
Pakkas-suolakestävyys- laattakokeet

Mitä betonin valmistajan
tulee ottaa huomioon?

Teemu Ojala, TkT
18.9.2025



Esityksen sisältö

1

Betonin
pakkasen-
kestävyys

2

Pakkasen-
kestävyyden
vaatimukset

3

Laattakokeen
vaiheet

4

Tulosten
arviointi

5

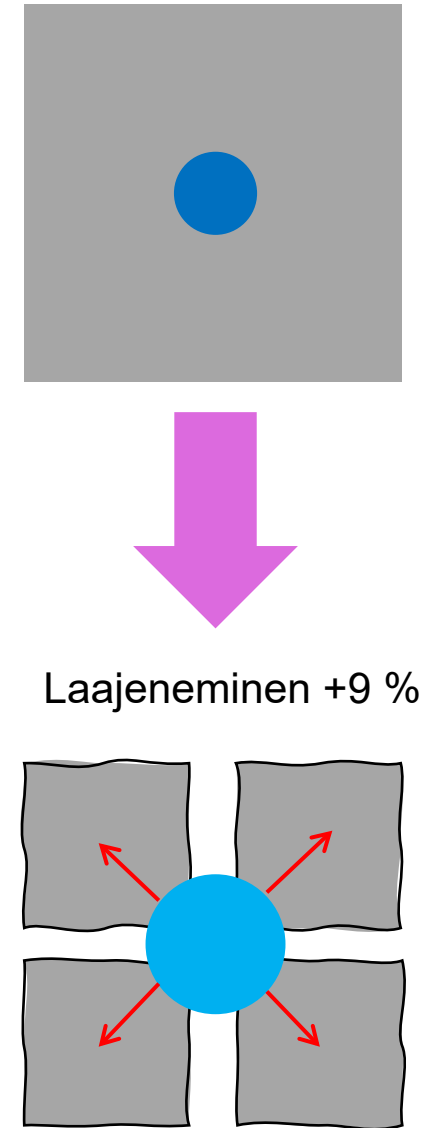
Laattakokeen
aikataulutus

1. Betonin pakkasenkestävyys

Mikä aiheuttaa pakkasvaurion?

- Huonosti suunniteltu ja/tai tehty betoni imee ympäristöstään vettä, jolloin sen kyllästysaste nousee
- Vesi jäätyessään laajenee 9 %, jolloin se aiheuttaa jännityksiä betoniin (hydraulinen paine)
 - Jäätyminen alkaa suurista huukosista ja etenee pienempiin huukosiin
 - Jos jännitykset ovat suurempia kuin betonin vetolujuus, betoniin muodostuu mikrohalkeamia
- Toistuvat jäädytys-sulatussyklit lisäävät mikrohalkeamien määrää kumulatiivisesti, jolloin betonin mekaaniset ominaisuudet heikkenevät
- Syntyneet halkeamat lisäävät veden tunkeutumista betoniin, mikä nostaa entisestään kyllästysastetta ja vaurioitumisnopeutta

A!



