



BIOHIILEN MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET BETONIN RAAKA-AINEENA

Anna Dunderfelt & Miia Sourander (toim.)



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Anna Dunderfelt & Miia Sourander (toim.)

BIOHIILEN MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET BETONIN RAAKA-AINEENA



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Etelä-Savon
maakuntaliitto

MIKSEI MIKKELI



XAMK KEHITTÄÄ 217

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
MIKKELI 2023

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n yhteishankkeessa BiBe – Biohiilen uudet käyttökohteet rakennusmateriaalina selvitettiin biohiilen soveltuvuutta ja käyttömahdollisuuksia betoni- ja rakennusteollisuuden uutena materiaalivaihtoehtona sekä kehitettiin ja testattiin uusia biohiilipohjaisia ratkaisuja ja aktivoitiin sidosryhmiä mukaan kehitystyöhön. Hankkeen toteutusaika oli 1.12.2020–31.8.2023. Hanketta rahoitti Etelä-Savon maakuntaliitto Euroopan aluekehitysrahastosta. Hankkeen yhteistyökumppaneita olivat Suur-Savon Energiasäätö sr, Etelä-Savon Koulutus Oy, Betsset Oy, Harri Haavikko Oy, Benetech Finland Oy, Carbo Culture Oy ja SoilCare Oy.

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Manu Eloaho

Taitto ja paino: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-536-9 (PDF)

ISSN: 2489-3102 (verkko)

julkaisut@xamk.fi

TIIVISTELMÄ

Ilmastonmuutoksen hillintä kannustaa etsimään uusia keinoja hiilensidontaan. Betonin raaka-aineena käytettävän sementin hiilijalanjälki on suuri johtuen sementin valmistusprosessista, joka on hyvin energiantensiivinen. Betoniteollisuus on etsinyt keinoja ilmastovaiikutusten pienentämiseen, ja termi vihreä betoni kertoo valmistuksen hiilidioksidipäästöjen olevan pienemmät verrattuna normaaliin betoniin.

BiBe – Biohiilen uudet käyttökohteet rakennusmateriaalina -hankkeessa selvitettiin biohiilen käyttöä osana betonisten rakennusmateriaalien valmistuksen raaka-aineena. Biohiilellä korvattiin sementtiä, mikä tarjoaa mahdollisuuden pienentää betonirakentamisen hiilijalanjälkeä. Etelä-Savon maakunnassa on helposti saatavilla erilaisia orgaanisia materiaalivirtoja, ja maakunnassa on biohiiltä ja betonia valmistavia yrityksiä. Käytettäessä materiaalivirtoja saadaan nostettua tuotteen jalostusastetta ja materiaalit saadaan kiertotalouden mukaisesti hyötykäyttöön.

Soveltuuko biohiili betonin raaka-aineeksi? Hankkeen aikana tutkittiin ja mallinnettiin ei-kantavien koetuotteiden, kuten pihalaattojen ja kevyiden hulevesirakenteiden, ominaisuuksia. Pilot-mittakaavan kokeiden kautta saatiin tarkkailtua biohiilibetonisten koetuotteiden kestävyysominaisuuksia. Koekappaleita valmistettiin myös erilaisiin laboratorio-kokeisiin, joissa tarkasteltiin pakkasenkestävyyttä, puristuslujuutta ja tiheyttä, VOC- ja PAH-yhdisteitä sekä veteen liukenevia aineita. Kenttäolosuhteissa testattiin ääneneristävyyttä, lämmönjohtavuutta ja kosteuden siirtymistä. Kaikki kokeet olivat vertailukokeita, joissa biohiilibetonisia koekappaleita verrattiin normaaliin betoniin, joka valmistettiin sekoittamalla sementti, vesi ja kiviaines. Lisäksi koetuotteille laskettiin hiilijalanjälki ja niitä tarkasteltiin vähähiilisuuden näkökulmasta.

Tämän hankkeen kokeiden tulokset eivät ole yleistettävissä, vaan ne kertovat vain valmistettujen koekappaleiden ominaisuuksista. Tulosten perusteella tunnistettiin biohiilibetonisen tuotteen kehittämismahdollisuudet ja haasteet. Lisätutkimuksille niin kenttä- kuin laboratorio-olosuhteissa on tarvetta.

Asiasanat: biohiili, rakennusmateriaali, hiilijalanjälki

ABSTRACT

Climate change mitigation necessitates the search for new ways of carbon sequestration. The carbon footprint of cement used as a raw material for concrete is significant due to its manufacturing process, which is very energy-intensive. The concrete industry has been searching for ways to reduce its climate impacts. The term 'green concrete' indicates that the carbon dioxide emissions from manufacturing are lower compared to normal concrete.

The new uses of BiBe – New applications of biochar as a building material project investigated the use of biochar as a raw material for producing concrete building materials. Biochar was used to replace cement, which provides an opportunity to reduce the carbon footprint of concrete construction. Various organic material streams are readily available in the South Savo region, and companies manufacture biochar and concrete locally. When material flows are used, the degree of processing of the product can be increased, and materials can be utilized in accordance with the circular economy.

Is biochar suitable as a raw material for concrete? The properties of non-load-bearing test products, such as yard tiles and light stormwater structures, were studied and modeled during the project. The pilot scale experiments were used to monitor the durability properties of biochar concrete test products. Test pieces were also produced for various laboratory tests: frost resistance, compressive strength and density, VOC and PAH compounds, and water-soluble substances. Under field conditions, sound insulation, thermal conductivity and moisture transfer were tested. Tests were comparative experiments in which biochar concrete test pieces were compared with normal concrete. In addition, a carbon footprint was calculated for the experimental products, which were studied from a low-carbon perspective.

The results of the tests of this project are not generalizable. They indicate the properties of the test pieces. Based on the results, the development opportunities and challenges of the biochar concrete product were identified. There is a need for further research in both field and laboratory conditions.

Keywords: biochar, building material, carbon footprint

KIRJOITTAJAT

ANNA DUNDERFELT, tradenomi (ylempi AMK), TKI-asiantuntija, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

JUSSI HEINIMÖ, TkT, ohjelmajohtaja, Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy

MIKKO HOKKANEN, DI, projektitutkija, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SAMI HUUHTANEN, rakennusinsinööri (AMK), laboratorioinsinööri, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Kymilabs

KATI JORDAN, KM, TKI-asiantuntija, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

TUOMO LEPPÄNEN, toimitusjohtaja, Mayt Oy

JUHA LIPPONEN, TkT, professori, Aalto-yliopisto

CHARLOTTA LIUKAS, KTM, operatiivinen johtaja, Carbo Culture Oy

AULI LÄMSÄ, insinööri (AMK), opiskelija, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

KIRSI MALMSTEDT, hortonomi (AMK), koulutuspäällikkö, Etelä-Savon Koulutus Oy

KEIJO PIIRAINEN, insinööri (AMK), talotekniikka (LVI), laboratorioinsinööri, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Sähkö-, talo- ja materiaalitekniikan koulutusyksikkö

HANNU SALMI, DI, vientipäällikkö, SoilCare Oy

HANNE SOININEN, TkT, tutkimusryhmäpäällikkö, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

MIIA SOURANDER, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

RIINA TUOMINEN, insinööri (ylempi AMK), TKI-asiantuntija, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT.....	4
KIRJOITTAJAT	5
UUTTA TIETOA BIOHIILESTÄ SEMENTIN KORVAAJANA	8
Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Hanne Soininen & Jussi Heinimö	
BIOHIILEN MAHDOLLISUUDET JA OMINAISUUDET BETONITEOLLISUUDEN RAAKA-AINEENA.....	12
Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Charlotta Liukas & Hannu Salmi & Tuomo Leppänen	
RAKENTAMISEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA JA LAINSÄÄDÄNTÖÄ.....	24
Miia Sourander & Anna Dunderfelt	
PILOT-MITTAKAAVAN TESTAUKSET KOETUOTTEILLE KENTTÄOLOSUHTEISSA.....	32
Miia Sourander & Anna Dunderfelt & Riina Tuominen & Mikko Hokkanen & Kirsi Malmstedt	
LABORATORIOMITTAKAAVAN VERTAILUKOKEET BIOHIILIBETONEILLE.....	44
Anna Dunderfelt & Miia Sourander	
BIOHIILIBETONISTEN KOEKAPPALEIDEN PURISTUSLUJUUDEN JA TIHEYDEN MITTAUS.....	60
Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Sami Huuhtanen	
BIOHIILIBETONISTEN KOEKAPPALEIDEN PAKKASENKESTÄVYYDEN TESTAUS.....	70
Anna Dunderfelt & Miia Sourander	
ÄÄNENERISTÄVYYDEN, LÄMPÖTILAN JA KOSTEUDEN SIIRTYMISEN TESTAUKSIA KENTTÄKOEMENETELMILLÄ.....	77
Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Mikko Hokkanen & Keijo Piirainen	

BIOHIILEN VAIKUTUS BETONIN HIILIJALANJÄLKEEN.....	96
Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Auli Lämsä	
TOIMIJAVERKOSTON AKTIVOINTI JA TULEVAISUUDEN DEMONSTRAATIOMAHDOLLISUUDET	105
Jussi Heinimö	
KIERTOTALOUDEN EDISTÄMISTÄ YHDESSÄ INNOVOIDEN	109
Anna Dunderfelt & Kati Jordan & Miia Sourander & Juha Lipponen	

UUTTA TIETOA BIOHIILESTÄ SEMENTIN KORVAAJANA

Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Hanne Soininen & Jussi Heinimö

Ilmastonmuutoksen hillintä kannustaa teollisuutta etsimään ja innovoimaan uusia keinoja hiilensitomiseen sekä löytämään kiertotaloutta tukevia tekniikoita ja materiaaleja. Rakennusteollisuudessa suurimpia yksittäisiä hiilijalanjälkiä on betonin valmistuksessa käytettävän sementin valmistusprosessi. Sementin valmistus on energiantensiivistä, ja pelkästään Suomessa sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöt ovat mittavat. Vähähiilisempien vaihtoehtojen löytäminen on erittäin tärkeää.

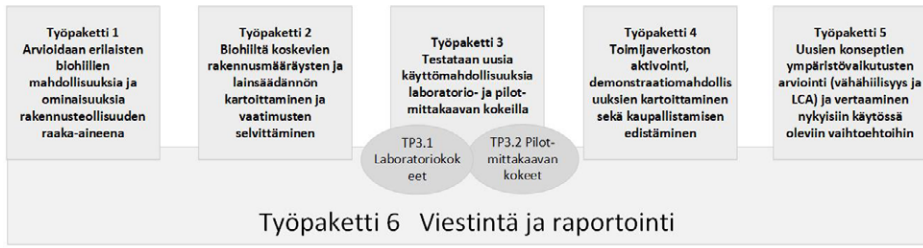
EU-tason päästövähennyksissä biohiilellä on merkittävä rooli teknisenä nieluna. Biohiilen tuotannon kasvattamiseksi olisi merkittävää ratkaista EU-tasolla investointi- ja tuotantotukiin, markkinamalleihin sekä sääntelyyn liittyviä ongelmia. Myös Suomen hallituksen uusimassa ohjelmassa on esitetty yhdeksi ilmastopolitiikan painopisteeksi tekniset nielut. (EU:n 2040... 2023.)

BiBe – Biohiilen uudet käyttökohteet rakennusmateriaalina -hankkeessa kehitettiin ja selvitettiin biohiilen käyttöä betonin raaka-aineena. Biohiili tarjoaa sementin korvaajana mahdollisuuden pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä. Tavoitteena oli löytää biohiilelle uusia käyttöönottettavia käyttömahdollisuuksia ja -kohteita rakennusmateriaaleissa, erityisesti betonissa. Toimenpiteissä selvitettiin biohiilen teknisiä ominaisuuksia ja testattiin biohiilibetonin erilaisia käyttökohteita sekä laboratorio- että pilot-mittakaavassa. Biohiilen käyttöpotentiaalia arvoitiin rakennusteollisuuden raaka-aineen näkökulmasta.

Useissa tutkimuksissa on havaittu biohiilellä myönteisiä vaikutuksia betonin ominaisuuksiin. Sementin korvaaminen biohiilellä voisi keventää betonielementtejä. Biohiilen on havaittu parantavan betonin lämmönjohtavuutta ja ääneneristävyyttä. Lisäksi biohiilellä on merkittävä kyky sitoa ilmakehän hiiltä, ja se on stabiili. Biohiiltä on mahdollista valmistaa erilaisista orgaanisista sivuvirroista, joilla ei ole muuten arvoa. Biohiilen valmistuksessa käytetyn materiaalin ominaisuuksilla on vaikutusta myös biohiilen ominaisuuksiin.

HANKKEEN TOIMENPITEET

Hankkeen toimenpiteissä tehtiin selvityksiä sekä tutkittiin ja testattiin biohiiltä ja sen ominaisuuksia laboratoriossa ja kenttäkoemenetelmillä. Hanke jakautui kuuteen toimenpiteeseen, jotka esitellään kuvassa 1.



Kuva 1. Hankkeen toimenpiteet työpaketeittain esitettynä

Työpakettien 1 ja 2 toimenpiteissä tehtiin kirjallisuuskatsausta koko hankkeen ajan ja sen avulla pyrittiin luomaan kokonaiskuvaa aiheesta. Kerättyä tietoa hyödynnettiin työpaketin kolmen toimenpiteen laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeisiin. Kirjallisuuskatsauksen tuloksena saatiin laaja tietopaketti betoniteollisuudesta ja biohiilen ominaisuuksista ja mahdollisuuksista rakennusteollisuuden raaka-aineena. Lisäksi ulkopuolinen asiantuntijaorganisaatio selvitti hankkeelle biohiilen käyttöä rakennusmateriaalissa sekä kaupallistamisen kannalta potentiaalisimpia käyttökohteita. Selvityksessä korostettiin lisätutkimuksen tarvetta ja yleisen tietoisuuden lisäämistä.

Biohiilen uusien käyttömahdollisuuksien testaaminen laboratorio- ja pilot-mittakaavan kokeilla -työpaketissa selvitettiin, miten biohiili ja sen ominaisuudet vaikuttavat betonin ominaisuuksiin, sekä tutkittiin koekappaleiden erilaisia tekstuurivaihtoehtoja ja tehtiin mallinnuksia tuotteiden ulkonäöstä. Kokeissa käytettäväksi biohiiliksi valittiin jo hankesuunnitteluvaiheessa Carbo Culture Oy:n mäntyhakkeesta valmistettu biohiili ja Soilcare Oy:n A-luokan purkupuusta, lepästä, koivusta ja männystä valmistetut biohiilet.

Hankkeen aikana tehtiin vertailukokeita, joissa selvitettiin betonin, johon ei ollut lisätty biohiiltä, ja biohiilibetonin eroavaisuuksia. Kokeissa käytettiin kahta erilaista portlandseossementtiä. Toinen seossementti oli nopeasti kovettuva, josta valmistettiin kevästä 2022 alkaen kaikki koekappaleet. Normaali betoni valmistettiin sekoittamalla pääraaka-aineet kiviaines, vesi ja sementti joko betonimyllyllä tai käsikäyttöisellä sekoitusvispilällä. Sementtiä korvattiin biohiilellä painoprosenteina. Sementtiseoksissa ei käytetty lisäaineita.

Laboratoriokokeilla selvitettiin biohiilibetonisen materiaalin kestävyttä puristuslujuuden ja tiheyden mittauksilla sekä pakkasenkestävyyden testauksella. Kokeiden avulla saatiin suuntaa siitä, millainen biohiilen partikkelikoko soveltuu betonin valmistamiseen ja millä sementin korvausosuudella sitä voidaan lisätä betoniin, jotta kovettuneen betonin ominaisuudet säilyvät. Esimerkiksi biohiilen partikkelikoko vaikuttaa merkittävästi pakkasenkestävyyteen ja sementin korvausosuus puristuslujuuteen. Lisäksi koekappaleista tutkittiin ulkopuolisissa laboratorioissa VOC- ja PAH-yhdisteet sekä veteen liukenevat aineet. Kenttäkoeympäristöissä testattiin ääneneristävyyttä, lämmönjohtavuutta ja kosteuden siirtymistä.

Toimijaverkoston aktivointi, demonstraatiomahdollisuuksien kartoittaminen sekä kaupallistamisen edistäminen tapahtuivat pääasiassa Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy:n toimesta. Hankkeessa arvioituista demonstraatiomahdollisuuksista kiinnostavimmaksi ja toteuttamiskelpoisimmaksi arvioitiin biohiiltä sisältävästä betonista 3D-tulostetun meluaidan toteuttaminen. Demoon liittyen ideointia on toteutettu yhteistyössä Mikkelin kaupungin kanssa ja käynnistetty keskustelut omarahoituksen sisällyttämisestä kaupungin kunnallistekniikan rakentamisen budjettiin sekä kartoitettu demon rahoitusvaihtoehtoja. Toimenpiteessä on kartoitettu demon toteuttamisessa tarvittavaa ja kaupallistamista edistävää toimijaverkkoa sekä järjestetty useita ideointitapaamisia sekä yksi tilaisuus toimijaverkostolle.

Hankkeessa selvitettiin uusien biohiilibetonisten koetuotteiden ympäristövaikutuksia ja arvioitiin niiden hiilijalanjälkeä verrattuna normaaliin betoniseen vastaavaan tuotteeseen. Kirjallisuusselvityksessä pohdittiin lisäksi mahdollisen uuden tuotekonseptin LCA- eli elinkaariarviointia. Laajemman LCA-arvioinnin avulla voitaisiin selvemmin osoittaa biohiilen edut ja hyödyt, sillä biohiili on stabiili ja sitoo hiiltä tuotteen koko käyttöajan ajan.

Uutta tietoa ja käytäntöjä viestittiin eri kohderyhmille. Keväällä 2023 järjestettiin opiskelijoiden ja yritysten yhteinen ideapaja. Tilaisuudessa ja ennakkotehtävien kautta ideoitiin biohiilelle uusia käyttökohteita. Samalla yritykset ja opiskelijat kohtasivat ja verkostoituivat.

HANKKEEN TULOKSET

Hankkeen tuloksena saatiin uutta tietoa biohiilen vaikutuksesta betonin ominaisuuksiin, ulkonäköön ja rakenteeseen. Laboratoriokokeissa saatiin tietoa hankkeen kokeissa käytetyistä biohiilien haitta-aineista, optimaalisesta kokoluokasta sekä biohiili–sementti-seossuhteista. Tulokset avasivat mahdollisuuksia erilaisille pilottikokeiluille ja yhteistyömahdollisuuksille. Hankkeessa suunniteltu demonstraatiokokeilu toteutuu toivottavasti tulevaisuudessa osana Mikkelin kaupungin demonstraatio -rakentamishanketta. Uudenlaisilla biohiilibetonisilla tuotekonsepteilla edistettiin betonirakentamisen vähähiilisyttä ja samalla tehostettiin sivuvirtojen käytettävyyttä valmistamalla biohiilibetonia A-luokan purkupuusta valmistetulla biohiilellä. Toimijaverkoston aktivoinnin avulla kartoitettiin yritysten ja sidosryhmien näkemystä biohiilibetonin mahdollisuuksista sekä lisättiin tietämystä biohiilen käytöstä sementin korvaajana. Uuden tiedon myötä yritykset voivat tulevaisuudessa kehittää ja kaupallistaa biohiilibetonisia ratkaisuja ja tuotekonsepteja.

Toimenpiteiden aikana ja tuloksia tarkastellessa nousi usein esille lisätutkimuksen tarve niin vakioituissa laboratorio- kuin kenttäolosuhteissa. Tutkimalla lisää biohiiltä sementin korvaajana ja etenkin sen vaikutuksia ympäristöön ja betonin säänkestävyyttä sekä lujuusominaisuuksia voidaan edistää betoniteollisuuden vähähiilisyystavoitteita.

LÄHTEET

EU:n 2040-tavoiteasetannassa panostettava laajaan, kestävään energiapalettiin sekä teknisiin
nieluihin. 2023. Bioenergia. Tiedote 30.6.2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://
www.bioenergia.fi/2023/06/30/eun-2040-tavoiteasetannassa-panostettava-laajaan-kesta-
vaan-energiapalettiin-seka-teknisiin-nieluihin/](https://www.bioenergia.fi/2023/06/30/eun-2040-tavoiteasetannassa-panostettava-laajaan-kesta-vaan-energiapalettiin-seka-teknisiin-nieluihin/) [viitattu 3.8.2023].

BIOHIILEN MAHDOLLISUUDET JA OMINAISUUDET BETONI- TEOLLISUUDEN RAAKA-AINEENA

Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Charlotta Liukas & Hannu Salmi
& Tuomo Leppänen

Biohiili on biomassasta pyrolyysillä valmistettu stabiili, huokoinen ja hiilirikas lopputuote. Biohiilelle on useita määritelmiä, ja eri kielissä biohiili-käsite sisältää erityyppisiä tuotteita. Myös Suomessa biohiili-termi on yleisnimitys erilaisissa prosesseissa tuotetuille korkeahiililille lopputuotteille. Biohiiltä voidaan tuottaa moneen käyttötarkoitukseen. (Elo ym. 2023, 9.)

Suomessa käytetyin raaka-aine biohiilen valmistuksessa on puubiomassa, mutta raaka-aineksi sopii lähes mikä tahansa orgaaninen aines (Salo 2019, Elo 2017). Raaka-aineksi käytetään muun muassa erilaisten puulajien hakkeita ja hakkuutähdettä, jätevesien lietettä, paperiteollisuuden sivuvirtoja, karjanlantaa ja kuivikkeita, viljojen akanoita ja muita kasvintuotannon ja -prosessoinnin kasvijätteitä sekä biokaasulaitosten jäännösmassaa. Rajoituksia raaka-aineen valintaan tulee biohiilen laatustandardeista, jotka määrittelevät epäpuhtauksien ja haitta-aineiden raja-arvoja. (Riikonen 2019, 8.) Raaka-ainevalinnoilla voidaan vaikuttaa haluttaviin ominaisuuksiin. Biohiilen ominaisuuksia voidaan monipuolistaa myös lisäaineilla ja tuotanto-olosuhteilla. (Biohiili 2022.)

