

Jukka Haavisto, Jukka Lahdensivu, Anssi Laaksonen

VÄHÄHIILISTEN BETONIEN SÄILYVYYSMITOITUS

VN/6891/2024

Loppuraportti
Joulukuu 2025

TIIVISTELMÄ

Hankkeessa tutkittiin vähähiilisten betonien pitkäaikaiskestävyyttä ja niiden kytkemistä uuden Eurokoodin (SFS-EN 1992-1-1:2023) mukaiseen suorituskykyperusteiseen säilyvyysluokitukseen (ERC). Tavoitteena oli määrittää vähähiilisiä sideaineita sisältäville betoneille niiden todelliseen suorituskykyyn perustuvat raudotteiden peitepaksuudet eri rasitusolosuhteissa ja edistää näin vähähiilisten ratkaisujen käyttöä rakennesuunnittelussa.

Hanke toteutettiin Tampereen yliopiston, VTT:n ja TAMK:n yhteistyönä, ja siinä valmistettiin neljää sideainetta käyttäen 48 betonia, yli 1000 koekappaletta ja tehtiin yli 10 000 mittausta. Tutkimus sisälsi kiihdytettyjä karbonatisoitumis- ja kloridikoekteita, halkeamien vaikutusten arviointia sekä pitkäaikaiskenttäkappaleiden valmistuksen. Laskennallisessa osuudessa mallinnettiin peitepaksuudet kaikille tutkituille betoneille sekä säilyvyysluokille suomalaisissa olosuhteissa.

Tulokset osoittivat, että vähähiiliset, masuunikuonapitoiset sideaineet paransivat kloridinkestävyyttä merkittävästi. Sen sijaan karbonatisoituminen lisääntyi sementin korvausasteen ja vesi-sideainesuhteen kasvaessa. Halkeamien todettiin lisäävän sekä hiilidioksidin että kloridien etene- mistä, mikä korostaa halkeilun hallintaa.

Hankkeen tulokset ovat välittömästi hyödynnettävissä. Tuloksia hyödynnetään käynnissä olevassa standardointityössä ja ne vaikuttavat alan käytäntöihin uusien Eurokoodien käyttöönoton myötä. Lisäksi hankkeessa validoidut koemenetelmät ja koottu tietokanta tukevat uusien vähähiilisten sideaineiden kehitystä ja yhdenmukaista arviointia jatkossa.

Hankkeella on merkittävä positiivinen vaikutus rakentamisen vähähiilisyyteen, sillä se mahdollistaa turvallisen siirtymän vähäpäästöisempiin betoniratkaisuihin ilman säilyvyyden heikentymistä. Jatkotutkimustarpeiksi tunnistettiin erityisesti kenttäkoekappaleiden pitkäaikaisseuranta, kiihdytettyjen ja luonnollisten rasitusolosuhteiden vertailu sekä Suomen olosuhteita kuvaavan tarkemman ilmasto- ja materiaalidatan kerääminen.

ABSTRACT

The project investigated the long-term durability of low-carbon concretes and their integration into the performance-based durability classification (ERC) introduced in the new Eurocode (SFS-EN 1992-1-1:2023). The objective was to define reinforcement cover depths for concretes containing low-carbon binders based on their actual durability performance under different exposure conditions, thereby supporting the safe and effective use of low-carbon materials in structural design.

The work was carried out in collaboration between Tampere University, VTT, and TAMK. A total of 48 concrete mixes were produced using four different binders, resulting in over 1,000 test specimens and more than 10,000 individual measurements. The experimental programme included accelerated carbonation and chloride ingress testing, assessment of crack effects, and the preparation of long-term field exposure specimens. In the numerical phase, cover depths were modelled for all studied concrete mixes as well as for each durability class under Finnish environmental conditions.

The results showed that low-carbon binders with high blast-furnace slag content significantly improved resistance to chloride ingress. In contrast, carbonation resistance decreased with increasing slag replacement levels and higher water-to-binder ratios. Cracks were found to accelerate the ingress of both carbon dioxide and chlorides, underscoring the importance of crack control.

The project outcomes are directly applicable in practice. They are already being used in ongoing national standardization work and will influence future design practices as the new Eurocodes are implemented. In addition, the validated test methods and the comprehensive data set produced in the project support the development and harmonized assessment of future low-carbon binders.

The project has a significant positive impact on low-carbon construction by enabling a safe transition to lower-emission concrete solutions without compromising durability. Identified needs for further research include long-term monitoring of field exposure specimens, comparison of accelerated and natural exposure conditions, and the collection of more detailed climate and material data specific to Finnish conditions.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	1
ABSTRACT	2
1.HANKKEEN TAUSTA JA TAVOITTEET	4
2.HANKKEEN OSAPUOLET JA MENETELMÄT	5
2.1 Osapuolet	5
2.2 Menetelmät.....	6
3.HANKKEEN TULOKSET	7
3.1 Tavoitteiden ja tulosten toteutuminen	7
3.2 Poikkeamat suunnitelmiin	7
4.HANKKEEN VAIKUTTAVUUS/VAIKUTUKSET	8
5.VIESTINNÄN TOTEUTUMINEN JA TULOKSET	9
6.TULOSTEN KESTÄVYYS JA HYÖDYNTÄMINEN.....	10
7.TALOUSRAPORTTI.....	11
8.SUOSITUKSET TULEVIA HANKKEITA JA OHJELMIA VARTEN.....	12
8.1 Jatkotutkimustarpeet.....	12
8.2 Suositukset tulevia ohjelmia varten.....	13
9.YHTEENVETO HANKKEEN PÄÄTULOKSISTA	13
10. SUMMARY OF THE MAIN RESULTS.....	15
LÄHTEET	17