Pakkasrasituksen vauriomekanismit

1. Sisäinen vaurioituminen



2. Ulkoinen vaurioituminen eli rapautuminen



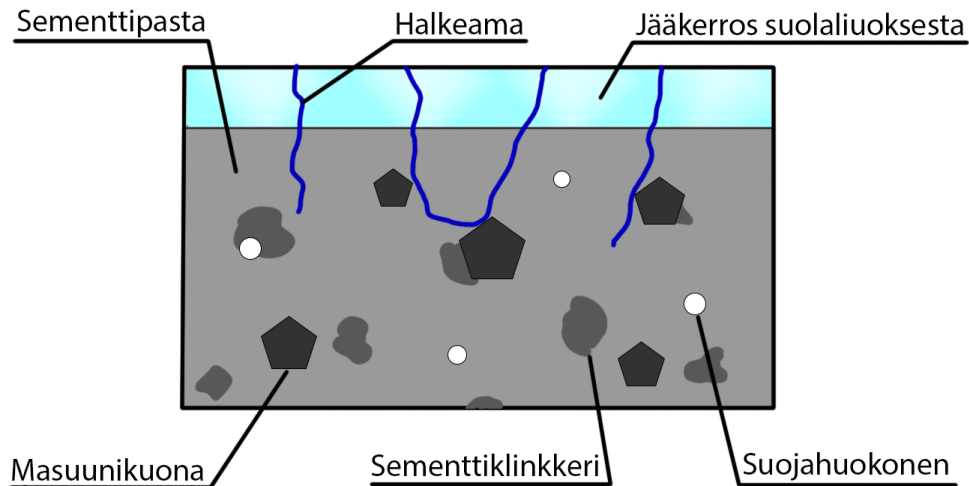
Miten vaurioitumisnopeuteen voidaan vaikuttaa?

Esimerkiksi

- Pitämällä betonin kosteus rakenteessa kriittisen kyllästysasteen alapuolella (0,78–0,91)
- Laskemalla vesi-sementtisuhdetta (noin $\leq 0,55 \dots 0,60$)
- Huokostamalla betoni (tuoreen betonin ilmamäärä 4,0...5,5 %)
 - Vaatii lisäksi, että suojahuokokset ovat riittävän pieniä ja tasaisesti jakautuneita

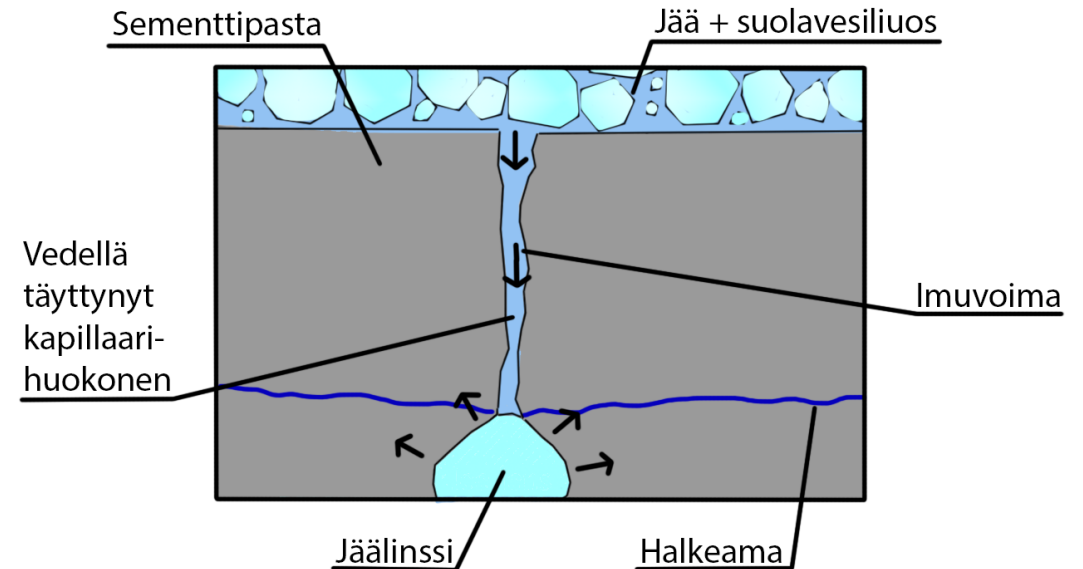
Teoriat betonin rapautumismekanismeille

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

2. Pakkasenkestävyyden vaatimukset

Vaatimustasojen merkinnät

Talopuolen rakenteet

- Jäädytys-sulatusrasitukselle käytetään XF-rasitusluokkaa, joka kertoo rakenteen kyllästysasteen määrän ja jäänsulatusaineiden rasitusmahdollisuuden (SFS 7022)
 - XF1 ja XF3 (ilman jäänsulatusaineita)
 - XF2 ja XF4 (jäänsulatusaineiden eli suolan kanssa)
- Lisäksi rakenteiden käyttöikä vaikuttaa koostumusvaatimukseen ja testauksen raja-arvoihin

