
Pakkasenkestävyyden testaus

Mitä betonin valmistajan ja testauslaboratorion tulee ottaa huomioon?

Teemu Ojala, TkT, Tutkija
20.1.2026

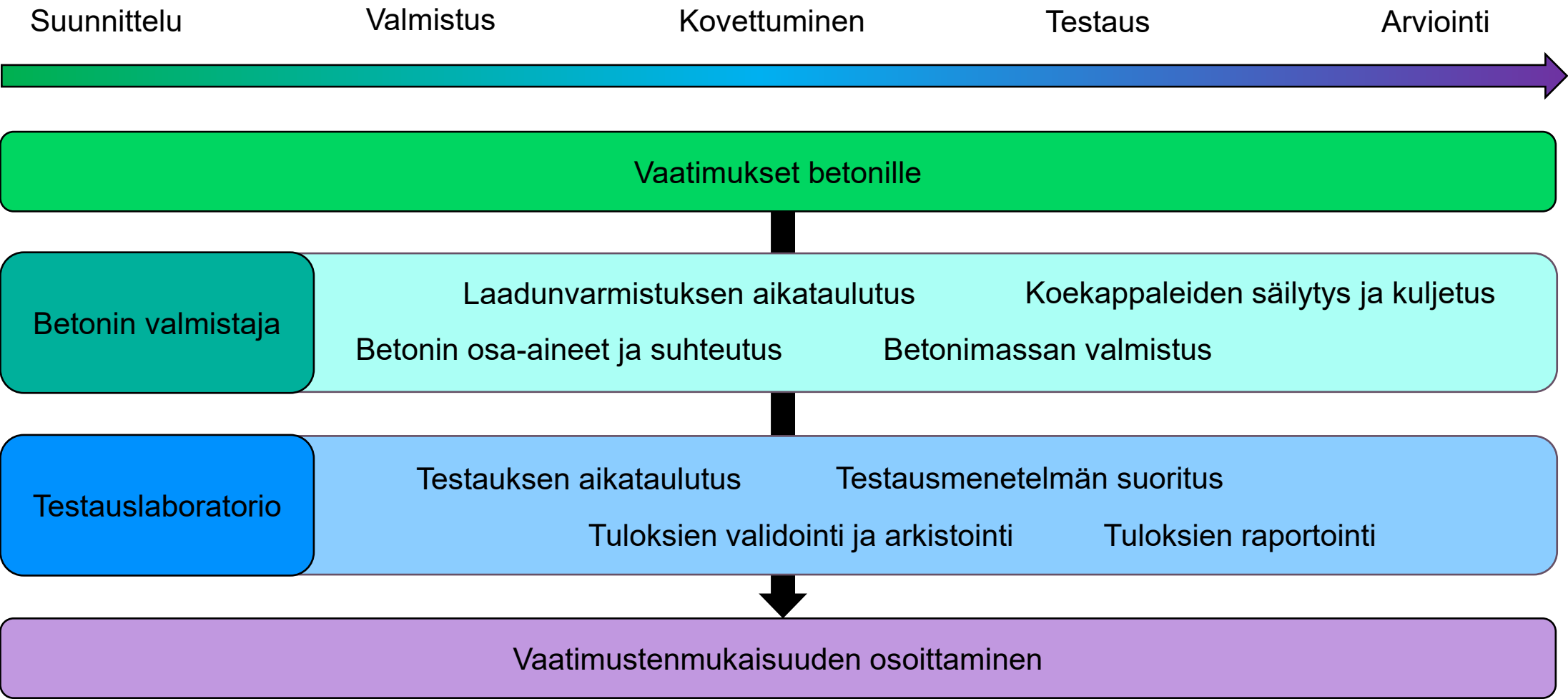
Luennon tavoitteet

1. Betonin pakkasvaurioituminen
2. Pakkaskestävyyden vaatimukset
3. Testausmenetelmät
4. Laattatestin suoritus
5. Tulosten tulkinta

A!

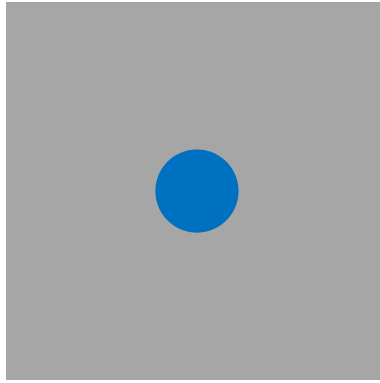


Intro: Pakkaskestävyyden testaus



1. Betonin pakkasvaurioituminen

Mikä aiheuttaa pakkasvaurion?

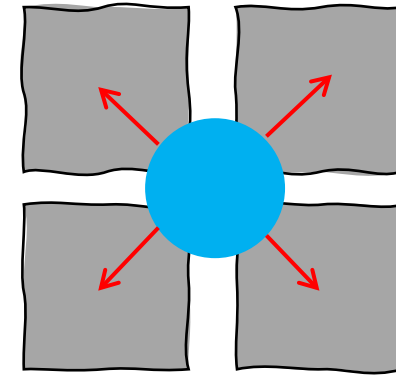


Heikosti suunniteltu ja/tai tehty betoni imee kapillaarisesti ympäristöstään vettä, jolloin sen kyllästysaste nousee



Vesi laajenee +9 %

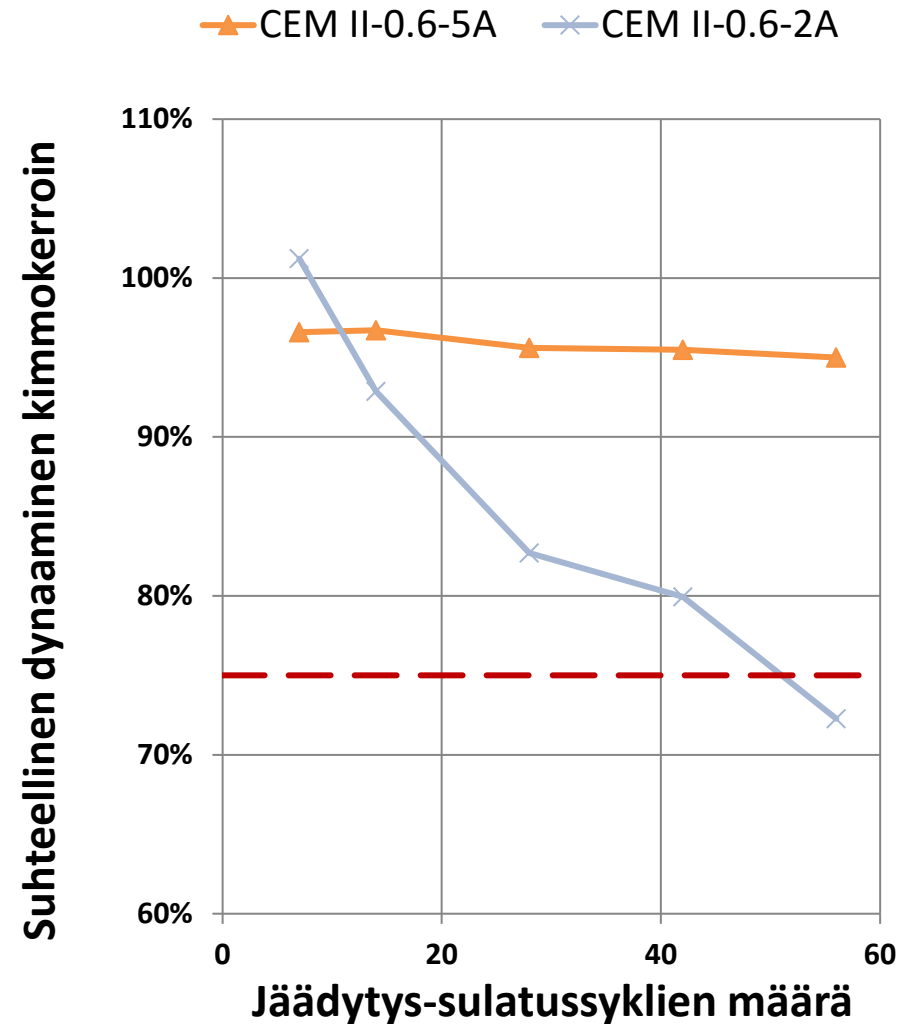
Jäätyminen alkaa suurista huokosista ja etenee pienempiin huokosiin



Jos jännitykset ovat suurempia kuin betonin vetolujuus, betoniin muodostuu mikrohalkeamia

