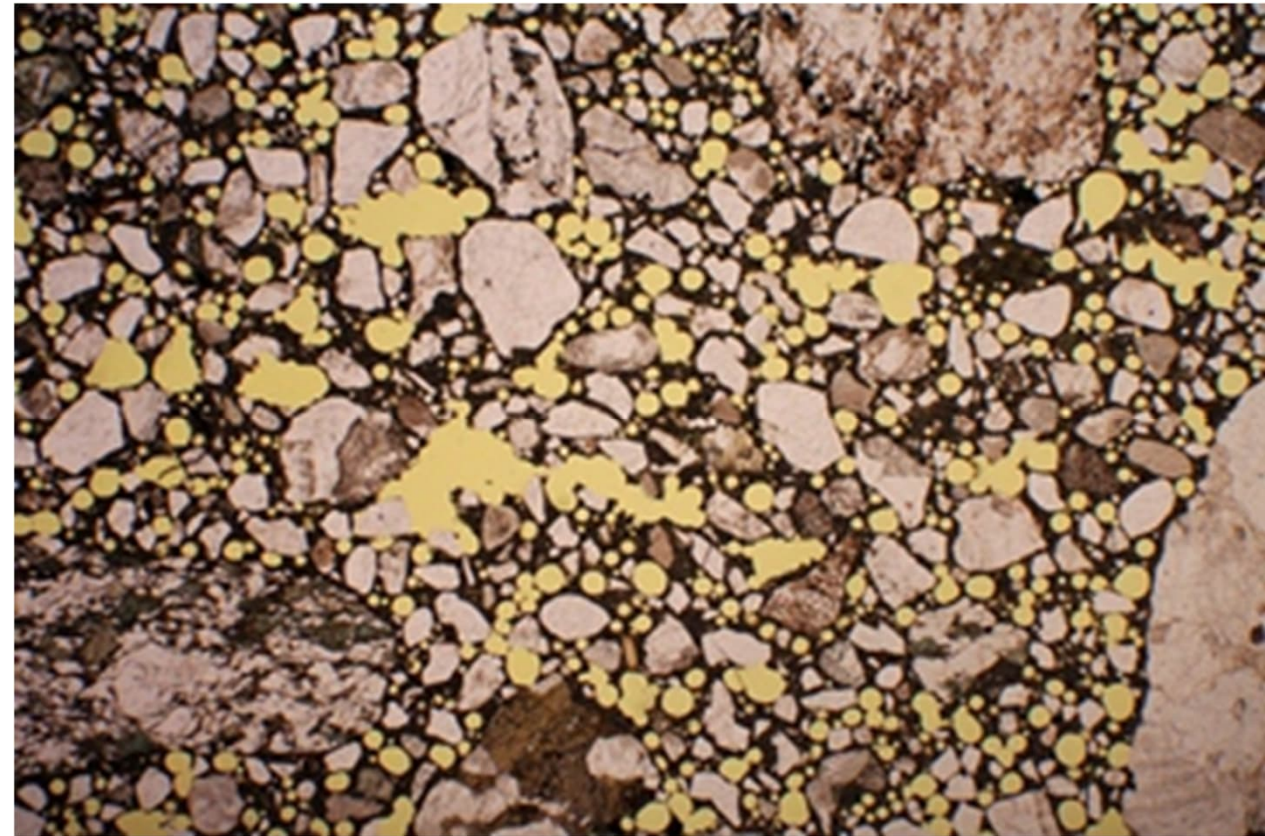
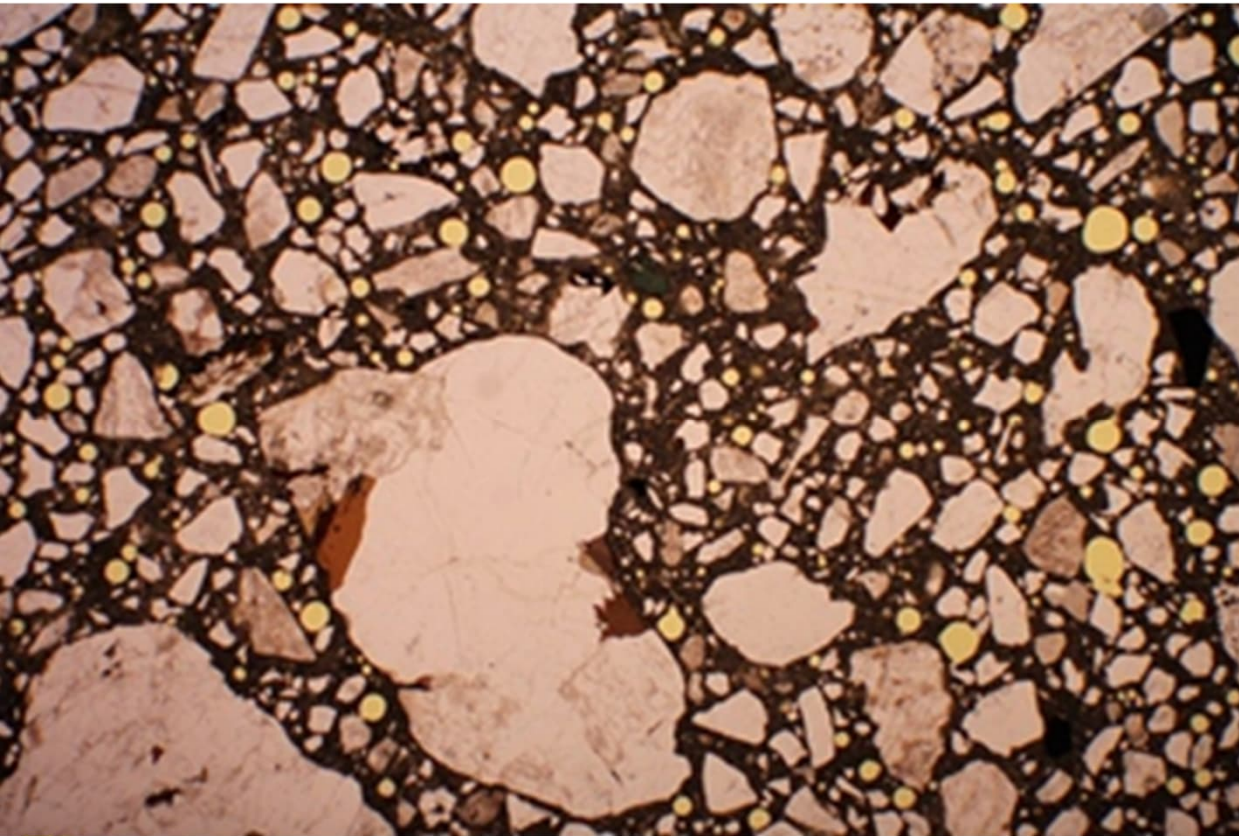
Betonin pakkasenkestävyys vs. huokostus