Infrarakenteet (InfraRYL)

- Infrabetoneiden merkitsemiseen ei käytetä rasitusluokkia (paitsi XA), sen sijaan käytetään Väyläviraston Infrabetonien valmistus –ohjetta (julkaisu 41/2020).
- Infrabetoneilla P-lukuun vaikuttaa suhteutustiedot, jälkihoito ja työmaalla mitattu ilmamäärä
 - P-luvun voi myös määrittää sideainekertoimen ja laattakokeen perusteella



Vaativuustasot laattakokeessa

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
 - Käytännössä rasitusluokissa XF1 ja XF3 käytetään huokosanalyysia ja XF2 ja XF4 tehdään laattakoe suolaliuoksella
- Tasokokeissa varmistetaan pakkasenkestävyyssominaisuuksien säilyminen ennakkokokeiden tasolla
 - Tehdään tasaisesti pitkin vuotta painottaen eniten tehtäviin betonilaatuihin
 - Enintään puolet saa tehdä huokosanalyysia käyttäen → tarvitaan myös suoria laattakokeita

Infrarakenteet

- Valmisbetonitehtaan tulee huolehtia tehdaskohtaisten ennakkokokeiden voimassaolosta, joissa myös varmistetaan pakkasenkestävyys
- Ennakkokoe hyväksytään, jos P-lukulaskelma täyttää vaatimuksen ja kun ennakkokokeen rapaumatulos suolaliuoksessa on raja-arvojen mukainen (41/2020).
- Sallitut rapaumamäärät ovat varsin tiukkoja (C35/45 P50 noin 200 g/m²)
- Vaativissa rakenteissa tehdään myös kohdekohtaisia ennakkokokeita, joissa keskitytään poralieriöiden tiheyteen ja lujuuteen

Lisäinfoa infrarakenteiden tehdaskohtaisista ennakkokokeista

- Kokeet 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.
- Jos betonin raaka-aineet muuttuvat (sideaine, lisäaineet, kiviaines), tehdään notkeusluokaltaan notkeampaa betonia, muutetaan P-lukua tai lujuusluokkaa, vedentarve lisääntyy tai huokostimen annostelu muuttuu.

Taulukko 1 (41/2020)

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

3. Laattakokeen vaiheet

Mitä tarkoitetaan laattakokeella?

- Laattakoe on yksi suorista jäädytys-sulatuskokeista, joissa betoni altistetaan kiihdytetysti jäädytys-sulatussykleille.
- Laattakoe perustuu Borås-menetelmään (SS 137244), mutta sille ei ole varsinaista standardia Euroopassa.

**Laattakoe ionivaihdetulla vedellä
(XF1 ja XF3)
CEN/TR 15177:2006**

- Tutkitaan sisäistä vauriota
- Mitataan laajenemista, resonanssitaajuuden muutosta tai ultraäänien kulkeutumisenopeuden muutosta jäädytys-sulatussykliä aikana
- Käytännössä tehdään vähän ja tulosten merkitsevyys on huonosti tiedossa

**Laattakoe 3 %:n suolaliuoksella
(XF2 ja XF4)
CEN//TS 12390-9:2016**

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

Betoniasema: Koekappaleiden valu

- Valetaan 4 kuutiokoekappaletta (eli yksi testisarja), 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

Betoniasema: Koekappaleiden muottien purku

- Koekappaleet puretaan muoteista seuraavana päivänä (1d)
- Kovettuneen betonin tiheys mitataan välittömästi muottien purun jälkeen infrabetoneilla (41/2020)
- Mittaamiseen käytetään vesi-ilmapunnitusta:

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

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 $\rho_{vesi} \approx 998 \text{ kg/m}^3$).