Mikrorakenteen vaurioituminen

- Toistuvat jäädytys-sulatussyklit lisäävät mikrohalkeamien määrää kumulatiivisesti
 - betonin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät
- Syntyneet halkeamat lisäävät veden tunkeutumista betoniin
 - nostaa entisestään kyllästysastetta ja vaurioitumisnopeutta



$$RDM_n = \left(\frac{X_n}{X_0} \right)^2 \times 100 [\%]$$

Pakkasrasituksen vauriomekanismit

1. Sisäinen vaurioituminen

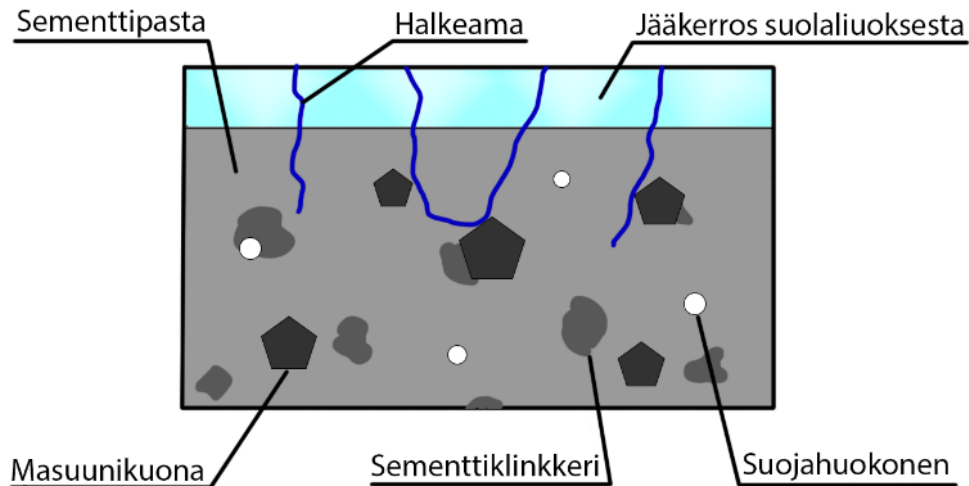


2. Ulkoinen vaurioituminen eli pinnan rapautuminen



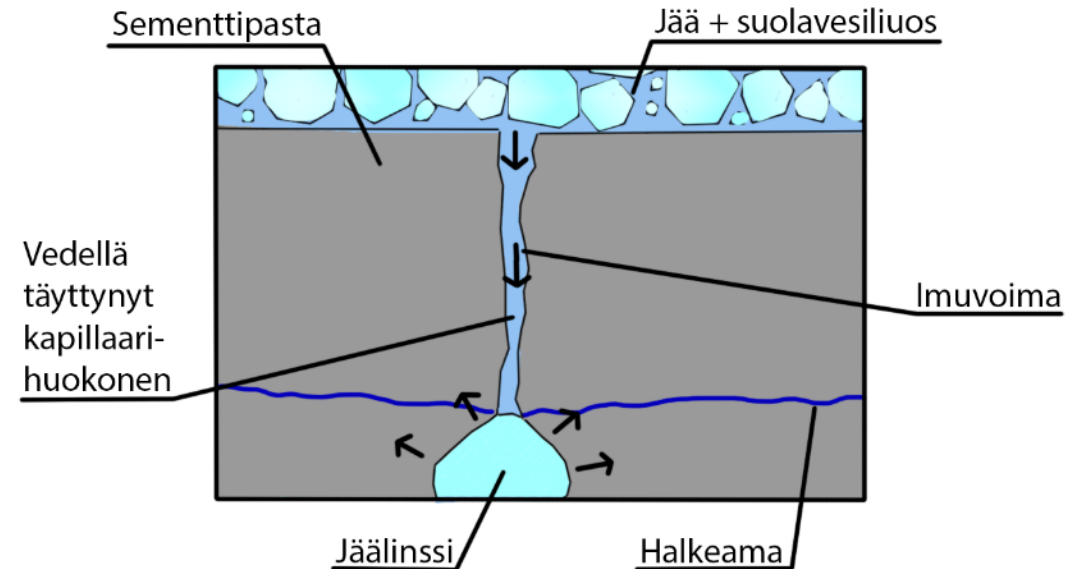
Teoriat betonin rapautumismekanismeille

Glue spall -teoria



Jääkerroksen halkeilu aiheuttaa
jännityksiä betonipinnassa
kutistumisen vuoksi

Cryogenic suction -teoria



Konsentraatioerot edistävät
jäälinsien kasvua, jota ruokkii
osittain nestemäisessä muodossa
oleva jää + suolavesiliuos

Miten pakkasvaurioitumista voidaan hidastaa?

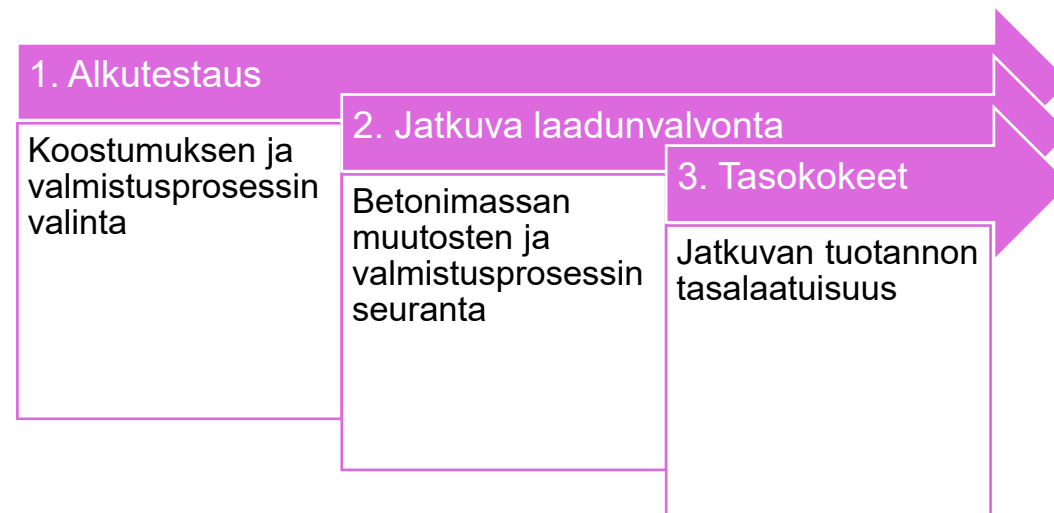
Esimerkiksi

- Pitämällä betonin kosteus rakenteessa kriittisen kyllästysasteen alapuolella (78–91 %)
- Alentamalla vesi-sementtisuhdetta riittävän alhaiseksi
 - Kapillaarihuokoisuus laskee ja betoni on lujempaa
- Huokostamalla betoniin suojahuokosia
 - Suojahuukosten on oltava riittävän pieniä ja tasaisesti jakautuneita

2. Pakkasenkestävyyden vaatimukset

Laadunvalvonnan perusteet

- Pakkaskestävyyden ja pakkas-suolakestävyyden laadunvalvonta ja vaatimustenmukaisuuden toteaminen jäätymis-sulatusrasituksessa
 - Pakkasrasitus XF1 ja XF3 ja pakkassuolarasitus (jäänsulatusaineilla) XF2 ja XF4
 - Kovettuneen betonin testaus akkreditoidussa testauslaitoksessa
- Betonilaadut jaetaan testausta varten osa-aineiden perusteella arvostelueriin
 - XF1 ja XF3 aina eri arvosteluerä kuin XF2 ja XF4
 - Väyläviraston P-lukubetoneilla omat arvostelueränsä



Betonin koostumukset ja ominaisuuksien raja-arvot jäätymis-sulamisrasituksessa (50 vuotta / 100 vuotta)

- XF-rasitusluokissa olennaisena tekijänä kyllästymismäärä ja jäänsulatusaineiden olemassa olo
- Betonin vastaavien ominaisuuksien menetelmän periaatteet: osoitetaan testaamalla vastaavan rasitusluokan betonin säilyvyysominaisuuksien olevan ainakin yhtä hyvät kuin referenssibetonilla (EI XF2, XF4 ja XA1...XA3)

Rasitusluokka	XF1	XF2	XF3	XF4
Tehollinen v/s-suhde enintään	0,60 / 0,55	0,50 / 0,45	0,50	0,45 / 0,40
Lujuusluokka vähintään	C30/37	C30/37 / C35/45	C30/37	C35/45 / C40/50
Tehollinen sideainemäärä vähintään (kg/m ³)	270	330	300	360
Ilmamäärä (%)	4,0 / 5,5	5,0	4,0 / 5,5	5,0

Vaatimustasot

- Talopuolen rakenteet

- Ennakkokokeissa varmistetaan, että haluttu pakkasenkestävyys taso saavutetaan sekä tuoreessa että kovettuneessa betonissa (SFS 7022:2024)
- Tämä tehdään arvosteluerittäin ja ennakkokokeena tehdään vähintään yksi vaihtoehtoisista kokeista
- Tasokokeissa varmistetaan pakkasenkestävyysominaisuuksien säilyminen ennakkokokeiden tasolla
- Tehdään tasaisesti pitkin vuotta painottaen eniten tehtäviin betonilaatuihin
- Enintään puolet saa tehdä huokosanalyysia käyttäen → tarvitaan myös suoria laattakokeita

Taulukko 5.5. Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden vaatimukset, kun suunnittelukäyttöikä on 50 tai 100 vuotta.

