

Pakkasprojekti25

– Edistystä betonin pakkasenkestävyyden tutkimisessa

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

Jouni Punkki, TkT, professori (POP)
Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos
jouni.punkki@aalto.fi

Taustaa

Betonin pakkasenkestävyys on äärimmäisen tärkeä säilyvyysominaisuus Suomen ilmastoo-olosuhteissa. Vuosikymmenten kuluessa pakkasenkestävän betonin valmistus on opittu hallitsemaan varsin hyvin, mutta betoni muuttuu jatkuvasti. Sementit sisältää aikaisempaa enemmän seosaineita, lisäaineet ovat kehittyneet ja pumppauksen myötä betoneista on tullut selvästi notkeampia kuin parikymmentä vuotta sitten.

Betonin laatuvaatimukset pakkasenkestävyyden suhteen perustuvat betoneihin, jotka eivät enää täysin vastaa nykypäivän betoneita. Tämä ei välttämättä aiheuta ongelmia, mutta korostaa testaamisen merkitystä. Esimerkiksi kun uusi sementti otetaan käyttöön, tulisi meidän tietää, miten se mahdollisesti vaikuttaa betonin pakkasenkestävyyteen.

Pakkasenkestävyyttä testataan Suomessa pääosin kahdella testausmenetelmällä: huokosanalyysillä [1] ohuthie- tai pintahienäytteistä rasiusluokissa XF1 ja XF3 sekä teknisen spesifikaation mukaisella laattatestillä eli "laattakokeella" [2] rasiusluokissa XF2 ja XF4 sekä infrabetonilla [3]. Molempiin mainittuihin testausmenetelmiin liittyy merkittäviä haasteita, ja haasteiden rooli korostuu entisestään siirryttäessä entistä enemmän seostettuihin sideaineisiin. Laattakokeessa keskeisiä ongelmia ovat:

Vaikka Suomessa ei varsinaisesti ole ongelmia betonin pakkasenkestävyyden kanssa, pakkasenkestävyyden testaamisen kanssa on haasteita. Siten nähtiin tarpeelliseksi käynnistää projekti betonin pakkasenkestävyyden laadunvarmistuksen kehittämiseksi. Vuosina 2023–2024 toteutettiin esiselvitys, jossa kartoitettiin pakkasenkestävyyden potentiaalisia testimenetelmiä sekä vertailtiin pakkasenkestävyyden vaatimustasoja eri maissa. Pakkasprojektin esiselvitys on esitelty Betoni-lehdessä 3–2024, sivuilla 42–47.

Vuonna 2025 käynnistettiin Pakkasprojekti25, jossa keskityttiin betonin pakkasenkestävyyden laadunvarmistuksen kehittämiseen. Projektissa selvitettiin olemassa olevien rakenteiden rapautumista laattakokeessa, tehtiin toimenpiteitä laattakokeen hajonnan pienentämiseksi ja esitettiin ehdotuksia pakkasenkestävyyden laadunvarmistuskäytäntöjen päivittämiseksi. Hankkeen merkittävin saavutus oli laattakokeen uusittavuuden selkeä paraneminen: laboratorioden välinen variaatiokerroin laski vuoden 2024 tasokokeen 82 %:sta 34 %:iin. Tulokset antavat nykyistä paremman perustan betonin pakkasenkestävyyden laadunvarmistukselle.

- suuri hajonta erityisesti laboratorioden välillä [4],
- menetelmän epäselvä yhteys rakenteissa havaittuun pakkasenkestävyyteen [5],
- nykyisten vaatimustasojen soveltuvuus uusille seossementeille [6] ja
- kokeen hitaus laadunvalvonnassa.

Laattakokeessa särmältään 150 mm:n kuutiokokekappaleesta sahataan 50 mm paksu koekappale niin, että testipintana toimii valupintaan nähden kohtisuora sahapinta. Ennen varsinaisen testin aloittamista testipinnan annetaan hieman kuivua ja karbonatisoitua kosteushuoneessa. Esikäsitteilyvaiheen aikana laattanäytteet veden- ja lämmöneristetään. Tämän olosuhdesäilytyksen jälkeen laattanäytteiden pinta kyllästetään vedellä uudelleen.

Laattanäytteiden testipinta altistetaan jäädytyskammiossa toistuvalla jäädytys-sulatusrasitukselle (kuva 1). Jäädytys-sulatuskoe aloitetaan heti vesikyllästyksen jälkeen, jolloin betoni on 31 vrk:n ikäistä. Koe tehdään siten varsin nuorelle betonille, ja erityisesti seossementtejä käytettäessä betoni ei välttämättä ole riittävästi hydratoitunut ennen kokeen alkua. Suola-pakkaskestävyyttä arvioitaessa annostellaan testattavalle pinnalle 3 %:n NaCl-suolaliuosta (kuva 2). Rapautuneen materiaalin määrä mitataan 7, 14, 28, 42 ja 56 syklin jälkeen.

1 Kuvituskuva. Vuosikymmenten kuluessa pakkasenkestävän betonin valmistus on opittu hallitsemaan varsin hyvin, mutta betoni muuttuu jatkuvasti.



Kuva 1 Laattakokeessa betoniin kohdistetaan kiihdytetysti jäädytys-sulatusrasitusta.

Yksi sykli kestää vuorokauden ja lämpötila vaihtelee $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ja $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n välillä. Tulokset esitetään rapautuneen materiaalin massana pinta-alaa kohden.