Biohiilen raaka-ainetta ei polteta, vaan biohiiltä valmistetaan pyrolyysiprosessissa. Pyrolyysissä biomassaa kuumennetaan lähes hapettomassa tilassa. Lämpötila nostetaan vähintään 300–700 °C:seen. (Salo 2019.) Kun biomassaa kuumennetaan vähähappisissa olosuhteissa, saadaan aikaan korkea alkuainehiilipitoisuus lopputuotteeseen. Pyrolyysiprosessissa biohiilen raaka-aine palaa epätäydellisesti, ja tästä johtuen lopputuotteeseen jää runsaasti vielä alkuainehiiltä. Biohiilen ominaisuuksiin ja saantoon vaikuttavat raaka-aineen lisäksi tuotantoprosessi, kuten pyrolyysin olosuhteet, esimerkiksi siinä käytetty lämpötila ja happivajauksen aste. Hidas ja nopea pyrolyysi tuottavat laadultaan erilaisia biohiiliä. Ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa lisäksi jälkikäsitteilyllä. (Riikonen 2019, 6–7.)

Laadukkaan biohiilen valmistus vaatii kovan, yli 500 °C lämpötilan. Euroopan johtavat asiantuntijat ovat tuoreessa julkaisussa esittäneet hiilen ominaisuusvaatimukset, joiden avulla voidaan varmistaa kompensaation edellyttämä sadan vuoden säilyvyys maassa. H/C-arvoksi esitetään noin 0,5:tä, ja se edellyttää noin 500 °C:n minimilämpötilaa prosessissa. (Rodrigues ym. 2023.)

Biohiilen tuottamiseen on useita pyrolyysitekniikoita, jotka eroavat pyrolysointiolosuhteiltaan toisistaan. Ne voidaan jakaa ainakin viiteen menetelmään: hidas, nopea, flash, vakuumi ja hydro. Edellä mainituissa menetelmissä on eroavaisuuksia viipymääjan, lämmitysnopeuden ja loppulämpötilan suhteen. (Knaapi 2019, 2.) Biohiili materiaalina on hyvin heterogeenistä, sillä tuotetun biohiilen laatuun ja ominaisuuksiin vaikuttavat niin lähtömateriaali, pyrolyysimenetelmä sekä mahdollinen jälkikäsittely. Kaikkiin käyttökoh-teisiin ei sovellu samanlainen biohiili. Valintaa tehdessä tulee tunnistaa kyseisen biohiilen kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet sekä käyttökohteen vaatimukset. (Elo ym. 2021, 19.)

Etelä-Savon maakunnassa SoilCare Oy:llä on pitkä kokemus biohiilen tuotannosta sekä sen valmistuslaitteiden kehitystyöstä ja valmistuksesta. Yrityksen laitteilla on valmistettu biohiiltä onnistuneesti koe-erinä useista biomassoista, puumateriaalien lisäksi kierrätyspuusta ja hampusta. Yritys on ollut mukana Bibe-hankkeen lisäksi Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) kehittämishankkeissa, joissa on tutkittu biohiiltä. Biohiiltä on käytetty näissä hankkeissa biokaasun puhdistuksessa siloksaaneista, ja tulokset vastaavat aktiivihiilellä saatuja tuloksia. Toisessa hankkeessa tutkittiin hiilen toksisuutta ja se todettiin puhtaammaksi kuin vertailukohde. Laitteistolla saadaan erilleen biohiilen valmistuksessa syntyvät tisle ja terva. Valmistuslaitteisto on siirrettävä, joten se voidaan kuljettaa helposti eri kohteisiin.

SoilCare Oy:n biohiilen valmistuskokemuksen mukaan kehitetyillä laitteilla voidaan valmistaa korkeatasoista biohiiltä hyvin erilaisista raaka-aineista. Kuvassa 1 on SoilCare Oy:n valmistuslaite Amacee 1700 liitettynä Ariterm Servicen kattilaan, jossa poltetaan prosessissa syntyvät kaasut. Energiaa saadaan lisäksi tisleiden talteenotossa olevan lauhduttimen lämmittämästä vedestä.



Kuva 1. Biohiilen valmistuslaitteisto, joka kerää talteen tisleet ja kaasut (kuva SoilCare Oy).

BIOHIILEN KOOSTUMUS JA OMINAISUUDET

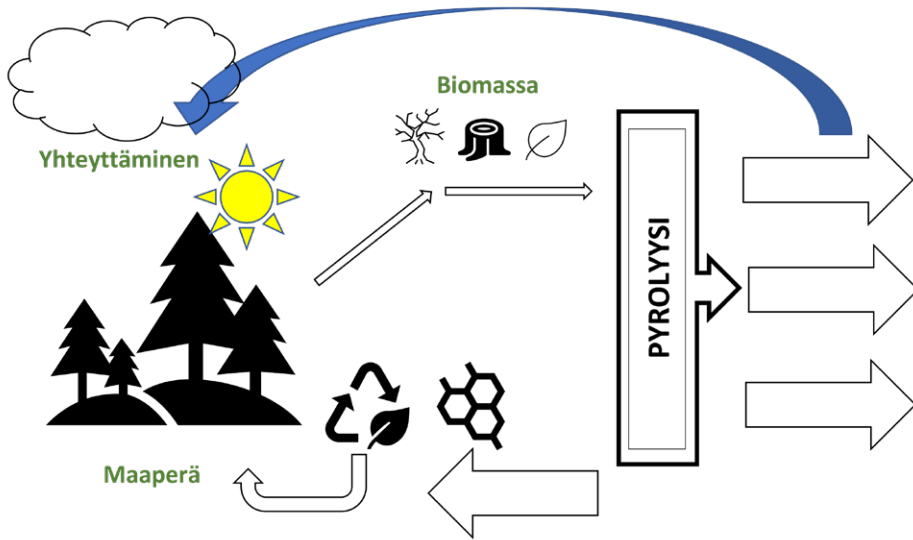
Biohiili koostuu lähinnä alkuainehiilestä ja osaksi lähtöraaka-aineen kivennäisaineista. Pyrolyysissä kivennäisaineita poistuu jonkin verran ja varsinkin niitä, joilla on alhainen kiehumispiste. Kivennäisaineista osa sitoutuu myös heikosti liukenevaan muotoon. Pyrolyysiprosessin aikana raaka-aineista häviää erityisesti happea ja vetyä ja lisäksi eloperäisiä yhdisteitä, joilla on alhainen kiehumispiste. Lähtöraaka-aine vaikuttaa vahvasti biohiilen kemiallisiin ominaisuuksiin ja rakenteeseen. (Elo ym. 2023, 5.)

Koska Suomessa biohiili valmistetaan pääsääntöisesti puuhakkeesta, on se tyypillisesti melko ravinneköyhää. Maailmalla käytetään biohiilen valmistamiseen vaihtelevammin raaka-aineita, esimerkiksi maataloudesta syntyviä sivutuotteita. Lannasta ja lietteestä valmistetut biohiilet voivat sisältää runsaammin liukoisia ravinteita. (Elo ym. 2023, 15.) Erilaisista kasvimateriaaleista saatua biohiiltä voidaan hyödyntää sementtimateriaalina, ja esimerkiksi riisinkuoresta valmistetulla biohiilellä on myös pozzolaanisia ominaisuuksia (Pravina ym. 2023). Pozzolaaniset materiaalit tarvitsevat vettä ja liukoisen kalsiumhydroksidin, jotta ne sitoutuvat ja kovettuvat. Portlandsementin hydratoitumisen yhteydessä syntyy kalsiumhydroksidia (Pozzolaani s.a.) Reagoidessaan pozzolaaniset materiaalit kuluttavat betonin kalsiumhydroksidia. Tällä voi olla vaikutusta sulfaatinkestävyyteen, kun kalsiumhydroksidin pitoisuus pienenee ja huokosrakenne tiivistyy. (Sulfaattikorrosio s.a.)

Biohiilen rakenne on huokoinen ja sen veden ja ravinteiden pidätyskyky erinomainen. Pidätyskyky mahdollistaa sen, että biohiili lisää maaperän kosteuspitoisuutta, millä on suotuisa vaikutus maaperän mikrobialiseen toimintaan. Biohiili voi säilyä maaperässä satoja tai jopa tuhansia vuosia rakenteensa ansiosta, jolloin sitä voidaankin kutsua pitkäaikaiseksi hiilivarastoksi. (Biohiili 2022.)

VALMISTUKSEN SIVUVIRrat HYÖTYKÄYTTÖÖN

Biohiilen valmistuksessa syntyneet kaasut ja tisleet sekä syntynyt energia voidaan hyödyntää. Hyödyntämällä valmistusprosessissa syntyneitä sivuvirtoja voidaan esimerkiksi korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Näillä kaikilla lopputuotteilla on kysyntää. Pyrolyysiprosessissa syntyneitä tisleitä hyödynnetään muun muassa torjunta-aineina, polttoaineina, pintakäsittelyaineina, elintarviketeollisuudessa ja maanparannuksessa. Merkittävä potentiaali markkinoilla on synteettisten torjunta-aineiden korvaaminen tisleillä. (Laine 2015.) Kuvassa 2 on nähtävissä, että biohiilen raaka-aineesta saadaan lopputuloksena erilaisia tuotteita: tisleitä, kaasua ja biohiiltä. Lisäksi valmistusprosessin kaasuista saadaan energiaa. (Elo ym. 2023, 19.) Pyrolyysiprosessissa syntynyttä energiaa ja lämpöä on lisäksi mahdollista hyödyntää myös lämmityksessä ohjaamalla sitä kaukolämpöverkkoon (Elo 2017).



Kuva 2. Biohiiltä voidaan tuottaa puubiomassasta. Biohiilen valmistuksen lopputuotteena syntyy energiaa, tislettä ja kaasua (kuva mukailleen Elo ym. 2023, 9, Leppänen ym. 2023).

BIOHIILEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET JA SEN LAATU

Biohiili on erittäin monikäyttöinen materiaali, ja se on yleisesti tunnistettu EU:ssa. EU:n lannoitesäädäntö määrittelee, että biohiilen termokemiallisen konversioprosessin tulee tapahtua reaktorissa, jossa on rajoitettu hapen määrää, ja kuumentaminen kestää minimissään kaksi sekuntia vähintään 180 °C:ssa. Biohiiltä valmistetaan yleensä 350–1000 °C:ssa, joka on Euroopan Biohiilisertifikaatin (EBC) määrittelemä kuumennuslämpötila. Kuumennuslämpötilaa voidaan säätää biohiilen käyttökohteen mukaisesti. Biohiilelle on vapaaehtoisia sertifiointiohjelmia, kuten EBC ja Kansainvälinen sertifiointiohjelma (IBI). IBI:n sertifiointiohjelma on vain maaperäkäyttöön tarkoitettu biohiilelle. (Biohiili 2022.)

EBC:llä (2023) on useita sertifiointiluokkia käyttökohteiden mukaisesti. EBC-luokkia ovat:

- EBC-FeedPlus
- EBC-Feed
- EBC-AgroOrganic
- EBC-Agro
- EBC-Urban
- EBC-ConsumerMaterials
- EBC- BasicMaterials.

Erilaisille käyttökohteille on asetettu sertifoointikriteerit vaatimuksien mukaan. Esimerkiksi EBC-BasicMaterials-sertifikaattiluokiteltua biohiiltä voidaan käyttää rakennusmateriaaleissa ja tienrakennusasfaltissa. Biohiiliteknologia kehittyä erittäin nopeasti, ja eri puolilla maailmaa on käynnissä useita tutkimusprojekteja, joissa tutkitaan biohiilen ominaisuuksia ja vuorovaikutuksia ympäristön sekä muiden aineiden kanssa. Tästä johtuen raja-arvoja ja testimenetelmiä päivitetään ja muutetaan tarvittaessa, jotta ne vastaavat uusimpia havaintoja. (EBC (2012–2023)... 2023, 8–10, 13.)

Biohiilen sertifoinnin lisäksi on hyvä ottaa huomioon mahdollisten biohiilikrediittien ostajien asettamat laatuvaatimukset. Usein biohiililiiketoimintaa suunnittelevat yritykset perustavat ainakin osittain liiketoimintamallinsa hiilensidontakrediittien (carbon removal credits) myymiseen niin kutsutuilla vapaaehtoisilla hiilimarkkinoilla (voluntary carbon markets). Tyypillistä on, että kolmas osapuoli akkreditoi ja varmentaa nämä hiilikrediitit käyttäen biohiileen kehitettyä metodologiaa (esimerkkeinä Puro.earth, Verra, Gold Standard, joilla kaikilla on biohiilestä myytäviin krediitteihin erikoistuneet metodologiat). Näissä metodologioissa esitetään biohiilen reunaehtoja ja raja-arvoja esimerkiksi biomassan alkuperään, kestävyYTEEN (permanence, durability) tai puhtauteen liittyen. Yksinkertais-taan voidaan sanoa, että korkeassa lämpötilassa valmistettu, korkean hiilipitoisuuden ja stabiileetin omaava biohiili tuottaa korkealaatuisempia ja siten kalliimpia hiilikrediittejä.

BIOHIILEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET RAKENNUSTEOLLISUUDESSA

Biohiilelle on nykyään löytynyt jo runsaasti erilaisia käyttökohteita. Yksi tunnistettu mahdollisuus on biohiilen käyttäminen rakennusmateriaalien lisäaineena. (Nummela 2017, Biohiili 2022.) Biohiiltä voidaan käyttää kaupunki- ja viherrakentamisessa, esimerkiksi katupuiden kasvualustoissa, viherkatoissa ja hulevesien puhdistusjärjestelmissä. Rakennustuotteiden osalta tutkitaan esimerkiksi biohiilen soveltuvuutta betonin raaka-aineena. (Biohiili 2022.)

Nykyään betoni valmistetaan sementistä, kiviaineksesta ja vedestä ja lisäksi siinä voidaan käyttää lisäaineita, seosaineita ja kuituja. Yleisen suomalaisen rakennebetonin hiilidioksidipäästöt ovat noin 260 kilogrammaa kuutiota kohden. Kun betonin valmistusta arvioidaan sen ympäristövaikutusten kannalta, sementti on osa-aineena merkittävin tekijä. Kuitenkin muillakin betonin raaka-aineilla on negatiivisia ympäristövaikutuksia, jotka on hyvä arvioida. Betonin ympäristövaikutuksien vähentämiseen on olemassa useita keinoja, joista osa on jo markkinoilla ja osa yhä kehitysvaiheessa laboratorioissa ja pilottihankkeissa. (Kotkavuo 2022, 22, 36.)

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, ja sitä valmistetaan vuosittain noin 13 miljardia kuutiometriä. Betonin käyttökohteet ovat monipuoliset, ja sitä voidaan käyttää

niin pieniin kuin suurin kohteisiin. Betoni on selkeästi suosituin rakennusten perustuksissa käytetty materiaali. Betonia käytetään usein myös infrarakenteissa, esimerkiksi silloissa, padoissa ja voimalaitoksissa. Lisäksi betonia käytetään monipuolisesti pienemmissä rakennusmateriaaleissa, kuten harkoissa, kattotiilissä ja ympäristötuotteissa, joita ovat muun muassa pihakivet ja -laatat. (Betoni rakennusmateriaalina s.a.)

Vaikka biohiilellä on pitkä historia maanparannuksessa, teollisuusalan biohiiliala on vielä suhteellisen nuori, mutta se kehittyy tällä hetkellä nopeasti. Biohiilen avulla etsitään ratkaisuja myös vähäpäästöisiin betonituotteisiin. Esimerkiksi suomalainen rakennusalan konserni GRK rakentaa useita biohiililaitoksia toimintamaihinsa, myös Suomeen. Yhtenä tutkimuskohteena on biohiilen käyttäminen asfaltin ja betonin raaka-aineena. (GRK rakentaa nopeassa tahdissa...2022.)

3D-tulostus on saamassa tilaa eri aloilla. Tekniikan käyttäminen betonirakentamisessa edellyttää tutkimusta, jotta voidaan edistää 3D-tulostuksen formulaatioita, jotka tukevat kiertotaloutta. Vergaran ym. (2023) tutkimuksessa on selvitetty jätepuuperäisen biohiilen yhdistämistä portlandsementtiin ja sen soveltuvuutta 3D-tulostukseen. Seoksissa biohiiltä sisällytettiin viidestä painoprosentista jopa 20 painoprosenttiin asti. Portlandsementin määrä pidettiin vakiona kaikissa formulaatioissa, vain biohiilen, kaoliinin ja kalsiumkarbonaatin osuuksia vaihdeltiin. Tehdyissä tutkimuksissa selvisi, että 3D-tulostuksessa sementtiseoksilla, joissa biohiilen osuus oli alle kymmenen painoprosenttia kuiva-aineesta, ei ollut vaikutusta tulostettavuuteen ja mittapysyvyyteen. Seoksilla, joissa biohiiltä oli yli kymmenen painoprosenttia, oli negatiivisia vaikutuksia näytteiden mekaaniseen stabiiliisuuteen. (Vergara ym. 2023.)

Suomalainen biohiiliyhtiö Carbo Culture Oy on tutkinut biohiiltä betonimateriaaleissa sekä osana Xamkin hanketta että Saksan liittovaltion tukemassa Carbon to Value ohjelmassa. Yritys on koetoiminnassaan demonstroinut, että se voi korvata jopa kymmenen prosenttia sementistä biohiilellä ilman, että materiaalin mekaaninen performanssi huononee. Valmiissa betonituotteessa tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi 1,5 prosentin biohiilipitoisuutta ja vähentää jopa 40 prosenttia betonin hiilijalanjäljestä. Hiilijalanjäljen pienentämisen lisäksi yritys tutkii muita hyötyjä, joita biohiilestä voisi rakennusmateriaaleissa olla, esimerkiksi biohiilen sähkönjohtavuuden ominaisuutta osana rakennusmateriaalia. Tulokset ovat alustavia, ja yritys jatkaa koeohjelmaansa vuoden 2024 loppuun asti, ja tarkoituksena on aloittaa pilotointi teollisten kumppanien kanssa.

Carbo Culture Oy:n tuotantomenetelmä kuuluu Flash-pyrolyysin piiriin. Prosessissa biomassa muunnetaan paineistetussa prosessissa ja korkeassa lämpötilassa (750 °C) biohiileksi ja synteetikaasuiksi eikä nestemäistä faasia (tislettä) synny lainkaan. Tuotanto-olosuhteet varmistavat, että syntyvä kaasu on puhdasta ja kuivaa ja näin helposti jatkoohyödynnettävissä, ja syntyvä biohiili on hyvin hiilipitoista (yli 90 %) eikä sisällä huomattavia määriä volatii-

leja ainesosia tai muita haitta-aineita. Se on myös hyvin pysyvää (permanent/durable), ja esimerkiksi biohiilen kemiallista pysyvyyttä mittaavissa testeissä Carbo Culturen biohiilen H:C-suhdeluku on ollut 0,1–0,2 ja O:C-suhdeluku 0,01–0,02.

SoilCare Oy seuraa aktiivisesti alan kehitystä maailmalla, ja sen tavoitteena on löytää erikoiskohteita biohiilelle. Betonissa biohiiltä on kokeiltu monissa maissa. Ruotsissa Finja tekee laastisekoituksia, joissa on mukana biohiiltä (Puts- & Murbruk C ECO s.a.). Norjassa Skanska on kokeillut biohiilen käyttöä betonisissa seinäelementeissä. Yhdysvalloissa Solid Carbon käyttää biohiiltä seoksissa, joista on tehty betonilattioita ja ajoväylien pinnoituksia (Solid Carbon s.a.). Tieteellistä taustaa tuo Colorado School of Mines -yliopisto, jossa on tutkittu biohiilen määrän optimointia betonin valmistuksessa. Tulosten mukaan betonin paino vähenee ja jotkut lujuusominaisuudet paranevat. Tuhkan lisäys vähentää myös sementin tarvetta, mikä johtaa myös hiilidioksidipäästöjen vähentymiseen. (Kura 2022.)

BETONIN VALMISTAMISESSA VOIDAAN HUOMIOIDA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA

Betonissa sementti toimii sideaineena. Sementin osuus betonissa on noin 200–400 kg kuutiometriä kohden. Kun sementti reagoi veden kanssa, muodostuu siitä sementtikiveä. Sementin tehtävä betonissa on sitoa kiviainesrakeet ja rauditus yhteen lujaksi materiaaliksi. Sementtiä käytetään myös laastien ja tasoitteiden valmistukseen. (Betonin valmistus s.a.) Betonin valmistamisessa voidaan korvata sementtiä seosaineilla, jotka ovat pienipäästöisiä, ja niillä voidaan vähentää betonin hiilidioksidipäästöjä jopa 90 prosenttia. Esimerkiksi nykyään betonin seosaineina käytetään masuunikuonaa, lentotuhkaa, kalkkikivijauhetta ja silikaa. (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 236–241.) Eurooppalainen standardi SFS-EN 197-1 säätelee kuitenkin tarkasti sitä, mitä sementti voi sisältää, ja standardi SFS-EN 206 määrittää betonissa käytettävät raaka-aineet (Punkki 2021).

Sementtiteollisuuden aiheuttamat päästöt jaetaan prosessipäästöihin ja energiapäästöihin. Päästöjen jakautuminen hankaloittaa sementin kokonaispäästöjen arvioimista. Sementtituotannon määriä ei ole mahdollista kertoa yhdellä yleisellä päästökertoimella, sillä eri maiden ja tehtaiden osuudet prosessipäästöjen ja polttoainepäästöjen suhteen ovat vaihtelevat. (Kotkavuo 2022, 26.)