Betoniasema: Koekappaleiden säilytys muotin purun jälkeen

Vesisäilytys

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

Olosuhdesäilytys

- 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



Betoniasema: Koekappaleiden säilytys muotin purun jälkeen

Huom!

- Jos säilytys kosteushuoneessa tai -kaapissa ei ole mahdollista heti vesisäilytysajan päätyttyä, koekappaleet lähetetään saman tien testauslaboratorioon olosuhdesäilytykseen.
- 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.

Kuljetus testauslaboratorioon

- Koekappaleet toimitetaan testauslaboratorioon 8–14d ikäisenä.
 - Koekappaleet pakataan ja suojataan huolellisesti kosteisiin pyyhkeisiin, kelmuun, muoviin ja/tai pahviin kuljetuksen ajaksi.
- Kaikki poikkeamat koekappaleiden säilytystavassa on raportoitava aina testauslaboratorioon.

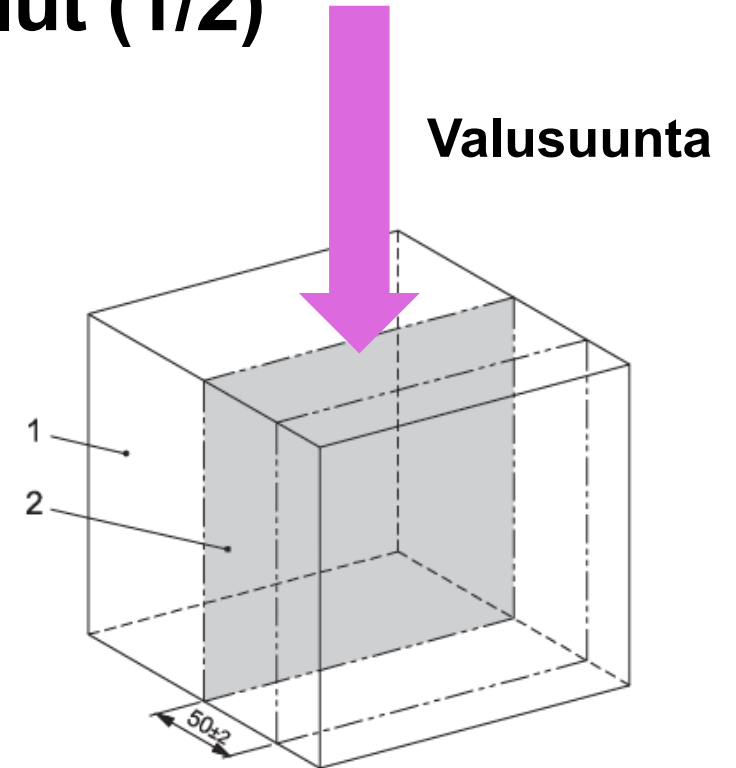
Testauslaboratorio: Koekappaleiden valmistelut (1/2)

Vastaanotto

- Koekappaleet tarkistetaan vastaanoton yhteydessä ja niiden tunnukset ja tiedot tarkistetaan.
- Koekappaleet siirretään saman tien olosuhdesäilytykseen kosteushuoneeseen tai –kaappiin.