- Kuntotutkimussarja, kohteita (rakennuksia) n. 60 kpl, 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, kaksi tutkimusaluetta 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 IIA 42.5 "Rapid" tai vast.	Huokostettu CEM IIB 42.5 "Plus" tai vast.	Huokostettu CEM IIA 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

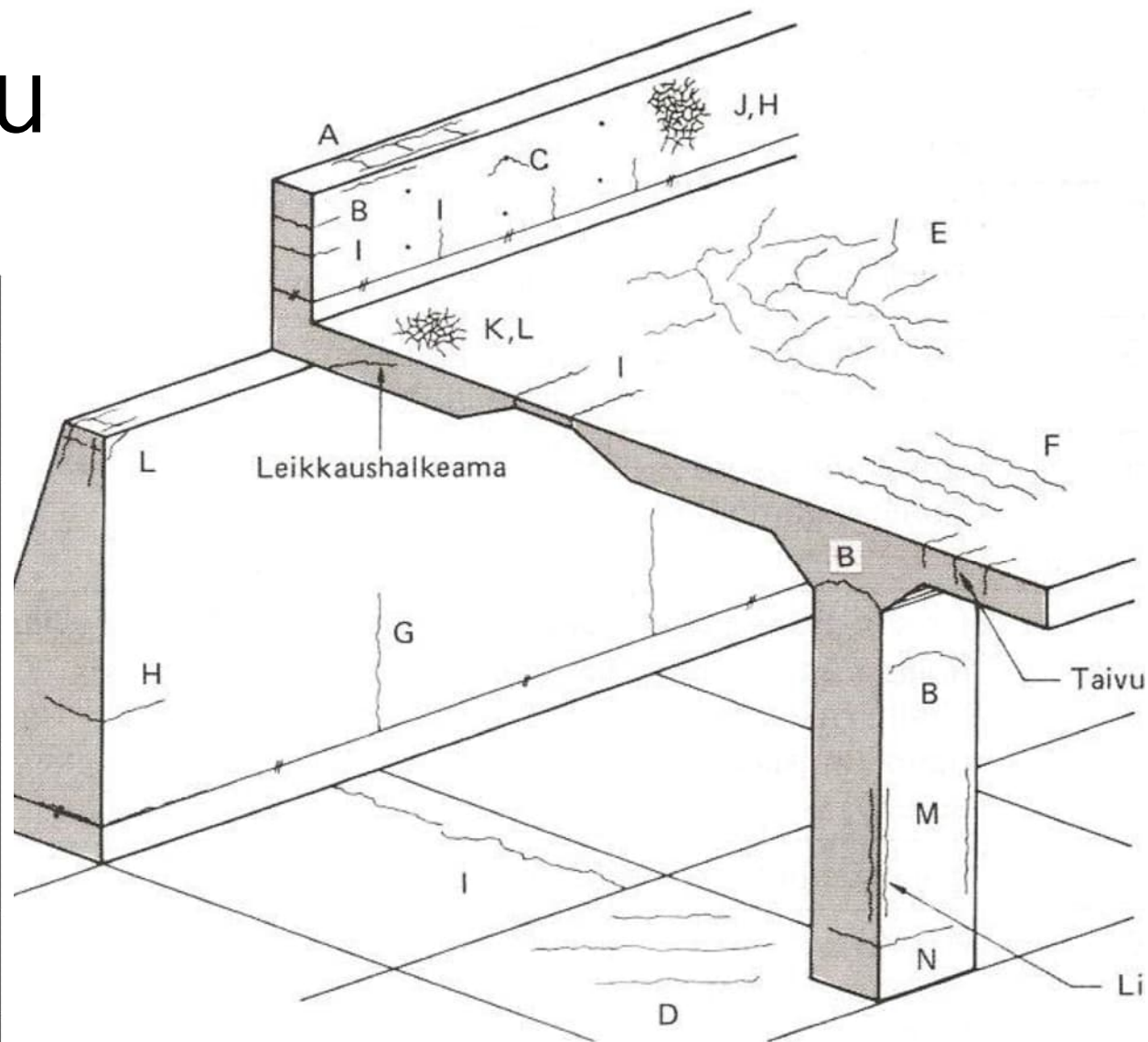
■ = v/s-suhteen alue, joka saattaa tuottaa ongelmia

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

- v/s-suhteen ollessa < 0,40 pumppattavuus vaikeaa, harkitse suurempaa v/s-suhdetta.
- v/s-suhteen ollessa < 0,50 pumppattavuus 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.
- Riski hitaaseen betonin kuivumiseen.