Testaustilanne on huomattavan ankara, pyritäänhän todellisuudessa välttämään rakenteita, joiden päällä seisoi jatkuvasti suolavettä ja vesi pääsisi jäätymään. Kiihdytetyssä kokeessa simuloidaan kuitenkin betonin 50 tai jopa 100 vuoden käyttäytymistä vain muutama kuukaudessa, joten rasituksen on oltava luonnonolosuhteita merkittävästi rajumpaa.

Laattakokeen toistettavuus eli yhden laboratorion sisäinen hajonta on yleensä hyväksyttävällä tasolla, mutta uusittavuus eli laboratorioden välinen hajonta on osoittautunut ongelmaksi. Vuoden 2024 tasokokeessa [4] laboratorioden tulokset vaihtelivat $30\text{...}515\text{ g/m}^2$:n välillä, ja uusittavuuden variaatiokerroin oli 82 %. Tämä arvo on lähes kaksinkertainen teknisen spesifikaation viitearvoon (45 %) verrattuna. Käytännössä tulokset tarkoittavat, että kahden laboratorion tulosten ero saattoi olla kaksinkertainen verrattuna rapaumatuloksen.

Vastaavia hajontaongelmia on havaittu myös huokosanalyyseissä. Esimerkiksi tasokokeessa 2023 [7] huomattiin hajonnan olevan liian korkealla tasolla erityisesti, kun huomioidaan menetelmän käyttö osana betonin laadunvarmistusta. Pintahaiden osalta vaihtelua kasvattivat vielä erilaiset analyysimenetelmät.

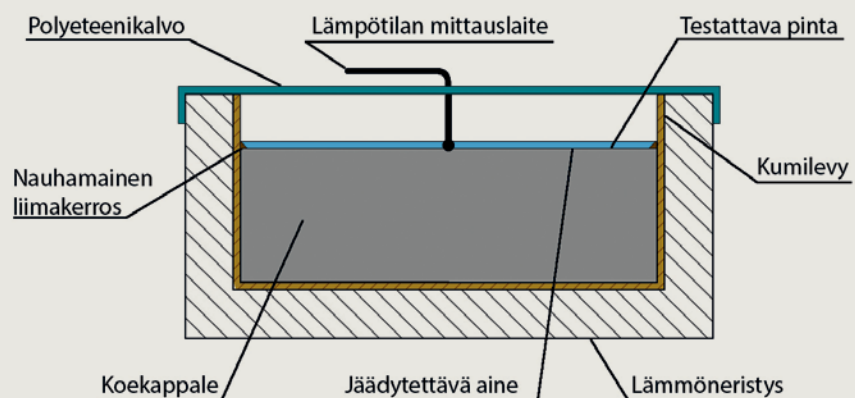
Kansallinen pakkasprojekti

Edellä kuvattujen testimenetelmien hajontaongelmat olivat lähtölaukaus kansalliselle pakkasprojektille. Betonin pakkasenkestävyyden arvioiminen on hyvin vaikeaa, jos testimenetelmät eivät anna luotettavia tuloksia. Vuosina 2023–2024 toteutetussa esiselvityksessä kartoitettiin käytössä olevia testimenetelmiä, vertailtiin vaatimustasoja eri maissa ja laadittiin alustava tutkimussuunnitelma suurempaa koesarjaa varten. Esiselvityksen jälkeen oli kuitenkin selvää, että ennen varsinaisen pakkasprojektin käynnistämistä on tarpeen selvittää useita perustavanlaatuisia kysymyksiä. Näin käynnistettiin Pakkasprojekti25, jonka tuloksia



Teemu Ojala

Kuva 2 Laattanäytteen testipinnalle annosteltu jäädytettävä aine aiheuttaa toistuvan jäädytys-sulatusrasituksen teknisen spesifikaation CEN/TS 12390-9 [2] mukaisesti.



Taulukko 1

Pakkasprojekti25:n osaprojektien lähtökohdat ja tavoitteet.

Osaprojekti	Lähtökohdat	Tavoitteet
OP1 Olemassa olevien rakenteiden testaus	Laattakokeen korrelaatio todelliseen pakkasenkestävyyteen on epäselvä.	Selvittää hyvin säilyneiden rakenteiden rapautuminen laattakokeessa ja arvioida jatkotutkimusten mahdollisuuksia.
OP2 Laattakokeen hajonnan pienentäminen	Laattakokeen hajonta on suuri erityisesti testausyksiköiden välillä. Siten testi soveltuu nykyisellään huonosti laadunvarmistukseen.	Kartoittaa ja yhtenäistää testauskäytäntöjä sekä laatia kansallinen tarkennettu ohje hajonnan pienentämiseksi.
OP3 Laadunvarmistuksen kehittäminen	Nykyiset vaatimukset ovat monimutkaisia ja testausmenetelmät soveltuvat huonosti laadunvarmistukseen: tulokset tulevat viiveellä ja niissä on paljon hajontaa.	Kehittää laadunvarmistuskäytäntöjä kustannustehokkaammiksi kuitenkin luotettavuudesta tinkimättä. Lisäksi arvioidaan talo- ja infrarakentamisen yhtenäistämismahdollisuuksia.

tarkastellaan tässä artikkelissa. Projekti koostui kolmesta varsin erilaisesti osaprojektista (taulukko 1).

Osaprojekti 1 – Olemassa olevien rakenteiden testaus

Laattakokeen ja todellisen pakkasenkestävyyden välistä yhteyttä lähestyttiin testaamalla viidestä siltarakenteesta porattuja koekappaleita. Sillat olivat valmistuneet vuosina 1960–2001, joten kaikki tutkitut rakenteet ovat valmistettu käyttäen vain kohtuullisen vähän seostettuja sementtejä (esimerkiksi Yleis-sementtiä). Rakenteet olivat hyväkuntoisia, ja näkyvää rapaamaa silloissa ei havaittu. Poikkeuksena oli yksi rakenne (reunapalkki), jota oli jo jouduttu korjaamaan noin 17 vuoden ikäisenä. Kolmen rakenteen osalta koekappaleet porattiin kansilaatan alapinnasta, joten betoniin kohdistuva kloridirasitus oli ollut hyvin pieni.