Sahaus

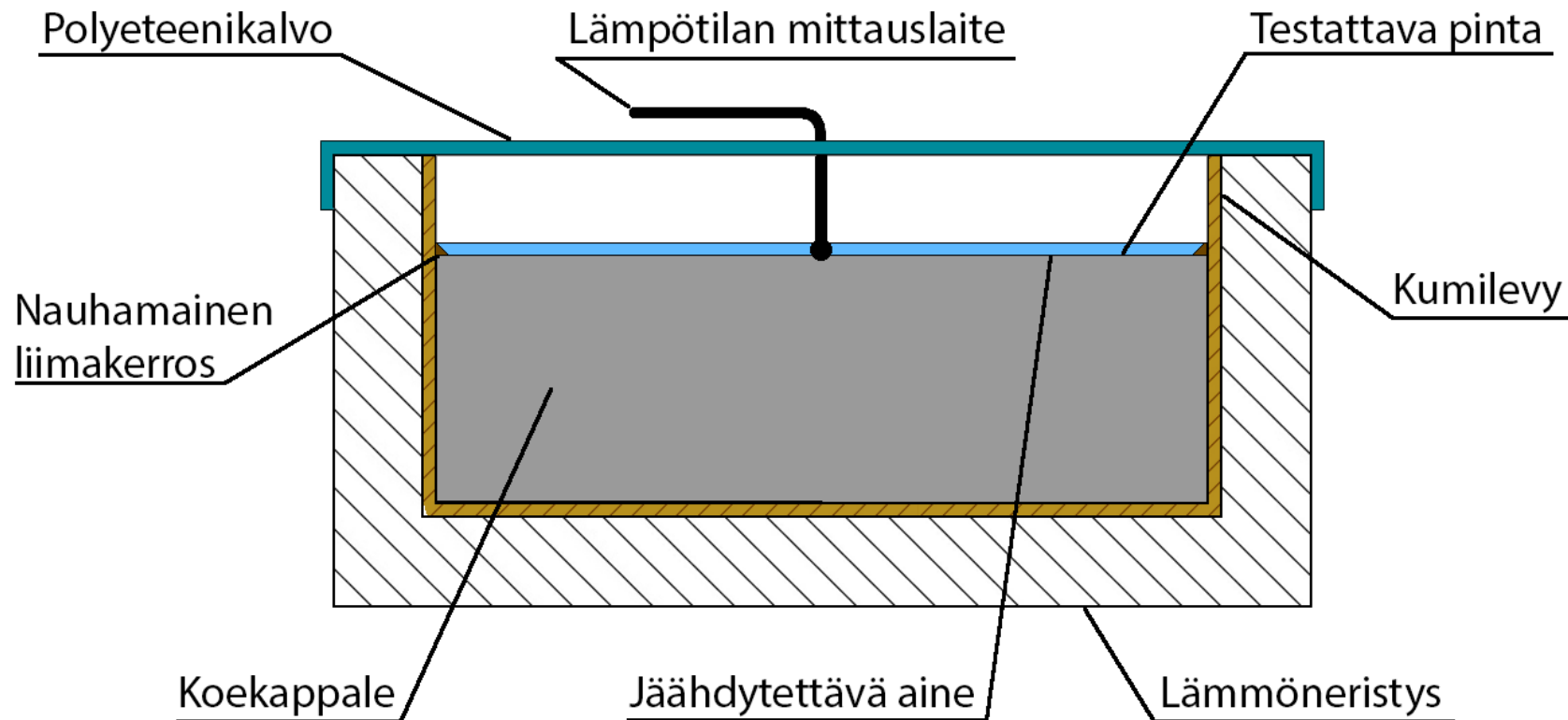
- Jokaisesta koekappaleesta sahataan yksi 50-mm paksuinen laattanäyte pystysuuntaisesti betonin ollessa (21 ± 1) d ikäinen.
- Sahauksen jälkeen sahattu testipinnan annetaan karbonatisoitua viikon ajan kosteushuoneessa tai -kaapissa