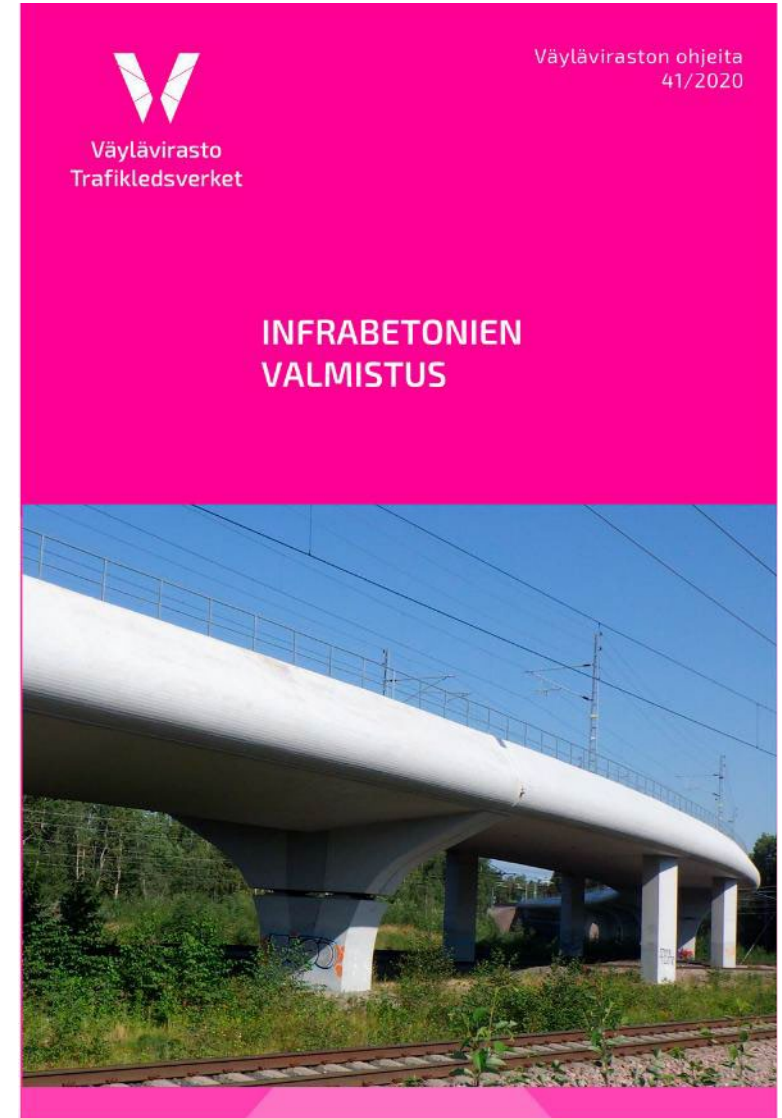
Suunnittelukäyttöikä [a]	Rasitusluokka	1		2			3	
		Huokosjako by 72 Betonin laadun- varmistus Osa 1 - Betonin ilmahuokos- parametrien määrittäminen ohutheista tai SFS-EN 480–11:2005 mukaan ^a		Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447 ^b			Laattakoe CEN/TR 15177 luokissa XF1 ja XF3 ^c , CEN/TS 12390-9 luokissa XF2 ja XF4 ^d , jälkimmäisessä väliaine 3 % NaCl-liuos	
		Enimmäisarvo [mm]		Sykliä lukumäärä	Taivutus- tai halkaisu- vetolujuuksien suhde [%]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ [%]	Rapauma m [g/m ²]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin γ [%]
		v/s _{teh} > 0,40	v/s _{teh} ≤ 0,40					
50	XF1	0,27	0,27	100	≥ 67	≥ 75	m ₃₆ ≤ 500	γ ₃₆ ≥ 67
	XF2	-	-	-	-	-	m ₃₆ ≤ 650	-
	XF3	0,23	0,23	300	≥ 67	≥ 75	m ₃₆ ≤ 200	γ ₃₆ ≥ 75
	XF4	-	-	-	-	-	m ₃₆ ≤ 350	-
100	XF1	0,25	0,25	300	≥ 67	≥ 75	m ₃₆ ≤ 200	γ ₃₆ ≥ 75
	XF2	-	-	-	-	-	m ₃₆ ≤ 500	-
	XF3	0,22	0,22	-	-	-	m ₃₆ ≤ 100	γ ₃₆ ≥ 85
	XF4	-	-	-	-	-	m ₃₆ ≤ 250	-

Vaatimustasot

- Infrapuolen rakenteet (InfraRYL)

- Infrabetoneiden merkitsemiseen käytetään Väyläviraston Infrabetonien valmistusohjetta (paitsi XA).
- Betonin valmistajan tulee huolehtia tehdaskohtaisten ennakkokokeiden voimassaolosta, joissa myös varmistetaan pakkasenkestävyys
- Ennakkokoe hyväksytään, jos P-lukulaskelma täyttää vaatimuksen ja kun ennakkokokeen rapaumatulos suolaliuoksella on raja-arvojen mukainen (41/2020).
- Sallitut rapaumamäärät ovat varsin tiukkoja (esim. C35/45 P50 noin 200 g/m²)

A!



Lisäinfoa infrarakenteiden tehdaskohtaisista ennakkokokeista

- Ennakkokokeet tehdään betonivalmistajan toimesta määritetyille taulukon 1 betonilaaduille vähintään kahden vuoden välein
- Laattakoe tehdään normaalitilanteessa betoneille C30/37 P30 ja C35/45 P50.
 - Lisäksi taulukon 1 ulkopuolisille betonilaaduille ja aina, jos kiviaineksen ylänimellisraja < 12 mm.
- Laattakoe toistetaan myös vuosittain joko P30 tai P50 betonilaadulle.
 - Tai jos betonin raaka-aineet muuttuvat (sideaine, lisäaineet, kiviaines), tehdään notkeusluokaltaan notkeampaa betonia, muutetaan P-lukua tai lujuusluokkaa, vedentarve lisääntyy tai huokostimen annostelu muuttuvat.

Taulukko 1 (41/2020)

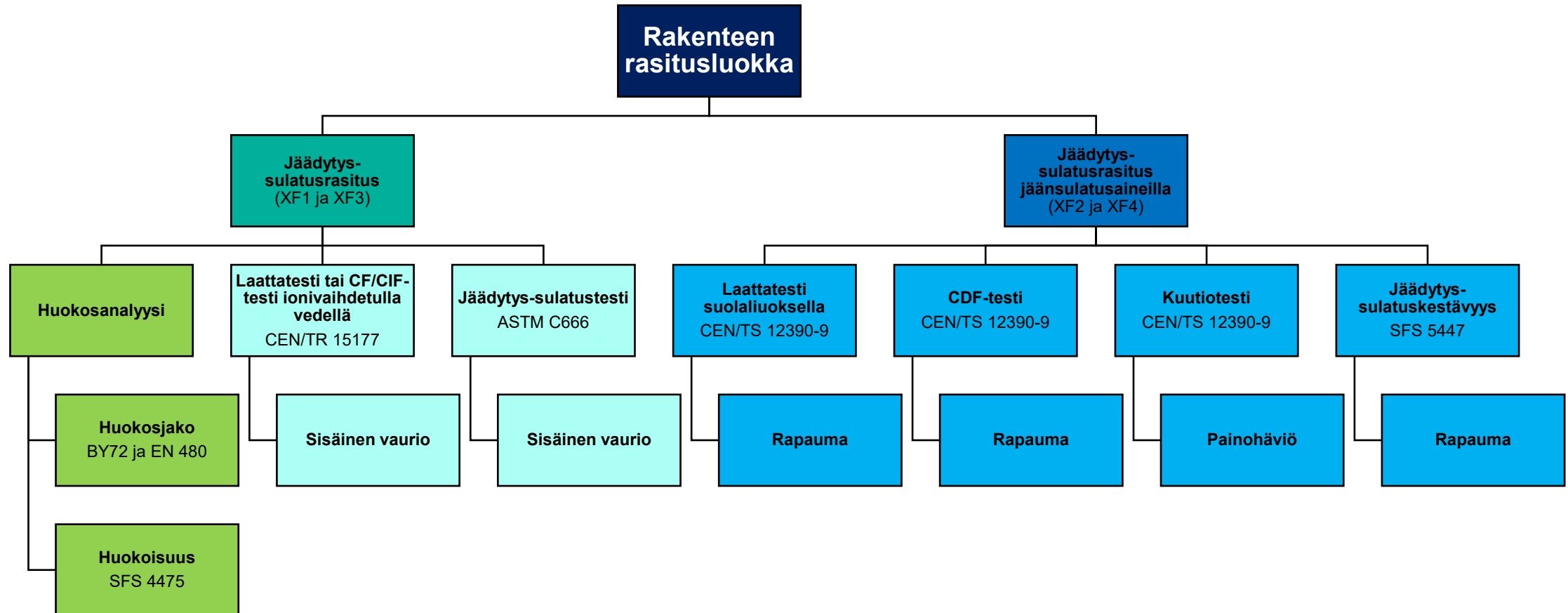
Infrabetonilaatu
C30/37 P0
C30/37 P30
C35/45 P0
C35/45 P30
C35/45 P50
C45/55 P50

3. Testausmenetelmät

Testausmenetelmän valinta

- Kovettuneen betonin pakkasenkestävyys todetaan testausmenetelmällä, joka paljastaa mahdollisimman hyvin mahdolliset puutteet pakkasenkestävyydessä
- Vaihtoehtoisia testausmenetelmiä ovat
 1. Huokosjaon määrittäminen (huokosanalyysi), BY72 Betonin laadunvarmistus Osa 1
 2. Jäädytys-sulatuskoe (vetolujuuksien suhde tai dynaamisten kimmokertoimien suhde)
 3. Laattatesti (XF1 ja XF3 rasitusluokissa sekä rapaumia että suhteellinen dynaaminen kimmokerroin ja XF2 ja XF4 rasitusluokissa rapauma)
- Hyväksyttävä tulos yhdellä testimenetelmällä riittää osoittamaan betonin vaatimustenmukaisuus
- Testausmenetelmä on valittava niin, että se soveltuu käytetylle valmistustekniikalle ja kyseiselle betonilaadulle