Jokaisesta porakoe-kappaleesta saatiin sekä karbonatisoitunutta (a-näyte) että karbonatisoitumattomaa betonia (b-näyte) laattakoe varten (kuva 3). Muiden näytteiden (c...e) avulla selvitettiin betonin koostumusta. Nuorelle betonille tehtävissä laboratoriotutkimuksissa karbonatisoituminen kasvattaa rapauma-arvoa, karbonatisoitumisella on erityisen voimakas vaikutus kuonasementeillä. Kokeessa haluttiin selvittää, miten karbonatisoituminen vaikuttaa rapaumatason todellisissa rakenteissa.

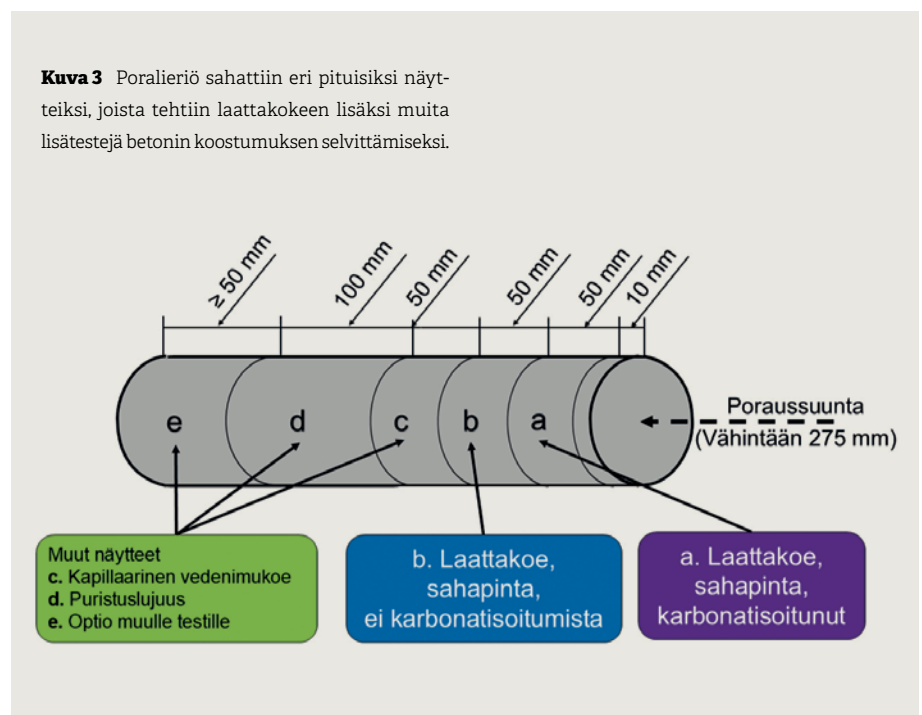
Tulokset olivat odottamattomat kahdessa suhteessa. Ensinnäkin ulkonäöltään samankuntoiset rakenteet (ei mitään näkyviä vau-

rioita) antoivat laattakokeessa hyvin erilaisia rapauma-arvoja. Kokonaisrapaumat vaihtelivat noin 300 g/m²:stä 22 000 g/m²:ään, ja rakenteiden sisäinen variaatiokerroin oli keskimäärin 61 %. Pienimmät rapaumat saatiin rakenteista, jotka olivat huokostettu hyvin tai joiden lujuustaso oli korkea (alhainen vesi-sideainesuhde). Toiseksi karbonatisoituneet a-näytteet rapautuivat pääosin vähemmän kuin syvemältä poratut karbonatisoitumattomat b-näytteet, mikä on vastoin tyyppillisiä laboratoriotuloksia [8, 9]. Havainto ei kuitenkaan ole suoraan

yleistettävissä nykyisille seossementeille, koska tutkitut rakenteet olivat valmistettu käyttäen vähemmän seostettuja sideaineita.

Olemassa olevien rakenteiden testaus osoittautui hyödylliseksi keinoksi selvittää laattakokeen ja todellisen pakkasenkestävyyden suhdetta, mutta yksi koesarja ei tähän riitä. Jatkossa testausta kannattaa laajentaa kloridirasitettuihin ja kuonasementtirakenteisiin, käynnistää pitkäaikaisia kenttäkokeita ja selvittää erikseen karbonatisoitumisen vaikutus todellisissa rakenteissa.

Kuva 3 Poralieriö sahattiin eri pituisiksi näytteiksi, joista tehtiin laattakokeen lisäksi muita lisätestejä betonin koostumuksen selvittämiseksi.



Taulukko 2

Tasokokeessa käytettyjen betonien tiedot ja ominaisuudet

Betonikoodi	Betonilaatu	Notkeus (mm)	Ilmamäärä (%)	Tiheys (kg/m ³)	Sylinteripuristuslujuus (MPa)	Laskennallinen P-luku	Sallittu rapauma (g/m ²)
P30	C30/37-P30	150	4,5	2371	58,8	P41	411
P50	C35/45-P50	160	6,3	2342	61,1	P60	201

Osaprojekti 2 – Laattakokeen hajonnan pienentäminen

Hankkeen tärkein kokonaisuus oli laattakokeen hajonnan saaminen hyväksyttävälle tasolle, koska se on toimivan laadunvalvonnan sekä jatkotutkimusten edellytys. Osaprojekti rakentui neljästä vaiheesta: aikaisempien koetulosten analysoinnista, testauskäytäntöjen kartoituksesta laboratorioissa, tarkennetun ohjeen laadinnasta ja lopuksi tasokokeesta, jossa ohjeen vaikutus mitattiin. Kaikki vaiheet tehtiin tiiviissä yhteistyössä seitsemän testauslaboratorion ja Aalto-yliopiston kesken.

