

Suuri suomalainen pakkasprojekti

Teemu Ojala

Väitöskirjatutkija, Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
teemu.ojala@aalto.fi

Jouni Punkki

Professori (POP), Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
jouni.punkki@aalto.fi

Betonin pakkasenkestävyys

Suomen ilmasto-olosuhteissa betonin pakkasenkestävyys on erittäin kriittinen tekijä rakenteiden pitkäaikaiskestävyyden kannalta. Pakkaskestävyys jaetaan olosuhteiden mukaan pakkasenkestävyyteen ilman kloridirasitusta (rasitusluokat XF1 ja XF3) ja pakkas-suolakestävyyteen (rasitusluokat XF2 ja XF4). Näistä pakkas-suolakestävyys on selvästi haastavampi, sillä pakkasenkestävyys ilman kloridirasitusta voidaan varmistaa varsin yksinkertaisesti. Esimerkiksi Suomessa ongelmia esiintyi 1970- ja 80-luvuilla valmistetuissa julkisivuissa, mutta nykyiset betonijulkisivut kestävät hyvin pakkasrasitusta. Tyypillisiä pakkas-suolarasitettuja rakenteita ovat erilaiset infrarakenteet kuten sillat, joissa kloridit tulevat pääosin jäänsulatusaineista.

Pakkasvauriot voidaan jakaa pinnan rapautumiseen sekä betonin sisäiseen vaurioon. Pakkas-suolarasituksessa pääasiallinen vauriomekanismi on pintarapautuminen, ja myös pakkas-suolakestävyyden testimenetelmät keskittyvät sen arviointiin. Ilman klorideita tapahtuvassa pakkasrasituksessa pääasiallinen vauriomekanismi on puolestaan sisäinen vaurio, jonka vaikutuksesta betonirakenne voi halkeilla. Betonin ominaisuuksista pakkasenkestävyyteen vaikuttavat ensisijaisesti betonin vesi-sideainesuhde ja ilmamäärä (suojahuokosten määrä). Lisäksi sideaineen laadulla on vaikutusta erityisesti betonin pakkas-suolakestävyyteen. Vaatimustasot ovat selvästi tiu-

Viime marraskuussa 2023 käynnistynyt Suuri suomalainen pakkasprojekti jakautuu kahteen vaiheeseen: esiselvitykseen ("Pikku pakkanen") ja varsinaiseen pakkasprojektiin ("Hirmu pakkanen"). Varsinaisen pakkasprojektin on tarkoitus alkaa vuonna 2025.

kemmat pakkas-suolarasituksella verrattuna pakkasrasitukseen ilman klorideita.

Vaikka Suomessa ei ole ilmennyt merkittäviä haasteita betonirakenteiden pakkasenkestävyyden kanssa, ongelmalliseksi koetaan pakkasenkestävyyden testauskäytännöt ja lisäksi nykyiset vaatimukset, jotka perustuvat pääosin 1980- ja 90-luvuilla tehtyihin testauksiin. Siten betonialalla on yleisesti nähty tarpeelliseksi päivittää sekä vaatimustasot sekä testausmenetelmät vastaamaan nykyajan vaatimuksia. Meillä on käynnistynyt Suuri suomalainen pakkasprojekti, joka jakautuu kahteen vaiheeseen: esiselvitykseen ("Pikku pakkanen") ja varsinaiseen pakkasprojektiin ("Hirmu pakkanen"). Esiselvitysvaihe käynnistyi marraskuussa 2023 ja varsinainen pakkasprojektin on tarkoitus alkaa vuonna 2025. Esiselvityksen tavoitteena oli kartoittaa potentiaalisia testimenetelmiä ja tutkia eri maiden vaatimustasoja. Sitä rahoittivat Betoniteollisuus ry, Väylävirasto, Finnsementti Oy ja Betoniyhdistys ry.