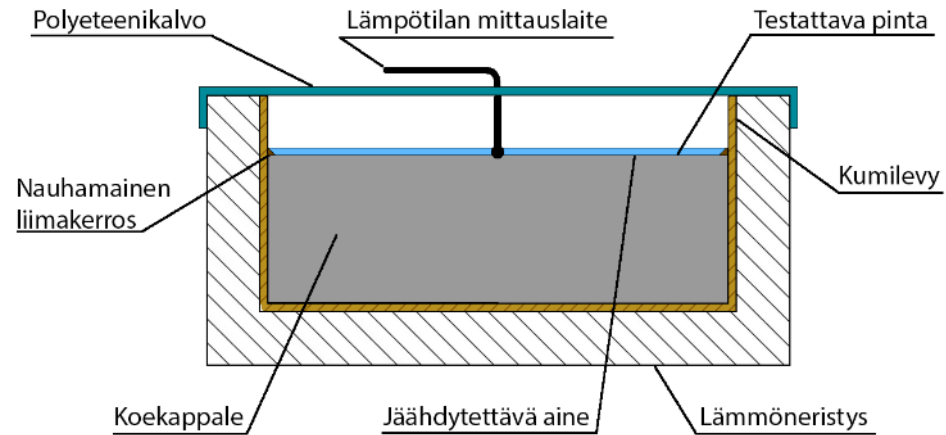
Pakkasenkestävyyden testausmenetelmiä



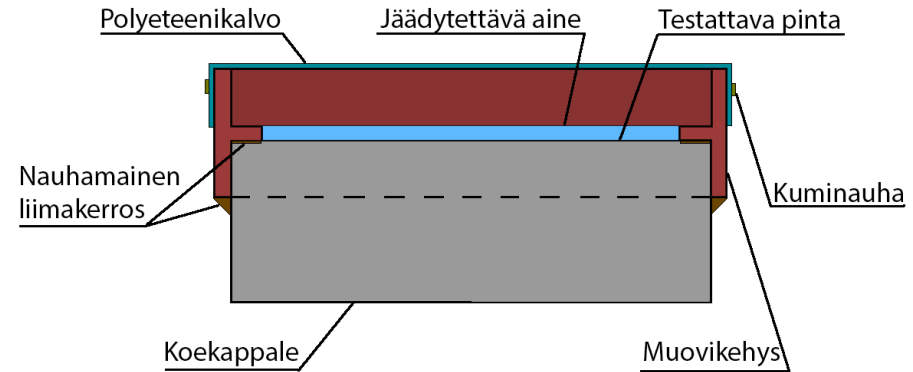
Suoria testausmenetelmiä

CEN/TR 15177 (sisäinen vaurio)

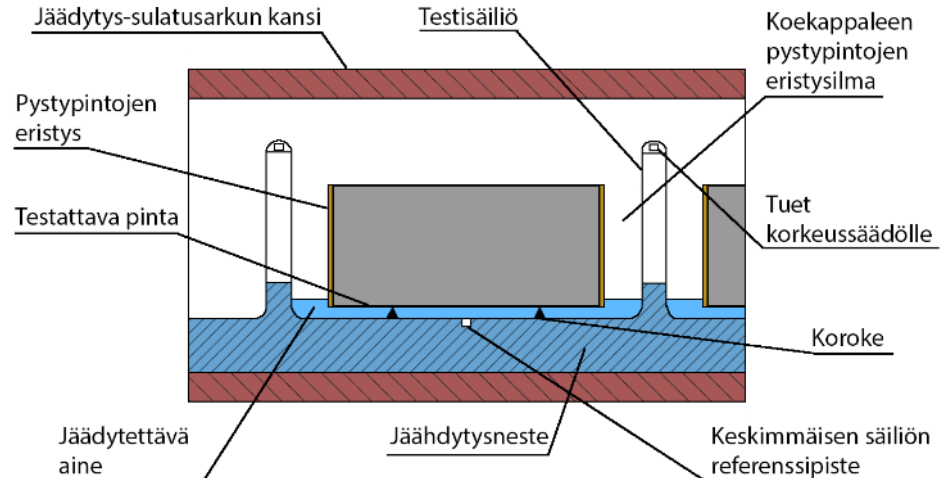
Laattatesti



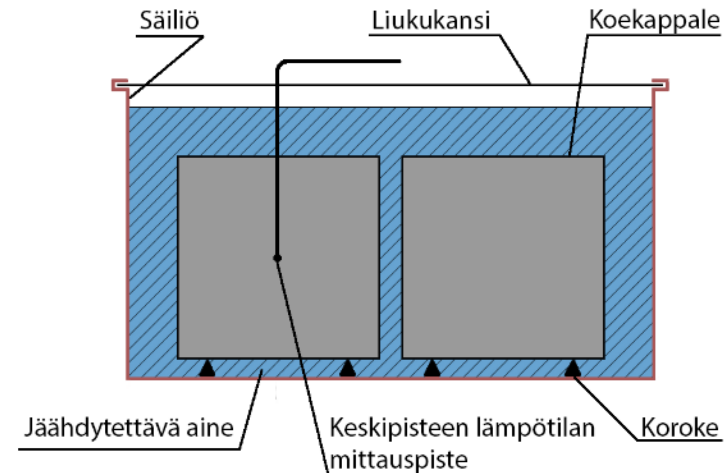
Sveitsiläinen laattatesti



CDF/CF/CIF-testi



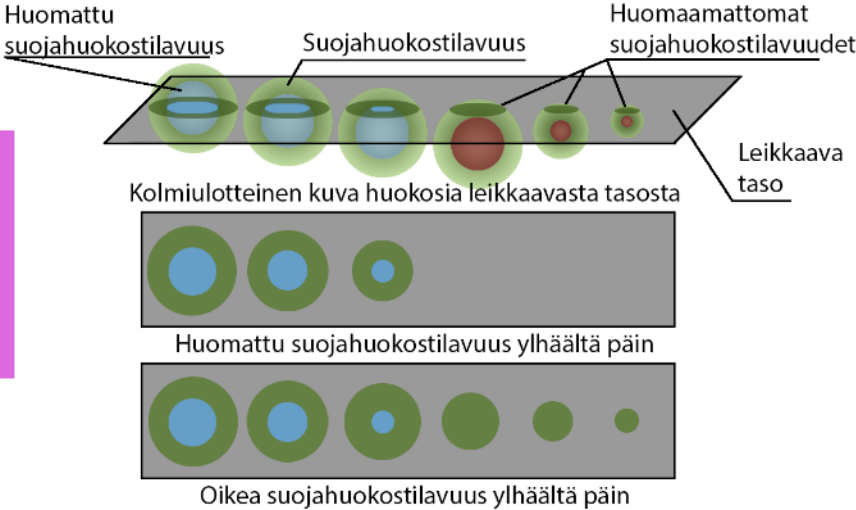
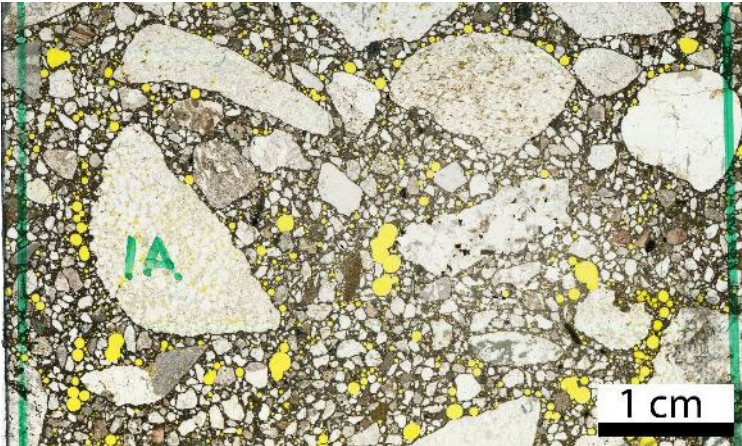
Kuutiotesti



A!

Epäsuoria testausmenetelmiä

Huokosanalyysi



BY72
Osa 1
SFS-EN
480

A!

Suojahuokos(suhde)testi

Kumottu SFS 4475



Laattatesti vedellä vai suolalla?

Laattakoe ionivaihdetulla vedellä (XF1 ja XF3)

CEN/TR 15177:2006

- Tutkitaan sisäistä vauriota
- Mitataan laajenemista, resonanssitaajuuden muutosta tai ultraäänen kulkeutumismuutosten muutosta jäädytys-sulatussykliä aikana
- Käytännössä tehdään vähän ja tulosten merkisyys on huonosti tiedossa

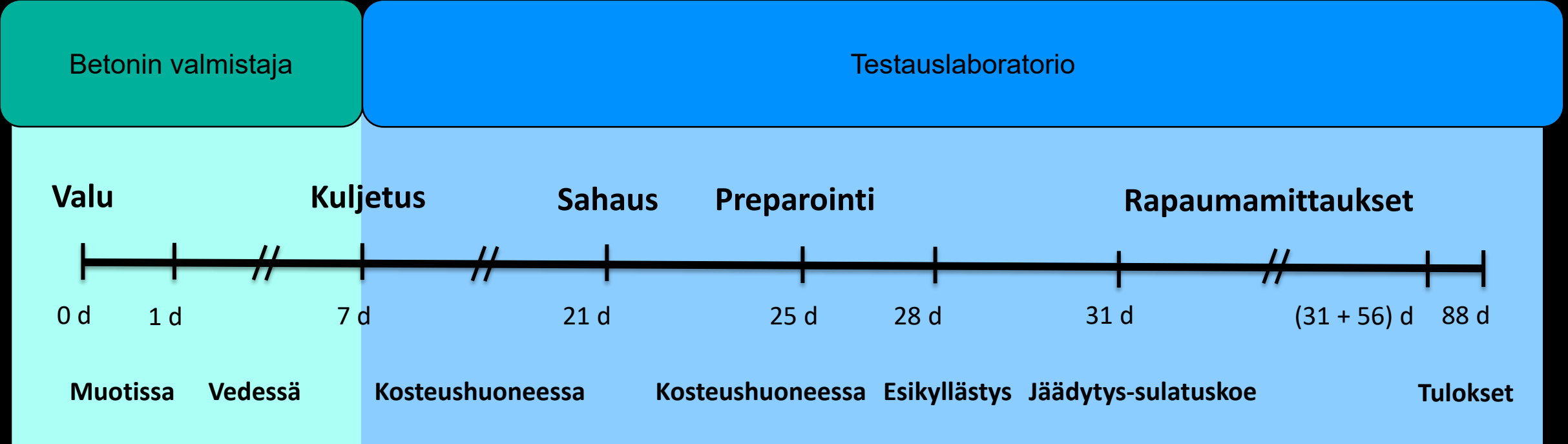
Laattakoe 3 %:n suolaliuoksella (XF2 ja XF4)

CEN/TS 12390-9:2016

- Tutkitaan betonin pintarapautumaa
- Mitataan laattanäytteen pinnalta rapautuvaa/hilseilevää betonimassaa jäädytys-sulatussykliä aikana
- Varsin paljon tehty, joten paljon dataa (viime aikoina tulosten hajonta puhuttanut)

4. Laattatestin suoritus

Laattatestin työvaiheet (CEN/TS 12390-9)



Milloin aloittaa laattatesti?