Virhelähteiden tunnistaminen

Osaprojekti aloitettiin yhteisellä laboratoriopäivällä Aalto-yliopistossa, jonka jälkeen Aalto-yliopiston edustaja vieraili jokaisessa projektiin osallistuneessa testauslaboratoriossa. Vierailujen aikana käytiin läpi laattakokeen kaikki vaiheet koekappaleiden vastaanotosta tulosten esittämiseen. Samalla kerättiin historiatietoa testausmääristä, olosuhdesäilytyksen olosuhteista ja jäädytyskammioiden lämpötiloista.

Virhelähteiden merkittävyyden selvittämisessä hyödynnettiin *Ahmad Farazin* Aalto-yliopistossa tehtyä diplomityötä [10], jossa tutkittiin laattanäytteiden olosuhdesäilytyksen vaikutusta rapaumatuloksiin. Diplomityön tulokset osoittivat sahauskseen jälkeisen karbonatisoitumisen kriittisen merkityksen: kun laattanäytteet suojattiin muovin heti sahauskseen jälkeen, rapautuminen oli erittäin vähäistä, kun taas kiihdytetty karbonatisoituminen 3 %:n CO₂-kammiossa nosti rapauksen 8–12-kertaiseksi referenssimenetelmään verrattuna.

Vaikka laboratoriot noudattivat teknisen spesifikaation peruseräaatteita, menettelytapoissa ja välineissä oli selviä eroja. Selvityksen perusteella virhelähteet ryhmiteltiin neljään kokonaisuuteen.

1. Koekappaleiden valmistus ja toimitus.

Koekappaleiden valupäivä määrittelee koko laattakokeen aikataulun, ja huonosti valittu valupäivä lyhentää käytännössä tarkoin määri-

teltyä olosuhdesäilytysaikaa. Joskus koekappaleet olivat saapuneet testauslaboratorioon niin, että ne olivat seisonneet ulkona usean päivän ennen niiden vastaanottoa. Lisäksi osa koekappaleista oli vastoin teknistä spesifikaatiota tiivistetty tärysauvalla, joka oli johtanut betonin erottumiseen testipinnan kohdalta.

2. Olosuhdesäilytys. Käytetyt kosteushuoneet ja -kaapit vaihtelivat merkittävästi kooltaan. Lisäksi menettely- ja mittaustavat, joilla olosuhteita hallitaan, erosivat huomattavasti toisistaan. Vaihtelut kosteushuoneen CO₂-pitoisuudessa nähtiin keskeiseksi virhelähteeksi karbonatisoitumisjakson aikana. Laboratorioden ilmoittama tyyppilinen ilman CO₂-pitoisuus oli 420 ± 44 ppm. Teknisen spesifikaation mukainen sallittu vaihteluväli on hyvin laaja, 300...1000 ppm. Kuitenkin yksittäisiä alituk- sia oli tapahtunut vuoden 2024 aikana. Myös ilman lämpötilassa, suhteellisessa kosteudessa ja haihtumisnopeudessa oli eroja, jotka vaikuttavat betonin kuivumiseen ja karbonatisoitumiseen.

3. Laattanäytteiden valmistelu. Koekappaleiden sahausikä ja sitä seuraava laattanäytteiden testipinnan karbonatisoitumisjakson pituus saattoi vaihdella. Lisäksi veden- ja lämmöneristyksessä käytettiin erilaisia materiaaleja ja menettelytapoja. Kokemusten perusteella testipinnan ja vedeneristyksen välinen sauma- profiili vaikuttaa jäätyvän liuoksen kerrospaksuuteen ja vuotoriskiä, joten sen yhtenäistäminen tunnistettiin tärkeäksi. Myös valmistamista ja annostelua testipinnalle pidettiin keskeisenä.

4. Jäädytys-sulatuskoe: Jäädytyskammioiden toteutuneissa aika-lämpötilakäyryissä oli eroja erityisesti jäätymis- ja sulamisnopeuksissa. Lisäksi jäädytyskammioiden maksimi- ja minimilämpötilat vaihtelivat erityisesti muutamassa testauslaboratoriossa. Suurin osa laboratoriosa oli säätänyt jäädytys-sulatusohjelmaa, koska kammio ei käyttöönnoton jälkeen noudattanut lämpötilarajoja. Jäädytyskammion täyttöaste osoittautui merkittäväksi

tekijäksi lämpötilan hallinnassa, koska alempi lämpökuorma korostaa lämpötilan muutosnopeuksia. Toisaalta liian suuri lämpökuorma heikensi kammion ilmankiertoa johtaen lämmön epätasaisempaan jakautumiseen ja hitaisiin lämpötilamuutoksiin.

Tarkennettu soveltamisohje virhelähteiden pohjalta laadittiin tarkennettu soveltamisohje "By 72 Betonin laadunvarmistus Osa 5 – Ohje betonin laattakokeen suorittamiseen" [11], joka julkaistiin Suomen Betoniyhdistys ry:n verkkojulkaisut-sarjassa. Ohje laadittiin testauslaboratorioiden ja Aalto-yliopiston yhteistyönä. Ohje täydentää teknistä spesifikaatiota CEN/TS 12390-9:2016 antaen tarkempia vaatimuksia ja suosituksia laattakokeen työvaiheisiin. Ohje noudattaa teknisen spesifikaation lukunumerointia, mikä helpottaa dokumenttien rinnakkaista käyttöä.