1. HANKKEEN TAUSTA JA TAVOITTEET

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, ja siksi sen vaikutus hiilidioksidipäästöihin on merkittävä. Sementti muodostaa selvästi suurimman osan betonin päästöistä, ja Suomessa sementtiteollisuuden osuus kasvihuonekaasupäästöistä on noin 2 %. Päästöjen vähentämiseksi perinteistä Portlandsementtiä pyritään korvaamaan teollisuuden sivuvirroista saatavilla seosaineilla.

Rakenteen käyttöikä vaikuttaa ratkaisevasti rakennusalan CO₂-päästöihin, kun tarkastellaan koko elinkaarta. Käyttöikään puolestaan vaikuttaa betonin pitkäaikaiskestävyys, jonka ominaisuudet on tunnettava riittävän hyvin, jotta rakenteet voidaan mitoittaa luotettavasti. Suunnittelumenetelmiä ja niihin liittyviä mitoitusmalleja on päivitetty viime vuosina, ja uusi Eurokoodi SFS-EN 1992-1-1:2023 (EC2) julkaistiin loppuvuodesta 2023. Sen käyttöönotto tapahtuu 2–3 vuoden kuluessa, ja samalla betonirakenteiden säilyvyysmitoitus muuttuu merkittävästi.

EC2:ssa säilyvyyttä tarkastellaan eri rasitusluokkiin edellytettävien säilyvyysluokkien (ERC) avulla. Suojabetonipeite määräytyy näiden luokitusten mukaan sekä karbonatisoitumisen että kloridien tunkeutumisen aiheuttaman korroosion tapauksissa. Eurokoodi sisältää menetelmät näiden ilmiöiden tutkimiseen laboratoriossa ehjälle betonille.

ERC-luokkien suojabetonipeitteet määritetään kansallisesti, ja arvot eri betoneille on esitettävä rasitusluokissa (XC1–4, XD1–3, XS1–3) ennen EC2:n kansallista käyttöönottoa. Suomessa muun muassa Tampereen yliopistolla on tutkittu perinteisellä Portlandsementillä valmistetun betonin pitkäaikaiskestävyyttä laajasti, mutta vähähiilistä betoneista ei ole saatavilla vastaavaa tietoa. Näiden betonien vaikutus rakenteiden säilyvyyteen raudoitteiden korroosion osalta on ensiarvoisen tärkeää selvittää, jotta niiden käyttöä voidaan edistää.

Hankkeen päätavoitteena on edistää vähähiilisten betonien käyttöä lisäämällä ymmärrystä niiden pitkäaikaiskestävyydestä ja kytkemällä niitä uuteen säilyvyysluokitukseen. Lisäksi tavoitteena on määrittää luokitusten mukaiset raudoitteiden peitepaksuudet betonissa. Riittävä peitepaksuus on keskeinen tekijä varsinkin ulkoilmarasituksessa olevien betonirakenteiden säilyvyydessä. Laajemmin menetelmä määrittää vaatimuksia koko rakenneosan betonille eikä vain betonipeitteelle. Tämän vuoksi käyttöikämitoitus on olennainen suunnittelutehtävä, johon tarvittiin lisätietoa.

2. HANKKEEN OSAPUOLET JA MENETELMÄT

2.1 Osapuolet

Hankkeen päähakijana, koordinoijana ja pääasiallisena tutkimustahona toimi Tampereen yliopiston (myöh. TAU, virallisesti Tampereen Korkeakoulusäätiö sr) Rakennetun ympäristön tiedekunta, jossa hankkeen vastuullisena johtajana toimi Betoni- ja siltarakenteiden tutkimusryhmän vetäjä, professori Anssi Laaksonen. Hankkeen muina tutkimusosapuolina toimivat Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy (myöh. VTT, yhteyshenkilö Miguel Ferreira) ja Tampereen ammattikorkeakoulu (myöh. TAMK, yhteyshenkilö Kati Koskento).

Hanke sai tukea ympäristöministeriöltä Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelmasta, jonka rahoitus tulee EU:n kertaluonteisesta elpymisvälineestä. Muut hankkeen rahoittajat olivat SBK-säätiö sr (yhteyshenkilö Jussi Mattila), Finnsementti Oy (yhteyshenkilö Jesse Junnila) ja Väylävirasto (yhteyshenkilö Janne Isohaka).

TAU:sta hankkeeseen osallistui yliopiston pitkäaikaista tutkimus- ja laboratoriohenkilökuntaa, jonka lisäksi hankkeeseen palkattiin kaksi diplomityöntekijää ja yksi tutkimusapulainen. Tutkimusta johti professori Anssi Laaksonen. Hankkeen ohjaustyöhön osallistuivat laajasti dosentti Jukka Lahdensivu ja projektipäällikkö Jukka Haavisto. Hankkeessa tutkijana toimi Heikki Alho, diplomityöntekijöinä Samuli Myöhänen ja Riku Paavilainen, sekä tutkimusapulaisena Jasper Kunnas. Laboratoriotyöskentelyyn osallistuivat TAU:sta lisäksi Jussa Pikkuvirta, Lauri Kuusisto, Riku Fagerström, Tomi Strander, Mika Vuorela, Robert Farkas, Tomi Vuori ja Santeri Salonen.