Nykyiset haasteet

Side- ja lisäaineiden kehitys viime vuosikymmeninä on muuttanut betonin ominaisuuksia merkittävästi. Esimerkiksi seosaineiden, kuten masuunikuonan käyttö on lisääntynyt, mikä vaikuttaa myös betonin pakkasenkestävyyteen. Vähähiilisen betonin kehitys tulee edelleenkin muuttamaan sideaineiden koostumuksia ja tähän muutokseen pitää pystyä

1 Kuvituskuva. Vuoden 1997 Betonirakenne-kilpailussa palkittiin kunniainnoinnalla Mustasaaren rakennettu Raippaluodon silta. Raippaluodon silta on 1 045 metriä pitkä. Silta on vinoköysisilta, jolla on kaksi pylonia. Pisin silta-aukko on pituudeltaan 250 metriä ja sen vapaa korkeus on 26 metriä. Pylonit kohoavat 82,5 metrin korkeuteen. Toinen pyloni perustettiin kalliolle ja toinen kaivinpaalu- jen varaan. Osa välituista on maanvaraisia ja osa perustettu lyöntipaaluille. Pilareiden suunnittelussa tuli ottaa huomioon suuret ahtojääkuormat; pohjoisivulla pilarit oli varustettava liikkuvien jäälauttojen takia jäänsärkijöillä. Sillan peruslaattojen ja rantamuurien valuissa käytettiin sulfaatinkestävää masuunikuonasementtiä.



varautumaan jo etukäteen. Lisäksi tuoreen betonimassan työstettävyyden on muuttunut notkeampaan suuntaan pumppauksen yleistyksen myötä. Tämä on johtanut erityisesti tehonotkistimien käytön lisääntymiseen, ja lisäksi tehonotkistimien osalta on tapahtunut merkittäviä kehitystä viimeisten kymmenien vuosien aikana.

Testimenetelmien osalta pääasialliset haasteet liittyvät menetelmien hajontaan sekä myös testausten pitkäkestoisuuteen. Esimerkiksi laattatestin tuloksissa on havaittu suurta hajontaa, erityisesti seosaineita sisältävien betonien kohdalla. Lisäksi nykyiset testausmenetelmät ovat usein aikaa vieviä, mikä hidastaa laadunvalvontaa ja kasvattaa kustannuksia.

Viime aikoina on tullut esille myös karbonatisoitumisen voimakas vaikutus erityisesti kuonabetonien pakkas-suolakestävyyteen. Tämä ei ole varsinaisesti uusi asia, mutta merkitys on kasvanut masuunikuonan käytön kasvamisen myötä. Laattakokeessa karbonatisoituneen kuonabetonin rapauma-arvo on moninkertainen verrattuna standarditestin, karbonatisoitumattoman betonin rapauma-arvoon. Toisaalta mikäli testauksen aloittamista siirretään standardin mukaisesti 28 vuorokaudesta 91 vuorokauden, alenee kuonabetonien rapauma-arvo laattakokeessa olennaisesti. Ei kuitenkaan ole täyttä varmuutta, missä määrin karbonatisoitumisen vaikutus liittyy itse laattakokeeseen ja toisaalta missä määrin karbonatisoituminen vaikuttaa betonirakenteiden todelliseen pakkas-suolakestävyyteen. Infrabetonien osalta 50 %:n kuonamäärää pidetään yleisesti maksimimääränä juuri pakkas-suolakestävyyden vuoksi.

Esiselvitys

Esiselvitysvaiheessa keskityttiin kartoittamaan potentiaalisia testimenetelmiä betonin pakkaskestävyyden arvioimiseksi sekä vertailemaan eri maiden vaatimustasoja. Valinnassa korostuivat testimenetelmien kansainvälinen tunnettavuus sekä niiden käyttömahdol-

lisuus Suomessa ilman mittavia investointeja. Valittavien testimenetelmien luotettavuutta arvioidaan vielä tarkemmin varsinaisen pakkasprojektin koeohjelmassa.