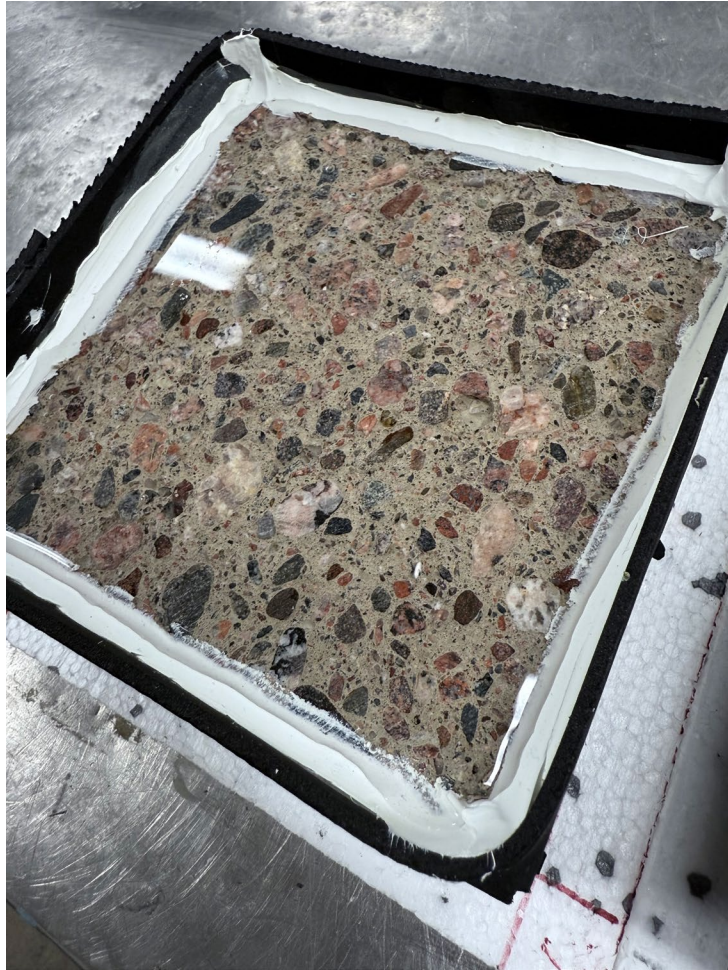
Testauslaboratorio: Koekappaleiden valmistelut (2/2)