- Laattatesti kestää vähintään kolme kuukautta ja sisältää useita erilaisia työvaiheita.
- Vaikka TS sallii osassa työvaiheita päivän siirtoja kumpaakin suuntaan, osa päivistä aiheuttaa aikatauluongelmia.
- Käytännössä hyviä valupäiviä ovat maanantai ja tiistai, sillä muuten osa työvaiheista menee viikonlopulle.
 - Huomioi myös pyhät!

Laattatestin aikataulutus

Versio 1.2 © Teemu Ojala 2025

Tekninen spesifikaatio CEN 12390-9:2016 - Pintarapautuminen

Toleranssit ja kriittiset ajat:

- **Valupäivä:** Vain ma-pe, ei pyhäpäiviä (perjantai-valut vaativat viikonlopputyötä)<
- **Lähetys/vastaanotto:** Suositeltavasti 14-19 päivää valusta (ei pyhät/viikonloput)
- **Sahaus:** 21 ± 1 päivää valusta (kriittinen, viivästettävissä jos osuu pyhille tai viikonlopuille)
- **Olosuhdesäilytys:** Aloitetaan aina 7 päivää toteutuneesta sahauspäivämäärästä
- **Preparointi:** 25 ± 1 päivää valusta tai 4 ± 1 päivää olosuhdesäilytyksen aloittamisesta, mikäli sahaus myöhästynyt
- **Esikyllästys:** Vähintään 28 päivää valusta tai 7 päivää olosuhdesäilytyksen aloittamisesta (myöhempi näistä)
- **Jäädytys-sulatustesti:** Aina kolme päivää esikyllästyksen aloittamisen jälkeen (56 sykliä)
- **Rapauman mittaukset:** 7, 14, 28, 42 ja 56 päivää testin aloituksesta (± 1 päivä jos osuu viikonloppuun tai pyhään)
- **Tulosten valmistuminen:** Ensimmäinen työpäivä testin jälkeen
- **Huom:** Viikonloppuisin ja pyhisin toimintoja ei suoriteta

Valitse valupäivämäärä:

Valupäivä:

20/01/2026

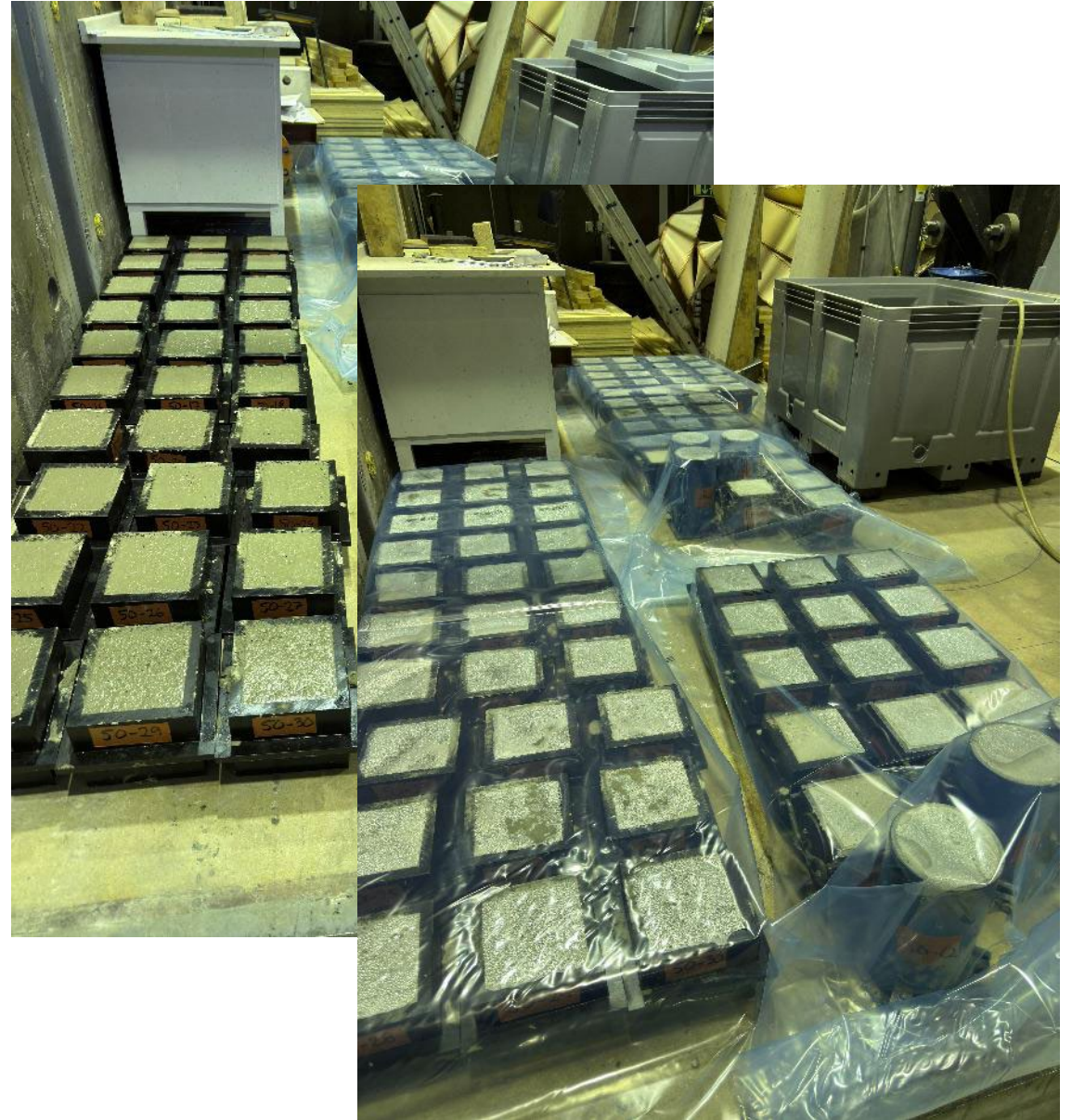


Laske aikataulu

Etsi sopiva valupäivä

Koekappaleiden valu

- Yhtä testisarjaa varten valetaan 4 kuutiokoekappaletta, jotka edustavat mahdollisimman hyvin testattavaa betonierää
- Kuution koko on $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$
- Koekappaleet tiivistetään yhdenmukaisesti tärypöydällä mahdollisimman hyvin ilman erottumista
- Valupinnan korkeus ei saa alittaa eikä ylittää muotin reunoja
- Pinta viimeistellään tarvittaessa tasaiseksi lastalla tai hiertimellä
- Peitä kuutiot valun jälkeen muovikalvolla. Säilytyslämpötilan tulee olla $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.



Miltä erottunut betoni näyttää koekappaleen sisältä?



Sementtipasta noussut ylös



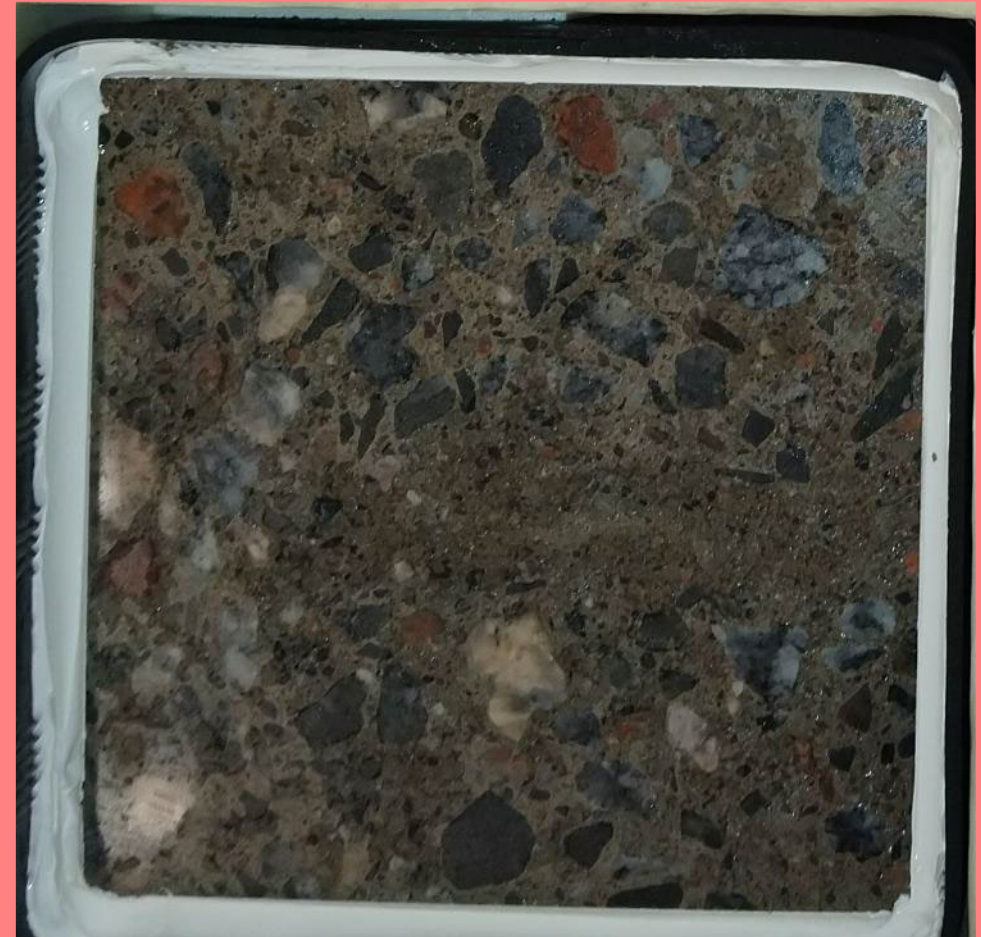
Kiviaines vajonnut pohjalle

Miltä erottunut betoni näyttää koekappaleen sisältä?