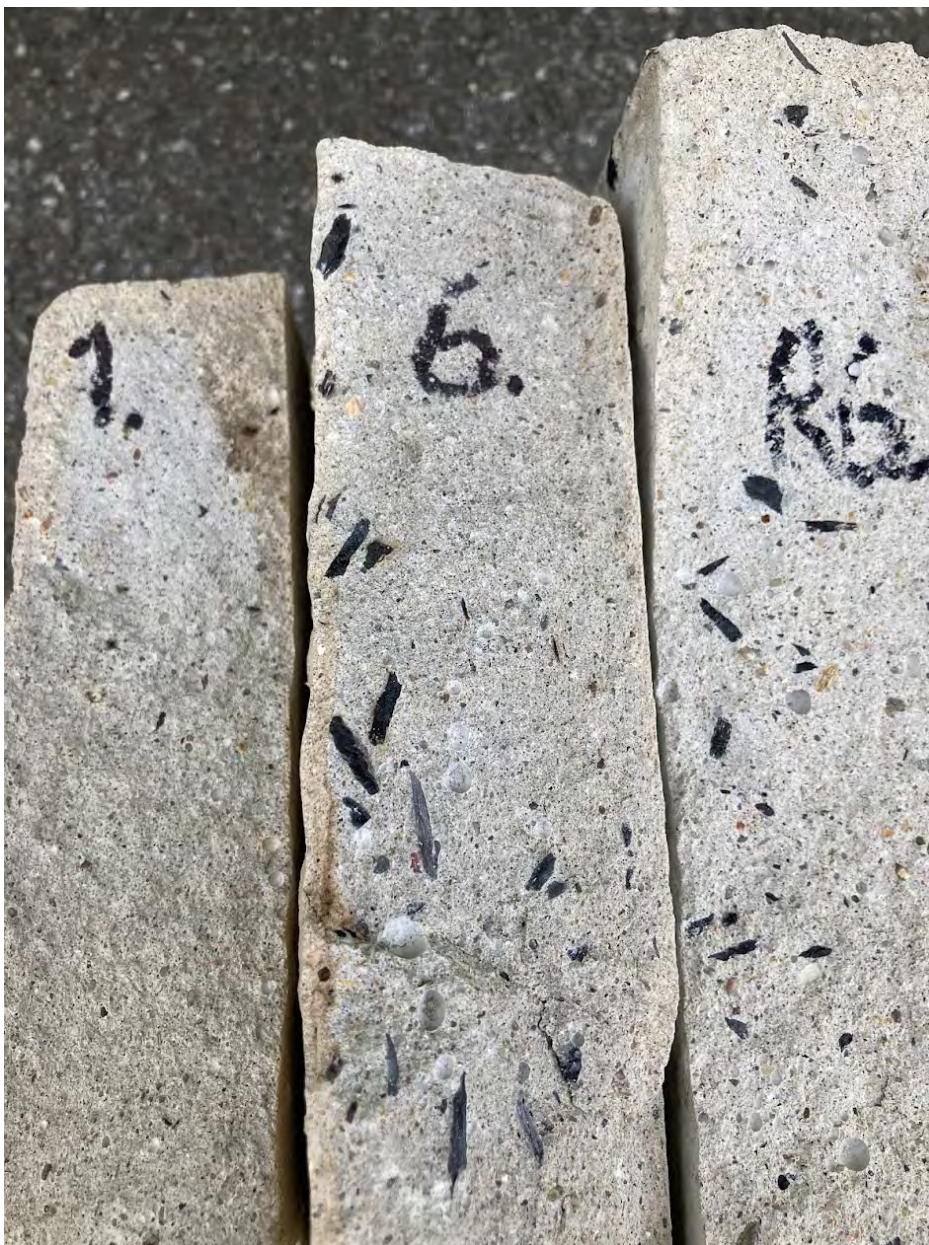
HANKKEEN BIOHIILIBETONISET KOEKAPPALEET

Hankkeen työpaketissa 3 selvitettiin betonisten rakennusmateriaalien osalta mahdollisuutta hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Toimenpiteissä toteutettiin betonin valmistamista vähentämällä sementin määrää ja korvaamalla sitä biohiilellä eri suhtein. Koekappaleiden valutöissä tarkasteltiin betonin työstettävyyttä ja valmistetuille koekappaleille tehtiin erilaisia betonin testauksia ja laboratoriokokeita.

Hankkeessa betonisiin ja biohiilibetonisiin koekappaleisiin käytettiin raaka-aineena sementtiä, kiviainesta, vesijohtovettä ja biohiiltä. Hankkeen koekappaleiden valmistuksessa oli kahdenlaista portlandseossementtiä, joista toinen oli nopeasti kovettuvaa. Alkuvaiheen koekappaleisiin käytettiin useista erilaisista raaka-aineista valmistettuja biohiiliä. Kuitenkin kokeiden tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi muuttujien määrää haluttiin karsia ja näin päädyttiin myöhemmissä kokeissa käyttämään kahta erilaista biohiiltä: A-luokan purku-
puusta ja mäntyhakkeesta valmistettua biohiiltä. Molemmat biohiilet siivilöitiin kahden millimetrin siiviläkoolla. Biohiilen ominaisuuksiin ja laatuun tulee muuttujia erilaisista lähtömateriaaleista ja pyrolyysiprosesseista. Betonimassan valmistustapa ja muut raaka-aineet pidettiin samoina. Betonimassan valmistuksessa ei ollut käytettävissä betonilaboratorio-olosuhteita, joten tämä saattoi myös vaikuttaa massan valmistukseen ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin.

Hankkeen ensimmäisissä biohiilibetonikokeissa tehtiin testauserä hienontamattomasta hakeesta valmistetusta biohiilestä. Tällä selvitettiin, miten isompi raekoko vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. Karkea biohiili hankaloitti valumassan työstettävyyttä, eikä se tehdyissä puristuslujuuskokeissa pärjännyt samalla tavalla hienonnettuna lisätylle biohiilelle. Muissa kokeissa käytetyt biohiilet olivat hienonnettuja.

Kuvassa 3 nähdään, kuinka karkea biohiili (R6 ja 6) erottuu kovettuneessa betonissa selvästi ja on noussut ennen betonin kovettumista pintaa kohden. R6 on sisätiloissa säilytetty referenssipihalaatta, ja pihalaatta 6 on ollut Mikkeli-puiston koealueella kenttäolosuhteissa. Pihalaatta 1 on normaali betoninen pihalaatta, joka on myös ollut kenttäolosuhteissa.



Kuva 3. Karkea biohiili erottuu selkeästi mustana harmaasta betonista (kuva: Anna Dunderfelt).

Hankkeessa valmistetuissa koekappaleissa vähäisillä biohiilisisäyksillä ei ollut vaikutusta massan työstettävyyteen. Kun sementtiä korvattiin betonimassassa noin 10 ja 15 painoprosentin verran, vaikeutuivat työstettävyyssominaisuudet. Työstettävyyden heikkenemisen vuoksi useimmissa kokeissa päädyttiin tutkimaan sementin korvausta biohiilellä noin

kahden painoprosentin osuudella. Työstettävyyttä massoissa arvioitiin aistinvaraisesti. Koekappaleissa ei käytetty työstettävyyttä parantavia lisäaineita, koska biohiilen ja lisäaineiden yhteisvaikutuksista ei löytynyt aikaisempaa tutkimustietoa. Biohiilen ja lisäaineiden kemiallisista käyttäytymistä betonimassassa tulee tutkia ennen niiden käyttöönottoa, ja se vaatii aikaa. Mielenkiintoisia jatkotutkimusaiheita ovat lisäaineiden käyttäytyminen biohiilibetonissa sekä se, olisiko niiden avulla mahdollista korvata sementtiä suuremmilla määrillä biohiiltä. Biohiilibetonisille ja normaalibetonisille koekappaleille tehtiin vertailukokeita niin laboratorio-olosuhteissa kuin kenttäkoeympäristöissä. Vertailukokeiden koejärjestelyistä ja tuloksista kerrotaan tämän julkaisun artikkeleissa.

YHTEENVETO

Tällä hetkellä biohiili betonirakenteissa on vielä kokeiluasteella, ja Pohjoismaissa on muutamia showcase-luonteisia esimerkkejä tällaisista tuotteista. Laajempi kaupallisen skaalan toiminta kuitenkin vielä puuttuu johtuen osittain biohiilen suppeasta saatavuudesta, melko monimutkaisesta tuotantoketjusta sekä sementin ja betonin regulaatiosta. Näiden takia muun muassa Carbo Culture uskoo, että kaupallistaminen on vielä usean vuoden päässä.

Rakennusteollisuuden vihreää siirtymää esittää muun muassa EU:n reguloitu päästömarkkina EU ETS, jonka yleisesti uskotaan nousevan noin 150 euron/CO₂t hintatasoon tämän vuosikymmenen toisella puoliskolla. Näin rakennusmateriaalien valmistajille aukeaa selkeä taloudellinen kannustin biohiilen integroimiseksi osaksi tuotantoprosessia.

LÄHTEET

Biohiili. 11.11.2022. Bioenergia ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.bioenergia.fi/biohiili/#ominaisuuksia> [viitattu 2.6.2023].

EBC (2012–2023) European Biochar Certificate – Guidelines for a sustainable Production of Biochar. 2023. Carbon Standard International (CSI), Frick, Switzerland. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_3.pdf [viitattu 6.6.2023].

Elo, A. 2017. Biohiilen monet mahdollisuudet. Uusiutuvien energiamuotojen päivä, Mustiala 9.3.2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lab.fi/sites/default/files/2018-06/Biohiilen%20monet%20mahdollisuudet.pdf> [viitattu 29.5.2023].

Elo, A., Hagner, M., Kainulainen, A., Kuoppamäki, K., Laulumaa, P., Männistö, A., Nuotio, A.-K., Riikonen, A., Salo, E. & Tiilikkala, K. 2023. Biohiiliopas viher- ja ympäristösuunnitteluun, -rakentamiseen ja kunnossapitoon. Viherympäristöliiton julkaisu 73. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vyl.fi/alan-kehittaminen/hankkeet-ja-selvitykset/biohiiliopas/> [viitattu 2.6.2023].

GRK rakentaa nopeassa tahdissa useita biohiililaitoksia kaikkiin toimintamaihinsa. 2022. GRK. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.grk.fi/grk-rakentaa-nopeassa-tahdisa-useita-biohiililaitoksia-kaikkiin-toimintamaihinsa/> [viitattu 7.6.2023].

Kamini, P., Fah Tee K., Gim bun, J. & Choo Chin, S. 2023. Biochar in cementitious material – A review on physical, chemical, mechanical, and durability. AIMS Press volume 10, issue 3: 405–421. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.3934/matricsci.2023022> [viitattu 9.6.2023].

Knaapi, J. 2019. Pyrolyysiöljyn kemikaalit ja jalostus polttonesteiksi vetykäsittelyllä. Tampereen yliopisto. Kemian ja biotekniikan laboratorio. Kandidaatintyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/115705/Knaapi.pdf?sequence=2> [viitattu 9.6.2023].

Kotkavuo, N. 2022. Betonioptimismi. Betonin kestävydestä ja arkkitehdin vaikutusmahdollisuuksista ilmastonmuutoksen aikakaudella. Diplomityö, Oulun yliopisto, Arkkitehtuurin yksikkö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202204081520> [viitattu 8.6.2023].

Kuta, S. 2022. Concrete solutions to infrastructure challenges. Mines Magazine 8.11.2022. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://minesmagazine.com/17582/> [viitattu 15.8.2023].

Laine, K. 2015. Biohiilen valmistuksessa syntyvien tisleiden hyötykäyttö, Utilization of the pyroigneous acids from charcoal production. Maisterivaiheen opinnäytetyö. Aalto-yliopisto. PUU - Puunjalostustekniikan koulutusohjelma. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/15061> [viitattu 30.5.2023].

Nummela, J. 2017. Keinoja hallittuun sidontaan ja kiertoon. HAMK. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2018/08/Tietokortit_biohiili_final.pdf [viitattu 7.6.2023].

Pozzolaani. s.a. Betonitietoyhdistys. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/pozzolaani.html> [viitattu 4.8.2023].

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Betoni verkkolehti Tutkimus ja Kehitys 4/2021. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/2021/12/10/betonin-sideaineet-tulevaisuudessa/> [viitattu 21.8.2023].

Puts- & Murbruk C ECO. s.a. Finja. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.finja.se/produkter/gjuta-mura-putsa-laga/puts-murbruk-c-eco> [viitattu 15.8.2023].

Riikonen, A. 2019. Biohiili ja sen käyttömahdollisuudet viherrakentamisessa. Helsingin kaupunki / Kaupunkiympäristön toimiala. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2019:19. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-19-19.pdf> [viitattu 7.6.2023].

Rodrigues, L., Budai, A., Elsgaard, L., Hardy, B., Keel, S. G., Mondini, C., Plaza, C. & Leifeld, J. The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice Soil Science 26.6.2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ejss.13396> [viitattu 11.8.2023].

Salo, E. 2019. Biohiili Suomessa. Suomen biohiilyhdistys. PDF-Dokumentti. Saatavissa: <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/04/Esko-Salo.pdf> [viitattu 29.5.2023].

Solid Carbon. s.a. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.solid-carbon.com/> [viitattu 15.8.2023].

Sulfaattikorroosio s.a. Eurofins. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakennusmateriaalien-testaus/betoni/sulfaattikorroosio/> [viitattu 4.8.2023].

Vergara, L., Perez, J. & Colorado, H. 2023. 3D printing of ordinary Portland cement with waste wood derived biochar obtained from gasification. Case Studies in Construction Materials. Available online 3 May 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02117> [viitattu 8.6.2023].

RAKENTAMISEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSIA JA LAINSÄÄDÄNTÖÄ

Miia Sourander & Anna Dunderfelt

Rakennusmateriaalien valmistuksesta ja tuotannosta syntyvien päästöjen vähentäminen on keskeisessä roolissa ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. Betonin vuosittaiset valmistusmäärät ovat valtavat, ja siksi on hyödyllistä selvittää tämän rakennusmateriaalin kohdalla ympäristöpäästöjen vähentämiskeinoja. Hankkeessa BiBe – Biohiilen uudet käyttökohteet rakennusmateriaalina selvitettiin biohiilen soveltuvuutta ja käyttömahdollisuutta betoni- materiaalin raaka-aineena sementin korvaajana.

Sementin valmistuksessa hiilidioksidipäästöjä aiheutuu kalkkikiven polttamisesta, sillä korkean lämpötilan vuoksi se vaatii paljon energiaa. Lisäksi sementti kalsinoituu polton aikana, eli siitä vapautuu hiilidioksidia. Sementin ominaispäästöihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi seosaineiden käyttämisellä. (Ympäristöraportti 2023, 7, 9.)

Suomen hiilidioksidipäästöt ovat kokonaisuudessaan vuosittain noin 50 miljoonaa tonnia, josta Suomen sementtiteollisuus aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä noin 0,9 miljoonan tonnin verran. Jo tälläkin hetkellä betonin valmistuksessa hyödynnetään muun teollisuuden sivutuotteita, kuten lentotuhkaa ja masuunikuonaa. Molemmilla raaka-aineilla voidaan rajallisesti korvata sementtiä betonin valmistuksessa. Sivutuotteiden käyttämisellä voidaan vähentää betonin aiheuttamia ympäristöpäästöjä. (Sementti ja kasvihuonepäästöt s.a.) Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on tullut ajankohtaiseksi ja tarpeelliseksi Suomen tavoitellessa hiilineutraalisuutta vuoteen 2035 mennessä (Punkki 2021).

Biohiili voi olla potentiaalinen raaka-aine betonin valmistuksessa, sillä se voi auttaa betoniteollisuutta hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Biohiilen käyttäminen betonin seosaineena vaatii kuitenkin laajaa tutkimusta ennen kaupallistamista. Biohiilen laatuun vaikuttavat useat seikat, kuten lähtöraaka-aine ja valmistusmenetelmä. Näin ollen biohiilen laadun tunnistaminen on tärkeässä osassa, kun suunnitellaan sen käyttökohdetta. Ennen kuin biohiiltä voidaan hyödyntää betonituotteissa korvaamaan sementtiä osittain, on tunnistettava lainsäädännöt, jotka asettavat vaatimuksia rakennusmateriaaleille.

On selvää, että sementin korvaaminen biohiilellä tuo mahdollisuuksien lisäksi myös haasteita. Betonissa uusien seosmateriaalien käyttöönotto vaatii muun muassa määräysten ja standardien huomioimisen. Hankkeen selvityksissä tutkittiin betonisia ympäristörakenteita, kuten pihalaattoja ja kevyitä hulevesirakenteita (kuva 1).



Kuva 1. Biohiilibetoninen kevyt hulevesirakenne, jossa on korvattu sementtiä kahden painoprosentin osuudella (kuva: Anna Dunderfelt).

RAKENTAMISEEN LIITTYVIÄ LAATUVAATIMUKSIA

Rakentamista koskevat säännökset ovat maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999), jossa säädetään rakentamisen yleiset edellytykset, tekniset vaatimukset, lupamenettelyt ja viiranomaisvalvonta. Lain luvussa 17, 117 a-g § kuvataan rakentamiselle asetettuja teknisiä vaatimuksia: rakenteiden lujuus ja vakaus, paloturvallisuus, terveellisyys, käyttöturvallisuus, esteettömyys, meluntorjunta, ääniolosuhteet ja energiatehokkuus. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132.)

EU:n rakennustuoteasetus ((EU) N:o 305/2011) säätelee siitä, kuinka rakennustuotteiden ominaisuuksista tulee kertoa ja millaisia vaatimuksia on siihen, että rakennustuotteet saadaan CE-merkinnän alaiseksi. Asetuksen tarkoitus on selkeyttää CE-merkinnän käyttämistä. (Rakennustuotteet s.a.) Tehtaassa valmistetut betonituotteet ovat pääsääntöisesti CE-merkittyjä (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 250). Laki eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä (954/2012) koskee rakennustuotteita, joissa ei voida käyttää CE-merkintää. Lain mukaisilla toimenpiteillä osoitetaan, että tällainen rakennustuote täyttää maankäyttö- ja rakennuslain asettamat vaatimukset. Edellä mainittua lakia tarkennetaan asetuksella Ympäristöministeriön asetus eräiden rakennustuotteiden

tuotehyväksynnästä (555/2013), jossa on tarkemmin säädetty esimerkiksi kansallisten hyväksymismenettelyjen hakeminen. CE-merkinnän väärinkäyttöön liittyvistä seuraamuksista säättää laki CE-merkintärikkomuksista (187/2010). (Rakennustuotteet s.a.)

Rakennustuotteita koskevalla lainsäädännöllä varmistetaan, että tuotteista saatava tieto on luotettavaa ja vertailukelpoista. Lisäksi lainsäädännöllä edistetään rakennustuotteiden myyntiä kotimaassa kuin myös ulkomaan vientiä. Rakennustuotteiden tulee olla turvallisia, ne eivät saa aiheuttaa terveydelle haittaa ja niiden tulee olla kestävä kehityksen periaatteiden mukaisia. Rakennustuotteella tarkoitetaan sellaista tuotetta, joka on rakennuksessa kiinteänä osana, kuten betonielementti, ja mahdollisesti sen asentamiseen tarvittavaa osaa. (Rakennustuotteet s.a.) Rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa on huomioitava lujuus ja vakaus, ettei rakennukseen kohdistuva kuormitus aiheuta siihen sortumista, lujuutta tai vakautta haittaavia muodonmuutoksia rakentamisen ja käytön aikana. (Suomen rakentamismääräyskokoelma s.a.)

Rakentamisen standardien rajoituksista johtuen vaihtoehtoisten sideaineiden käyttökohteet betonille ovat ei-kantavissa rakenteissa. Betonituotteilla rajoitukset sideaineen laadulle ovat tavallisesti kantavia rakenteita lievemmat. Yksittäisissä betonituotteissa vaihtoehtoisten sideaineiden käytöllä voidaan saavuttaa tuntuvia päästövähennyksiä, vaikkakin betonirakentamisen kokonaispäästöihin ne vaikuttavat todennäköisesti vähänlaisesti. (Punkki 2021.)

RAKENTAMISEN PÄÄSTÖIHIN VAIKUTETAAN

Ympäristöministeriö on teettänyt vuonna 2017 selvityksen tiekartasta, jonka tavoitteena on vähentää rakentamisen ja rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeä. Rakentamisen sääntely ulottuisi myös rakennusmateriaaleista aiheutuviin kasvihuonepäästöihin. Ympäristöministeriöllä on tavoite ohjata lainsäädännöllä rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä 2020-luvun puoliväliin mennessä. (Vähähiilisen rakentamisen tiekartta s.a.)

Rakennusten päästöjen vähentämisen keinoissa on siirryttävä myös rakennusmateriaalien valmistuksen aiheuttamien päästökuormien hallintaan, sillä niiden osuus rakennuksen elinkaaren päästöistä on merkittävä. Kuitenkin tulee huomioida ja selvittää useat reunaehdot ja muut tekijät, jotka liittyvät rakennusmateriaalien hiilijalanjälkeen sekä käytön ohjaukseen. Nykyään rakennusten elinkaaren päästölaskenta perustuu vapaaehtoisuuteen, ja sitä käytetään etenkin kaupallisten ympäristöluokitusten vuoksi. Rakennustuotteiden hiilidioksidipäästöjä on useissa lähteissä saatavilla, mutta niiden laatu on edelleen vaihtelevaa. CO₂-päästötiedoissa olisi noudatettava standardia (EN 15804). (Tiekartta rakennuksen elinkaaren... 2017, 2, 27.)

Valtioneuvosto on hyväksynyt syyskuussa 2022 hallituksen esityksen uusista rakennuslain muutoksista, ja lakien on tarkoitus tulla voimaan 1.1.2024. Rakentamislailta oh-

jataan rakentamista vähähiiliseksi. Tämä tarkoittaa, että rakentamisessa huomioidaan rakennuksen koko elinkaaren aikana syntyvät ilmastohaitat sekä -hyödyt. Rakennukselle määritetään uudet olennaiset tekniset vaatimukset sen vähähiilisyydestä ja elinkaaresta. Rakentamislaisissa kannustetaan rakennusmateriaalien kiertotalouteen, jotta materiaalit olisivat mahdollisimman pitkään kierrossa. Tulevassa laissa vaaditaan muun muassa sekä uusista että purettavista rakennuksista selvitys kaikista käytetyistä ja vapautuvista materiaaleista. Tällä hetkellä rakentamista säätelee noin 20 vuotta vanha maankäyttö- ja rakennuslaki. Uuden lain voimaantulon yhteydessä lain nimi muutetaan alueidenkäyttölaiksi. (Hallitus antoi... 2022.)

BETONI YMPÄRISTÖRAKENTAMISESSA

Betonia käytetään paljon maisemarakentamisessa, ja se onkin siinä yksi tärkeimmistä materiaaleista. Betonilaattoja on teollisesti valmistettu jo noin 50 vuoden ajan, mutta reilusti pidempään on valmistettu muotteihin valettuja laattoja sekä paikallaan valettuja rakenteita. Betonimateriaalin laatu ja tuotteiden kestävyys lisäävät niiden suosiota. Kun betonirakenne suunnitellaan laadukkaasti, sen elinkaari on pitkä. Betonituotteet ja rakenteet voidaan niiden elinkaaren lopussa käyttää uudelleen tai kierrättää. (Betonin käyttö ympäristöra kentamisessä 2023, 10.) Suomessa kierrätetään jo yli 80 prosenttia kaikesta käytettävästä betonista (Betonin kierrätys... s.a.).