TAMK vastasi hankkeessa käytettyjen betonien suhteituksesta, betonikoekappaleiden valmistuksesta ja siinä yhteydessä tehdyistä tuoreen betonin mittauksista. TAMK:sta hankkeeseen osallistuivat Kati Koskento, Jarno Kilponen ja Marko Harjumäki.

VTT:ltä tutkimukseen osallistui Miguel Ferreira ja kenttäkoekappaleiden järjestelyyn Ville Sjöblom.

Hankkeen tutkimusosapuolista ja rahoittajista koottu ohjausryhmä kokoontui hankkeen aikana yhdeksän kertaa. Ohjausryhmän kokouksiin osallistuivat hankkeen aikana Jussi Mattila ja Ari Mantila Betoniteollisuus ry:stä, Jesse Junnila ja Sini Ruokonen Finnsementti Oy:stä, Janne Isohaka ja Jussi Vuotari Väylävirastosta, Jarkko Klami ja Mika Tuolima Rudos Oy:stä sekä Kati Koskento TAMK:sta. TAU:sta ohjausryhmän kokouksiin

osallistuivat Anssi Laaksonen, Jukka Lahdensivu, Jukka Haavisto, Heikki Alho, Samuli Myöhänen, Riku Paavilainen ja Jasper Kunnas.

2.2 Menetelmät

Hanke toteutettiin kokeellisena ja laskennallisena tutkimuksena. Kokeellinen osuus jakautui neljään vaiheeseen. Kaksi ensimmäistä vaihetta olivat hankkeen päävaiheet, joissa tehtiin kiihdytettyjä laboratoriokokeita 48 eri betonilaadulle. Kolmannessa vaiheessa tutkittiin halkeaman vaikutusta karbonatisoitumisen ja kloridien etenemiseen. Neljännessä vaiheessa valmistettiin kenttäkoekappaleet, jotka sijoitetaan useiden vuosien mittaiseen pitkäaikaissäilytykseen luonnollisissa rasitusolosuhteissa.

Betoneille tehtiin kiihdytettyjä laboratoriokokeita karbonatisoitumisen ja kloridien etenemisen arvioimiseksi. Kokeissa käytettiin neljää eri sideainetyyppiä, jotka erosivat toisistaan pääosin masuunikuonan korvausasteen ja siten vähähiilisyyden osalta. Jokaisesta sideainetyypistä valmistettiin betoneita 12 erilaisella suhteituksella, joissa varioitiin vesi-sideaine-suhdetta, sideainemäärää ja huokostimen käyttöä. Vähähiilisimmistä betonilaaduista valmistettiin lisäksi rinnakkaiset koekappaleet pidemmän arvosteluiän (91 d) mukaisia testauksia varten.

Betoniin muodostuneen halkeaman vaikutusta betonirakenteen pitkäaikaiskestävyyteen arvioitiin tutkimuksessa valmistettujen pienen mittakaavan betonipalkkien avulla. Yhdellä harjateräksellä raudoitettuihin betoniprismoiin muodostettiin yksi halkeama kolmipiste-taivutuksessa ja prismat sijoitettiin sen jälkeen kiihdytettyn hiilidioksidi- tai kloridirasitukseen. Rasituksen jälkeen koekappaleista määritettiin karbonatisoitumisen ja kloridien etenemisen profiili.

Osasta kiihdytetyissä laboratoriokokeissa käytetyistä betoneista valettiin kenttäkoekappaleet, jotka tullaan sijoittamaan todellisiin olosuhteisiin useiden vuosien pitkäaikaisrasitukseen. Kenttäkoekappaleet valmistettiin käyttäen kolmea tutkimuksen vähähiilisempää sementtilaataa, joista jokaisesta valmistettiin neljä erilaista huokostettua betonia. Jokaisesta betonista valmistettiin kaksi koekappaletta tien suolauksen aiheuttamaan kloridirasitukseen moottoritien varressa olevaan koekenttään sijoitettavaksi ja kaksi koekappaletta, joita on mahdollista hyödyntää karbonatisoitumisen etenemiseen ulkoilmassa.

Tutkimuksen laskennallisessa osuudessa mallinnettiin betonin peitepaksuudet kloridien tunkeutumiselle XS1...3 ja XD1...3 rasitusluokissa kymmenellä eri säilyvyysluokalla ja karbonatisoitumisen etenemiselle XC1...4 rasitusluokissa kahdeksalla eri säilyvyysluokalla. Lisäksi betonipeitteet mallinnettiin kaikille 48 kokeellisessa osuudessa tarkas-

telulle betonille edellä esitetyissä rasitusluokissa. Laskennalliset määritykset tehtiin erikseen 50 ja 100 vuoden suunnitellulla käyttöiällä käyttäen suomalaisia olosuhteita mahdollisimman hyvin kuvaavia lähtötietoja. Tämän lisäksi tehtiin mallinnuksen lähtötietojen herkkyystarkasteluja.