Tärysauvan jättämä jälki



Epätasainen rapauma



Koekappaleiden muottien purku

- Koekappaleet puretaan muoteista seuraavana päivänä (1d)
- Kovettuneen betonin tiheys mitataan muottien purun jälkeen infrabetoneilla, mutta kannattaa muutenkin (Infrabetonien valmistus 41/2020)
- Mittaamiseen käytetään vesi-ilmapunnitusta:

$$\rho_{betoni} = \frac{m_{ilmassa}}{(m_{ilmassa} - m_{vedessä})} \cdot \rho_{vesi}$$

missä ρ_{betoni} on koekappaleen tiheys [kg/m³],

$m_{ilmassa}$ on punnittu koekappaleen massa ilmassa [kg],

$m_{vedessä}$ on punnittu koekappaleen massa kokonaan veteen upotettuna [kg],

ρ_{vesi} on veden tiheys [kg/m³] (20°C:ssa $\rho_{vesi} \approx 998 \text{ kg/m}^3$).

Koekappaleiden säilytys vedessä

Vesisäilytys

- Koekappaleet siirretään heti punnituksen jälkeen vesijohtovedellä täytettyyn vesihauteeseen, jonka lämpötila on $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$.



Olosuhdesäilytys

Kosteushuone- tai kaappi

- Kun kuutiot ovat 7d ikäisiä (tasan viikko valusta), siirretään koekappaleet kosteushuoneeseen tai -kaappiin, jossa
 - suhteellinen kosteus $(65 \pm 5) \%$
 - ilman lämpötila $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$
 - haihtumisnopeus $(45 \pm 15) \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$
 - CO_2 -pitoisuus 300–1000 ppmv



Koekappaleiden kuljetus testauslaboratorioon

- Koekappaleet toimitetaan heti vesisäilytyksen jälkeen +7 d ikäisenä.
 - Koekappaleet lähetetään saman tien testauslaboratorioon olosuhdesäilytykseen
 - Koekappaleet pakataan ja suojataan huolellisesti kosteisiin pyyhkeisiin, kelmuun, muoviin ja/tai pahviin kuljetuksen ajaksi.
- Kaikki poikkeamat koekappaleiden säilytystavassa on raportoitava aina testauslaboratorioon.



- Jos koekappaleita ei voida vesisäilytyksen jälkeen siirtää poikkeuksellisesti olosuhdesäilytykseen tai lähettää heti testauslaboratorioon, koekappaleita on pidettävä vesisäilytyksessä aina siihen saakka, kunnes ne lähetetään testauslaboratorioon testattavaksi.

Koekappaleiden valmistelut (1/2)

Vastaanotto

- Koekappaleet tarkistetaan vastaanoton yhteydessä ja niiden tunnuksot ja tiedot tarkistetaan
 - Koekappaleiden tiheys määritetään
 - Koekappaleet siirretään sen jälkeen olosuhdesäilytykseen

Sahaus

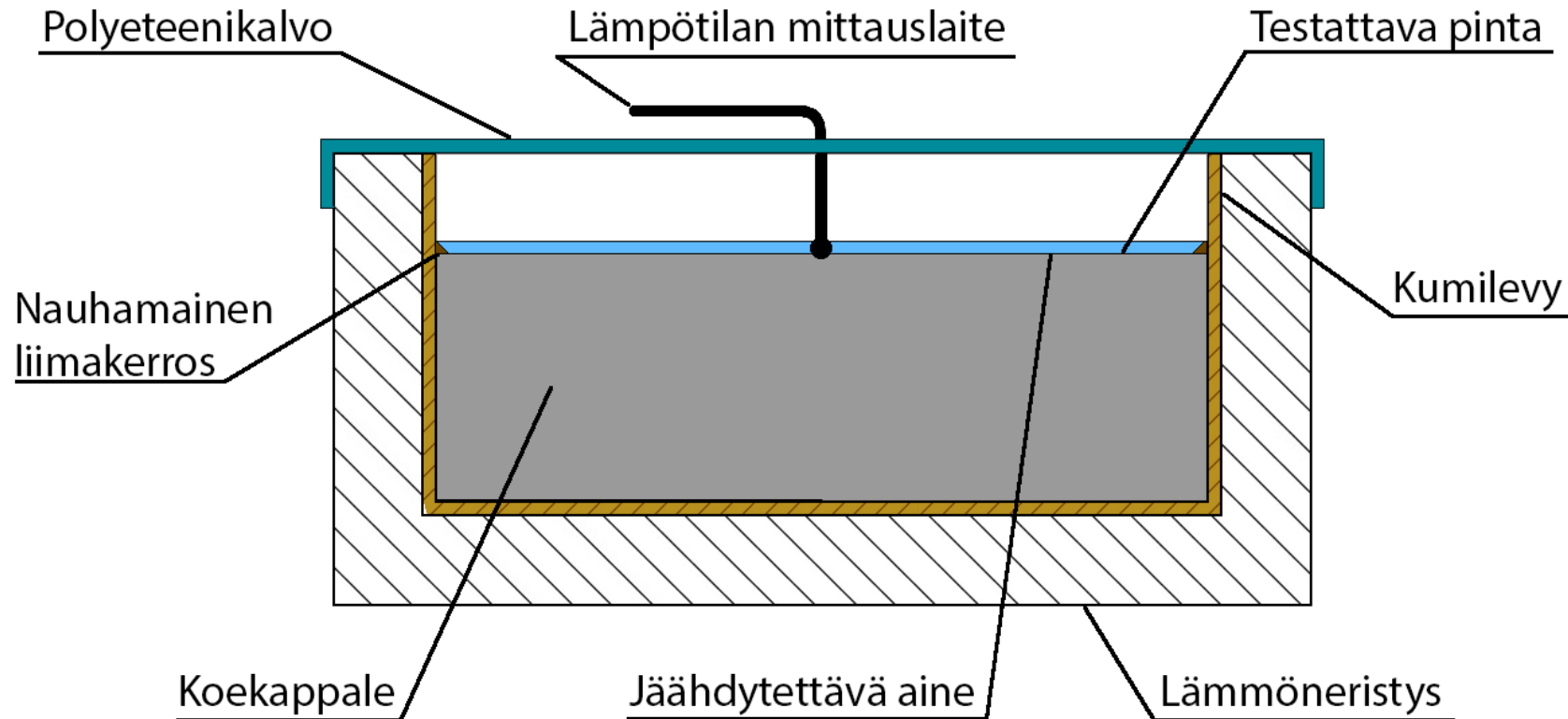
- Jokaisesta koekappaleesta sahataan yksi 50-mm paksuinen laattanäyte pystysuuntaisesti betonin ollessa (21 ± 1) d ikäinen.
- Sahauksen jälkeen sahattu testipinnan annetaan karbonatisoitua viikon ajan kosteushuoneessa tai -kaapissa



Koekappaleiden valmistelut (2/2)

Eristys

- Sahatut laattanäytteet eristetään jäädytys-sulatuskoetta varten, kun sahauksesta on kulunut 4 ± 1 päivää (betoni (25 ± 1) d ikäinen).