Tasokoe 2025

Tasokokeen tavoitteena oli määrittää tarkennetun ohjeen vaikutus laattakokeen hajontaan ja arvioida ohjeen käytännön toimivuutta. Testauslaboratorioita ohjeistettiin noudattamaan sekä teknistä spesifikaatiota että tarkennettua ohjetta. Lisäksi tasokokeen aikana tehtiin normaalia laajemmat olosuhde- ja lämpötilamittaukset. Tasokokeeseen osallistui seitsemän testauslaboratoriota, joihin kuului kuusi suomalaista sekä yksi ruotsalainen testauslaboratorio. Testauslaboratorioita käsiteltiin anonyymisti.

Tasokokeessa testattiin kahta P-lukubetonia, jotka toimitettiin valmisbetonina Aalto-yliopistoon. Valetut koekappaleet satunnaistettiin ositetusti testauslaboratorioille (kuva 4). Molemmissa betonilaaduissa sideaineena oli Oiva-sementti (CEM II/B 52,5 N), kiviaineksen maksimiräekoko oli 16 mm ja tavoitteenotkeusluokka oli S3. Betonien tiedot ja ominaisuudet ovat esitetty taulukossa 2. Laboratoriot sahsivat jokaisesta kuutiokoekappaleesta kaksi laattanäytettä, joten kukin laboratorio testasi yhteensä neljä testisarjaa eli 16 laattanäytettä.

Testatut betonilaadut poikkesivat odotetusti rapaumatasoltaan toisistaan (kuva 5).

Kuva 4 Kuutiokoeappaleita säilytettiin vesihautauskammiossa 7 vrk:n ikään saakka, jonka jälkeen ne toimitettiin testauslaboratorioihin.

Betoni P30 laboratoriokohtainen kokonaisrapauma oli 88–274 g/m² (keskiarvo 209 g/m²) ja betonilla P50 vastaavasti 41–147 g/m² (keskiarvo 97 g/m²). Laboratorioiden sisäiset variaatiokerroimet olivat keskimäärin 15 % (P30) ja 21 % (P50). Kuvasta 5 havaitaan, että betonilla P30 vain yksi laboratorio sai merkittävästi muita alhaisemman rapauksen. Betonilla P50 tätä poikkeavuutta ei voida pitää merkittävänä, vaikka saman laboratorion rapaumatulos oli myös alhaisin.

Kuvasta 5 huomataan myös, kuinka P30-betonin rapautuminen painottui kokeen alkuvaiheeseen. Ensimmäisten 14 jäädytys-sulatussyklin aikana kertyi keskimäärin 154 g/m² eli noin 74 % kokonaisrapaumasta, jonka jälkeen tahti hidastui. Laboratorioiden väliset erot syntyivät siis pääosin kokeen alussa ja pysyivät sen jälkeen vakaina. P50-betonilla rapauksen kehittyminen oli puolestaan verrattain lineaarista ja laboratorioiden väliset erot kasvoivat kokeen edetessä. Kokeen loppuvaiheessa rapautumisnopeus oli samaa suuruusluokkaa molemmilla betonilaaduilla. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että testausolosuhteiden pienetkin erot korostuvat matalammalla rapaumatason.

Tasokokeen 2025 rapaumatuloksia verrattiin tasokokeeseen 2024 ja teknisen spesifikaation tarkkuustietoihin (taulukko 4). Luvut osoittivat merkittävää parannusta verrattuna

aikaisempaan. Uusittavuuden variaatiokerroin parani 82 %:sta P30-betonilla 34 %:iin ja P50-betonilla 42 %:iin. Molemmat betonilaadut alittivat lasketun 45 %:n viitearvon, joka saadaan keskimääräisellä 200 g/m²:n rapaumatason. P50-betonilla variaatiokerroimet ovat suurempia kuin P30-betonilla johtuen alhaisemmasta keskiarvosta. Toistettavuuden variaatiokerroimeksi saatiin 15 %, joka on myös pieni parannus verrattuna vuoden 2024 tasokokeeseen.

Laboratorioiden tulosten yhdenmukaisuutta arvioitiin myös tilastollisilla Mandelin *h*- ja *k*-tunnusluvulla, joissa *h* mittaa laboratorion keskiarvon poikkeamaa kokonaiskeskiarvosta ja *k* vertaa laboratorion sisäistä hajontaa kaikkien laboratorioiden yhteiseen sisäiseen hajontaan. Tunnuslukujen mukaan rapaumatuloksien yhdenmukaisuus oli pääosin hyväksyttävällä tasolla. Ainoa tilastollisesti

merkittävä poikkeama oli yhden laboratorion *h*-arvo P30-betonilla, joka viittaa systemaattisesti muita alhaisempaan rapaumatason.