Ympäristöbetonirakentamiseen liittyy paljon standardeja. Ne voidaan luokitella neljään ryhmään (Betonin käyttö ympäristöra kentamisessä 2023, 18, 250):

- suunnittelustandardit
- tuotestandardit
- testausstandardit
- toteutusstandardit.

Eurokoodit eli eurooppalaiset rakenteiden suunnittelustandardit ovat yhtenevät EU-maissa, ja niitä sovelletaan kunkin maan kansallisen liitteen mukaisesti riippuen rakennuskohteen sijainnista. Suomessa ympäristöministeriö on vahvistanut kansalliset liitteet. Infrarakentamisesta vastaa Väylävirasto, joka huolehtii esimerkiksi siltoihin liittyvistä ohjeista ja kansallisista liitteistä. (Betonin käyttö ympäristöra kentamisessä 2023, 18, 250.)

Betonituotteiden suunnittelussa on huomioitava jokaisen alueen erityispiirteet. Betonisien päällysterakenteiden tulee vahvistaa ja suojata alusrakenteita, mutta on otettava huomioon rakenteisiin kohdistuvat kuormat ja kulutukset. Ympäristöra kenteiden tulee olla kestäviä, ja niiden tulee säilyttää toimivuus ja ominaisuudet myös muuttuvissa olosuhteissa. (Betonin käyttö ympäristöra kentamisessä 2023, 13.)

Esimerkkejä ympäristöbetonirakentamiseen liittyvistä standardeista (Betoniin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 251):

- SFS-EN 206 Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimuksenmukaisuus
- SFS 7022 Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa
- SFS 7017 Betonista tai luonnonkivestä tehdyille ulkotilojen päällystekiville, laatoille ja reunakiville eri käyttökohteissa vaaditut ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot
- SFS-EN 1338 +AC Betoniset päällystekivet. Vaatimukset ja testausmenetelmät
- SFS-EN 1917 +AC Betoniset hulevesi- ja viemärikaivot, raudoitetut ja raudoittamattomat ja teräskuiduilla vahvistetut.

SEOSAINEIDEN HYÖDYT JA NIITÄ RAJOITTAVAT TEKIJÄT

Betonin valmistuksessa on mahdollista käyttää täydentäviä sideaineita eli seosaineita, kuten lentotuhkaa, masuunikuonaa, silikaa ja kalkkikivijauhetta. Seosaineille on ominaista, että ne muodostavat sementtikiveen lujuutta sekoituessaan emäksisen portlandsementin kanssa. Masuunikuonan, silikan ja lentotuhkan avulla pyritään alentamaan betonin hiilijalanjälkeä. Niitä saadaan teräs- ja energiateollisuuden sivuvirroista. (Kosomaa ym. 2015, 38.) Kun halutaan tehdä vähäpäästöistä betonia, on keskiössä sideaineiden ominaispäästöjen alentaminen. Tehokkaaksi toimenpiteeksi on todettu lisäaineettoman portlandsementin korvaaminen teollisuuden sivuvirroilla, etenkin masuunikuonalla. (Ahti-Virtanen 2022.)

Seosaineet voivat vaikuttaa betonin kestävyysominaisuuksiin. Seosaineiden lisäykselle on asetettu enimmäismäärät, jotka ovat riippuvaisia esimerkiksi betonin rasitusluokasta. (Tikkanen 2019, 13.) Betonin rasitusluokilla kuvataan sitä, millaisissa ympäristöolosuhteissa betoni tulee olemaan käyttöikänsä aikana (Rasitusluokka s.a.). Betonissa lentotuhkalle on määritetty rasitusluokittain enimmäismäärät portlandsementin määrässä. Jos betoni joutuu kloridirasitukselle alttiiksi, on sillä vähentävä vaikutus lentotuhkan enimmäismäärään. (Tikkanen 2019, 14.) Masuunikuonan ja lentotuhkan on todettu parantavan huomattavasti betonin kloriditunkeumavastusta (Mattila 2017). Biohiilen käyttäminen betonin seosaineena ja sen soveltuminen kemikaalirasituksille sekä säälle alttiissa rakenteissa tarvitsee lisää selvitystä. Tutkimuksien avulla on mahdollista saada selville biohiilen lisäykselle enimmäismäärät eri olosuhteille suunniteltuihin betoneihin. Uusien seosaineiden käyttöönotto kaupallisiin betonituotteisiin vaatii laajaa tutkimusta, ja seosaineiden tulee täyttää standardien asettamat vaatimukset.

Rakentamisalalla turvallisuus on erityisen tärkeä kriteeri, ja haasteita vaihtoehtoisten sideaineiden käytölle asettavat kantavien rakenteiden rajoitukset. Eurooppalainen standardointi SFS-EN 197-1 säätelee hyvin tarkkaan sementissä sallitut raaka-aineet. SFS-EN 206 puolestaan säätelee sen, mitä raaka-aineita betonin valmistuksessa saa käyttää. Vaihtoehtoisille sideaineille on mahdollista saada hyväksyntä, vaikka ne eivät täyttäisi standardien vaatimuksia, mutta nämä prosessit ovat vaativia. ETA-hyväksyntä on tähän yksi vaihtoehto. (Punkki 2021.)

Biohiilen lainsäädäntö ja sertifiointi päivittyvät koko ajan, ja ne asettavat eri käyttökohteisiin käytettäville biohiilille kriteerejä, muun muassa lähtömateriaaleille ja lopputuotteen raja-arvoille. Tällaisia ovat esimerkiksi lähtömateriaalin kohdalla tuotannon kestävyys ja lopputuotteen PAH-yhdisteiden raja-arvot. Biohiilelle on vapaaehtoisia sertifiointiohjelmia, kuten eurooppalainen biohiilisertifikaatti (EBC) ja International Biochar Initiatiiven sertifiointiohjelma (IBI). (Biohiili 2022.) Näistä edellä mainituista on kerrottu enemmän tämän julkaisun artikkelissa ”Biohiili ja sen mahdollisuudet ja ominaisuudet betoniteollisuuden raaka-aineena”.

YHTEENVETO

Biohiilen soveltaminen betonin raaka-aineeksi on vielä hyvin alkutekijöissään. Tutkimukset ovat tähän asti painottuneet laboratorioon ja pienen mittakaavan kokeisiin. Tarvitaan lisää tutkimustietoa, jotta voidaan varmistaa, että rakennusmateriaalit ovat tarkoitukseen ja käyttökohteeseen suunnitellun mukaisia. Tarkkojen laboratoriotutkimuksien lisäksi tarvitaan tietoa ja kokemusta siitä, että biohiilibetoni toimii myös työmaa- ja kenttäolosuhteissa. Hiilidioksidipäästöjen vähentämisen ja kiertotalouden edistämisen kannalta on järkevää tutkia uusien seosaineiden käyttömahdollisuuksia. On kuitenkin huomioitava, että kehitys vie aikaa ja tarvitaan pitkäaikaistutkimusta, ennen kuin uusien seosaineiden käyttöönotto betonin raaka-aineena on mahdollista.

Sementtiteollisuus kuuluu EU:n päästökaupan piiriin. Tästä johtuen sementtiteollisuus on jo aikaisemmin reagoanut syntyviin päästöihin kuin betonin valmistajat. Lähiainoina hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen on kiinnitetty enemmän huomiota, sillä Suomella on tavoite olla hiilineutraali vuonna 2035. Käytännön paineita luovat rakennuskohtaiset uusien rakennusten CO₂-päästölaskelmat sekä se, että päästöille asetetaan rakennustyyppikohtainen maksimitaso. (Punkki 2021.) Joissakin Euroopan maissa, kuten Ranskassa ja Hollannissa, säädetään jo rakennusmateriaalien sekä rakennusten elinkaaren aikaisista päästöistä (Vähähiilisen rakentamisen tiekartta s.a.).

Betonin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen biohiilellä vaatii laaja-alaista tutkimusta ennen kuin sitä voidaan käyttää sementin korvaajana. Tämän vuoksi tulee tunnistaa biohiilen vaikutukset kovettuneeseen betoniin, ja niitä ovat muun muassa kemialliset reaktiot, haitta-aineiden pitoisuudet ja säilyvyysominaisuudet. Biohiilen laadun hallinta on erittäin tärkeässä osassa, jotta betonin ominaisuuksien vaatimuksiin ylletään. Biohiili on kuitenkin potentiaalinen raaka-aine, jolla voidaan vähentää rakentamisen hiilijalanjälkeä ja tukea tulevaisuuden hiilineutraalitason saavuttamista.

Suomi ei ole yksin kamppailussa ilmastonmuutosta vastaan, sillä Euroopan ilmastolain myötä koko EU on sitoutunut olemaan hiilineutraali viimeistään vuoteen 2050 mennessä (Mitä hiilineutraalius...2022). Suomi voi saada biohiilestä merkittävän vientituotteen. Kansallisissa ja kansainvälisissä standardityöryhmissä biohiilen mahdollisuudet ja markkinakehitys on noteerattu ja työ biohiilistandardien edistämiseksi on käynnistetty. (Salo 2023.)

LÄHTEET

Ahti-Virtanen, J. 2022. Betonitutkimuksessa tapahtuu nyt paljon. Projektiiutiset. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.projektiiutiset.fi/betonitutkimuksessa-tapahtuu-nyt-paljon/> [viitattu 26.5. 2023].

Betonin kierrätys ja uudelleenkäyttö. s.a. Betoni ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/kiertotalous/> [viitattu 16.6.2023].

Betonin käyttö ympäristörakentamisessa. 2023. Betoniteollisuus ry. PDF-Dokumentti. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2023/01/Betonin-kaytto-ymparistorakentamisessa_2023.pdf [viitattu 25.5.2023].

Biohiili. 2022. Bioenergia ry. WWW-dokumentti. (päivitetty 11.11.2022) Saatavissa: <https://www.bioenergia.fi/biohiili/#lainsaadanto> [viitattu 14.6.2023].

Hallitus antoi eduskunnalle rakentamisen päästöjä vähentävät ja digitalisaatiota edistävät lakiesitykset. 2022. Ympäristöministeriön tiedote 15.9.2022. WWW-dokumentti. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/hallitus-antoi-eduskunnalle-rakentamisen-paastoja-vahentavat-ja-digitalisaatiota-edistavat-lakiesitykset> [viitattu 16.6.2023].

Kosomaa, S., Mattila, J. & Tepponen, P. 2015. Mitä betoni on? PDF-dokumentti. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_38-43.pdf [viitattu 26.5.2023].

Maankäyttö- ja rakennuslaki (alueidenkäyttölaki) 5.2.1999/132.

Mattila, J. 2017. Betoni ja rakentaminen – yleiskatsaus. Betoniseminaari, Oulu 21.3.2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.ril.fi/media/2017/2017-jasenyyys/1_jussimattila.pdf [viitattu 26.5.2023].

Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? 2019. Euroopan parlamentti. Päivitetty 8.9.2022. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-mennessa?&at_campaign=20234-Green&at_medium=-Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=hiilineutraali&at_topic=Carbon_Neutral&at_location=FI&gclid=EAIaIQobChMI05W0jN-PR_wIVqopoCR1nLwgCEAAYAAAEgJKlvD_BwE [viitattu 20.6.2023]

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Betoni verkkolehti. Tutkimus ja kehitys. nro 4/2021. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/2021/12/10/betonin-sideaineet-tulevaisuudessa/> [viitattu 25.5.2023].

Rakennustuotteet. s.a. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/rakennustuotteet> [viitattu 25.5.2023].

Rasitusluokka. Betonitietoyhdistys. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/rasitusluokka.html> [viitattu 25.5.2023].

Salo, E. 2023. Standardeilla on keskeinen rooli biohiili-innovaatioiden markkinakehityksessä. 15.6.2023. Blogi. Bioenergia ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.bioenergia.fi/2023/06/15/standardeilla-on-keskeinen-rooli-biohiili-innovaatioiden-markkinakehityksessa/> [viitattu 20.6.2023].

Sementti ja kasvihuonepäästöt. s.a. Betoniteollisuus ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/> [viitattu 25.5.2023].

Suomen rakentamismääräyskokoelma s.a. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/rakentamismaaraykset> [viitattu 20.6.2023].

Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. 2017. Bionova Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf/1f3642e1-5d58-8265-40c1-337deeab782d/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf?t=1603260760602 [viitattu 29.6.2023].

Tikkanen, E. 2019. Kemiallisten rasitusten vaikutus betonin vaurioitumiseen. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta. Kandidaatintyö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201909103243> [viitattu 25.5.2023].

Vähähiilisen rakentamisen tiekartta s.a. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta> [viitattu 26.5.2023].

Ympäristöraportti 2023. Finnsementti Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Ymparistoraportti-2023_FINAL.pdf [viitattu 16.6.2023].

PILOT-MITTAKAAVAN TESTAUKSET KOETUOTTEILLE KENTTÄOLOSUHTEISSA

Miia Sourander & Anna Dunderfelt & Riina Tuominen
& Mikko Hokkanen & Kirsi Malmstedt

Hankkeen toimenpiteessä 3 pilot-mittakaavan kokeet testattiin kenttäolosuhteissa biohiilibetonisien pihalaattojen toimivuutta puistolaatoituksessa ja vertailukohteena käytettiin tavallisia betonilaattoja, joihin ei ollut lisätty biohiiltä. Hankkeen käytännön kokeet aloitettiin syksyllä 2021 valmistamalla pilot-koekappaleina betoni- ja biohiilibetonipihalaattoja ja myöhemmin vuonna 2022 istutusruukkuja ja kevyitä hulevesirakenteita. Pihalaatat ja istutusruukut sijoitettiin Mikkeli puiston koalueelle. Kevyet hulevesirakenteet sijoitettiin yksityisomistuksessa olevan rakennuksen sadevesirännien alle. Artikkelissa esitellään pilot-koekappaleiden seuranta ja siinä tehtyjä havaintoja. Pilot-mittakaavan kokeiden tarkoituksena oli tuottaa tietoa biohiilibetonikoekappaleiden toimivuudesta Suomen sääolosuhteissa.

Biohiilen käyttömahdollisuutta betoniin on luonnollista lähteä testaamaan matalan vaatimustason tuotteissa, ja näin ollen pihalaatat soveltuivat hyvin alkuvaiheen pilot-mittakaavan kokeisiin. Kokeellisessa osuudessa selvitettiin valmistettujen biohiilibetonituotteiden työstettävyyttä, kestävyyttä ja ulkonäköä verrattuna referenssikappaleisiin, joihin ei ollut käytetty biohiiltä. Kenttäkoe mahdollisti biohiilibetonituotteiden kestävyuden seurannan oikeissa olosuhteissa, ja näin saatiin tietoa koetuotteiden säänkestävyydestä, kun ne olivat altistuneena eri vuodenaajoille ja sääolosuhteille. Koalue seurannan päätteeksi pihalaattoja verrattiin myös vastaaviin sisätiloissa säilytettyihin referenssikappaleisiin.

MIKKELIPUISTON KOEALUE

Hankkeen pilot-mittakaavan kokeita hahmoteltiin toteutettavaksi Mikkeli puistossa jo hankesuunnitelmassa. Sijoittamalla pihalaattojen testausalue puistoon saatiin laattoihin kohdistumaan rasiutusta kävijöiden avulla ja näin myös tietoa niiden toimivuudesta käyttökohteessa. Testaustulosten lisäksi hanke sai myös näkyvyyttä, sillä testausalueen yhteydessä kerrottiin sekä hankkeesta että alueen koejärjestelystä.

Mikkeli puisto sijaitsee Mikkelin keskustan läheisyydessä. Puisto on puutarhamatkailukohde, jossa on muun muassa esillä mallipuutarhoja. Puistossa käy vuosittain yli 100 000 vierailijaa, ja siellä on lähes 30 mallipuutarhaa. (Mikkeli puisto s.a.) Puistoalueelle on vapaa pääsy ympäri vuoden.

KOEKAPPALEET KENTTÄOLOSUHTEISIIN

Käyttötarkoitukseen oikein valittuna betoniset päällysteet ja ympäristörakenteet edesauttavat ulkoalueiden käyttömahdollisuuksia. Niiden tarkoituksena on myös suojata ja vahvistaa alusrakenteita. On tärkeää myös, että päällysteet ja ympäristörakenteet kestävät käytöstä aiheutuvia kuormia ja kulutusta. (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2022, 82.)

Kenttäkoetta varten valmistettiin pilot-tuotteina pihalaattoja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puupolin tiloissa syksyllä 2021 ja keväällä 2022. Pilot-koekappaleita ei valmistettu standardien mukaan eikä niissä käytetty lisäaineita. Hankkeessa valmistettuja pilot-koekappaleita ei voi verrata teollisen mittakaavan tuotteisiin. Kokeiden havainnot eivät ole yleistettävissä, ja niitä voidaan verrata vain näiden koetuotteiden välillä.

Pihalaattojen valmistuksessa muottina käytettiin valmiita neliönmuotoisia muovisia huuhtelualtaita, joiden pohjamitta oli noin 30 x 30 cm. Pihalaatan korkeudeksi määriteltiin viisi senttimetriä. Pihalaattoja valmistettiin 11 variaatiota, joista yksi oli normaali betonilaatta, johon ei lisätty biohiiltä.

Jo hankesuunnitteluvaiheessa oli yhdeksi biohiilen toimittajaksi valikoitunut Carbo Culture Oy. Koska hankkeessa oli tarkoituksena tarkastella myös biohiilen ominaisuuksien vaikutusta sementin korvaamisessa, selvitettiin muiden biohiilen valmistajien halukkuutta osallistua hankkeeseen. Hankkeen ensimmäisiin kokeisiin saatiin neljää erilaista biohiiltä myös SoilCare Oy:ltä. Biohiilibetonilaattojen valmistuksessa sementin korvausosuus biohiilellä oli 1–10 painoprosenttia.

Kokeissa päädyttiin testaamaan aluksi jokaista saatua biohiiltä, jolloin biohiilen raaka-aineen ja valmistusprosessin vaikutus laattojen valmistuksessa nähtäisiin. Kirjallisuuden perusteella biohiilen raakoon tulisi olla lähellä sementin raakokoa, jotta korvaaminen onnistuisi parhaiten. Kokeessa huomioitiin valmistajien omat reunaehdot biohiilen hienonnukselle ja testattava biohiili siivilöitiin kahden millimetrin siiviläkoolla. Yksi testauseriä tehtiin myös hienontamattomasta hakkeesta valmistetusta biohiilestä, sillä haluttiin selvittää, miten isompi raakoko vaikuttaa betonin ominaisuuksiin. Biohiilen hienonnus niin pieneen raakokoon, joka sementin korvaamisessa olisi optimaalinen, loi haasteita biohiilen valmistajien normaaliin valmistusprosessiin.

Syksyllä 2021 toteutetuissa kokeissa havaittiin, että biohiilen raaka-aine tai valmistusprosessi ei juurikaan vaikuttanut seoksen työstettävyyteen. Suurimmat vaikutukset olivat biohiilen raakoolla sekä korvausprosentin suuruudella. Artikkelissa Artikkelin ”Biohiilen mahdollisuudet ja ominaisuudet betoniteollisuuden raaka-aineena” kohdassa ”Hankkeen biohiilibetoniset koekappaleet” kerrotaan valmistusprosessiin liittyvistä seikoista tarkemmin.

Ensimmäisten valmistettujen koekappaleiden variaatioiden määrä aiheutti haasteita. Muuttujia oli niin raaka-aineissa, vesi–sementtisuhteessa kuin valmistukseen liittyvissä olosuhteis-

sa. Näin ollen kevään 2022 pihalaattojen valmistuksessa päädyttiin rajaamaan muuttujien määrää. Pihalaattojen valmistukseen käytettiin vain yhtä biohiililaatua ja sementtiä korvattiin biohiilellä kahdella ja viidellä painoprosentilla. Valmistetut pihalaatat tulivat syksyllä 2021 asennettujen pihalaattojen jatkoksi. Taulukossa 1 on nähtävissä laattojen sijoittelu ja numerointi sekä biohiilen korvaussuhteet. Koealueelle valmistettiin myös istutusruokkuja, jotka sijoitettiin laatoituksen viereen (kuva 1).

Taulukko 1. Laattojen sijoittelu koealueella.

1	2	3	4	5	12	13
6	7	6	9	10	14	12
11	5	6	7	8	13	14
9	10	11	1	2	12	13
3	4	1	2	1	14	12
1	3	4	5	6	13	14
7	8	9	10	11	14	12
1 Ei biohiiltä						
2 Biohiilenä jauhettu mäntyhake, ~1 p-% biohiiltä						
3 Biohiilenä jauhettu mäntyhake, ~2 p-% biohiiltä						
4 Biohiilenä jauhettu mäntyhake, ~5 p-% biohiiltä						
5 Biohiilenä jauhettu mäntyhake, ~10 p-% biohiiltä						
6 Biohiilenä mäntyhake, ~2 p-% biohiiltä						
7 Biohiilenä jauhettu mänty, ~2 p-% biohiiltä						
8 Biohiilenä jauhettu leppä, ~2 p-% biohiiltä						
9 Biohiilenä jauhettu purkupuu, ~2 p-% biohiiltä						
10 Biohiilenä jauhettu koivu, ~2 p-% biohiiltä						
11 Biohiilenä jauhettu koivu, ~5 p-% biohiiltä						
12 Ei biohiiltä (valmistettu 2022)						
13 Biohiilenä jauhettu mäntyhake, ~2 p-% biohiiltä (valmistettu 2022)						
14 Biohiilenä jauhettu mäntyhake, ~5 p-% biohiiltä (valmistettu 2022)						



Kuva 1. Pihalaatoituksen viereen sijoitettiin istutusruukut, joista kaksi on biohiilibetonisia (kuva: Miia Sourander).

KOEALUEIDEN SEURANTAKÄYNNIT JA HAVAINNOT

Koalueen pilot-tuotteita käytiin tarkkailemassa säännöllisin väliajoin, jotta pystyttiin seuraamaan niissä tapahtuvia muutoksia eri sääolosuhteissa. Talvikaudella laatoitusta puhdistettiin lumesta ja jäätä, millä demonstroitiin pihalaatoitukseen kohdistuvaa räsitusta (kuva 2 ja 3). Koalueen seuranta-ajanjaksoon sisältyi hyvin erilaisia sääolosuhteita, kuten runsasluminen talvi, lämmin kesä ja sateisia päiviä. Koalueen seuranta perustui aistinvaraiseen havainnointiin. Hankkeessa biohiilibetonin säänkestävyyttä selvitettiin myös pakkasenkestävyysskojeilla, ja tätä käsitellään tämän julkaisun artikkelissa ”Biohiilibetonisten koekappaleiden pakkasenkestävyyden testaus”.