Laattanäytteiden esikyllästys



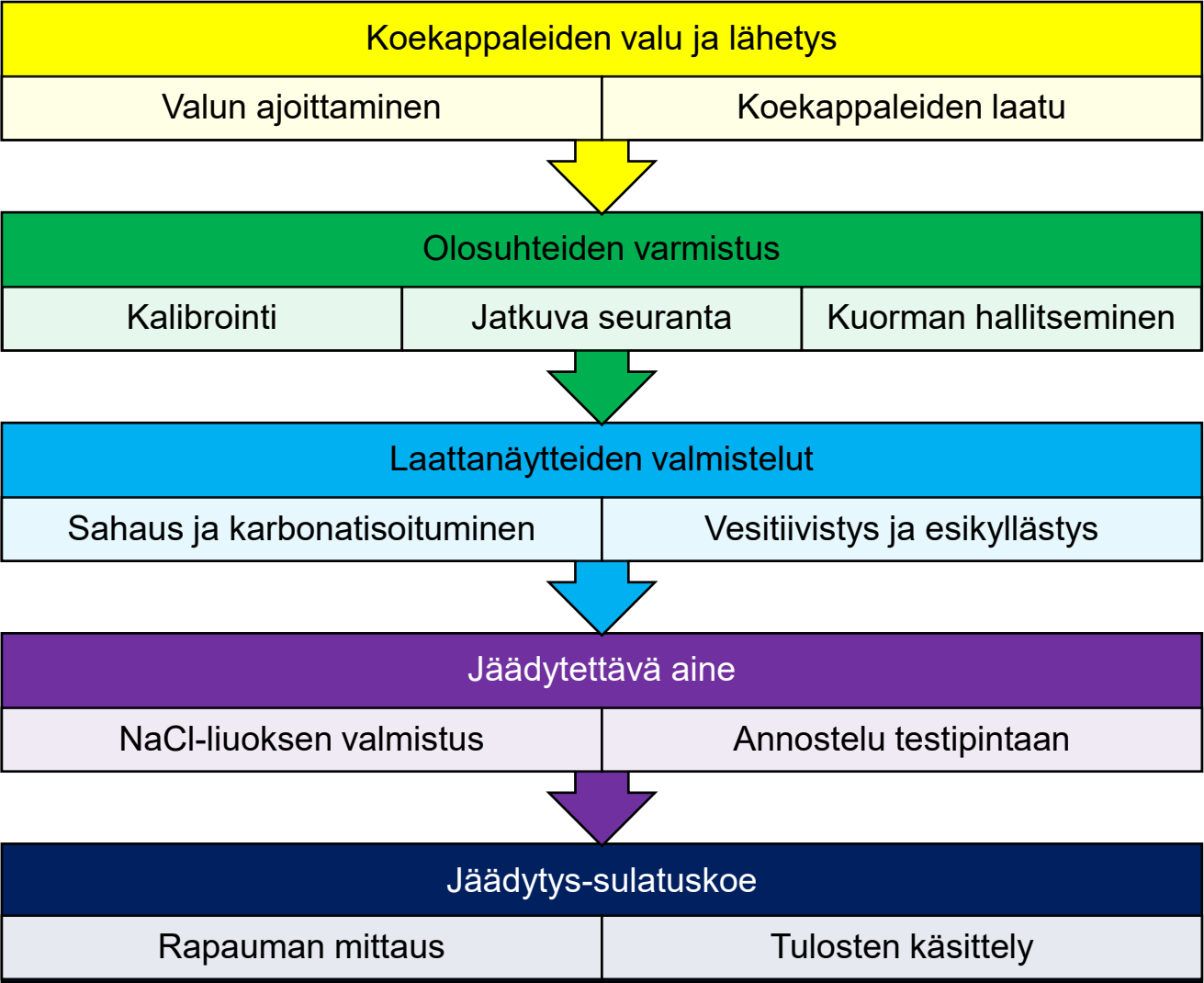
Esikyllästys

- Kun sahauksesta on kulunut tasan seitsemän (7) päivää, aloitetaan esikyllästysvaihe
- Esikyllästyksen aikana laattanäytteen testipintaa kyllästetään kolmen (3) päivän ajan ionivaihdettua vettä käyttäen
 - Testipinnan päälle annostellaan ionivaihdettua vettä $(3 \pm 0,5)$ mm
 - Pinnalle lisätään tarvittaessa lisää nestettä
- Kun sahauksesta on kulunut tasan 10 päivää (7 + 3), aloitetaan jäädytys-sulatuskoe

Tulossa: Laattatestin kansallinen soveltamisohje



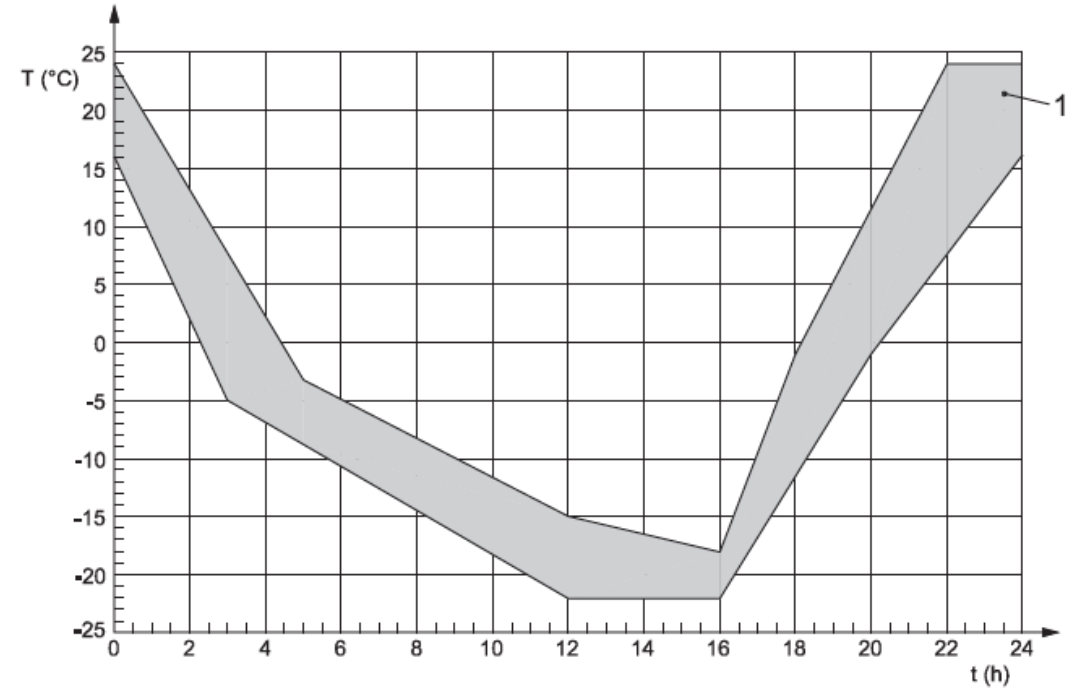
A!



Kiihdytetty vaurioituminen

Jäädytys-sulatuskoe

- Jäädytyskammion lämpötila kalibroidaan niin, että jokaisen laattanäytteen jäädytettävän aineen lämpötila noudattaa aika-lämpötilasykliä
- Vähintään yhden näytteen lämpötilaa on seurattava testin ajan



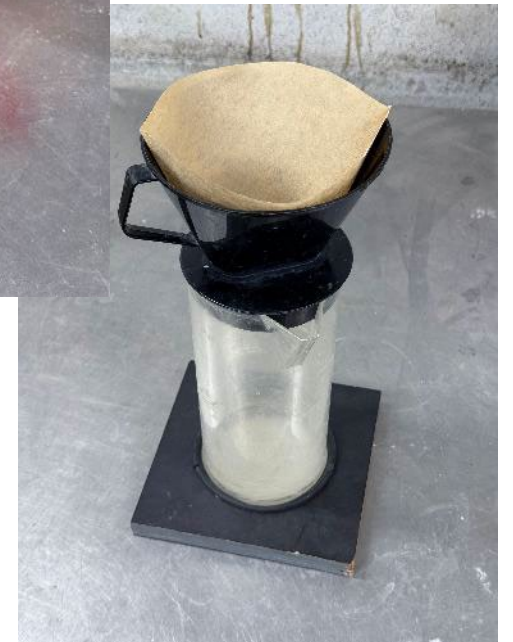
A!



Tuloksien kerääminen

Rapauman mittaus

- Jäädytys-sulatuskoe kestää 56 jäädytys-sulatussykliä, jonka aikana kerätään testipinnalta rapaumat materiaali 7, 14, 28, 42 ja 56 syklin jälkeen.
- Rapautunut materiaali kuivataan yön yli uunissa (110 ± 10) °C ennen punnitusta.
- Testitulokset valmistuvat siten aikaisintaan betonin ollessa 88 d ikäinen.