3. HANKKEEN TULOKSET

3.1 Tavoitteiden ja tulosten toteutuminen

Hankkeen keskeisimpänä tavoitteena oli saada tutkimustietoa uusien vähähiilisten betonien karbonatisoitumisesta ja kloridien vastustuskyvystä, sekä määrittää betoniraudoitteiden peitepaksuudet uuden EC2:n säilyvyysluokkien mukaisiksi. Hankkeen aikana valmistettiin neljää sideainetta ja 48 eri betonilaatua käyttäen yhteensä yli tuhat koekappaletta, joille tehtiin hankkeen aikana yhteensä yli kymmenentuhatta mittausta. Betoniraudoitteiden peitepaksuudet mallinnettiin valittuja lähtötietoja käyttäen lähes tuhannessa laskentatapauksessa, jonka lisäksi valituille lähtötiedoille tehtiin useita herkkyystarkasteluja. Edellä esitetyn tavoitteen voidaan todeta siten täyttyneen erinomaisesti.

Näiden tulosten myötä on erittäin suuri potentiaali saavuttaa myös hankkeen päätavoite, eli vähähiilisten betonien käytön lisääntyminen. Tämän tavoitteen täytyminen voidaan todeta kuitenkin vasta useiden vuosien kuluttua. Siihen vaikuttaa tämän hankkeen ohella merkittävästi myös muu aihepiirin kehitystyö ja lainsäädäntö.

Hankkeen päätulosten yhteenveto on esitetty loppuraportin luvuissa 9-10. Hankkeen tulokset on laajemmin raportoitu opinnäytetöissä [1–3], ja hankkeen päätyttyä julkaistavissa artikkeleissa [4–8].

3.2 Poikkeamat suunnitelmiin

Hankkeen aikana alkuperäisiin suunnitelmiin nähden tarkennettiin käytettäviä koemenetelmiä ja suhteutuksia (eli betonireseptejä), jotta betonit olisivat toteutettavissa ja jotta koemenetelmät vastaisivat mahdollisimman hyvin eurooppalaisen säilyvyysluokituksen taustalla käytettyjä laboratoriomenetelmiä. Lisäksi betonit valmistettiin alkuperäisestä suunnitelmista poiketen laboratorio-olosuhteissa tuotannossa tapahtuvan valmistuksen sijaan. Tämä mahdollisti koekappaleiden valmistukseen tutkimuksellisessa tarkoituksessa vaadittavan tarkkuuden sekä tutkimusta varten räätälöidyt suhteitukset.

Vaikka suunnitelmaa tarkennettiin monilta osin hankkeen edetessä, kokeellisen osuuden kokonaisrakenne säilyi kuitenkin alkuperäisen suunnitelman mukaisena. Merkittävin muutos alkuperäiseen suunnitelmaan nähden oli hankkeen laskennallisen osuuden laajentuminen huomattavasti ennakoitua suuremmaksi. Tämä johtui siitä, että hankkeen keskeisimpänä tavoitteena ollut betoniraidoitteiden peitepaksuuden määrittäminen uusien säilyvyysluokkien mukaisiksi ei ollut koetulosten perusteella mahdollista ilman perusteellista laskennallista mallintamista.

4. HANKKEEN VAIKUTTAVUUS/VAIKUTUKSET

Hankkeella on suuri vaikutus vähähiilisten betonien nopeaan käyttöönottoon. Tämä mahdollistuu sillä, että hankkeen tutkimustuloksista on informoitu aktiivisesti kansallisia standardointityöryhmiä. Tätä kautta tulokset tulevat huomioon otetuiksi kansallisissa standardeissa, ja päätyvät siten käytännön rakennesuunnitteluun 2-3 vuoden kuluttua uusien suunnittelustandardien käyttöönoton yhteydessä.

Hankkeen yhteydessä muodostettu tietokanta tulee avoimesti kaikkien käyttöön, mikä vahvistaa alan tiedon jakamista ja tukee tutkimuksen ja standardoinnin kehitystä. Hankkeessa testattiin ja varmistettiin uusien laboratoriomenetelmien toimivuus, jotta niiden avulla voidaan jatkossa luotettavasti määrittää, miten hyvin eri sideaineet kestävät erilaisia rasitusolosuhteita ja mihin säilyvyysluokkaan ne kuuluvat. Lisäksi saadut tutkimustulokset halkeamien vaikutuksesta parantavat betonirakenteiden pitkäaikaiskestävyyden arviointia.

Hankkeen aikana määritetyt sideainekohtaiset betonipeitteet eri rasitusolosuhteille tukevat vähähiilisten sideaineiden turvallista käyttöönottoa. Tämä mahdollistaa betonirakenteiden hiilijalanjäljen pienentämisen, mikä osaltaan hillitsee rakentamisen ilmastovaikutuksia. Rakennesuunnittelussa voidaan hyödyntää hankkeen tuloksia sideaineiden optimoinnissa betonirakenteille.

5. VIESTINNÄN TOTEUTUMINEN JA TULOKSET

Tutkimushankkeelle perustettiin hankkeen alussa omat internetsivut¹, johon on koottu kaikki hankkeesta julkaistu materiaali. Sivujen päivitystä jatketaan myöhemmin julkaitavilla materiaaleilla ja se täydennetään kattamaan myös hankkeen jälkeisen jatko-projektin sisältö.