Eristys

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



Testauslaboratorio: Laattanäytteiden esikyllästys



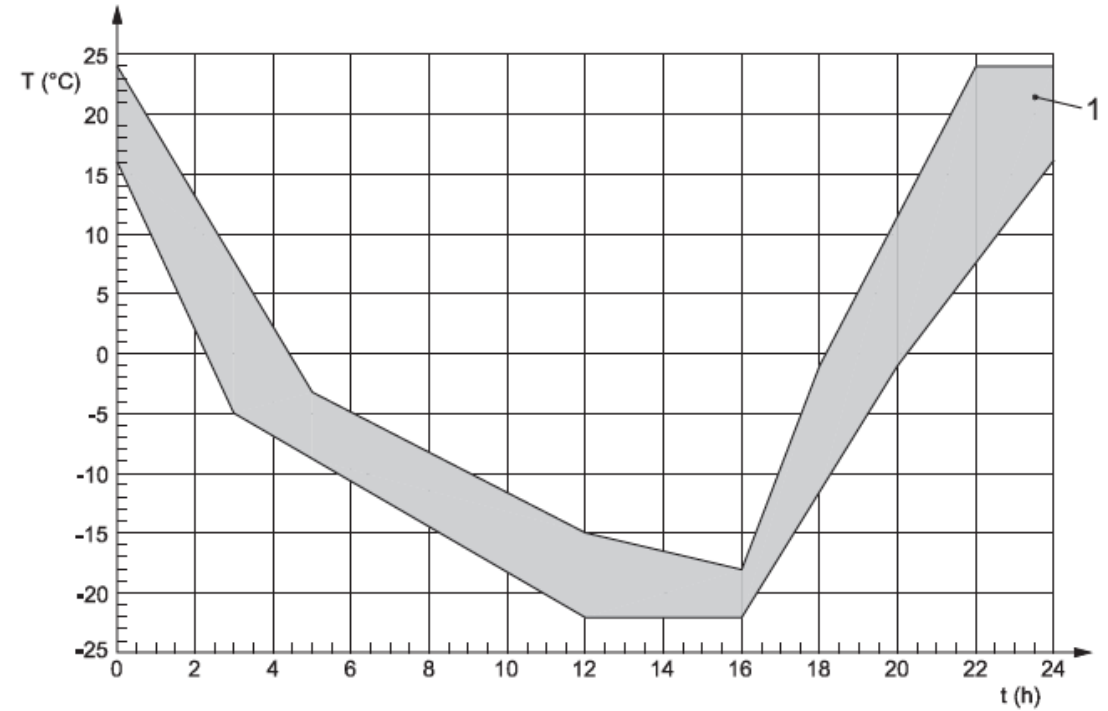
Esikyllästys

- 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.

Testauslaboratorio: Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskoe

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



Testauslaboratorio: Jäädytys-sulatuskoe

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

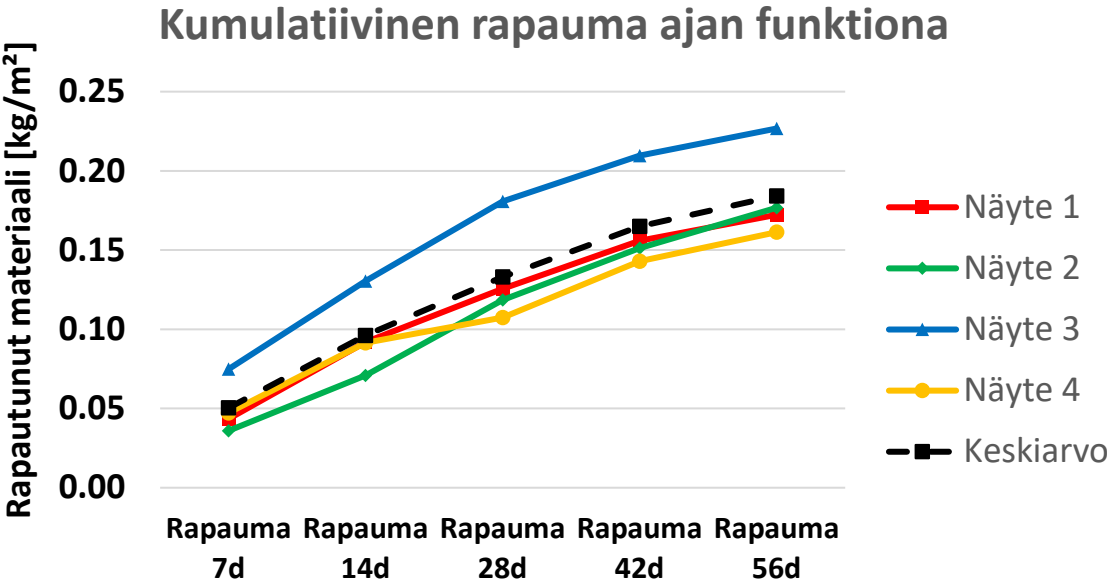
4. Tulosten arviointi

Testiraportissa on oltava vähintään seuraavat tiedot

- 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

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



5. Laattakokeen aikataulutus

Milloin aloittaa laattakoe?

- Laattakoe kestää vähintään noin kolme kuukautta ja sisältää useita erilaisia työvaiheita.
- Vaikka TS sallii osassa työvaiheita päivän siirtoja kumpaakin suuntaan, osa päivistä aiheuttaa aikataulullisia ongelmia.
- Käytännössä hyviä valupäiviä ovat maanantai ja tiistai, sillä muuten osa testauksesta (tai muottien purusta) menee viikonlopulle.
 - Huomioi myös pyhät!

A!

Laattatestin aikataulutus

Versio 1.1 © 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:

17/09/2025



Laske aikataulu

Etsi sopiva valupäivä

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)



Kiitos **aalto.fi**

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