Video: Laattanäytteet valmistelut ja jäädytys-sulatuskoe

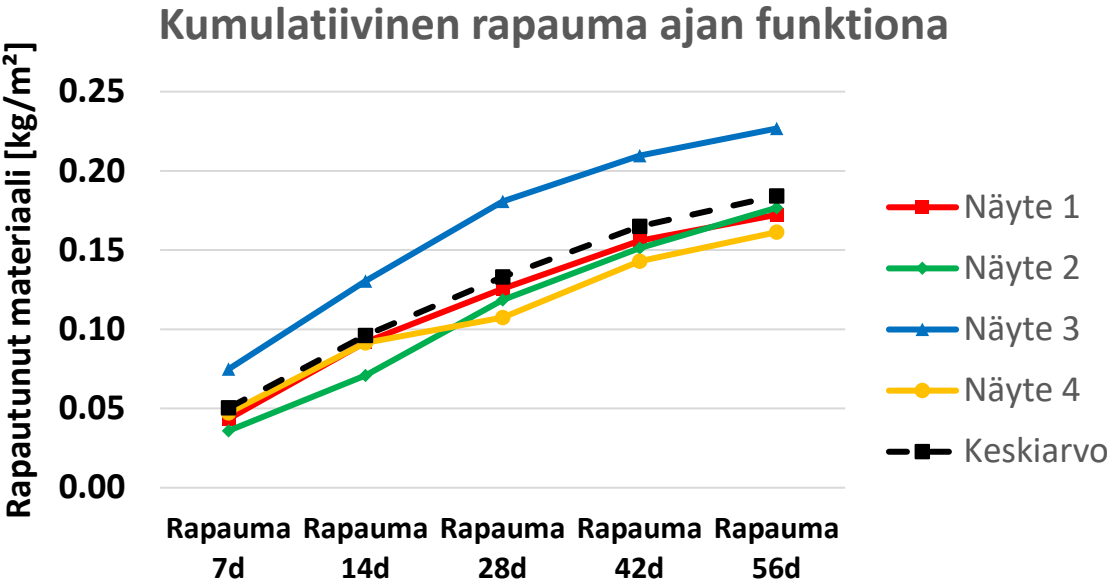


LAATTATESTI CEN/TS 12390-9:2016 MUKAISESTI TYÖVAIHEIDEN ESITTELY

5. Tulosten tulkinta

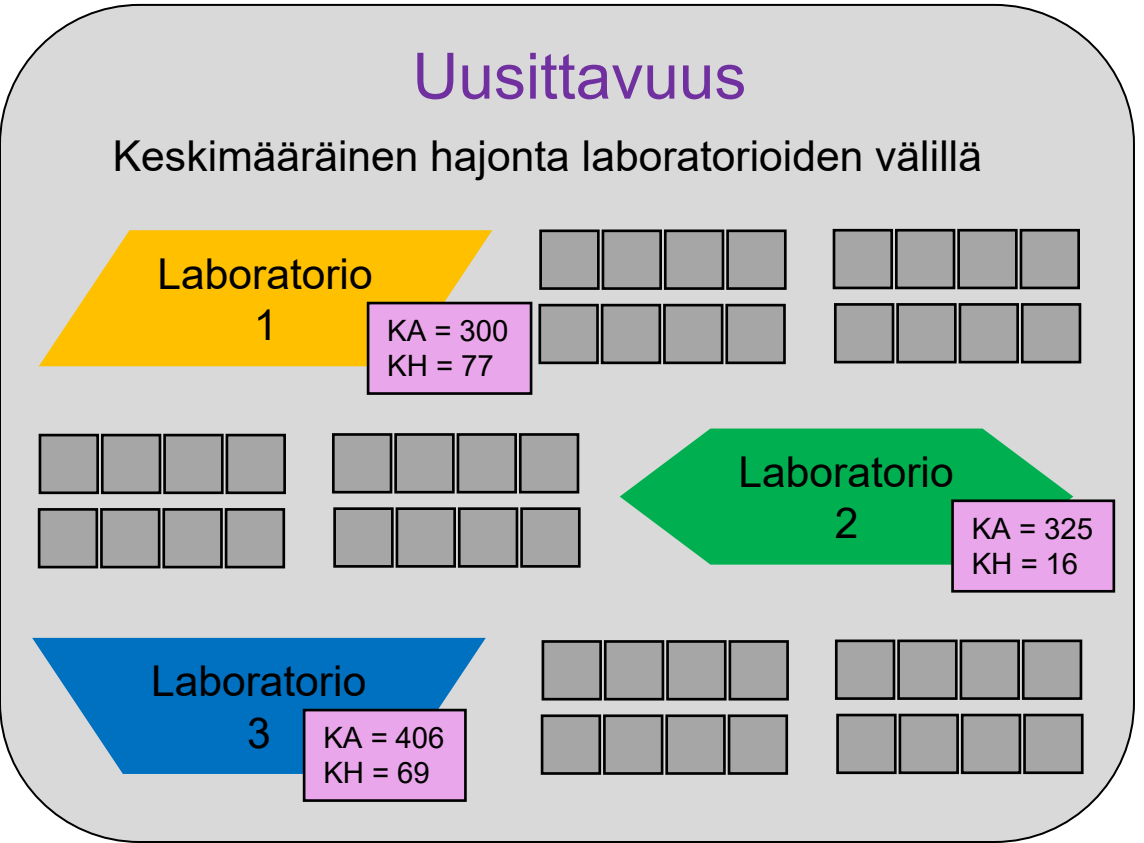
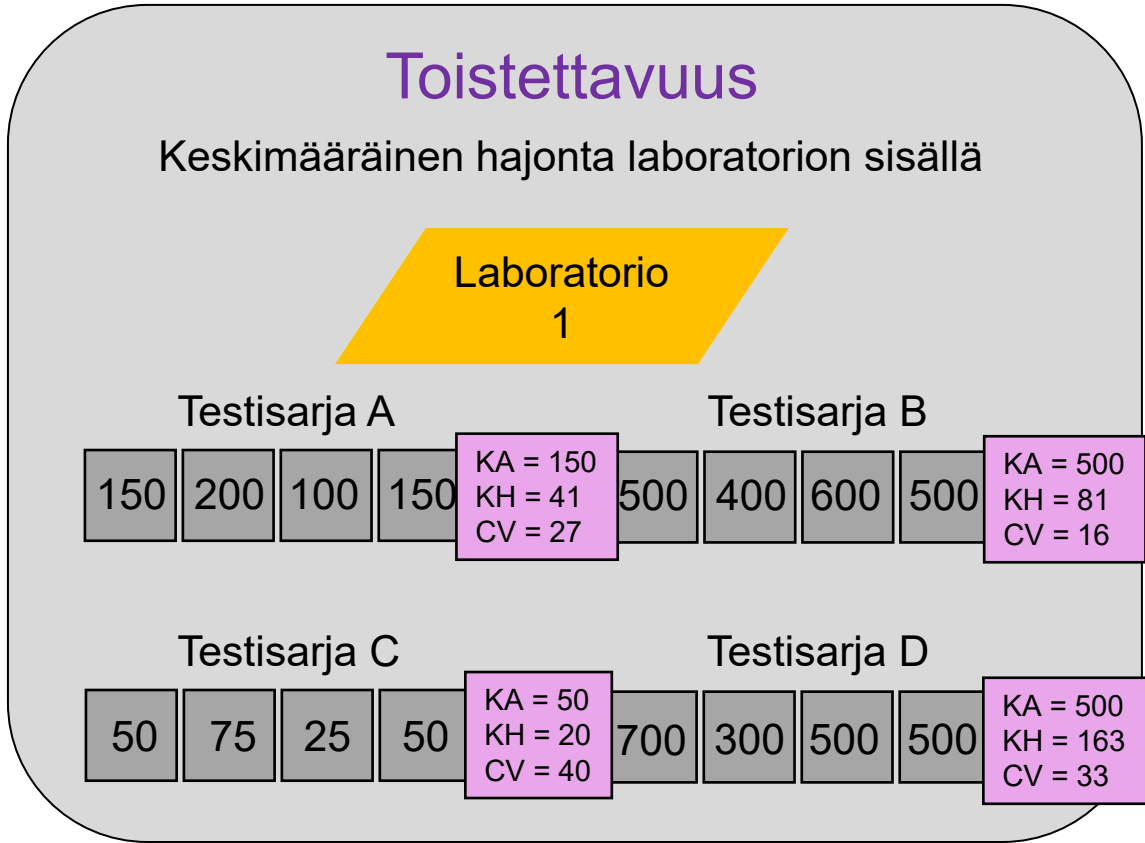
Esimerkki rapaumatuloksista

Näytetunnus	Rapauma 7d		Rapauma 14d		Rapauma 28d		Rapauma 42d		Rapauma 56d		Kokonaisrapauma	
	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]
Näyte 1	0,80	0,04	0,89	0,04	0,62	0,04	0,56	0,04	0,30	0,02	3,17	0,18
Näyte 2	0,68	0,04	0,66	0,04	0,90	0,04	0,62	0,04	0,48	0,02	3,34	0,18
Näyte 3	1,40	0,08	1,04	0,06	0,94	0,06	0,54	0,02	0,32	0,02	4,24	0,24
Näyte 4	0,88	0,04	0,82	0,04	0,30	0,02	0,66	0,04	0,34	0,02	3,00	0,16
Keskiarvo	0,94	0,06	0,85	0,04	0,69	0,04	0,60	0,04	0,36	0,02	3,44	0,18



Testimenetelmien tarkkuus (laattatestille)

Keskiarvo = KA [g/m²]
Keskihajonta = KH [g/m²]
Variaatiokerroin = CV [%] (CV = KH/KA)



A!

Toistettavuuden keskihajonta $s_r = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p s_i$

Toistettavuuden variaatiokerroin $CV_r = \frac{s_r}{\bar{x}_{tot}} \times 100 \% = 22 \%$

Uusittavuuden keskihajonta $s_R = \sqrt{s_r^2 + s_L^2}$ $s_L = \sqrt{s_{\bar{x}}^2 - \frac{s_r^2}{n}}$

Uusittavuuden variaatiokerroin $CV_R = \frac{s_R}{\bar{x}_{tot}} \times 100 \% = 25 \%$

ISO 5725 mukainen laskenta (poolattu varianssi)

Tyypillisen tilauslomakkeen sisältö

Perustiedot

- Tilaajan tiedot
- Laskutustiedot

Koekappaleiden lähetys

- Tehdäänkö testaus teknisen spesifikaation mukaisesti?
- Minkä tyyppisiä näytteitä toimitetaan, mitkä ovat niiden mitat ja onko huomautuksia?
- Koekappaleen merkinnät/tunnukset

Testauksen tiedot

- Testattava pinta (sahattu pinta tai jokin muu poikkeava pinta)
- Testimenetelmä (suolaliuos vai ionivaihdettu vesi)
- Karbonatisoitumisen lisävaihtoehtot (esim. pikakarbonatisoituminen)
- Sykliä määrä (56 tai 112 sykliä)

Toiminta erikois/poikkeamatilanteissa

Betonin tiedot (asiakkaan tai valtuutetun toimittama)

Tulosten esittäminen (esim. raportointitaajuus)

Testiraportissa on oltava vähintään seuraavat tiedot (CEN/TS 12390-9)

- a) Teknisen spesifikaation tunnus
- b) Mahdolliset poikkeamat referenssimenettelystä
- c) Koekappaleiden alkuperä ja merkintä
- d) Betonin tunnistetiedot
- e) Jäädytettävän aineen koostumus
- f) Rapauma-arvot jäädytys-sulatuskokeen jälkeen jokaisesta laattanäytteestä
 - Rapaumatulokset esitetään yksikössä kg/m^2 ja pyöristetään lähimpään $0,02 \text{ kg/m}^2$, jossa esitetään koetulosten eli testisarjan keskiarvo.
- g) Silmämääräiset havainnot ennen ja jäädytys-sulatuskokeen aikana



Kiitos **aalto.fi**

Teemu Ojala, Tohtoritutkija
Rakennustekniikan laitos, Aalto-yliopisto
teemu.ojala@aalto.fi