Kuva 2. Koalueen seurantajaksole osui runsasluminen talvi (kuva: Anna Dunderfelt).



Kuva 3. Lumikerroksen alla oli jääsohjoa. Laattojen värisävyt erottuvat kerroksen lävitse (kuva: Miia Sourander).

Hankkeen aikana valmistettiin myös kevyttä hulevesirakennelmaa mallintava biohiilibetoninen pilot-koekappale ja sen referenssikappale (normaali betoni). Ennen varsinaisia valutöitä suunniteltiin ja rakennettiin muotti vesikourulle. Vesikouru muodostui kuppi- ja kouruosasta ja sijoitettiin kenttäolosuhteisiin räystäskourun alle. Biohiilibetoniseoksessa käytettiin jauhettua mäntyhakebiohiiltä ja sillä korvattiin sementtiä seoksessa noin kahden painoprosentin verran. Molemmat sekä biohiilibetoniset että referenssirakennelmat sijoitettiin kenttäolosuhteisiin syksyllä 2022. Vesikoururakenteita tarkkailtiin aistinvaraisesti kenttäolosuhteissa kesäkuuhun 2023 saakka. Seurannassa kiinnitettiin huomiota säänkestävyyteen, mahdolliseen pinnan rapautumiseen ja yleiseen ulkonäköön. Mikkeli puiston koalueen seurantakäynneillä havaittiin, että pihalaattojen sävyerot tulivat esiin erityisesti sateisella ja kostealla säällä. Kuvassa 4 on nähtävissä tummempina pihalaatat, joissa on biohiiltä.



Kuva 4. Sateisellä säällä laattojen sävyerot tulivat selvästi esille (kuva: Miia Sourander).

MIKKELIPUISTON KOEALUEEN PURKAMINEN JA REFERENSSIKAPPALEIDEN VERTAAMINEN

Pihalaatat purettiin koealueelta toukokuussa 2023. Jokaisesta variaatiosta otettiin yksi kappale vertailtavaksi sisätiloissa säilytettyn referenssilaataan. Vertailun tarkoituksena oli havainnoida sääolosuhteista johtuvia mahdollisia muutoksia pihalaattojen ulkonäössä ja rakenteessa. Ulkonäkövertailun jälkeen laatat halkaistiin ja arvioitiin niiden sisäistä struktuuria.

Kuvassa 5 on noin kahden painoprosentin mäntyhakebiohiilipihalaatta, ja vasemmalla on pohjapuoli ja oikealla pintapuoli. R-kirjaimella merkitty on sisällä säilytetty referenssilaatta. Pihalaatat on kuvattu samana päivänä, kun koealue purettiin. Nähtävissä on selvä sävyero ja kosteuden kertyminen laataan, joka on ollut altistuneena sääolosuhteille. Laatan pinta on ehjä.



Kuva 5. Biohiilibetoniset pihalaatat (jauhettu mäntyhake, 2 painoprosenttia), ylempänä kuvasarja pohjapuolelta ja alempana pintapuolelta (kuva: Anna Dunderfelt).

Vertailuna kuvassa 6 on noin kymmenen painoprosentin mäntyhakebiohiilipihalaatta, ja nähtävissä ei ole huomattavia eroja noin kahden painoprosentin mäntyhakebiohiililaattaan verrattuna.



Kuva 6. Biohiilibetoninen pihalaatta (jauhettu 10 painoprosentin mäntyhake) pohjapuolelta kuvattuna. Referenssikappale on vasemmalla. (kuva: Anna Dunderfelt).

Jauhamattomasta karkeasta noin kahden painoprosentin mäntyhakebiohiilestä valmistettu pihalaatta sen sijaan erottui muista koetuotteista ulkonäöllisesti tarkasteltaessa pohjapuolta (kuva 7). Kuvasta voi nähdä, kuinka biohiilipartikkelit ovat nousseet valmistusprosessissa laatan pintaan. Tämä puoli on ollut koealueella maaperään vasten ja on niin sanottu pihalaatan pohja. Laattaa käsiteltäessä pohjasta irtosi mustaa väriä. Pintapuoli ei erottunut muista laatoista eikä värjännyt käsiä. Tässä testauksessa havaittiin, että käytettäessä karkeaa ja isompaa partikkelia sementtiseoksessa massasta ei saada tasalaatuista, ja se näkyy lopputuotteessa.



Kuva 7. Biohiilibetoninen pihalaatta (jauhamaton, karkea ~2 painoprosentin mäntyhake) pohjapuolelta (kuva: Anna Dunderfelt).

Pihalaatat halkaistiin noin kahden viikon päästä koealueen purkamisesta. Pihalaatat halkesivat yllättävän helposti. Halkaistun noin viiden painoprosentin mäntyhakebiohiilipihalaatan (nro 4) ja sen referenssikappaleen (R4) sävyerot ovat havaittavissa hyvin kuvasta 8. Pihalaattojen halkaisemisessa ei käytetty vettä pölynsidontaan. Sävyeron arvioidaan johtuvan joko hydratoitumattomasta sementistä tai kosteudesta. Biohiilen huokoinen rakenne sitoo hyvin kosteutta. Laatta numero yksi on normaali betoni, joka on ollut koealueella, ja sävy on selvästi vaaleampi.



Kuva 8. Halkaistut pihalaatat vertailussa. Vasemmalla on normaali betoni ja keskellä sekä oikealla biohiilibetonit (jauhettu ~5 painoprosentin mäntyhake) (kuva: Anna Dunderfelt).

KEVYIDEN HULEVESIRAKENTEIDEN SEURANNASTA TEHDYT HAVAINNOT

Vertailtaessa normaalia betoni- ja ~2 painoprosentin mäntyhakebiohiilibetonihulevesirakennelmaa havaittiin eroja kuivumisessa ja sävyssä. Kuvassa 9 nähdään, kuinka biohiilibetoni on sitonut itseensä kosteutta ja oletettavasti siitepölyä. Hulevesirakennelmat olivat rakennuksen eri puolilla eivätkä olleet saman sadevesirännin alla. Seurantajakso oli hyvin lyhyt suhteessa hulevesirakennelman käyttöikänsä. Lyhyellä seurantajaksoilla ei huomattu pinnan raputumista tai muita ulkoisia muutoksia betonissa.



Kuva 9. Kevyet hulevesirakenteet, vasemmalla on biohiilibetoninen ja oikealla normaali betoni (kuva: Anna Dunderfelt).

YHTEENVETO

Vaikka koalueiden seurantajaksolle sattui hyvin vaihtelevia sääolosuhteita, on seuranta-aika hyvin lyhyt betonin käyttöikään verraten. Betoniin kohdistuvat ulkoiset tekijät vaikuttavat myös käyttöikään. Koalueen seurannan tulokset kertovat vain vertailututkimuksen omaisesti kokeessa käytetyn normaalin betonin ja biohiilibetonien välillä havaittuja eroavaisuuksia tällä ajanjaksolla.

Huomioitava seikka on, että kokeessa valmistetut pilot-koekappaleet eivät ole verrattavissa teollisesti valmistettuihin betonituotteisiin. Tämä havaittiin esimerkiksi pihalaattojen halkaisun helpoudessa. Hankkeessa koekappaleet tehtiin ilman lisäaineita, eivätkä valmistusolosuhteet olleet vakioituneet. Jatkotutkimus olisi hyvä kohdistaa teollisiin tuotteisiin, jolloin olisi mahdollista testata ja optimoida myös lisäaineiden vaikutusta muun muassa tuotteiden säänkestävyyteen. Jatkotutkimuksella voisi saada lisätietoa biohiilen ja lisäaineiden keskinäisistä vaikutuksista betonissa vaadittavien ominaisuuksien saavuttamisessa.

Käytännökokeiden kautta löydetään keinoja parantaa betonimateriaalien hiilensidontaa. Pilot-kokeiden avulla voidaan jakaa tietoa biohiilen käytön mahdollisuuksista kiertotalouden edistämistyössä niin alalla toimijoille kuin kansalaisille, kuten hankkeen Mikkeli-puiston koalueen tavoitteena oli. Ennen varsinaista kaupallistamista tulee biohiilibetonia tutkia laajemmin laboratoriossa ja tehdä pitkäaikaisseurantaa pilot-mittakaavassa.

LÄHTEET

Betonin käyttö ympäristörakentamisessa. 2022. Betoniteollisuus ry. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2022/05/Betonin-kaytto-ymparisto-rakentamisessa_2022.pdf [viitattu 25.4.2023].

Mikkeli puisto. s.a. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://mikkeli puisto.fi/> [viitattu 17.4.2023].

LABORATORIOMITTAKAAVAN VERTAILUKOKEET BIOHIILIBETONEILLE

Anna Dunderfelt & Miia Sourander

Betonituotteiden ja -rakenteiden soveltuvuuden arviointi käyttökohteeseen on erityisen tärkeää. Lisäksi paikallisten olosuhteiden arviointi on merkittävässä roolissa, jotta voidaan vaikuttaa betonin säilyvyysvaatimuksiin. Paikallista ympäristöaristusta betonituotteisiin tulee esimerkiksi alueen liikenteestä ja liikenneväylien suolauksesta. (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 64, 76.)

Ympäristöolosuhteet voivat aiheuttaa betoniin myös kemiallisia rasiuksia. Kemiallinen rasiutus voi olla peräisin esimerkiksi jätevedestä tai maaperästä, kuten sulfiittisavesta, joka aiheuttaa betoniin sulfaattirasiutusta. Lisäksi betoniin voi kulkeutua kemiallisia yhdisteitä teollisuuslaitoksista ja maataloudesta. Kemikaalit vaurioittavat kovettunutta betonia liuottamalla, paisuttamalla ja heikentämällä sen ominaisuuksia. (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 68.)

On tärkeää selvittää myös sitä, ettei rakennusmateriaaleista itsestään haihdu ilmaan haitallisia aineita, kuten VOC- ja PAH-yhdisteitä. Lisäksi tulee tutkia, ettei materiaaleista liukene haitallisia aineita esimerkiksi hulevesien mukana ympäristöön. Bibe-hankkeen toimenpiteessä 3 tehdyillä kokeilla selvitettiin biohiilen vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Laboratoriokokeilla selvitettiin biohiilibetonimateriaalien VOC- ja PAH-yhdisteitä ja vertailukohteenä käytettiin normaalia betonimateriaalia, jossa ei ollut biohiiltä. Lisäksi vertailukokeilla selvitettiin veteen kosketuksessa olevan betonin ja biohiilibetonin vaikutusta vedenlaatuun. Kokeella selvitettiin, onko erilaisten betonimateriaalien välillä eroavaisuuksia veteen liukenevien aineiden suhteen.

SISÄILMAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Rakennuksen sisäilmaan vaikuttavat useat seikat. Kosteus- ja mikrobivaurioiden lisäksi sisäilmaongelmia saattavat aiheuttaa materiaalien kemialliset ja hiukkasmaiset päästöt (Holmström ym. 2016, 14.) Useat lait ja asetukset asettavat rakennusmateriaaleille vaatimuksia. Rakennuksien ja asuintilojen terveydellisistä oloista on säädetty maankäyttö- ja rakennuslaissa (132/1999), jonka 117 §:ssä on rakentamista koskevat vaatimukset (Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132). Terveydensuojelulain (1994/763) 26 ja 27 §:ssä on asunnon ja muun oleskelutilan sisäilman vaatimuksista ja esiintyvistä terveyshaitoista. Työ-

turvallisuuslaissa puolestaan säädetään työympäristön vaatimuksista (Työturvallisuuslaki 23.8.2002/738). Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista (545/2015) on annettu toimenpiderajat haihtuville orgaanisille yhdisteille. Asetuksen 15 §:ssä on määritetty haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden toimenpideraja huoneilmassa. (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus...2015.)

Sisäilmassa voi olla jopa satoja kaasumaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). VOC-yhdisteitä voi vapautua asuntojen sisäilmaan esimerkiksi rakennus- ja sisustusmateriaaleista, ja ne voivat aiheuttaa siellä oleskeleville ihmisille terveyshaittaa. On huomioitava myös, että rakennuksen iällä on vaikutusta VOC-yhdisteiden pitoisuuksiin. Materiaaleilla voi olla primääriemissioita, ja esimerkiksi uusilla materiaaleilla voi olla lyhytaikaisia ominaispäästöjä, jotka voivat aiheuttaa ensimmäisinä kuukausina runsaita VOC-pitoisuuksia. Haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä on eri toimijoiden asettamia ohjearvoja ja toimenpiderajoja koskien esimerkiksi materiaalien päästöjä, asunnossa esiintyviä pitoisuuksia ja työperäisiä altistumisia. (Juntunen ym. 2022, 5, 10.)

Valtaosa sisäympäristössä esiintyvistä orgaanisista yhdisteistä on haihtuvia, ja ne höyrystyvät helposti huonelämpötilassa ja ovat kaasumaisessa muodossa. Esimerkiksi WHO ja ISO-standardi jakavat haihtuvat orgaaniset yhdisteet kolmeen luokkaan niiden haihtuvuuden mukaan (Wallenius ym. 2021, 8–9):

- erittäin haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VVOC)
- haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC)
- puolihaihtuvat orgaaniset yhdisteet (SVOC).

Näiden lajittelujen lisäksi ne voidaan luokitella kemiallisen rakenteen ja toiminnallisten ryhmien mukaisesti, esimerkkinä alifaattiset ja aromaattiset hiilivedyt (Wallenius ym. 2021, 9). VOC-yhdisteet pitävään sisällä ne haihtuvat orgaaniset yhdisteet, joiden kiehumispisteominaisuus asettuu välille 50–260 °C, ja 20 °C:n lämpötilassa höyrönpaine on 0,01 kPa tai suurempi. VOC-yhdisteiden yhteispitoisuudesta käytetään lyhennettä TVOC (total VOC). (Holmström ym. 2016, 67.) TVOC-yhdisteiden pitoisuuksille on olemassa viitearvoja, mutta pitoisuutta ei tule käyttää terveysvaikutusten arvioinnissa, sillä arviointiin tarvitaan lisätietoa TVOC-pitoisuuden koostumuksesta (Wallenius ym. 2021, 68).

Alifaattisia hiilivetyjä esiintyy sisäilmassa yleensä yksittäisinä yhdisteinä, ja niiden pitoisuudet ovat pieniä. Lähteinä ovat muun muassa useat rakennusmateriaalit, kosmetiikka ja puhdistusaineet. Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH-yhdisteet) luokitellaan puolihaihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin ja hiukkasmaisiin orgaanisiin yhdisteisiin. Sisäilmaan PAH-yhdisteitä voi tulla rakennusmateriaaleista, jotka sisältävät esimerkiksi kivihiihterä. Tällaisia yhdisteitä voi esiintyä vanhoissa kosteuseristeissä. Sisäilmaan voi tulla myös PAH-yhdisteitä liikenteestä, ruoanlaitosta ja puun- ja kynttilöiden polttamisesta. (Wallenius ym. 2021, 10.)

RAKENNUSMATERIAALIEN LAATUA VALVOTAAN

Rakennustuotteiden valmistajalla on velvollisuus testata tuotteen ominaisuudet, ja lisäksi valmistajan on huolehdittava, että tuotannon laadunvalvonta on harmonisoidun tuotes-tandardin mukaista. CE-merkinnän saa laittaa vain sellaisiin tuoteryhmiin, joissa sille on edellytys. CE-merkinnän väärinkäyttöön voivat puuttua viranomaiset, ja Suomessa asiaa valvoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes). CE-merkinnän kiinnittäminen tuotteeseen antaa tuotteelle vapaan liikkumisoikeuden Euroopan talousalueella. (Järnström 2017.)

Rakennusmateriaalien tuoteturvallisuusarviointeihin käytetään EU-LCI-arvoja (Lowest Concentration of Interest), jotka toimivat ohjearvoina monille haihtuville orgaanisille yhdisteille. Arvot ovat eurooppalaisten asiantuntijoiden laatimia, ja ne perustuvat epidemiologiseen ja toksikologiseen tutkimusnäyttöön. EU-LCI-arvot ovat pitoisuustasoja, jotka eivät nykytietämyksen mukaan todennäköisesti aiheuta väestölle haitallisia terveysvaikutuksia pitkälläkään aikavälillä. Arvot ovat siis terveysperusteisia vertailuarvoja, ja niiden avulla pystytään arvioimaan uusien rakennusmateriaalien terveysriskejä hengitysteiden kautta tapahtuvalle altistumiselle. EU-LCI-arvot on tarkoitettu rakennusmateriaalien päästöjen arviointiin koeolosuhteissa. Niitä ei käytetä sisäilman viitearvoina. (Wallenius ym. 2021, 21, 30.)

Rakennusmateriaalien M1-luokituksella edistetään vähäpäästöisten materiaalien käyttöä, ja se takaa, ettei tuote haise. M1-luokitusmerkin perusteet tulevat standardista EN ISO 14024:2018. Luokitus asettaa raja-arvot rakennusmateriaalien haihtuville orgaanisille yhdisteille. Rakennusmateriaalien päästöluokitus on vapaaehtoista, ja maahantuoja ja valmistajat voivat hakea sitä tuotteelleen (Mikä on M1 s.a.).

MATERIAALIN EMISSIOTUTKIMUS

Materiaalin emissiotutkimusmenetelmän valintaan vaikuttaa se, mitä materiaalista halutaan selvittää. Tärkeää on huomioida, että kaikkiin käyttötarkoituksiin ei ole mahdollista käyttää samoja menetelmiä. Yksittäinen testaus ja mittaus eivät myöskään ole riittäviä kertomaan koko totuutta. (Leino 2020.)

Bulk- eli kokonaisemissiomenetelmässä materiaalinäyte hienonnetaan, jotta saadaan selvitettyä päästöt sen kaikista osista eikä vain pinnoilta. Bulk-menetelmän kautta saatuja tuloksia ei voi käyttää sisäilman pitoisuuksien arviointiin, eivätkä ne myöskään sovellu rakennusmateriaalien M-päästöluokituksen raja-arvojen vertailuun. Saaduilla tuloksilla ei voi tehdä terveyshaitan arviointia. Bulk-menetelmällä saadut tulokset ovat semikvantitatiivisia, eli ne ovat määrällisesti suuntaa antavia. Näytteenkäsittely ei ole vakioitua, joten eri laboratorioilta saatuja kokonaisemissiotuloksia ei voi verrata keskenään. (Wallenius ym. 2021, 25.)

VOC- JA PAH-YHDISTEIDEN KOEKAPPALEET JA ANALYYSIT

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puupolin tiloissa valmistettiin VOC- ja PAH-yhdisteiden analysointiin kolme erilaista betonia. Kahdessa koeseoksessa oli sementtiä korvattu biohiilellä noin kahden painoprosentin verran. Koekappaleissa käytetyt biohiilet olivat mäntyhake ja A-luokan purkupuuh. Vertailukohteena oli normaali betoni, johon ei lisätty biohiiltä. Betoni- ja biohiilibetoninäytteet lähetettiin ulkopuoliseen laboratorioon analysoitavaksi. Koekappaleet hienonnettiin ennen lähetystä ja pakattiin laboratorion saatuun ohjeiden mukaisesti.

VOC-yhdisteet analysoitiin materiaalinäytteistä standardiin ISO 16000-6:2021 perustuvalla menetelmällä KEMIA-TY-031. TVOC-pitoisuus on määritetty tolueeniekvivalenteina ja osa yksittäisistä yhdisteistä on määritetty niiden omilla vasteilla. Tällä menetelmällä toteutettu materiaalianalyysi ei ole kvantitatiivinen, vaan se kuvastaa pelkästään, mitä aineita ja missä suhteessa ne emittoituvat käytetyissä olosuhteissa. Materiaalinäytteistä analysoitiin PAH-yhdisteiden emissiot ja ilmanäytteestä EPA:n priorisoimat 16 PAH-yhdistettä sekä 2- ja 1-metyyli-naftaleenit. PAH-yhdisteet analysoitiin KEMIA-TY-044-menetelmällä. (Työterveyslaitos 2023b.)

TULOKSET JA YHTEENVETO

VOC-emissioista ja PAH-yhdisteiden emissioista on tehty kaksi eri analyysiä Työterveyslaitoksella ja tulokset on esitetty taulukossa 1 kootusti. Tässä artikkelissa esitetyt tulokset koskevat vain tätä koetta ja koejärjestelyä. Tulokset on ilmoitettu yksikössä $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$ eli mikrogrammaa kuutiometriä ja näytegrammaa kohti.

Kokeessa normaali betoni, johon ei ole lisätty biohiiltä, toimi referenssinäytteenä. Biohiilibetoneja verrattiin referenssinäytteeseen. Biohiilibetonin ja referenssinäytteiden analyysituloksien välillä ei ole näissä kokeissa havaittavissa merkittäviä eroja. Biohiilibetoninäytteissä hiilivetyseoksien pitoisuudet ovat hiukan korkeampia.

Taulukko 1. TVOC- ja PAH-yhdisteiden tulokset kootusti (tiedot: Työterveyslaitos 2023a; Työterveyslaitos 2023b).

Näyte	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$)	Hiilivety- seos* ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$)	Kaasumaiset PAH-yhdisteet, puolihaihtuvat PAH-yhdisteet, kiin- teät PAH-yhdisteet yhteensä ($\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$)
normaali betoni	<10	1	<0,11
normaali betoni	<10	-	<0,11
normaali betoni	<10	-	<0,10
mäntyhake biohiilibetoni ~2 p-%	<10	3	<0,10
mäntyhake biohiilibetoni ~2 p-%	<10	3	<0,10
mäntyhake biohiilibetoni ~2 p-%	<10	2	<0,10
purkupuuhiohiilibetoni ~2 p-%	<10	5	<0,09
purkupuuhiohiilibetoni ~2 p-%	<10	3	<0,09
purkupuuhiohiilibetoni ~2 p-%	<10	4	<0,09

(<) pitoisuus alle määrittäysrajan

*Hiilivetyseoksen kiehumispiste noin 190–230 °C, sisältää alifaattisia hiilivetyjä

Työterveyslaitoksen julkaisussa Kooste toimistoympäristöjen epäpuhtaus- ja olosuhdetasoi-
ta, joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-ongelmiin (2017) mainitaan, että osalle mate-
riaaleista on asetettu viitearvot asiakas- ja seurantanäytteiden bulk-emissiotulosten kautta.
Työterveyslaitoksen asettamia viitearvoja on mahdollista käyttää bulk-emissiomenetelmällä
tutkittujen materiaalien tulosten arviointiin. Huomioitavaa on, että näiden analyysien
kautta saadut tulokset eivät vastaa huoneilmassa kerättyjä näytteitä. Myöskään tuloksia
ei voi käyttää materiaalien päästöluokituksen arvioinnissa (M-luokat). Bulk-emissioiden
viitearvot tasoite- ja betonimateriaaleille ovat TVOC 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$ ja 2-etyyli-1-heksanoli 40
 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{g}$. (Työterveyslaitos 2017, 5.)