Testimenetelmien osalta esiin nousi kolme potentiaalista vaihtoehtoa:

1. Laattatesti (CEN/TS 12390-9¹⁾): Pohjoismaissa laajalti käytetty testimenetelmä (kuva 1a), mutta sen tuloksissa on havaittu hajontaa varsinkin vähähiilisillä betoni-laaduilla ja eri säilytysolosuhteiden välillä. Kokeen kesto on noin neljä kuukautta, mikä tekee siitä raskaan menetelmän laadunvalvonnan kannalta.
2. Sveitsiläinen Q-slab-testi eli nopea laattatesti (SIA 262/1-C², Luonnos): Testimenetelmä perustuu perinteiseen laattatestiin, mutta eroaa merkittävästi koekappaleiden valmistelun ja koestuksen osalta (kuva 1b). Testi on nopeampi suorittaa kuin perinteinen laattatesti, mutta menetelmä on kuitenkin vielä uusi, eikä sen korrelaatiosta perinteiseen laattatestiin tai todellisiin rasitusolosuhteisiin ole riittävästi tietoa.
3. Huokosanalyysi (By 72, Osa 1³): Sekä ohuthie- että pintahieanalyysiä on käytetty runsaasti betonin pakkaskestävyyden arviointiin rasitusluokissa XF1 ja XF3, mutta se ei sovellu pakkas-suolarasitetujen betonien testaamiseen. Menetelmien ongelmana on tulosten suuri hajonta. Digitalisaation ja tekoälyn hyödyntäminen huokosanalyysissä nähdään lupaavana kehityssuuntana. Digitaalinen kolmiulotteinen huokosanalyysi voisi tarjota

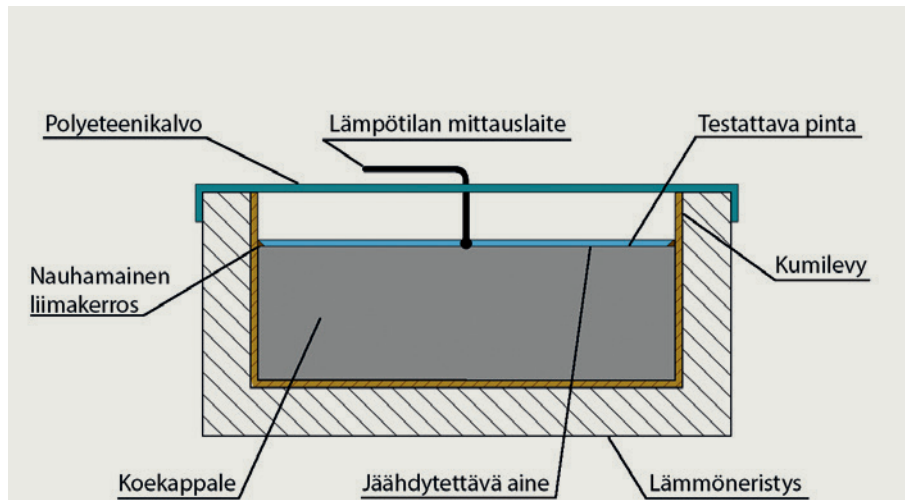
tarkempaa tietoa betonin pakkaskestävyydestä. Menetelmän etuna on nopeus, mutta menetelmä on epäsuora ja siten se ei suoraan mittaa betonin käyttäytymistä jäätymis-sulamissykliä aikana.

Eri maiden vaatimustasojen vertailutuloksen osoittavat, että vaikka peruseriaatit ovat samankaltaisia, käytännössä on selkeitä eroja maiden välillä. Infrabetonien osalta Suomessa on käytössä P-lukubetoni, eikä vastaavaa menetelmää ei ole muissa maissa. Suomen ulkopuolella vaatimukset annetaan lähinnä vesi-sideainesuhteen ja ilmamäärän kautta. Kuitenkin verrattaessa muihin Pohjoismaihin suomalainen P-lukujärjestelmä antaa varsin samankaltaisia vesi-sideainesuhdevaatimuksia infrabetonille. Rasitusluokassa XF4 yleinen vaatimustaso muissa Pohjoismaissa vesi-sideainesuhteelle on 0,40, mikä vastaa varsin hyvin suomalaisen P50 betonin vesi-sideainesuhtetta. Suomessa sideaineen laatu vaikuttaa muita maita enemmän vaadittuun vesi-sideainesuhteeseen. Keski-Euroopassa infrabetonien vaatimustaso on hieman alhaisempi kuin Pohjoismaissa. Rasitusluokassa XF1 Suomen ulkopuolella ei yleensä vaadita lisähuokostusta, mutta vaatimukset vesi-sideainesuhteen osalta ovat samalla tasolla (vesi-sideainesuhde vähintään 0,60). Rasitusluokissa XF1 ja XF3 vain Suomessa käytetään laattatestiä myös puhtaalla vedellä. Pinnan rapautuminen puhtaalla, ionivaihdetulla vedellä on laattatestissä minimaalista, mutta testillä voidaan toki arvioida betonin sisäistä vauriota.