Hankkeesta järjestettiin kaikille avoin tuloswebinaari 27.5.2025, jossa käytiin läpi hankkeen päävaiheiden sisältö ja keskeisimmät tulokset. Webinaarin kohderyhmänä oli betonirakenteiden suunnittelijat ja betonin valmistajat. Webinaaria markkinoitiin LinkedIn-verkkoyhteisöpalvelussa muun muassa hankkeen tutkijoiden, TAU:n ja Betoniyhdistyksen toimesta. Webinaari onnistui tavoittamaan kohderyhmän hyvin, sillä tapahtumassa oli yli 50 osallistujaa, jonka lisäksi webinaarin tallenne on saatavilla TAU:n Betoni- ja siltarakenteiden tutkimusryhmän internetsivujen kautta.

Hankkeen tuloksista on pidetty ja pidetään esityksiä useissa eri tilaisuuksissa. Riku Paavilainen esitteli karbonatisoitumisvaiheen tuloksia kansainvälisessä *Nordic webinar: CO₂-uptake in concrete* -tilaisuudessa 13.6.2025. Jukka Haavisto kävi läpi hankkeen päätulokset kansalliset betonipeitepaksuudet päättävän *SR102/AR6 Durability* -työryhmän kokouksessa 6.10.2025. Samuli Myöhänen pitää kloridien etenemisestä esityksen Suomen Betoniyhdistyksen ja Väyläviraston järjestämällä Siltatekniikan päivillä 10.-11.2.2026. Kansainvälisen betonijärjestön *fib*:n kesäkuussa 2026 järjestettävässä tiedeellisessä kongressissa hankkeesta on kaksi esitystä: Samuli Myöhänen esittelee kloridien tunkeutumisen laskennallista osuutta ja Miguel Ferreira esittelee karbonatisoitumisen etenemisen laskennallista osuutta. Lisäksi Jukka Haavisto ja Anssi Laaksonen esittelevät hanketta KIRAilmasto-ohjelmasta valmistuvien hankkeiden tulostilaisuudessa 28.1.2026.

Hankkeesta valmistui kolme opinnäytetyötä. Riku Paavilaisen diplomityössä käsitellään karbonatisoitumisosion kokeelliset ja laskennalliset tulokset. Samuli Myöhäsen diplomityössä käsitellään vastaavasti kloridien tunkeutumisen kokeelliset ja laskennalliset tulokset. Jasper Kunnas määrittä hankkeessa tutkituille betonilaaduille vähähiilisyysluokat, ja teki tämän pohjalta kandidaatintyönsä.

¹ <https://research.tuni.fi/betonirakenteet/tutkimus/tutkimuskokonaisuudet/vahahiilisten-betonien-sailyvyysmitoitus/>

Opinnäytetöiden ohella hankkeen tulosten hyödynnettävyyden kannalta tärkeimpänä viestintätapana pidetään myöhemmin julkaistavia tieteellisiä vertaisarvioituja artikkeleita ja vapaasti hyödynnettävissä olevia datapankkeja. Kiihdytettyjen laboratoriokeiden tulokset julkaistaan data-arkistona Zenodo-palvelussa, ja tähän liittyen tavoitellaan julkais-tavan *Data in Brief* -lehdessä kaksi data-artikkelia, jotka ovat valmistumassa alkuvuo-desta 2026 vertaisarvointiin. Hankkeen halkeamaosuudesta on lisäksi valmistumassa vertaisarvioitu artikkeli, joka tavoitellaan julkaistavaksi alan korkeatasoisessa julkai-sussa, kuten *Structural Concrete* -lehdessä.

Viestinnän voidaan todeta onnistuneen hyvin, sillä hankkeen aikana julkaistut opinnäy-tetyt ja hankkeesta järjestetty tuloswebinaari tavoittivat vähähiilisten betonien säilyvyys-mitoituksen kannalta tärkeimmät kohderyhmät, eli betonirakenteiden suunnittelijat ja be-tonin valmistajat hyvin. Hankkeen viestinnässä on huomioon otettavaa, että iso osa vies-tinnästä tapahtuu vasta hankkeen päätyttyä, ja osin yhdistettynä aihepiiristä käynnisty-neen jatkohankkeen viestinnän kanssa. Hankkeesta myöhemmin julkaistavat tieteelliset artikkelit, pidettävät esitykset ja tuloksista koottu datapankki kasvattavat viestinnän vai-kuttavuutta hankkeen päätyttyä. Maininnan arvoista on myös, että tulosten vaikuttavuuden kannalta tärkeimmät kohderyhmät, eli kansalliset standardoinnin työryhmät, on ta-voitettu hyvin myös hankkeen ohjausryhmän sisäisen viestinnän kautta.

6. TULOSTEN KESTÄVYYS JA HYÖDYNTÄMI-NEN

Hankkeesta saadut tulokset ovat hyvin konkreettisia ja välittömästi hyödynnettävissä. Tutkimuksessa käytetyt betonilaadut ovat tuotantoon soveltuvia ja niissä on hyödynnetty jo markkinoilla olevia vähähiilisiä sideaineita. Koekappaleet valmistettiin ja testattiin ylei-sesti hyväksytyjä standardimenetelmiä soveltaen, mikä vahvistaa tulosten luotettavuutta ja vertailukelpoisuutta.

Hankkeessa validoitiin koemenetelmiä, joiden avulla voidaan arvioida vähähiilisten side-aineiden säilyvyyteen liittyviä ominaisuuksia johdonmukaisesti ja luotettavasti. Menetel-mät pohjautuvat eurooppalaisessa säilyvyysluokituksessa käytettyihin periaatteisiin. Li-säksi hankkeen aikana laadittiin viitekehys raudoitteiden peitepaksuuksien määrittämi-

selle suomalaisissa olosuhteissa eri rasisitusluokissa. Näin syntyi kokonaisuus, joka kattaa sekä sideaineiden arvioinnissa käytettävät testit että niiden tulosten hyödyntämisen rakennesuunnittelussa.