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), 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), 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

- Muun kuin veden aiheuttama kiteytymispaine
 - Nousevan kosteuden aiheuttama suolarasitus



Betonipinnan rapautuminen – osittain fysikaalista, osittain mekaanista

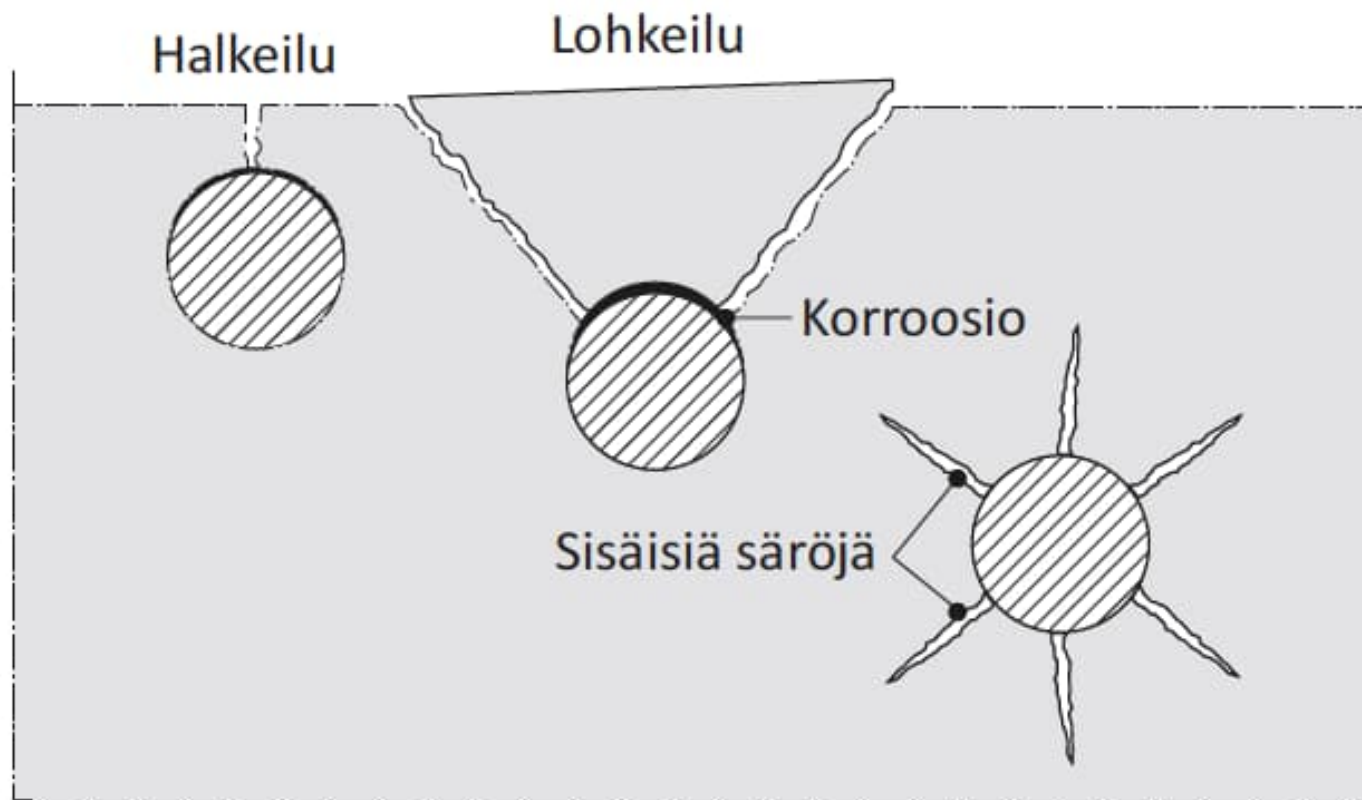
- Säärasituksen (sade, tuuli, auringonsäteily) aiheuttama
- Kulutuksen (abraasio) aiheuttama
- Virtaavan veden (kavitaatio) aiheuttama
- Ilmenee silloin, kun betonirakenteen pintakerrokset ovat jääneet heikoiksi tai kulutus on voimakasta

Betonipinnan rapautuminen

- Betonin valupinnan laatu puutteet
- Vähäinen kiviaineksen määrä pinnassa
- Paksu sementtiliimakerros
- Suuri sementtipastan määrä
- Suuri v/s-suhde
- Erottuminen
- Betonin tiiveys



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