Analyysituloksiin on voinut vaikuttaa koekappaleiden valmistusmenetelmä ja koekap-
paleiden esikäsitteily ennen laboratorioon lähettämistä. Tuloksissa havaitut erot voivat
aiheutua edellä mainituista toimista. Näiden tulosten perusteella ei voida päätellä biohiilen
aiheuttavan merkittäviä muutoksia materiaaliin VOC- ja PAH-yhdisteiden pitoisuuksiin.

Koe oli suppea, ja siinä oli mukana vain kolme erilaista näytettä, joissa kahdessa sementtiä
korvattiin erilaisilla biohiilillä noin kahden painoprosentin osuudella. Lisätutkimuksia on
hyvä tehdä näytteisiin, joissa sementtiä on korvattu biohiilellä suuremmilla suhteilla. Myös
näytteen tutkiminen eri menetelmillä voi olla perusteltavaa, jotta analyysillä saadut tulok-
set vastaisivat huoneilmassa kerättyihin näytteisiin, ja näin tuloksia voisi verrata käytössä
oleviin toimenpiderajoihin ja viitearvoihin. Lisätutkimukset kannattaa tehdä vakioituissa

olosuhteissa, jotta koekappaleisiin kohdistuvien muuttujien määrää saadaan rajattua ja todellinen biohiilen vaikutus saadaan luotettavammin esille.

VETEEN LIUKENEVAT AINEET -KOE

Betoni on inertti materiaali, josta ei juurikaan liukene haitallisia aineita veteen tai maaperään. Tämän takia betoni on turvallinen rakennusmateriaali pohjavesialueella ja sitä voidaan käyttää juomavesikaivoina ja -putkistoina. (Mannonen s.a.) Betonin valmistuksessa betonituotteeseen kemiallisesti vaikuttavia tekijöitä ovat kiviaineksen epäpuhtaudet, sideaineen koostumus ja laatu sekä sekoitusveden ominaisuudet. Valmistettuun betonituotteeseen voi päätyä ulkoisia haitta-aineita, kuten klorideja. Nämä voivat kulkeutua betoniin erilaisista rasisuslähteistä, esimerkiksi maantiesuoloista. (Pyy 2023.) Betonin oikeanlainen koostumus varmistaa betonin kemikaalikestävyyden. Kemiallisen kestävyuden näkökulmasta erittäin tärkeitä ominaisuuksia ovat betonin tiivis ja ehjä pinta, jolloin haitallisten aineiden on vaikea tunkeutua siihen. (Kettunen 2018.)

Betoni on huokoista materiaalia. Kun betoni on kosketuksissa veden kanssa, liukenee se ajan myötä, ja etenkin veden virtauksen lisääntyessä liukeneminen kasvaa. Vaikka betoniin ei kohdistuisi ulkoisia tekijöitä, tapahtuu siinä pikkuhiljaa muutoksia, sillä betoni ei ole kemiallisesti kokonaan tasapainossa. Veden laatu vaikuttaa merkittävästi betonin kestävyuteen. Betonissa on vesiliukoisia aineita, ja niistä liukoisin on kalsiumhydroksidi (portlandiitti), jota muodostuu sementin ja veden reagoiessa keskenään. Masuunikuonasementistä valmistetussa betonissa muodostuu vähänlaisesti kalsiumhydroksidia, ja näin ollen sen liukoisuus on portlandsementtiin verrattuna vähäisempää ja sen pH-arvo on myös alhaisempi. (Kekki ym. 2008, 78–79, 81.) Veden liuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa (Kekki ym. 2008, 81):

- veden kovuus, virtausolosuhteet ja lämpötila
- sementtityyppi ja betonin tiheys
- betonirakenteiden muoto, mittasuhteet ja ikä.

Biohiilessä itsessään voi olla joitain haitta-aineita. Erityisesti se voi sisältää raskasmetalleja, dioksiineja ja furaaneja sekä polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH) ja polykloorattuja bifeenylejä (PCB). PAH-yhdisteet ovat yleensä biohiilen tuotantoprosessin sivutuotteita, ja niiden määrään voidaan vaikuttaa pyrolyysin olosuhteiden hyvällä hallinnalla. PCB-yhdisteiden määrään vaikuttaa taas biohiilen raaka-aineen klooripitoisuus. Yleensä kasviperäisissä biohiilissä ei ole haitallisia määriä PCB-yhdisteitä. Biohiilen raaka-aineiden raskasmetallit harvoin poistuvat pyrolyysin aikana, vaan niillä on tapana rikastua lopputuotteeseen. Tämän takia biohiilen raaka-aineen laatu on keskeisin vaikuttava tekijä raskasmetallien suhteen. Haitta-aineiden välttämiseksi biohiilen loppukäyttäjän on turvallisin hankkia laatusertifioitua biohiiltä. Sertifikaatti velvoittaa valvomaan tuotteen haitta-ainepitoisuuksia. (Elo ym. 2023, 29.)

VETEEN LIUKENEVAT AINEET -KOKEEN KOEKAPPALEET JA ANALYYSIT

Kokeessa vertailtiin veteen kosketuksessa olevan normaalin betonin ja biohiilibetonin vaikutusta vedenlaatuun. Kokeen avulla pyrittiin selvittämään, onko erilaisten betonimateriaalien välillä eroa siinä, mitä aineita niistä liukenee.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puupolin tiloissa valmistettiin koetta varten betoni- ja biohiilibetonikuutiot. Kokeessa saatuja tuloksia voidaan verrata vain tämän kokeen koekappaleiden välillä. Veteen liukenevat aineet -koe suoritettiin laboratorio-olosuhteissa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Mikkelin ympäristölaboratoriossa. Kokeessa oli viisi erilaista koekuutiota, jokaista kaksi rinnakkaista näytettä. Koekuutioissa biohiilen raaka-aine ja sementin korvaussuhde olivat erilaisia. Kokeessa käytettävät koekuutiot olivat seuraavanlaisia:

- normaali betoni, ei biohiililisäystä
- biohiilibetoni, jossa sementtiä korvattu -2 p-%:n mäntyhakebiohiilellä
- biohiilibetoni, jossa sementtiä korvattu -2 p-%:n purkupuubiohiilellä
- biohiilibetoni, jossa sementtiä korvattu -5 p-%:n mäntyhakebiohiilellä
- biohiilibetoni, jossa sementtiä korvattu -5 p-%:n purkupuubiohiilellä.

Koekappaleet leikattiin ennen koetta sopivan kokoisiksi, jotta ne saatiin kokeessa käytettävän astian sisään. Koekappaleiden lisäksi kokeessa oli kaksi rinnakkaista nollanäytettä, jotka olivat laboratorion ultrapuhdasta vettä.

KOKEEN TOTEUTUS

Koekappaleet huuhdeltiin ennen koetta ultrapuhdaassa vedessä, jotta niiden pinnalta irtoavaa hienoa pölyä saatiin vähennettyä. Astioissa olevan veden pH-arvot mitattiin ennen kokeen alkua. Sen jälkeen koekappaleet upotettiin 6,4 litran kokoiseen astiaan, jossa oli ultrapuhdasta vettä neljä litraa. Astia oli elintarvikekelpoista muovia, ja ne oli huuhdeltu ennen koetta ultrapuhdaalla vedellä. Kokeessa käytettiin tasoravistelijoita: IKA laboratechnik HS501 digital (kuva 1), jonka ravistelunopeus säädettiin arvoon 92–93/min, ja Edmund Bühler SM 25, jonka ravistelunopeus säädettiin arvoon 97,5/min.



Kuva 1. Koekappale astian sisällä, ravistelunopeus säädetty sopivaan kierrosluukuun (kuva: Miia Sourander).

Koekappaleet olivat tasoravistelijoissa kolmena peräkkäisenä päivänä, yhteensä noin 15 tuntia. Tasoravistelijoiden edestakainen liike sai aikaiseksi veden sekoittumisen. Kokeen loputtua astioiden vedestä mitattiin pH-arvo ympäristölaboratoriossa. Vedestä otettiin näytteet, jotka lähetettiin ulkopuoliseen laboratorioon analysoitavaksi. Vesinäytteistä tehtiin seuraavat laboratorioanalyytit: pH, sähkönjohtavuus, PAH-yhdisteet, metallit, DOC, TDS, TOC, kloridi, fluoridi ja sulfaatti.

TULOKSET JA POHDINTAA

Biohiilibetonisten koekappaleiden vesinäytteiden analyysituloksia vertailtiin normaalin betonin analyysituloksiin. Kokeessa tutkittiin myös, onko biohiilen eri lähtöraaka-aineilla ja sementin korvausosuudella vaikutusta veden laatuun ja koekuutioon. Kokeen loputtua vertailtiin myös aistinvaraisesti koekappaleen ulkonäköä ja rakennetta. Kuvassa 2 on vertailussa koekappaleet noin viiden painoprosentin mäntyhakebiohiilibetoni A-näyte ja noin viiden painoprosentin purkupuubiohiilibetoni B-näyte. Purkupuubiohiilestä valmistettu koekappale on selvästi sitonut itseensä tehokkaammin vettä ja on säilyttänyt tumma. Molemmat näytteet ovat kuvanottohetkellä nostettu suoraan ultrapuhtaasta vedestä paperin päälle. Kuivumista ei ole ehtinyt tapahtua.



Kuva 2. Vasemmalla ~5 painoprosentin mäntyhakebiohiili A-näyte ja vasemmalla ~5 painoprosentin purkupuubiohiili B-näyte (kuva: Anna Dunderfelt).

Betonin pH on 12–14, ja ollessaan vesijohtoveden kanssa kosketuksessa hakeutuu se kemialliseen tasapainoon (Kekki ym. 2008, 81). Tuloksista nähdään, että veden pH-arvo nousee betonikappaleen emäksisyyden vuoksi. Näytteiden pH-arvojen välillä ei ole poikkeavuuksia. Tässä kokeessa ei havaittu, että biohiililisyksellä olisi vaikutusta veden pH-arvoon tutkituilla korvausprosenttiosuuksilla. Kokeessa saatuja analyysituloksia voidaan verrata vain tämän kokeen koekappaleiden välillä.

Rinnakkaisnäytteiden analyysitulokset on esitetty taulukossa 2. Taulukossa on laskettu rinnakkaisnäytteiden keskiarvo ja keskihajonta. Variaatiokertoimen avulla nähdään keskihajonnan ja keskiarvon suhde prosentteina. Lisäksi taulukossa on laskettu rinnakkaisnäytteiden prosentuaalinen poikkeama pienemmästä tuloksesta. Tuloksia tarkastellessa

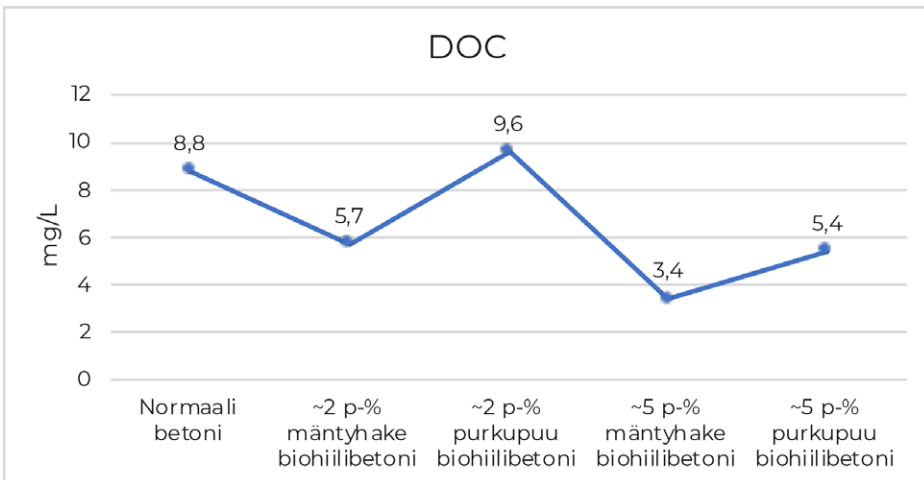
huomataan, että noin viiden painoprosentin mäntyhakebiohiilibetoniset rinnakkaisnäytteet (taulukossa 2 sinisellä) poikkeavat merkittävästi toisistaan joidenkin tulosten kohdalla. Poikkeamaa selittää mahdollinen satunnaisvirhe näytteen valmistus- ja käsittelyprosessissa, näytteenotossa tai laboratorioanalyyseissa. Purkupuubiohiilibetonin rinnakkaisnäytteissä on nähtävissä DOC-pitoisuuksissa poikkeavuutta molemmissa korvausprosentteissa.

Taulukko 2. Jokaisesta koekappaleesta oli kaksi rinnakkaisnäytettä (A ja B). (tiedot: ALS Finland Oy 2023)

Näyte	Sähkönjohtavuus		Natrium		Kalsium		DOC	
	mS/m	%	µg/L	%	µg/L	%	mg/L	%
normaali betoni A	138		26100		89700		7,3	
normaali betoni B	144	4,35	28700	9,96	90600	0,01	10,4	43,25
keskiarvo	141		27400		90150		8,8	
keskihajonta	4,24	3,01	1838	6,71	636,40	0,71	2,2	25,15
~2 p-% mäntyhake biohiilibetoni A	126	4,13	28700		70800	6,15	5,7	0,35
~2 p-% mäntyhake biohiilibetoni B	121		29400	2,44	66700		5,7	
keskiarvo	124		29050		68750		5,7	
keskihajonta	3,54	2,86	495	1,70	2899,14	4,22	0,0	0,25
~2 p-% purkupuubiohiilibetoni A	136	4,13	28500	0,71	75700		8,2	
~2 p-% purkupuubiohiilibetoni B	142		28300		84700	11,89	10,9	32,93
keskiarvo	139		28400		80200		9,6	
keskihajonta	4,24	3,05	141	0,50	6363,96	7,94	1,9	19,99
~5 p-% mäntyhake biohiilibetoni A	65		17100		41400		2,8	
~5 p-% mäntyhake biohiilibetoni B	131	100,61	38600	125,73	66800		4,0	43,88
keskiarvo	98		27850		54100		3,4	
keskihajonta	46,46	47,33	15203	54,59	17960,51	33,20	0,9	25,45
~5 p-% purkupuubiohiilibetoni A	118		30700		69500	5,30	7,4	110,57
~5 p-% purkupuubiohiilibetoni B	121	2,54	33100	7,82	66000		3,5	
keskiarvo	120		31900		67750		5,4	
keskihajonta	2,12	1,78	1697	5,32	2474,87	3,65	2,7	50,35

Sähkönjohtavuuden arvot ovat normaalilla betonilla korkeammat, ja biohiilen korvausosuuden kasvaessa arvot lähtevät laskuun (taulukko 2). Esimerkiksi normaalin betonin rinnakkaisnäytteiden keskiarvo 141 mS/m eroaa noin viiden painoprosentin purkupuubiohiilibetonin näytteiden keskiarvosta 120 mS/m. Tuloksista voidaan päätellä, että näissä kokeissa biohiili vaikutti sähkönjohtavuuteen. Liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuudet ovat nähtävissä taulukossa 2. Kuva 3 havainnollistaa mäntyhakebiohiilibetonilla olevan alhaisemmat DOC-arvot purkupuubiohiilibetoniin verrattuna. Normaaliin betoniin verrattuna sekä mäntyhake että purkupuun viiden painoprosentin biohiilen korvausosuudella laskevat DOC-pitoisuutta. Biohiilellä on tutkimusten mukaan kyky sitoa haitallisia aineita.

Natriumin pitoisuuksissa nähdään lievää nousua biohiilen korvausmäärän kasvaessa betonissa (taulukko 2). On mahdollista, että biohiilessä itsessään on natriumia. Biohiilen lähtöraaka-aine vaikuttaa lopputuotteen natriumpitoisuuteen. Kalsiumpitoisuus laskee näytteen sementin määrän laskiessa (taulukko 2). Sementti sisältää kalsiumia, ja sementin määrän vähentyessä biohiilikoekappaleissa kalsiumpitoisuus pienenee.



Kuva 3. Näytteiden DOC-pitoisuuksien keskiarvot (tiedot: ALS Finland Oy 2023).

Näytteiden PAH-yhdisteiden kokonaissumma jää alle määrityspitoisuuden (taulukko 3). Naftaleenipitoisuuksia tarkasteltaessa huomataan, että nollanäytteessä on korkeimmat pitoisuudet. Nollanäyte on ultrapuhdasta vettä. Naftaleenipitoisuus aiheutuu jostain muusta muuttujasta kuin betoni- tai biohiilibetonikoekappaleista.

Kokonaisuudessaan veteen liukenevat aineet -kokeen tuloksia tarkasteltaessa näytteiden pitoisuudet olivat alhaisia. Tutkimusta siitä, miten virtaavan veden laboratoriokokeissa biohiilibetoni vaikuttaa veden laatuun ja tuotteen kestävyys, on tarpeellista jatkaa. Tällä saadaan demonstroitua biohiilibetonin käyttömahdollisuutta hulevesirakennelmissa.

LÄHTEET

ALS Finland Oy. 2023. Analyysiraportti. PDF-dokumentti. Saapunut 23.1.2023, 26.1.2023, 2.2.2023.

Betonin käyttö ympäristörakentamisessa. 2023. Betoniteollisuus ry. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2023/01/Betonin-kaytto-ymparisto-rakentamisessa_2023.pdf [viitattu 11.5.2023].

Elo, A., Hagner, M., Kainulainen, A., Kuoppamäki, K., Laulumaa, P., Männistö, A., Nuotio, A.-K., Riikonen, A., Salo, E. & Tiilikkala, K. 2023. Biohiiliopas viher- ja ympäristösuunnitteluun, -rakentamiseen ja kunnossapitoon. Viherympäristöliiton julkaisu 73. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vyl.fi/alan-kehittaminen/hankkeet-ja-selvitykset/biohiiliopas/> [viitattu 26.6.2023].

Holmström, J., Kantola, J., Kauriinvaha, E., Kettunen, A.-V., Komulainen, J., Laamanen, P., Laine, K., Makkonen, H., Niemi, S., Pitkäranta, M., Saarinen, J., Sandström, V., Tuovinen, H. & Viljanen, K. (toim. Pitkäranta, M.) 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. Ympäristöopas 2016. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4626-8> [viitattu 12.5.2023].

Juntunen, M., Salmela, A., Jalkanen, K., Hovi, H., Wallenius, K. & Hyvärinen, A. 2022. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. THL – Työpaperi 5/2022. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet asunnoissa: pitoisuus, yleisimmät yhdisteet ja terveysvaikutukset. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-809-5> [viitattu 20.4.2023].

Järnström, H. 2017. Rakennustuotteiden emissiot & CE merkintä – miten valmistajan tulee varautua. VTT Expert Services Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://cdnmedia.eurofins.com/european-east/media/2847974/emissiotestaus_ce-merkinnan_myota_042017.pdf [viitattu 7.8.2023].

Kekki, T., Kaunisto, T., Keinänen-Toivola, M. & Luntamo, M. 2008. Vesijohtomateriaalien vauriot ja käyttöikä Suomessa. Vesi-instituutin julkaisuja 3. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.samk.fi/wp-content/uploads/2016/06/Vesijohtomateriaalien-vauriot-ja-k%C3%A4ytt%C3%B6ik%C3%A4-Suomessa.pdf> [viitattu 21.6.2023].

Kettunen, T. 2018. Betonin kemikaalikestävyys ja suojaaminen teollisuusrakentamisessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Diplomityö. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201805221778> [viitattu 21.6.2023].

Leino, K. 2020. Kuinka arvioida materiaaliemissioiden vaikutusta sisäilman kemialliseen laatuun. Sisäilmastoseminaari 10.3.2020, Messukeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.sisailmayhdistys.fi/pdf/Leino_Katri.pdf [viitattu 21.4.2023].

Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132.

Mannonen, P. s.a. Betonipaalujen ekologisuus. Rakennusteollisuus. Betoniteollisuus ry. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/Betonipaalujen-ekologisuus-Petri-Mannonen-Betoniteollisuus-ry-1.pdf> [viitattu 22.6.2023].

Mikä on M1? s.a. Rakennustietosäätiö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://cer.rts.fi/rakennusmateriaalien-paastoluokitus-m1/mika-on-m1/> [viitattu 21.6.2023].

Pyy, H. 2023. Betonirakenteiden korjaaminen 2023. Betonirakenteiden kemialliset vauriot. Betoniyhdistys. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssit/betonirakenteiden-korjaaminen-ja-tutkiminen/hannu-pyy-betonin-korjauskurssi-2023-kemialliset-vauriot.pdf> [viitattu 21.6.2023].

Rakennusten kosteustekninen toimivuus. 2020. Ympäristöministeriön ohje rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta. Ympäristöministeriö. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje_Rakennusten-kosteustekninen-toimivuus-2020-F3A686EA_E374_4983_A396_CC15D6830B7B-156354.pdf/323bffe4-19f4-9b97-6c59-d314db622cb4/Ohje_Rakennusten-kosteustekninen-toimivuus-2020-F3A686EA_E374_4983_A396_CC15D6830B7B-156354.pdf?t=1603260109033 [viitattu 22.6.2023].

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015. 23.4.2015.

Terveydensuojelulaki 19.8.1994/763.

Työturvallisuuslaki 23.8.2002/738.

Työterveyslaitos. 2017. Kooste toimistoympäristöjen epäpuhtaus- ja olosuhtetasoista (rakennuksissa, joissa on koneellinen ilmanvaihto), joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-ongelmiin. Päivitetty 27.2.2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mip.fi/images/docs/fi/sisaympariston-viitearvoja.pdf> [viitattu 22.5.2023].

Työterveyslaitos. 2023a. VOC-emissiot materiaalista analyysivastaus. Raportointi 31.3.2023. PDF-dokumentti.

Työterveyslaitos. 2023b. PAH-yhdisteiden emissiot materiaalista analyysivastaus. Raportointi 18.4.2023. PDF-dokumentti.