Näiden tulosten myötä uusien, kehitettävien sideaineiden arviointi on jatkossa suoraviivaisempaa. Uudet materiaalit voidaan testata samoilla menetelmillä ja näin tuottaa vertailukelpoista aineistoa niiden pitkäaikaiskestävyydestä. Samalla hanke tarjoaa pohjan sille, että vähähiilisiä sideaineita sisältävät betonit voidaan sijoittaa tarkoituksenmukaisesti säilyvyysluokkiin ja testitulosten käyttämisestä luokittelun tukena on kokemuksia.

Hankkeen tulokset tukevat siten sekä vähähiilisten sideaineiden kehitystä että laajempaa siirtymää vähähiilisiin betonirakenteisiin. Tulosten odotetaan palvelevan useita tulevia tutkimus- ja kehityshankkeita, joka vahvistaa hankkeen pitkäaikaista vaikuttavuutta. Tulosten konkreettisuutta ja tarpeellisuutta osoittaa se, että niitä hyödynnetään parhaillaan käynnissä olevassa kansallisessa betonin säilyvyyden arviointiin liittyvässä standardointityössä.

7. TALOUSRAPORTTI

Hanke toteutui pääosin rahoitussuunnitelman mukaisena vähäisin muutoksin. Suurin hankkeen talouteen vaikuttava muutos oli tutkittavien betonien valmistaminen TAMK:ssa laboratoriotyönä, kun alkuperäisenä suunnitelmana oli tutkittavien betonien toimittaminen Betonteollisuuden jäsenyritysten betoniasemalta. Tämän alkuperäiseen suunnitelmaan nähden tulleen lisäyksen vaikutusta hankkeen talouteen varmistettiin ympäristöministeriöltä, ja koska hankkeen kokonaiskustannuksia ei ollut mahdollista kasvattaa ilman muutospäätöstä, päädyttiin siihen, että Finnsementti Oy toimitti hankkeessa käyttetyt betonit käyttäen TAMK:ia alihankkijanaan.

Rahoitussuunnitelman ja toteutuneiden kustannusten välillä merkittävimpana erona oli tutkimuksissa käytettyjen kemikaalien ja tarvikkeiden raportointi *Välineiden ja laitteiden kustannuksina*, kun rahoitussuunnitelmassa nämä kustannukset oli sijoitettu *Muut kustannukset* -kohdan alle.

Rahoitussuunnitelmassa hankintojen ja ostojen kustannukset ilmoitettiin alun perin arvonnisäverottomina. Opetus- ja kulttuuriministeriön päätöksen (OKM/14/592/2018) mukaisesti korkeakoulujen yhteisrahoitteisten hankkeiden toteuttaminen ei kuitenkaan ta-

pahdu arvonlisäverolaissa tarkoitetulla tavalla liiketoiminnan muodossa. Tällöin hankkeeseen liittyvien ostojen arvonlisäveroa ei saa vähentää, ja arvonlisävero jää näin ollen TAU:n kustannukseksi. Hankkeen asiantuntijapalveluiden hankinnan kustannukset nousivat siten arvonlisäveron verran rahoitussuunnitelmaan nähden.

8. SUOSITUKSET TULEVIA HANKKEITA JA OHJELMIA VARTEN

8.1 Jatkotutkimustarpeet

Hankkeen seurauksena on käynnistynyt laaja jatkoprojekti, jossa tutkitaan kiihdytettyjen ja luonnollisissa olosuhteissa tehtyjen laboratoriokokeiden vastaavuutta vähähiilisillä betonilaaduilla sekä ikäkertoimen vaikutusta betonirakenteiden pitkäaikaiskestävyyteen. Jatkoprojektissa laajennetaan myös päättyneen hankkeen halkeamaosuutta kattamaan laajempi joukko sideaineita. Pidemmän keston ansiosta projektissa voidaan selvittää halkeaman vaikutusta betonirakenteiden pitkäaikaiskestävyyteen myös korkeamman massakuonapitoisuuden omaavilla sideaineilla.

Vähähiilisten betonien pitkäaikaiskestävyyteen liittyen on valmisteltu myös uusi pakkas- enkestävyyteen liittyvä hanke, jossa hyödynnetään *Vähähiilisten betonien säilyvyysmitoitus* -hankkeesta saatuja kokemuksia. Tämän hankkeen rahoitushakemus on parhailaan Suomen Akatemian arvioitavana.

Betonipeitteet mallinnettiin käytettävissä olevalla Suomen olosuhteita kuvaavalla datalla, mutta sen havaittiin olevan usealta osin puutteellista ja näiden osalta jouduttiin tekemään paljon otaksumia ja yksinkertaistuksia, sekä soveltamaan muista Euroopan maista saatavilla olevia arvoja. Selkeäksi jatkotutkimustarpeeksi osoittautui Suomen ilmasto-olosuhteita kuvaavan datan kerääminen sekä kansallisten olosuhdeparametrien jakaumatyyppien ja -parametrien vakiointi karbonatisoitumis- ja kloridien etenemismallien yhdenmukaisemman käytön mahdollistamiseksi.