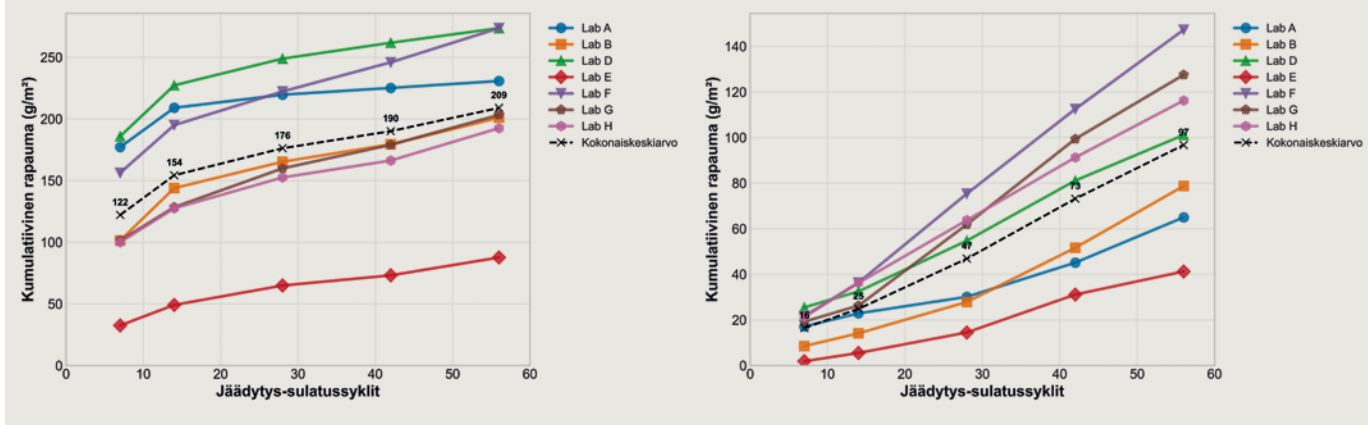
Olosuhdedata kertoi, että olosuhdesäilytyksessä noudatettiin varsin hyvin sekä teknistä spesifikaatiota että tarkennettua ohjetta. Suurimmat hankaluudet koettiin käytännössä mittausjärjestelyissä ja mittausdatan esittämisessä. Tulosten perusteella testauslaboratorioissa oli eroavaisuuksia säilytysolosuhteissa, mutta ne täyttivät pääosin tarkennetun ohjeen kireämmät vaatimukset. Lisäksi jäädytyskammioissa noudatettiin tarkemmin lämpötilan raja-arvoja, ja siten tulokset olivat selvästi yhdenmukaisempia kuin projektin alussa. Selkeää virhelähdettä poikkeavalle rapaumatulokselle P30-betonilla ei löytynyt, joten alhainen tulos johtui todennäköisesti usean eri tekijän summasta.



4

Taulukko 4 Tasokokeissa 2024 ja 2025 saavutetut tarkkuusluvut ja teknisestä spesifikaatiosta lasketut variaatiokerroimet 200 g/m²:n keskimääräiselle rapaumalle.

Tunnusluku	Yksikkö	Tasokoe 2024	Tasokoe 2025 P30	Tasokoe 2025 P50	CEN/TS
Yleiskeskisarvo \bar{m}	g/m ²	220	209	97	200
Toistettavuus s_T	g/m ²	39	32	18	–
Uusittavuus s_R	g/m ²	181	70	41	–
Variaatiokerroin $CV(s_T)$	%	18	15	19	25
Variaatiokerroin $CV(s_R)$	%	82	34	45	45
$r = 2,8s_T$	g/m ²	109	90	50	–
$R = 2,8s_R$	g/m ²	507	196	114	–

Kuva 5 Kumulatiivinen rapauma betonilaaduille P30 (vasemmalla) ja P50 (oikealla) laboratorioittain.

Osaprojekti 3 – Laadunvarmistuksen kehittäminen

Osaprojektin 3 tavoitteena oli tehdä ehdotuksia betonin pakkasenkestävyyden laadunvarmistuksen kehittämiseksi. Osaprojektissa tehtiin vain ehdotuksia, ehdotusten käytäntöön panosta päättää Tukiryhmä Betoni ja infrabetonien osalta Väylävirasto. Olennaista ehdotusten taustalla on myös osaprojektissa 2 saavutettu laattakokeen parantunut luotettavuus.

Infrabetonit

P-luku koetaan varsin toimivaksi parametriksi arvioitaessa betonin pakkassuolakestävyyttä. Kuitenkin kokonaisuutena P-lukumenettely koetaan varsin monimutkaiseksi ja jäykäksi. Uusien betonien käyttöönotto on hidasta johtuen laattakokeen pitkästä kestosta. Myös laattakokeen hajonta aiheuttaa hämmennystä. P-luku johtaa myös usein huomattavaan yli-tiluuteen, mikä puolestaan kasvattaa betonin hydrataatiolämpötilaa, halkeiluriskejä, kustannuksia ja CO₂-päästöjä. Jotta edellä mainittuja haasteita voitaisiin lieventää, P-lukubetonien osalta ehdotetaan seuraavia muutoksia:

- siirtymistä arvosteluerämenettelyyn myös infrabetonien osalta, jossa samankaltaiset betonit arvostellaan ryhmänä yksittäisten reseptien sijaan
- sementtien erillishyväksyntämenettelyn uudistamista. Erillishyväksynnän voisi korvata sideaineiden ennakkokokeet
- betonin pakkassuolakestävyyden keventämistä, kun sideaine on testattu etukäteen
- laattakokeen hieman yksinkertaistettuja vaatimustasoja:
 - P30-betoni: 500 g/m²
 - P50-betoni: 250 g/m²
- pieniä muutoksia ilmamäärän mittaustaajuuksiin työmaalla sekä tunnistuskoekappaleiden määriin.