Wallenius, K., Hovi, H., Mahiout, S., Remes, J., Rautiala, P., Jokela, P., Leino, K. & Liukkonen, T. 2021. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet toimistotyypisissä työympäristöissä: Päästölähteet, mittausmenetelmät, pitoisuustasot ja terveysvaikutukset. Työterveyslaitos, Helsinki. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:9789522619570> [viitattu 21.4.2023].

BIOHIILIBETONISTEN KOEKAPPALEIDEN PURISTUSLUJUUDEN JA TIHEYDEN MITTAUS

Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Sami HUUHTANEN

Betonirakenteiden turvallisuus ja niiden käyttöikä ovat riippuvaisia käytetyn betonirakenteen puristuslujuudesta. Lujuudella tarkoitetaan betonin lujuusluokkaa, mutta siihen ei ole olemassa yhtä määritelmää, vaan lujuus määritellään tilastollisilla menetelmillä. Sitä arvioitaessa on tärkeää tietää mittaamisessa käytetyt menetelmät ja testaustavat. Betonin puristuslujuuteen vaikuttavat muun muassa (Betoni on luja... s.a.):

- testikappaleen muoto
- testikappaleen murtotapa
- kiviainesrakeiden koko suhteessa testikappaleeseen
- puristusnopeus
- testikappaleen puristuspintojen suoruus
- puristimen rungon jäykkyys
- tiivistämisen onnistuminen valuissa
- testikappaleen säilytysolosuhteet.

Betonin puristuslujuutta määrittäessä tulee käyttää testausmenetelmiä, jotka ovat betonistandardisarjan 12390 mukaisia. Tällöin voidaan varmistua siitä, että menetelmien tarkkuus ja toistettavuus on tutkittu. (Betoni on luja... s.a.) Puristuslujuutta pidetään kovettuneen betonin yhtenä tärkeimpänä ominaisuutena. Valettujen koekappaleiden puristuslujuuden määrittämiseen käytetään standardia SFS-EN 12390-3 (Kymilabs – Betonitestauspalvelut s.a.). Puristuslujuudella osoitetaan sitä, kuinka testattava betonikappale kestää puristavaa voimaa. Puristuslujuuden yksikkö on megapascal (MPa). (Pyörny 2018, 24.) Betonin puristuslujuudet voidaan luokitella (Tulossa 150-... s.a.) seuraavasti:

- yleinen (normaali) 30–80 MPa
- korkealujuus 60–100 MPa
- erikoisluja 50–250 MPa.

Betonin lujuutta voidaan ilmaista lieriö- tai kuutiolujuutena. Betonin ikä vaikuttaa lujuuteen, joten on tärkeää ilmaista lujuuden määrittämisen ajankohta. (Tulimaa 2018.) Tavallisesti betonin puristuslujuus määritetään koekappaleista 28 vuorokauden iässä. Kui-

tenkin kovettuneen betonin arviointi-ikä nä voidaan käyttää muutakin aikaa, esimerkiksi 91 vuorokautta. (Betonin on luja... s.a.). Jos puolestaan arvioidaan betonin nopeaa lujuu denkehitystä, laadunarvosteluikä nä voidaan käyttää seitsemää vuorokautta (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 22).

Betonin lujuus kuvastaa betonirakenteen kykyä kantaa kuormia. Betonin lujuus vaikuttaa myös betonin säilyvyyteen erilaisissa rasituksissa ja olosuhteissa. Betoneissa käytetään lujuusluokkamerkintää. Merkinnässä ensimmäinen lukuarvo kertoo betonin puristuslujuuden, joka on mitattu lieriön muotoisista, ja toinen lukuarvo kuution muotoisista koekappaleista. Esimerkiksi normaalisti kantavista rakenteista käytetään lujuusluokkia C20/25–C45/50. (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 22.)

Kovettuneen betonin tiheyden määrittämiseen käytetään standardia SFS-EN 12390-7 (Pyörny 2018, 18). Tiheys kuvaa kyseisen kappaleen massaa tilavuusyksikköä kohden. Kovettuneen betonin tiheyden vaikuttaa myös se, onko betonimassan tiivistäminen onnistunut. Jos esimerkiksi tiivistys on jäänyt vajaaksi, on betonissa enemmän ilmaa kuin on ollut tarkoitus, ja tämä vaikuttaa betonin tiheyteen. (Johansson 2022.) Betonin tilavuudesta kiviainesta on noin 65–75 prosenttia, ja käytettävä kiviaines on tavallisesti huokoista (Pyörny 2018, 19).

BIOHIILEN VAIKUTUS BETONIN PURISTUSLUJUUTEEN JA TIHEYTEEN

Useat tutkimukset ovat antaneet viitteitä biohiilen käyttömahdollisuuksista sementtipohjaisissa tuotteissa. Tutkimustietoa löytyy eri lähtömateriaaleista valmistettujen biohiilien soveltamisesta sementtiseoksiin eri suhteissa sekä eri raaka-aineiden korvaajana. Osasta tutkimuksista käy esille, että vähäiset biohiililisykset voisivat olla mahdollisia myös betonin puristuslujuuden näkökulmasta.

Wangin ym. (2020) tutkimuksessa arvioitiin männyn (Masson pinewood) sahanpurusta valmistetun biohiilen soveltuvuutta sementtipohjaisiin komposiitteihin. Tutkimuksessa käytettiin hiilidioksidikovuksen menetelmää (CO₂ curing). Tutkimuksessa yhden painoprosentin biohiilen lisäys kasvatti betonin ja biohiilen komposiittien puristuslujuutta, mutta viiden painoprosentin lisäyksellä oli haitallisia vaikutuksia mekaaniseen lujuuteen. Tämän arvellaan johtuvan biohiilen huokoisesta ja hauraasta rakenteesta.

Guptan ja Kuan (2019) tutkimuksessa selvitettiin biohiilen hiukkaskoon ja pinnan morfologian vaikutuksia muun muassa sementtilaastin reologiaan ja lujuuteen. Biohiilihiukkaset, joiden kokoalue oli 2–100 µm ja 0,10–2 µm, nopeuttivat hydrataatiokinetiikkaa ja paransivat varhaista lujuutta.

Akhtarin ja Sarmahin (2018) tutkimuksessa selvitettiin biohiililisyksen vaikutusta normaalilujuusbetoniin. Biohiiltä lisättiin 0,1–1 prosenttia betonin kokonaistilavuudesta. Sellu- ja paperitehtaan lietteestä ja riisinkuoresta valmistetut biohiilet lisäsivät seitsemän vuorokauden varhaislujuutta. Puristuslujuuden kasvu oli keskimäärin sellu- ja paperitehtaan lietteestä valmistetulla biohiilellä kymmenen prosenttia ja riisikuoresta valmistetulla biohiilellä kuusi prosenttia. Kuitenkin lujuusominaisuuksissa havaittiin merkittävä muutos 28 päivän jälkeen, jolloin kontrollinäytteet saivat korkeammat puristuslujuudet kuin muut näytteet.

Cuthbertsonin ym. (2019) tutkimuksissa biohiilen lisääminen osoitti haitallista vaikutusta betonin puristuslujuuteen, mikä asettaisi tämänkaltaiset betonit alempaan lujuusluokkaan. Toisessa tutkimuksessa havaittiin kappaleen puristuslujuuden paranevan, kun laastiin lisättiin viisi prosenttia lehtipuubiohiiltä. Laastin lujuus lähti kuitenkin heikkenemään korkeampien biohiilipitoisuuksien myötä. Lisäksi hasselpähkinän- ja maapähkinänkuoresta valmistetun biohiilen lisääminen paransi betonin puristuslujuutta, mutta myös sen taivutuslujuutta. Lisäksi biohiilen on osoitettu pystyvän vähentämään sementtitiilen tiheyttä niin paljon, että se kelluu veden päällä. (Cuthbertson ym. 2019.)

Eräissä tutkimuksissa kehitettiin sementtiseos, joka sisälsi biohiiltä 30 prosenttia, jolloin betonituotteesta saatiin hiilinegatiivinen. Lisäksi betonituote säilytti hyvän puristuslujuuden 28 vuorokauden vertailuiässä. Tulos on lähellä normaalin betonin puristuslujuutta 27,6 MPa. (Irving 2023.)

KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS PURISTUSLUJUUDEN TESTAUKSEEN JA TIHEYDEN MÄÄRITYKSEEN

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puupolin tiloissa valmistettiin koekappaleita puristuslujuuden testaukseen ja tiheyden määrittämiseen mukailien standardia SFS-EN 12390-2 (koekappaleiden valmistus lujuustestejä varten). Koekappaleissa oli sementtiä korvattu mäntyhakebiohiilellä ja A-luokan purkupuusta valmistetulla biohiilellä. Biohiilen korvausosuudet olivat noin 2–15 painoprosenttiin. Vertailukohteena käytettiin normaalia betonia, johon ei lisätty biohiiltä.

Koekappaleet olivat kuutioita, joiden koko oli 100 mm x 100 mm x 100 mm (kuva 1). Valmistuksen jälkeen niitä säilytettiin laboratorion ohjeiden mukaisesti 28 vuorokautta vedessä. Betoni- ja biohiilibetonikoekappaleiden analyysit tehtiin ulkopuolisessa laboratoriossa. Puristuslujuus määritettiin standardin SFS-EN 12390-3 ja tiheys standardin SFS-EN 12390-7 mukaisesti.



Kuva 1. Koekappaleiden irrotus muoteista ilmanpaineen avulla (kuva: Anna Dunderfelt).

Biohiilen esikostutus auttaa betonimassan sekoitusvaihetta, sillä vedellä kyllästetty biohiili ei ime sekoitusvettä. Tutkimuksessa havaittiin, että esiliotettu biohiili paransi betonin 28 vuorokauden vertailuiän puristuslujuutta verrattaessa sitä tavalliseen betoniin. Samankaltainen trendi näkyi myös taivutus- ja halkaisuvetolujuudessa. (Gupta & Kua 2018.) Hankkeen koekappaleiden valmistuksessa biohiili lisättiin betonimassaan vesijohtovedellä kostutettuna 1:1 (g). Biohiilen kostutus helpotti betonimassan työnettävyyttä ja vähensi pölyävyyttä. Yhden koe-erän valmistuksessa käytettiin kuitenkin kuivaa biohiiltä, ja erän kuutioita

verrattiin puristuslujuuskokeessa kostutetusta biohiilestä valmistettuihin koekuutioihin. Koekappaleiden valmistuksessa vesi–sideainesuhteessa huomioitiin sementin korvaamisessa käytetty biohiili ja lisätyn veden määrä (taulukko 1).

Taulukko 1. Koekappaleiden vesi–sementtisuhteissa oli pieniä eroavaisuuksia.

Koekappale	Vesi/sementti + biohiili -suhde
normaali betoni *	0,69
mäntyhakebiohiilibetoni ~2 p-% *	0,72
normaali betoni	0,69
purkupuubiohiilibetoni ~2 p-%	0,71
purkupuubiohiilibetoni ~5 p-%	0,74
purkupuubiohiilibetoni ~10 p-%	0,79
purkupuubiohiilibetoni ~15 p-%	0,84
kuiva purkupuubiohiilibetoni ~5 p-%	0,69
mäntyhakebiohiilibetoni ~10 p-%	0,74

*betonimylly

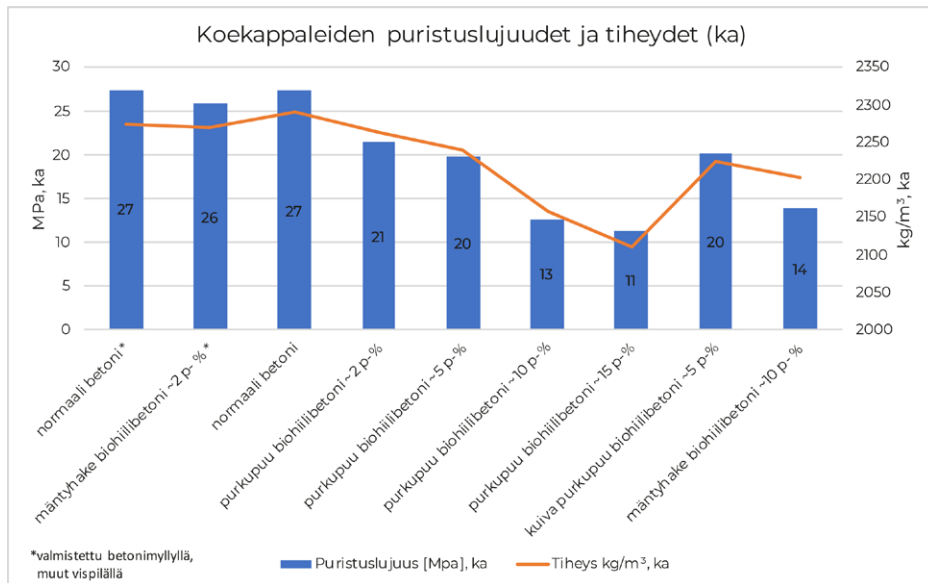
Betonin valmistamiseen käytettiin nopeasti kovettuvaa portlandsesossementtiä, Finnsementin rapidsementtiä (CEM II/A-LL 42,5 R). Käytetty sementtilaatu soveltuu nopean lujuuskehityksensä ansiosta talvibetonointiin, ja se on valmistettu standardin SFS-EN 197-1: 2011 mukaisesti. Sementtiseoksen tavoitelujuus on $\geq 42,5$ MPa ja $\leq 62,5$ MPa. (Rapid sementti 2022.) Koekuutioita, joita kutsutaan testeissä normaaliksi betoniksi, käytettiin referenssinä. Nämä koekuutiot eivät sisältäneet biohiiltä. Kokeessa on kahdella tavalla valmistetut, normaalista betonista tehdyt koekuutiot. Tällä haluttiin poissulkea valmistustavan vaikutus tuloksiin.

KOEKAPPALEIDEN PURISTUSLUJUUDEN TESTAUKSEN JA TIHEYDEN MÄÄRITYKSEN TULOKSET

Koekappaleiden puristuslujuustestien ja tiheyden määrittämis tulokset on esitetty kuvassa 2. Tulokset esitetään koekappaleiden rinnakkaismäärittämis tulosten keskiarvoilla, ja koekappaleiden testi-ikä on 28 vuorokautta. Tiheyden yksikkö on kg/m^3 ja puristuslujuuden megapascalina (MPa). Tässä artikkelissa esitetyt tulokset koskevat vain tätä koetta.

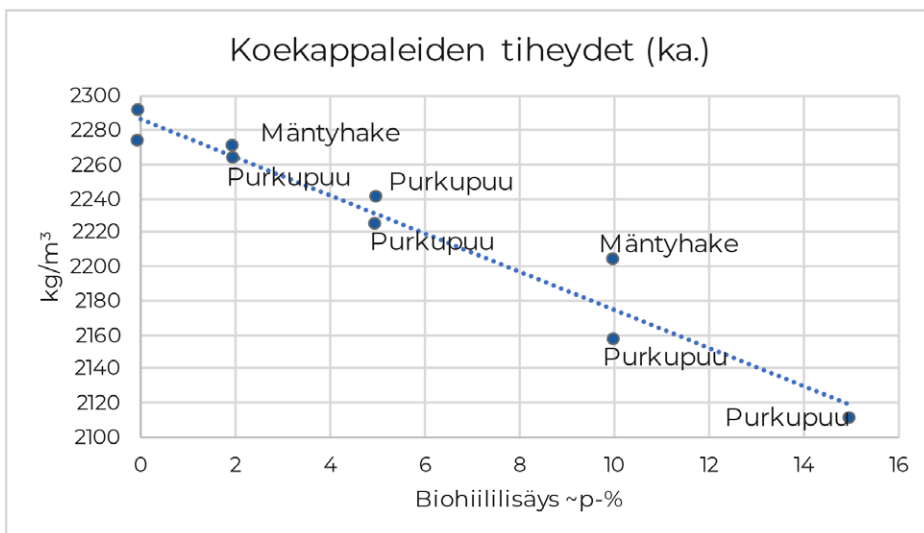
Kokeista on havaittavissa, että koekappaleiden valmistustavalla ei ollut merkitystä tuloksiin. Kuvassa 2 on nähtävissä, että betonimyllyllä ja käsivispilällä valmistetut, normaalista betonista valetut koekappaleet saivat lähes samanlaiset tulokset puristuslujuuden ja tiheyden osalta. Näiden koekappaleiden puristuslujuus- ja tiheysmäärittämis tulokset saivat kokeen korkeimmat tulokset.

On myös havaittavissa, että noin kahden painoprosentin mäntyhakebiohiilibetoni on hyvin lähellä normaalin betonin tuloksia. Mittaustuloksista voidaan todeta, että biohiilisyönteisen määrän kasvaessa betonin puristuslujuus ja tiheys heikkenevät. Tuloksissa on nähtävissä, että puristuslujuuteen ei merkittävästi vaikuttanut se, lisättiinkö biohiili seokseen kuivana vai kostutettuna. Noin viiden painoprosentin purkupuubiohiilibetoni sai molemmilla valmistustavoilla sekä puristuslujuuden että tiheyden mittauksissa melko lähellä toisiaan olevia arvoja.



Kuva 2. Koekappaleiden keskimääräiset puristuslujuudet ja tiheysmääritykset 28 vuorokauden iässä (tiedot: KymiLabs Betonitestauspalvelut).

Tuloksien tulkinnessa tulee ottaa huomioon, että koekappaleiden tiheyteen on useita vaikuttajia. Tällaisia ovat esimerkiksi biohiilien raaka-aine ja tuotantoprosessi sekä betonissa sementin korvaussuhde ja massaan käytetty veden määrä. Betonisten koekappaleiden ilmamäärää ei mitattu massan valmistuksen yhteydessä. Kuvan 3 suuntaviivan avulla voi nähdä, kuinka sementin korvaaminen biohiilellä laski betonin tiheyttä. Samalla biohiilikorvaussuhteella on nähtävissä tiheyden eri arvoja riippuen betoniin käytetystä biohiililaadusta. Koekappaleet, joihin oli käytetty purkupuubiohiiltä, sai mäntyhakebiohiilestä valmistettuihin koekappaleihin verrattuna alhaisemmat tiheydet. Biohiilibetonien referenssinä toimivat niin sanotut normaalit betonit, jotka kuvassa 3 näkyvät 0 p-%:n biohiilisyönteisen kohdalla.



Kuva 3. Tiheyden arvot vaihtelivat myös samoilla biohiilikorvausmäärillä. (tiedot: KymiLabs Betonitestauspalvelut).

YHTEENVETO KOKEEN TULOISTA

Tässä vertailevassa kokeessa arvioitiin biohiilen vaikutusta betonin puristuslujuuteen ja tiheyteen. Kuitenkin on selvää, että betonin valmistuksessa tapahtuvat seikat vaikuttavat myös tuloksiin. Hankkeessa tehdyt koekappaleet eivät olleet teollisen tuotannon tuotteeseen verrattavia. Tuloksiin vaikuttavat valuhetken olosuhteet ja massan tiivistystapa. Kokeista ei voida tehdä selkeitä johtopäätöksiä, koska tutkimus ei ole siihen tarpeeksi laaja. Testissä koekappaleiden määrä oli suhteellisen pieni, ja koekappaleiden valmistamiseen liittyi muuttujia. On huomioitava, että betonin puristuslujuuteen vaikuttavat useat seikat. Näiden kokeiden perusteella ei voida päätellä biohiilen lisäyksen muita vaikutuksia betonin ominaisuuksiin.

Näissä kokeissa noin kahden painoprosentin mäntyhakebiohiilibetonin puristuslujuus ei heikentynyt merkittävästi verrattaessa sitä normaaliin betoniin. Voidaan todeta, että sen puristuslujuus oli hyvin lähellä kokeen normaalia betonia. Tulosten pienet erot voivat olla peräisin jo valmistusvaiheen muuttujista sekä siitä, että biohiilibetonissa on vettä hiukan enemmän johtuen biohiilen esikostutuksesta.

Puristuslujuustuloksien tulokinnassa tulee huomioida, että matala vesi–sementtisuhde ja korkea puristuslujuus ovat yhteydessä toisiinsa. Betonimassassa vesimäärän nostaminen lisää valmiin kappaleen huokoisuutta. Kun betonin vesi–sementtisuhdetta pienennetään, vähentää se kapillaarihuokosten määrää sekä parantaa sementin ja kiviaineksen muodostamaa liitosta. (Pyörny 2018, 23–25.)

Koekappaleiden valmistuksessa valuhetken olosuhteet vaihtelivat ja massan tiivistys tapahtui käsin. Betonimassan vesi–sementtisuhteessa oli myös pieniä eroavaisuuksia johtuen biohiilen kostutuksesta sekä kiviaineksen kosteuspitoisuuden vaihtelusta. Kiinnostava jatkotutkimuksen aihe olisi vastaavanlaisten kokeiden tekeminen vakioituissa olosuhteissa, kuten vakioituissa laboratorio-olosuhteissa, ja lisäaineiden vaikutusten selvittäminen tiheyteen ja puristuslujuuden kehittymiseen. Tällöin virhelähteiden ja muuttujien määrä olisi paremmin rajattavissa. Jatkotutkimuksia voisi tehdä myös eri-ikäisille tuotteille. Tulosten myötä saataisiin tietoa esimerkiksi siitä, onko koekappaleiden varhaislujuuden kehittymisessä eroavaisuuksia.

Koekappaleissa käytettyjen biohiilien raaka-aine ja tuotantoprosessi poikkesivat toisistaan. A-luokan purkupuusta valmistettu biohiili oli kevyempää, ja siksi sen tilavuus kasvoi massassa, koska sementtiä oli korvattu painoprosenteissa. Lisäksi hankkeen koekappaleissa käytettiin biohiiltä, jonka partikkelikoko oli ≤ 2 mm. Näyttäisi siltä, että biohiilen mikronisoinnilla olisi merkitystä betonin mekaanisiin ominaisuuksiin. Biohiilen partikkelikoon mikronisoinnilla päästäisiin lähemmäksi sementin partikkelikokoa, jolloin materiaalista tulisi tasalaatuisempaa. Tärkeää on jatkaa tutkimusta biohiilen partikkelikoon vaikutuksesta biohiilibetonin puristuslujuuteen ja tiheyteen. Monipuolista tutkimusta tulisi jatkaa ennen kuin voidaan tehdä luotettavia johtopäätöksiä siitä, voidaanko tulevaisuudessa biohiilellä korvata turvallisesti sementtiä rakennusteollisuudessa.