Jatkotutkimustarpeeksi tunnistettiin lisäksi karbonatisoitumisen ja kloridien etenemisen selvittäminen vähähiilisillä betoneilla todellisissa rasitusolosuhteissa. Tähän selvitykseen on mahdollista käyttää hankkeen aikana valmistettuja pitkäaikaiskenttäkoekappaleita.

8.2 Suositukset tulevia ohjelmia varten

Rakenteiden käyttöikä ja pitkäaikaiskestävyyttä koskevat tutkimukset ovat keskeisiä CO₂-päästöjen vähentämisessä. Rakenteen käyttöikä vaikuttaa suoraan sen koko elinkaaren päästöihin. Erityisesti uusien vähähiilisten materiaalien kohdalla on olemassa riski, että arvioinnissa keskitytään liiaksi pelkästään valmistusvaiheen päästöihin ilman luotettavaa tietoa materiaalien todellisesta pitkäaikaiskestävyydestä.

Vähähiilisiä ratkaisuja kehittävässä tutkimus- ja innovaatio-ohjelmissa tulisi siksi olla mahdollisuus myös kestoaltaan pidempiin hankkeisiin. Nykyinen 1–2 vuoden projektimalli on monissa pitkäaikaiskestävyyttä selvittävässä tutkimuksissa liian lyhyt, jotta materiaalien käyttäytymisestä saataisiin riittävän luotettavaa ja yleistettävää tietoa.

Lisäksi olisi tärkeää mahdollistaa vuosikymmenten aikaiset seurantatutkimukset. Ne ovat olennaisia, jotta rakenteiden ja uusien materiaalien todellinen käyttäytyminen voidaan havaita, validoida ja ekstrapoloida tulevia suunnitteluperusteita varten. Pitkäkestoiset mittaus- ja seurantahankkeet mahdollistavat myös sen, että materiaalien ikääntymismekanismeja ja ympäristökuormitusten vaikutuksia voidaan arvioida realistisesti, eivätkä johtopäätökset perustu pelkästään lyhytaikaisiin laboratoriokokeisiin tai teoreettisiin malleihin.

9. YHTEENVETO HANKKEEN PÄÄTULOKSISTA

Hankkeessa käytettiin kokeellisia ja laskennallisia menetelmiä, joilla vähähiilisiä sideaineita sisältävien betonien suorituskyky karbonatisoitumista ja kloridien tunkeutumisesta vastaan voidaan luotettavasti mitata, ja luokitella uudistuvan EC2:n säilyvyysluokkiin. Tämä mahdollistaa kansallisten suojabetonipeitteiden määrittämisen säilyvyysluokittain ennen uuden Eurokoodin käyttöönottoa Suomessa. Tulokset perustuvat 48 betonilaadun kiihdytettyihin laboratoriokokeisiin, halkeamavaikutusten selvitykseen sekä lähes tuhatteen peitepaksuusmallinnukseen suomalaisissa olosuhteissa.

Karbonatisoitumisen etenemistä tarkastelevassa osuudessa todettiin koetulosten perusteella karbonatisoitumisnopeuden kasvavan, kun masuunikuonan osuus tai vesi-sideainesusuhde kasvaa. Betoneille määritettiin koetulosten perusteella säilyvyysluokat ja niitä vastaavat vähimmäispeitepaksuudet rasitusluokissa XC1–XC4 50 ja 100 vuoden suunnittelukäyttöiässä. Työ loi perustan Suomen olosuhteisiin soveltuville lähtötiedoille karbonatisoitumisen mallintamiseksi. Samalla todettiin, että vähimmäispeitepaksuuksien

luotettava mallintaminen edellyttää jatkotutkimusta Suomen ilmasto-olosuhteita kuvaavan datan keräämiseksi ja kansallisten olosuhdeparametrien jakaumatyyppien ja -parametrien vakioimiseksi.

Kloridien tunkeutumista selvittävässä osuudessa voitiin kokeellisesti osoittaa, että kloridien eteneminen hidastuu selvästi, kun Portlandklinkkeriä korvataan masuunikuonalla. Lisäksi kokeellisista tuloksista voitiin todeta kloridien etenemisen hidastuvan, kun vesi-sideainesuhde pienenee tai sideainemäärä kasvaa. Tutkimusosuudessa esitettiin vertailu migraatiokokeen ja diffuusiokokeen välisistä tuloksista sekä johdettiin kokeiden tuloksista säilyvyysluokat ja niille vastaavat betonipeitepaksuudet eri rasitusluokissa (XS1-XS3 ja XD1-XD3) 50 ja 100 vuoden suunnittelukäyttöiässä. Tulosten perusteella todettiin, että perinteisellä portlandsementillä valmistetuissa betoneissa kloridien tunkeutuminen on niin nopeaa, että niille määräytyvä säilyvyysluokka on korkeampi kuin korkein luokka, jolle uudessa EC2:ssa on annettu betonipeitteen referenssiarvot. Masuunikuonaa sisältävät sideaineet puolestaan paransivat säilyvyysluokkaa asteittain klinkerimäärän vähentyessä.

Hankkeessa todettiin pienen mittakaavan palkkikokeilla, että halkeamaleveys vaikuttaa merkittävästi hiilidioksidin etenemiseen ja kloridien tunkeutumiseen kohti raudoitteita. Nämä tulokset tukevat halkeamien vaikutuksen arviointia betonirakenteiden säilyvyyteen.