Arvosteluerät muodostettaisiin pääosin sideaineen perusteella ja betonien suola-pakkasenkestävyyttä testattaisiin arvosteluerittäin. Näin uusien betonilaatujen käyttöönotto arvosteluerän sisällä on olisi helpompaa, laattakokeita uudelle betonille ei tarvittaisi. Myös erillishyväksyntämenettely edellyttää uusia. Ehdotetaan että erillishyväksyntä korvautuisi sideaineiden ennakkotestaamisella. Kun sementti olisi testattu kattavasti vakioresepteillä tehdyillä ennakkokokeilla, betonin valmistaja tekemää testaamista laattakokeella voitaisiin vähentää. Eli käytännössä betonien testaaminen vähenisi nykyisestä, mutta toisaalta sementtejä testattaisiin nykyistä enemmän. Laattakokeen vaatimustasot tulee tarkistaa lähitulevaisuudessa. Tarkistuksia varten tarvitaan enemmän systemaattisia testauksia ja siten tässä vaiheessa tehtäisiin vain pieniä yksinkertaistuksia vaatimustasoihin.

Rasitusluokkien XF1 ja XF3 betonit

Rasitusluokan XF1 osalta ehdotetaan huokosjakovaatimuksen poistamista betonien koostumusvaatimusten säilyessä ennallaan. Eli jatkossakin edellytettäisiin huokostusta rasitusluokassa XF1, mutta betonilla ei olisi vaatimusta huokosjaon osalta. Perusteluna muutokselle on:

- Huokosjaon ja pakkasenkestävyyden välillä ei ole kiistatonta näyttöä.
- Suojahuokostuksen määrä ja vesi-sideainesuhde ovat merkittävimmät tekijät pakkasenkestävyyden osalta.
- Naapurimaissa, esimerkiksi Ruotsissa, ei vaadita huokostusta rasitusluokassa XF1. Siten ehdotus jättäisi edelleenkin Suomen vaatimustason varsin tiukaksi.

Rasitusluokan XF3 osalta harkittiin myös huokosjakovaatimuksen poistamista, mutta

työryhmässä päädyttiin säilyttämään se tässä vaiheessa. Tähän voidaan palata, kun saadaan kokemuksia XF1:n osalta. Rasitusluokan XF3 koostumusvaatimukset ehdotetaan pidettävän ennallaan, mutta huokosjakovaatimukseen ehdotetaan pientä lievennystä.

Talo- ja infrapuolen yhtenäistäminen

Talo- ja infrapuolella on varsin erilaisia käytäntöjä sekä betonin puristuslujuuden että pakkasenkestävyyden testaamisen osalta. Myös betonin koostumusvaatimukset poikkeavat talo- ja infrarakentamisen välillä. Käytännön yhtenäistämiseksi nähdään selviä hyötyjä, mutta toisaalta pelätään sekaantumismahdollisuuksia. Nykyisellään P-luku kertoo selkeästi, että kyseessä on infrabetoni. Siten yhtenäistämiseen suhtaudutaan hieman ristiriitaisin mielipitein. Yhtenäistäminen voitaisiin tehdä eri tasoilla, voitaisiin yhtenäistää vain betoniasemalla tehtävä testaaminen tai toisessa ääripäässä voitaisiin siirtyä käyttämään samoja betonilaatuja sekä talo- että infrakohteissa. Työmaalla tehtävissä testauksissa voisi edelleenkin olla eroja talo- ja infrarakentamisen kesken.

Mikäli siirryttäisiin käyttämään samoja betonilaatuja sekä talo- että infrarakentamisessa, tulossa olevat eurooppalaisen standardoinnin mukaiset säilyvyysluokat antaisivat siihen hyvät mahdollisuudet. Pakkaskestävyyden osalta tarvittaisiin vajaa kymmenen eri säilyvyysluokkaa ja suunnittelija valitsisi kohteeseen sopivan säilyvyysluokan rasituksen ja käyttöiän perusteella. Betonin ominaisuudet ja testaaminen olisi samat riippumatta siitä käytetäänkö betonia talo- vai infrarakentamisessa. Pakkaskestävyyden säilyvyysluokat antaisivat vaatimukset vesi-sideainesuhteelle ja ilmamäärälle sementtityypeittäin. Näin myös P-luvusta voitaisiin luopua, koska säilyvyysluokat sisältäisivät samat tekijät kuin mitä käytetään P-luvussa.

Johtopäätökset

Pakkasprojekti25 tuotti kokonaiskuvan laattakokeen nykytilasta Suomessa ja konkreettisia toimenpide-ehdotuksia. Hankkeen keskeiset tulokset ja johtopäätökset olivat:

- Osaprojektissa 1 havaittiin, että laattakoe antoi hyvin erilaisia rapauma-arvoja (300–22 000 g/m²) ulkonäöltään samantasoisista siltojen rakenteista. Karbonatisoituneet näytteet rapautuivat pääosin vähemmän kuin karbonisoitumattomat, mikä poikkeaa seosmenttibetoneilla tehdyistä laboratoriokokeista. Tulosten perusteella olemassa olevien rakenteiden testaamista kannattaa jatkaa.
- Osaprojektissa 2 tunnistettiin laattakokeen kriittisimmät virhelähteet: karbonisointusjakson vaihtelu, kosteushuoneen CO₂-pitoisuus sekä jäädytyskammion lämpötilakäyrän toteutuminen. Tunnistettujen virhelähteiden pohjalta julkaistiin tarkennettu kansallinen soveltamisohje (By 72, Osa 5).