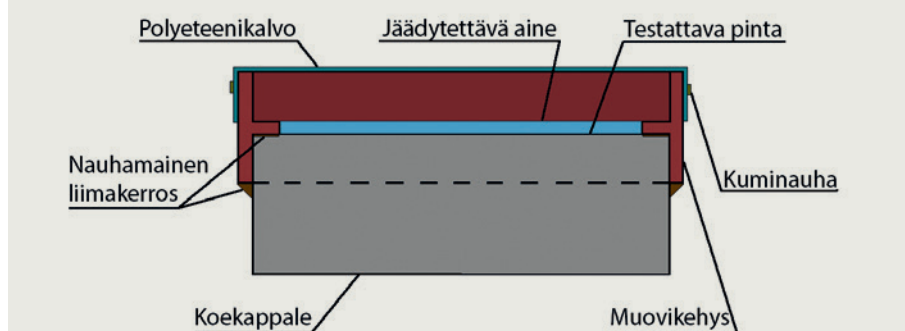
1 CEN/TS 12390-9:2016:fi. (2016). Kovettuneen betonin testaus. Osa 9: Jäädytys-sulatuskestävyys jäänsulatusaineilla. Pintarapautuminen. Standardisoimisliitto SFS.

2 SIA 262/1 Appendix C (2019). Betonbau – Ergänzende Festlegungen. SN 505262/1. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA. Saksaksi.

3 by 72 Betonin laadunvarmistus – Osa 1 – Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthiestä. (2020). ISBN: 978-952-7314-06-7 (e-kirja). Suomen Betoniyhdistys ry.



Kuva 1 a) Laattatesti toimii referenssimenetelmänä teknisessä spesifikaatiossa CEN/TS 12390-9 suola-pakkaskestävyyden arvioimisessa pintarapauman avulla. Testissä mitataan koekappaleen sahapinnasta rapautuvaa betonimäärää jäädytys-sulatussykliä aikana.



Kuva 1 b) Sveitsiläisessä Q-slab-testissä mitataan poikkeavasti muottipinnasta rapautuvaa betonimäärä nopeutettujen jäädytys-sulatussykliä aikana. Lisäksi koekappaleen muottipintaan kiinnitetään vain muovikehys ilman lämmöneristystä.

Ennakkokokeet ovat Suomessa selvästi kattavampia kuin muissa maissa. Useimmissa maissa vaaditaan sementtilaadun ennakkotestausta, mutta ei edellytetä vastaavaa ennakkokoeikäytäntöä kuin mitä Suomessa edellytetään infrabetoneilta. Vaikka infrabetonien vaatimustasot (vesi-sideainesuhde) ovat samalla tasolla eri Pohjoismaissa ja testimenetelmänä käytetään yleisesti laattatestiä, Suomen vaatimukset rapauma-arvon osalta ovat selvästi muita maita tiukemmat. Esimerkiksi Suomessa P50-betonille pintarapauman raja-arvo noin 200 g/m^2 hieman sideainekoostumuksen mukaan, kun taas Norjassa ja Ruotsissa vastaava raja-arvo on 500 g/m^2 . Tämä ero herättää kysymyksiä siitä, että onko Suomen vaatimustasot kohdallaan. Ruotsissa on otettu käyttöön myös karbonisoituneen betonin testaaminen, mikäli sideaineessa on seosaineita vähintään 20 %.