Hankkeen tuloksista on viestitty aktiivisesti kansallisille standardointityöryhmille, ja niitä hyödynnetään suoraan määritettäessä Suomen uudet kansalliset peitepaksuusarvot tulevaa kansallista suunnittelustandardia varten. Lisäksi kaikki hankkeessa tuotettu data julkaistaan avoimesti, mikä tukee alan tutkimusta, standardointia ja vähähiilisten betonien turvallista käyttöönottoa laajassa mittakaavassa. Laboratoriokokeista saatavat tulokset konkretisoivat, että sideaine, joka parantaa kloridinkestoaa voi toisaalta kiihdyttää karbonatisoitumista. Tämä tekee säilyvyysluokituksen oleelliseksi työkaluksi tulevaisuuden rakennesuunnittelussa. Hankkeen tulokset ovat jo johtaneet jatkohankkeisiin, jotka syventävät pitkäaikaiskestävyyden arviointia ja edistävät vähähiilisen rakentamisen kehittymistä Suomessa.

10. SUMMARY OF THE MAIN RESULTS

The project employed both experimental and numerical methods to reliably assess the resistance of concretes containing low-carbon binders to carbonation and chloride ingress, and to classify these concretes according to the durability classes specified in the revised Eurocode. This enables the determination of national concrete cover requirements for each durability class prior to the Eurocode's implementation in Finland. The results are based on accelerated laboratory testing of 48 concrete mixes, an investigation of crack effects, and nearly one thousand concrete cover simulations under Finnish environmental conditions.

In the carbonation analysis, the experimental results showed that carbonation depth increases with higher replacement levels of Portland cement by GGBS and with increasing water-to-binder ratio. Based on these results, durability classes and the corresponding minimum cover depths were defined for exposure classes XC1–XC4 for 50- and 100-year design service lives. The study also established a foundation for developing input parameters for carbonation modelling in Finnish conditions. However, it was simultaneously observed that reliable modelling of minimum cover depths will require further research, particularly improved climate data and standardized national environmental parameter distributions for Finland.

In the chloride ingress analysis, the experiments demonstrated that replacing Portland clinker with GGBS significantly reduces chloride penetration. The results also showed that chloride ingress decreases as the water-to-binder ratio is lowered and as the total binder content is increased. The study compared migration and diffusion test results and used them to derive durability classes and corresponding cover depths for exposure classes XS1–XS3 and XD1–XD3 for 50- and 100-year design service lives. The findings indicate that concretes made with traditional Portland cement exhibit such rapid chloride ingress that their durability class exceeds the highest class for which the new Eurocode provides reference cover values. In contrast, slag-containing binders improved chloride resistance progressively as clinker content decreased.

The small-scale beam tests conducted in the project demonstrated that crack width has a significant influence on the progression of carbon dioxide and the ingress of chlorides toward the reinforcement. These results support a more accurate assessment of the impact of cracking on the durability of concrete structures.

The project findings have been actively communicated to national standardization groups, and the results will be directly utilised in establishing Finland's national concrete cover requirements in the forthcoming design standard. All project data will be published openly to support research, standardization efforts, and the safe large-scale adoption of low-carbon concretes. The combined results demonstrate that a binder improving chloride resistance may simultaneously accelerate carbonation, highlighting the importance of durability classification as an essential tool in future structural design. The outcomes of this project have already initiated follow-up studies aimed at deepening the understanding of long-term durability and advancing low-carbon construction practices in Finland.

LÄHTEET

- [1] S. Myöhänen, Vähähiilisten betonien säilyvyysluokitus : Kloridien tunkeutuminen betoneihin, diplomityö. Tampereen yliopisto, Tampere, 2025, 112 s. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202505215907>
- [2] R. Paavilainen, Vähähiilisten betonien säilyvyysluokitus : Karbonatisoituminen, diplomityö. Tampereen yliopisto, Tampere, 2025, 212 s. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202505155527>
- [3] J. Kunnas, Betonin raaka-aineiden vaikutus betonirakentamisen hiilidioksidipäästöihin, kandidaatintyö. Tampereen yliopisto, Tampere, 2025, 39 s. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202506046697>
- [4] J. Haavisto, R. Paavilainen, H. Alho, J. Lahdensivu, M. Ferreira, A. Laaksonen, Accelerated carbonation test data for concretes with varying slag content. 2026, valmisteilla.
- [5] S. Myöhänen, J. Haavisto, H. Alho, J. Lahdensivu, M. Ferreira, A. Laaksonen, Chloride diffusion and migration test data for concretes with varying slag content. 2026, valmisteilla.
- [6] M. Ferreira, R. Paavilainen, J. Haavisto, J. Lahdensivu, A. Laaksonen, Determination of the minimum concrete covers for XRC Exposure Resistance Classes for Finnish environmental conditions. 2026, valmisteilla.
- [7] S. Myöhänen, J. Haavisto, J. Lahdensivu, M. Ferreira, A. Laaksonen, Durability Classification of Reinforced Concrete in the Context of the 2nd generation Euro-code 2: Probabilistic Assessment of Chloride Resistance. 2026, valmisteilla.
- [8] S. Myöhänen, J. Haavisto, H. Alho, J. Lahdensivu, M. Ferreira, A. Laaksonen, The effect of crack width on the penetration of chlorides and carbonation in GGBS-containing concretes. 2026, valmisteilla.