- Tasokokeessa 2025 laattakokeen uusittavuus parantui merkittävästi: uusittavuuden eli testauslaboratorioiden välisen hajonnan variaatiokerroin laski 82 %:sta 34 %:iin, jonka keksimääräinen rapaumataso on noin 200 g/m². Molemmat tutkitut betonilaadut alittivat teknisen spesifikaation viitearvot, ja parannus johtui ensisijaisesti laboratorioiden välisen toiminnan yhdenmukaistamisesta.
- Tarkennetun ohjeistuksen käyttöönotto kaikissa laattakokeita suorittavissa laboratorioissa on keskeinen jatkotoimenpide. Laattakokeen ja todellisen pakkasenkestävyyden välisen korrelaation osoittaminen sekä vaatimustasojen sideainekohtainen päivittäminen edellyttävät laajempia jatkotutkimuksia.
- Osaprojektissa 3 esitettiin ehdotuksia laadunvarmistuksen kehittämiseksi, kuten siirtymistä infrabetonien arvosteluerämenetelyyn sekä rasisluokan XF1 huokosjakovaatimuksen poistamista.

Pakkasprojekti25 – developing the quality assurance of frost-resistant concrete

A national frost project has been launched in Finland to renew the quality assurance of the frost resistance of concrete. The Pakkasprojekti25 (Frost Project 25) was implemented during 2025 and contained three subprojects. Subproject 1 examined the scaling of existing bridge structures in the slab test, revealing wide variability (300–22 000 g/m²) and rather unexpected carbonation effects. Subproject 2, the largest part of the project, identified critical error sources in the slab test through laboratory visits, surveys, and research, and produced a detailed national application guide (By 72, Part 5) to complement technical specification CEN/TS 12390-9:2016. A new round-robin test demonstrated that the coefficient of variation for reproducibility improved from 82 % to 34 % (P30 concrete) and 42 % (P50 concrete), both within the reference values. The improvement was achieved primarily through harmonisation of practices between laboratories. Subproject 3 proposed developments in quality assurance practices of frost resistance, including simplified limit values and removal of the spacing factor requirement for exposure class XF1.

Viitteet:

1. By 72. Betonin laadunvarmistus Osa 1 – Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthiistä, Suomen Betoniyhdistys ry, Helsinki, 2020. Saatavilla: https://www.expressmagnet.eu/pub/336/by72_Betonin_laadunvarmistus_osa1_2painos/#p=1
2. CEN/TS 12390-9:2016:fi. Kovettuneen betonin testaus. Osa 9: Jäädytys-sulatuskestävyys jäänsulatusaineilla. Pintarapautuminen, Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 2016.
3. Infrabetonien valmistus, Väyläviraston ohjeita 41/2020, Helsinki, 2020. Saatavilla: https://aineistot.vayla.fi/api/file/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-41_infrabetonien_valmistus_web.pdf
4. Punkki, J. 2025. Pakkaskestävyyden laattakokeen tasokoe 2024, Betoni-lehti 1/2025. Saatavilla: <https://betoni.com/lehti/2025/03/10/testauslaboratorioiden-tasokokeet-2024/>
5. Müller, M. Salt-Frost Attack on Concrete - New Findings Regarding the Damage Mechanism. Väitöskirja, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2021. Saatavilla: <https://doi.org/10.25643/bauhaus-universitaet.4868>
6. Helsing, E. Review of Frost Requirements on Concrete; RISE Report 78; RISE Research Institutes of Sweden, Borås, 2025. Saatavilla: <https://urn.fi/urn:nbn:se:ri:diva-78776>
7. Punkki, J. Testauslaboratorioiden tasokokeet 2023, Betoni-lehti 2/2024. Saatavilla: <https://betoni.com/lehti/2024/06/10/testauslaboratorioiden-tasokokeet-2023/>
8. Iqbal, A.; Ojala, T.; Punkki, J. Effect of carbonation on salt-frost scaling of concrete with different binders. Nordic Concrete Research, 2024. Saatavilla: <https://doi.org/10.2478/ncr-2024-0012>
9. Iqbal, A.; Ojala, T.; Punkki, J. Salt-frost scaling of concrete: the role of carbonation and binder type. Concrete and Building Materials, 2026. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2026.145772>
10. Faraz, A. Influence of concrete's preconditioning on salt-frost scaling in the slab test. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Espoo, 2025. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202508186214>
11. By 72. Betonin laadunvarmistus Osa 5 – Ohje betonin laattakokeen suorittamiseen, Suomen Betoniyhdistys ry, Helsinki, 2026. Saatavilla: https://www.expressmagnet.eu/pub/336/by72_Betonin_laadunvarmistus_osa_5/

Hanketiedot:

Hanke: Pakkasprojekti25 – Projekti pakkasenkestävän betonin laadunvarmistuksen kehittämiseksi

Toteutusaika: 1.1.2025–31.12.2025

Koordinoiti: Aalto-yliopisto (professori Jouni Punkki, Tkt Teemu Ojala)

Raportin kirjoittajat: Teemu Ojala ja Jouni Punkki, Aalto-yliopisto

Rahoittajat: Väylävirasto, Finnsementti Oy, Betonteollisuus ry, Suomen Betoniyhdistys ry, Schwenk Suomi Oy, Mitta Oy, Mitta Engineering Oy, XAMK/KymiLabs, Suomen GPS-Mittaus Oy, Eurofins Contesta Oy, Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy

Osallistuneet testauslaboratoriot: Aalto-yliopisto, Eurofins Contesta Oy, Mitta Oy (Helsinki ja Oulu), Suomen GPS-mittaus Oy, XAMK/KymiLabs, RISE Research Institutes of Sweden

Keskeinen julkaisu: By 72 Betonin laadunvarmistus, Osa 5 – Ohje betonin laattakokeen suorittamiseen 2026, Suomen Betoniyhdistys ry

Raportti: Ojala, T. & Punkki, J. 2026. Pakkasprojekti25. Aalto University publication series.