Jatkuvassa laadunvalvonnassa Suomessa painotetaan muita maita enemmän työmaa-koekappaleiden testausta. Tämän käytännön tarkoituksena on varmistaa, että betoni täyttää vaatimukset myös todellisissa työmaaolosuhteissa, mutta se kasvattaa testausmääriä. Työmaalla tehtävien ilmamäärän mittaustaajuuksien osalta Suomi edustaa keskimääräistä tasoa. Ruotsi poikkeaa muista tarkastelluista maista rakenteiden testaamisen osalta. Ruotsissa infrarakenteista (rasitusluokka XF4) edellytetään sekä puristuslujuuden että pakkas-suolakestävyyden testaamista rakenteesta poratuista koekappaleista. Huomattava on myös, että arvioitaessa rakenteen pakkas-suolakestävyyttä laattatestin vaatimustaso poikkeaa normaalista, valettujen koekappaleiden vaatimustasosta. Suomessa rakenteita tutkitaan vain, mikäli aikaisemmissa testauksissa on havaittu puutteita.

Varsinainen pakkasprojekti

Varsinainen pakkasprojekti on tarkoitus aloittaa vuoden 2025 alussa. Tämä vaihe tulee sisältämään laajan koeohjelman toteuttami-

Kuva 2

Varsinaisen pakkasprojektin koeohjelma on jaettu neljään työpakettiin, joissa tutkitaan betonin pakkasenkestävyyttä eri näkökulmista.

Työpaketti: Luotettavuuskokeet	Tutkitaan eri testimenetelmien välistä korrelaatiota, tarkkuutta ja vaativuutta käyttäen 3–4 yleisintä sementtilaatua.
	Tehdään uusittavuuskokeet useissa eri laboratorioissa, jotta saadaan kattava kuva menetelmien toimivuudesta erilaisissa ympäristöissä ja eri tekijöiden suorittamina.
	Tavoitteena on selvittää, kuinka toistettavia ja uusittavia testit ovat. Tämä on kriittistä, sillä testitulosten suuri hajonta on ollut yksi keskeisistä ongelmista nykyisissä menetelmissä.
Työpaketti: Tutkimusosuus	Keskitytään uusien testimenetelmien kehittämiseen, pääpainona primäärisementit ja testien herkkyyserilaatuisilla betoneilla.
	Tutkitaan erityisesti digitaalisten ja automaattisten menetelmien, kuten tekoälyavusteisen huokosanalyysin, mahdollisuuksia.
	Tavoitteena on kehittää nopeampia, tarkempia ja vähemmän työläisiä menetelmiä betonin pakkasenkestävyyden arviointiin.
Työpaketti: Varsinaiset betonikokeet	Tutkitaan laajemmin betonin eri ominaisuuksien vaikutusta valittuihin testimenetelmiin.
	Betoniparametreja varioidaan mahdollisimman paljon laboratorioiden testauskapasiteetin rajoissa. Tämä sisältää erilaisten sideaineyhdistelmien, vesi-sideainesuhteiden ja ilmamäärien tutkimisen.
	Tavoitteena on ymmärtää, miten erilaiset betonin koostumukset vaikuttavat sen pakkasenkestävyyteen ja miten hyvin eri testimenetelmät pystyvät havaitsemaan nämä erot.
Työpaketti: Olemassa olevien rakenteiden testaus	Selvitetään yhteyksiä betonirakenteiden ominaisuuksien ja niiden todellisen pakkasenkestävyyden välillä.
	Sisältää eri-ikäisten ja eri kuntoisten betonirakenteiden tutkimisen sekä laboratoriokokeiden tulosten vertaamisen todellisiin kenttäolosuhteisiin.
	Tavoitteena on varmistaa, että laboratoriotestit todella ennustavat betonin käyttäytymistä todellisissa olosuhteissa.

sen, jossa huomioidaan useita erilaisia betonikoostumuksia ja testimenetelmiä. Projektin päätavoitteet ovat:

1. Päivitetään pakkasenkestävyyden vaatimukset nykyisille raaka-aineille ja betonilaaduille. Lisäksi pyritään ennakoimaan sideaineiden tulevaa kehitystä. Vaatimusten päivitys sisältää vaatimusten raja-arvojen tarkistamisen niiden oikeellisuuden sekä luotettavuuden kannalta.
2. Kehitetään pakkasenkestävyyden testimenetelmiä ja laadunvalvonnan kokonaisuutta. Tähän kuuluu sekä olemassa olevien menetelmien parantaminen että mahdollisten uusien, nopeampien ja tarkempien menetelmien kehittäminen/käyttöönotto.
3. Selvitetään talo- ja infrarakentamisen vaatimusten yhtenäistämismahdollisuuksia. Tällä hetkellä näiden sektorien vaatimukset eroavat toisistaan, mikä on johtanut kahden erilaisen systeemin käyttöönottoon.

Projektin tulee sisältämään työpaketteja kuvan 2 mukaisesti. Työpakettien sisältö tarkentuu vielä syksyn -24 aikana.

Pakkasprojektin odotetaan tuovan merkittävää uutta tietoa betonin pakkasenkestävyydestä ja sen testausmenetelmistä. Projektin tulokset tulevat vaikuttamaan pakkasenkestävän betonin laadunvalvontaan ja niiden vaatimustasoihin Suomessa. Pakkasprojektin perusteella voidaan myös tarkistaa sideainemuutosten vaikutukset betonin pakkasenkestävyyteen. Lisäksi tutkimuksessa huomioidaan muiden maiden tutkimus- ja kehitystyötä pakkasenkestävyyden osalta.

Varsinaisen pakkasprojektin tavoitteena on:

1. kehittää pakkasenkestävyyden laadunvalvonnan kokonaisuutta tehokkaampaan suuntaan ja selvittää potentiaalisten testimenetelmien luotettavuus betonin pakkasenkestävyyden arvioinnissa.
2. selvittää eri betonikoostumusten vaikutusta pakkasenkestävyyteen ja testimene-

telmien mittaustuloksiin, myös tulevaisuuden vähähiilisten betonien osalta.

3. mahdollistaa vaatimustasojen päivittämisen vastaamaan paremmin nykyaikaisten betonien ominaisuuksia.
4. yhtenäistää talo- ja infrapuolen vaatimuksia, mikä voi yksinkertaistaa betonin valmistuksen ja laadunvalvonnan kokonaisuutta.

Pakkasprojektin valmistelut jatkuvat syksyllä 2024, jolloin selvitetään tarkemmin laboratorioiden testauskapasiteettia, mahdollisia koulutustarpeita sekä kartoitetaan potentiaalisia osallistujia varsinaiseen pakkasprojektiin. Betoniteollisuuden ja tutkimusyhteisön tiivis yhteistyö on avainasemassa projektin onnistumisen kannalta.

3 Betonin pinnasta on rapautunut betonia laatta-
testin aikana.

Ahsan Iqbal



National Frost Project

National Frost Project in Finland aims to update concrete's frost resistance requirements and testing practices as well as methods. The project is divided into a preliminary study and a main project, addressing current challenges in the field such as evolving mix compositions, variation in testing methods, and outdated requirements especially for salt freeze-thaw resistant concrete.

The preliminary study identified three promising test methods: the slab test, the Swiss Q-slab test, and the air void analysis. Comparison of requirements between countries revealed similarities in basic principles and requirement levels but differences in practices. For instance, Finland's P-factor system for infrastructure concrete is unique, while other countries mainly specify requirements through water-to-binder ratio and air content.

The main project is planned to start in 2025 and will include an extensive testing program. The objective is to update frost resistance

requirements for current and future concrete compositions, improve testing methods and quality control processes, and unify requirements for building and infrastructure construction.

Close collaboration between the concrete industry and research community is essential for the project's success. Preparations will continue in autumn 2024, focusing on assessing laboratory capacities, identifying training needs, and mapping potential participants. The outcomes are expected to significantly influence quality control of concrete and requirement levels for frost resistant concrete in Finland.