LÄHTEET

Akhtar, A. & Sarmah, A. 2018. Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. *Science on The Total Environment*. Volumes 616–617, March 2018, p. 408–416. Available online 8 November 2017. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.319> [viitattu 15.6.2023].

Betoni on luja rakennusmateriaali, mutta mikä on betonin lujuus? s.a. Finnsementti Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/betonin-lujuus/> [viitattu 22.5.2023].

Betonin käyttö ympäristörakentamisessa. 2023. Betoniteollisuus ry. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2023/01/Betonin-kaytto-ymparisto-rakentamisessa_2023.pdf [viitattu 23.5.2023].

Cuthbertson, D., Berardi, U., Briens, C. & Berruti, F. 2019. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. *Biomass and Bioenergy* 120 (2019), pp. 77–83. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.007> [viitattu 17.4.2023].

Gupta, S. & Kua, H. 2018. Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar. *Construction and Building Materials*. Volume 159, 20 January 2018, Pages 107–125. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.095> [viitattu 15.6.2023].

Gupta, S. & Kua, H. 2019. Carbonaceous micro-filler for cement: Effect of particle size and dosage of biochar on fresh and hardened properties of cement mortar. *Science of The Total Environment*. Volume 662, 20 April 2019. p 952-962. Available online 23 January 2019. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.269> [viitattu 15.6.2023].

Irving, M. 2023. New recipe makes concrete that absorbs more CO2 than it emits. *New Atlas* 18.4.2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://newatlas.com/materials/carbon-negative-concrete-treated-biochar/> [viitattu 15.6.2023].

Johansson, K. 2022. Betonilaborantti- ja myllärikurssi Helsinki 3.5.2022. Suomen Betoniyhdistys ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/227477750-Betonilaborantti-ja-myllarikurssi-helsinki-kim-johansson.html> [viitattu 8.8.2023].

Kymilabs – Betonintestauspalvelut. s.a. Puristuslujuuden määrittäminen. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.xamk.fi/tutkimus-ja-kehitystoiminta/betonintestaus/> [viitattu 23.5.2023].

KymiLabs – Betonitestauspalvelut. 2022. Tutkimusseloste 2022.

Pyörny, J. 2018. Betonin ominaisuudet betonirakenteen valmistusketjun eri vaiheissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto Insinööritieteiden korkeakoulu. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/35561/master_Py%c3%b6rny_Juho_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 22.5.2023].

Rapid sementti 2022. Tuote-esite 5/2022. Finnsementti Oy Parainen. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/FS_Rapid_PAR_FI_2022.pdf [viitattu 8.8.2023].

Tulimaa, M. 2018. Kuutioita ja lieriöitä – betonin lujuuden valvonta tehtaalla ja työmaalla. Paikalla rakentamisen laatukiertue 6.11.2018. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/106495547-Kuutioita-ja-lierioita-betonin-lujuuden-valvonta-tehtaalla-ja-tyo-maalla.html> [viitattu 22.5.2023].

Tulossa 150-250 MPa:n erikoislujuat kuitubetonit. s.a. Betoniteollisuus ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/ominaisuudet-ja-edut/betonin-lujuus/> [viitattu 22.5.2023].

Wang, L., Chen, L., Tsang, D., Guo, B., Yang, J., Shen., Z., Hou, D., Ok, Y. & Poon, C. 2020. Biochar as green additives in cementbased composites with carbon dioxide curing. Journal of Cleaner Production. Volume 258, 10 June 2020, 120678. Available online 19 February 2020. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120678> [viitattu 15.6.2023].

BIOHIILIBETONISTEN KOE- KAPPALEIDEN PAKKASEN- KESTÄVYYDEN TESTAUS

Anna Dunderfelt & Miia Sourander

Suomen sääolosuhteiden vuoksi betonin säilyvyyteen vaikuttaa merkittävästi sen pakkasenkestävyysominaisuus (Betonin ominaisuudet s.a.). Kun kohteessa on käytetty oikeanlaista betonia ja valut on tehty huolellisesti, betoni kestää vaativiakin olosuhteita, kuten pakkasta ja kosteutta (Ominaisuudet ja edut s.a.).

Pakkasrasitusta tapahtuu luonnollisesti kaikissa suomalaisissa ulkobetonirakenteissa. Betoniin kohdistuvaan pakkasrasitukseen vaikuttavat lisäksi suojaavat rakenteet ja sijainti. Mitä kuivempänä betoni pysyy, sitä vähäisempää pakkasrasitusta siihen kohdistuu. Kun betonissa oleva vesi jäätyy toistuvasti, aiheuttaa se betoniin säröilyä. Tämän seurauksena heikentyvät betonin ominaisuudet, kuten sen lujuusominaisuudet. Jäätymis–sulamissykliä jatkuen betoniin aiheutuu lohkeilua ja rapautumista. Betoniin kohdistuu ulkoisien rasituksien lisäksi myös sisäisiä tekijöitä, joilla on vaikutusta sen pakkasenkestävyyteen. Yksi sisäisistä tekijöistä on betonin kapillaarihuokosjakauma, joka on yhteydessä vesi–sementtisuhteeseen. Kun vesi–sementtisuhte laskee, kapillaarihuokosten osuus ja jäätyvän veden määrä betonissa vähenee. Tavallinen betoni, johon ei ole lisätty suojahuokosia, kestää pakkasen aiheuttamaa rasitusta yleensä heikosti. Pakkaskestävyyden saavuttamiseksi tarvitaan betoniin kohtuullisen matala vesi–sementtisuhte ja oikeanlainen huokostus. (Leivo 2000, 9–11.)

BETONIN PAKKASENKESTÄVYYTEEN VOIDAAN VAIKUTTA

Pakkasvaurioiden aiheuttajana on useimmiten betonin huokosissa jäätyvä vesi. Kun vesi jäätyessään laajenee noin yhdeksän prosenttia tilavuudestaan, aiheuttaa se betonissa sisäistä painetta ja halkeamia. Yksi parhaimmista tavoista parantaa betonissa pakkasenkestävyyttä on lisähuokostaminen, joka toteutetaan lisäaineilla. Huokostinlisäaineilla betoniin saadaan pieniä suojahuokosia, eivätkä ne pysty täytymään vedellä kapillaarisen imun vaikutuksesta niiden pienen koon vuoksi. Kun suuremmissa huokosissa vesi jäätyy, pääsee paine purkautumaan täyttymättömiin pieniin suojahuokosiin, ja näin välttään pakkasen aiheuttamilta vaurioilta. (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 68.)

Ulkobetonirakenteilta vaaditaan säänkestävyyttä eli myös pakkasenkestävyyttä (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 67). Betonille on määritetty rasitusluokat ympäristöolosuhteiden mukaisesti. Betoniin tuleva pakkasrasitus kasvaa, kun mukaan tulee suoloja. Suolat aiheuttavat sen, että betoniin pääsee imeytymään kosteutta alhaisemmissa lämpötiloissa, ja ne nostavat myös jäätympainetta. (Betonin rasitusluokat lyhyesti s.a.) Jos betoni on rasitusluokaltaan vääränlaista, voi betoniin tulla sisäisiä halkeamia, mikä heikentää betonin lujuutta. Pakkasen aiheuttamat vauriot voivat lisäksi aiheuttaa näkyviä halkeamia betoniin sekä betonipinnan rapautumista. (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 68.)

Betonin rasitusluokka tulee valita vastaamaan ympäristön todellisia olosuhteita ja rasituksia. Rakenteeseen voi kohdistua yhtä aikaa monia rasitusluokkia. Rasitusluokat XF (jäätymis-sulamisrasitus) ovat seuraavat (Betonin käyttö ympäristörakentamisessa 2023, 67–70):

- Rasitusluokat XF1 ja XF3 ovat normaaleja säänkestäviä betoneja, jolloin rakenteeseen aiheutuu jäätymis-sulamisrasitusta, mutta ei kuitenkaan kloridirasitusta.
- Rasitusluokkien XF2 ja XF4 betonia käytetään, kun betonirakenteeseen kohdistuu jäätymis-sulamisrasituksen lisäksi kloridirasitusta. Merivesi ja jäänsulatusaine voivat aiheuttaa kloridirasitusta betoniin.

PAKKASENKESTÄVYYSTESTAUKSEEN KOEKAPPALEET

Hankkeessa selvitettiin betonimassan pakkasenkestävyyttä niin sanotulla laattakokeella. Koetta varten valmistettiin kolme erilaista betonia Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puupolin tiloissa. Kokeen tavoitteena oli arvioida biohiililisäyksen vaikutusta betonin pakkasenkestävyyteen.

Pakkasenkestävyyksikokeita varten valmistettiin koesarja, joka sisälsi 150 mm:n kuutioita (kuva 1):

- normaali betoni, ei biohiililisäystä
- biohiilibetoni, sementtiä korvattu -2 p-%:n mäntyhakebiohiilellä, biohiili hienonnettu ja siivilöity 2 mm:n siiviläkoolla
- biohiilibetoni, sementtiä korvattu -2 p-%:n purkupuubiohiilellä, biohiili hienonnettu ja siivilöity 2 mm:n siiviläkoolla.



Kuva 1. Pakkaskestävyyden koekappaleita tiivistämisen jälkeen laboratorion lähettämässä muoteissa (kuva: Anna Dunderfelt).

Koekappaleiden valmistuksessa vesi–sideainesuhteessa on huomioitu myös sementin korvaamisessa käytetty biohiili ja lisätyn veden määrä. Koekappaleiden valmistuksessa biohiili lisättiin betonimassaan vesijohtovedellä kostutettuna 1:1 (g), mikä on huomioitu vesi–sideainesuhteessa. Kostutus lisäsi hiukan koekappaleiden vesi–sideainesuhdetta, ja suhdeluvut ovat nähtävissä taulukossa 1. Biohiilen kostuttamisella helpotettiin betonimassan työstettävyyttä, ja se vähensi pölyävyyttä.

Taulukko 1. Koekappaleiden vesi–sideainesuhteet

koekappale	vesi/sementti + biohiili -suhde
normaalibetoni	0,72
~2 p-%:n mäntyhake biohiilibetoni	0,74
~2 p-%:n A-luokan purkupuu biohiilibetoni	0,74

Kahdessa koeseoksessa oli sementtiä korvattu biohiilellä noin kahden painoprosentin verran, ja vertailukohteena käytettiin normaalia betonia, johon ei lisätty biohiiltä. Koekappaleiden pakkasenkestävyyden testauksen ja analysoinnin teki ulkopuolinen laboratorio, joka toimitti kokeeseen käytettävät muotit ja koekappaleiden säilytysohjeet ennen laboratorioon lähetystä. Kovettuneen betonin pakkasenkestävyyttä määritettiin teknisen spesifikaation CEN/TR 15177 (laattakoe ilman suolarasitusta) ja CEN/TS 12390-9 (3 %:n NaCl-liuoksessa) mukaisilla laattakokeilla. Koekappaleet säilytettiin vedessä muottien purkamisen jälkeen ennen laboratorioon lähettämistä.

Koekappaleisiin ei käytetty lisäaineita, eivätkä ne olleet rasisluokan mukaisia ulkobetonituotteita. Betonimassan pakkasenkestävyysskoeken tulokset eivät ole yleistettävissä, ja niitä voidaan verrata vain tämän kokeen koekappaleiden välillä.

Koekappaleiden valmistusprosessin aikana havaittiin, että mäntyhakebiohiilibetoniseos ei tiivistynyt kuten muut koeseokset. Tähän ei löytynyt selkeää syytä, sillä muut valmistuksen raaka-aineet ja menetelmät eivät poikenneet toisistaan. Huomioitavaa on, että betonin valmistusprosessin olosuhteet eivät olleet vakioituneet laboratorio-olosuhteet. Tämä on saattanut vaikuttaa mäntyhake biohiilibetonin tiivistymiseen.

TULOKSET JA POHDINTAA

Laattakokeen aikana vedellä kyllästetyt koekappaleet altistetaan sykleittäin jäätymiselle ja sulamiselle. Koekappaleen pinnalla olevan veden annetaan jäätyä, ja kokeesta riippuen vesi on makeaa tai 3-% NaCl-vesiliuosta. Jäädytys–sulatussyklejä on 56, ja yksi sykli kestää vuorokauden. Laattakokeen aikana rapautunut betoni kerätään ja punnitaan. Laattakokeissa on lisäksi suhteellisen kimmokertoimen vaatimus. Betonin sisäisen vaurion arviointiin käytetään dynaamista kimmokerrointa (RDM). RDM:n laskemiseen voidaan käyttää kahta tapaa, joko ultraäänipulssin etenemisnopeutta tai koekappaleen ominaistaajuutta. (Silventoinen & Tulimaa 2020.) Hankkeen koekappaleiden dynaamiset kimmokertoimet arvioitiin ultraäänipulssin läpimenoajalla.

Kuvassa 2 on nähtävissä laattakokeiden kumulatiivinen pintarapautuma (g/m^2) deionisoidulle vedelle altistettuna. Mäntyhake biohiilibetonin koe keskeytettiin ensimmäisen rapaumamäärityksen jälkeen, joka tapahtui kahdeksannen syklin jälkeen, koska rapauman todettiin olevan todella voimakasta (lähde: Eurofins Expert Services Oy). Kuvassa on nähtävissä, että normaalibetonin ja purkupuuhä biohiilibetonin pinnan rapauma oli vähäisempää ja koekappaleet ovat menneet läpi täydet 56 sykliä.



Kuva 2. Kumulatiivinen pintarapautuma (g/m²) laattakokeessa CEN/TR 15177 deionisoitu vesi, testipinta-ala (m²) (tiedot: Eurofins Expert Services Oy)

Taulukko 2. Tulokset ja niiden vertailu XF-rasitusluokkiin. Pinnanrapautuman ja kimmokertoimen vaatimukset tulee molempien osalta täyttyä näissä rasitusluokissa (tiedot: Eurofins Expert Services Oy).

koekappale (y = sykli)	kumulatiivinen pinta- rapautuma g/m ²	suhteellisen dynaami- sen kimmokertoimen neliö (%)
normaalibetoni (y56)	100	109
~2 p-%:n mäntyhake biohiilibetoni (y8)	2440	101
~2 p-%:n A-luokan purku- puu biohiilibetoni (y56)	140	108

*Suunniteltu käyttöikä 50 v, rasitusluokka XF1, rapautuma ≤ 500 g/m², γ₅₆ ≥ 67 %
 Suunniteltu käyttöikä 50 v, rasitusluokka XF3, rapautuma ≤ 200 g/m², γ₅₆ ≥ 75 %
 Suunniteltu käyttöikä 100 v, rasitusluokka XF1, rapautuma ≤ 200 g/m², γ₅₆ ≥ 75 %
 Suunniteltu käyttöikä 100 v, rasitusluokka XF3, rapautuma ≤ 100 g/m², γ₅₆ ≥ 85 %
 Standardissa SFS 7022 esitetään kovettuneen betonin pakkasenkestävyyden vaatimukset.*

Laattakokeessa, jossa tehtiin suolarasitus kaikkiin koekappaleisiin, jouduttiin keskeyttämään todella voimakkaan rapautuman vuoksi. Taulukossa 3 on nähtävissä syklien ja rapautuman määrä. Tulosten tulkinnassa tulee huomioida molemmat: syklien ja pinnanrapautuman arvot. Esimerkiksi noin kahden painoprosentin mäntyhakebiohiilibetonin pinnan rapautuma-arvo on alhaisin, mutta koe jouduttiin keskeyttämään jo syklin 9 jälkeen. Sen sijaan kahdelle muulle koesarjalle on voitu tehdä 14 sykliä. Koekappaleissa ei käytetty huokostinta, jonka avulla olisi voitu estää pinnan rapautuminen.

Taulukko 3. Kumulatiivinen pintarapautuma (g/m²) laattakokeessa CEN/TS 12390-9 NaCl 3 %:n vesiliuos (tiedot: Eurofins Expert Services Oy).

koekappale (y = sykli)	pinnan rapauma g/m ²
normaalibetoni (y14)	3260
~2 p-%:n mäntyhake biohiilibetoni (y9)	2540
~2 p-%:n A-luokan purkupuu biohiilibetoni (y14)	3360

Koska haluttiin tutkia biohiilen vaikutusta betoniin, koekappaleiden valmistuksessa ei käytetty lisäaineita, kuten huokostinta. Tämä vaikutti merkittävästi kokeen tuloksiin. Vesi-sideainesuhteella ei oletettavasti ollut vaikutusta asiaan, mutta biohiilen partikkelikoolla todennäköisesti oli. Kovettuneen betonin laatuun vaikuttaa merkittävästi massan tiivistäminen. Tässä kokeessa tiivistäminen epäonnistui yhden koesarjan kohdalla, mikä on nähtävissä tuloksissa. Tämän kokeen tulokset osoittivat, että biohiilen lisääminen heikensi betonin pakkasenkestävyyttä tehdyissä koesarjoissa. Tutkimusta olisi tarpeellista jatkaa pienemmällä biohiilen partikkelikoolla, suojahuokosten lisäämisellä ja vakioiduissa laboratorio-olosuhteissa.

LÄHTEET

Eurofins Expert Services Oy. 2023. Raportti. CEN/TR 15177: 14.4.2023, 13.6.2023. CEN/TS 12390-9: 27.4.2023, 13.4.2023. PDF-dokumentti.

Betonin käyttö ympäristörakentamisessa. 2023. Betoniteollisuus ry. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2023/01/Betonin-kaytto-ymparistorakentamisessa_2023.pdf [viitattu 11.5.2023].

Betonin ominaisuudet. s.a. Betonitieto. Betoniyhdistys. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/oppiminen/opetuksen-tukimateriaali/betonin-ominaisuudet-ja-valinta.html> [viitattu 19.4.2023].

Betonin rasitusluokat lyhyesti. s.a. Finnsementti Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/tietoa-betonista-tietoa-betonista-suunnittelijalle/betonin-rasitusluokat-lyhyesti/> [viitattu 26.4.2024].

Leivo, M. 2020. Betonin pakkasenkestävyyden varmistaminen, osa 2. Laadunvalvonta ja -varmistus. VTT-tiedotteita. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2000/T2047.pdf> [viitattu 26.4.2023].

Ominaisuudet ja edut. s.a. Betoniteollisuus ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/ominaisuudet-ja-edut/> [viitattu 19.4.2023].

Silventoinen, A. & Tulimaa, M. 2020. Diplomityö Aalto-yliopistossa. Mikrohuokostetun betonin pakkasenkestävyys. Betoni. https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2020/12/BET2004_88-93.pdf [viitattu 28.6.2023].

ÄÄNENERISTÄVYYDEN, LÄMPÖTILAN JA KOSTEUDEN SIIRTYMISEN TESTAUKSIA KENTTÄKOEMENETELMILLÄ

Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Mikko Hokkanen
& Keijo Piirainen

ÄÄNENERISTÄVYYDEN TESTAUS

Hankkeen yhtenä tavoitteena oli selvittää, miten biohiilen lisääminen vaikuttaa betonikapaleen ääneneristävyteen ja onko biohiilellä ilmaääneneristävyttä parantavia vaikutuksia betonituotteissa. Useat tutkimukset ovat osoittaneet biohiilen parantavan ääneneristävyttä. Tutkimusten huono yleistettävyyden on haasteena ääneneristävyttä tarkasteltaessa. Cuthbertson ym. (2019) osoittivat tutkimuksessaan, että biohiilien lisäys paransi betonin äänenvaimennuskerrointa. Biohiilen lisääminen betoniin lisää betonin huokoisuutta, jonka katsotaan parantavan ääneneristävyttä. (Cuthbertson ym. 2019)

Euroopan unionin jäsenmaissa rakentamista koskevaa lainsäädäntöä ohjaa ylimpänä rakennustuotedirektiivi, jossa on määritetty olennaiset vaatimukset rakennuksille. Yksi vaatimuksista on meluntorjunta. Vaadittavien olosuhteiden määritelmät ohjataan kansallisesti. (Kylliäinen ym. 2017, 12.) Maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999) 117 §:ssä on säädetty rakentamiselle asetettavat vaatimukset. Laissa säädetään myös meluntorjunnasta ja ääniolosuhteista. Ympäristöministeriön asetuksessa rakennuksen ääniympäristöstä (796/2017) säädetään rakennusten ääneneristyksestä piha- ja oleskelualueiden ja oleskeluun käytettävien parvekkeiden meluntorjunnasta ja ääniolosuhteista (796/2017). Asetuksessa on annettu raja-arvot huonetilojen pienimmälle sallitulle äänitasoeroluvulle ja suurimmalle sallitulle askeläänitasoluvulle. Asetus 360/290 on Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä annetun ympäristöministeriön asetuksen 5 ja 6 §:n muuttamisesta. Taulukossa 1 on esitetty näiden säädösten ja ohjeiden keskinäinen hierarkia.

Taulukko 1. Äänieristystä koskevat säädökset ja ohjeet sekä niiden merkitys (mukaillen Kylliäinen ym. 2017, 12).

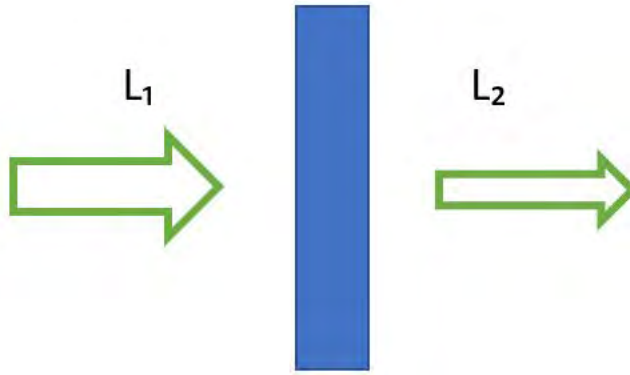
Asema	Asiakirja	Merkitys
Säädös	Rakennusdirektiivi	Velvoittava, ohjaa lain-säädäntöä
Säädös	Maankäyttö- ja rakennuslaki	Velvoittava
Säädös	Suomen rakentamismääräys-kokoelman osa C1	Velvoittava
Säädös	Suomen rakentamismääräys-kokoelman osa D2	Velvoittava
Ohje	Valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohje-arvoista	Asemakaavamääräysten kautta velvoittava
Suositus	SFS 5907 Rakennusten akustinen luokitus	Velvoittava, jos määritetty noudettavaksi urakka- tai kauppa-asiakirjoissa
Suunnitteluohje	RIL 243 Rakennusten akustinen suunnittelu	Edustaa hyvää rakentamis-tapaa

Ihmisen puhe, musiikki ja erilaiset tekniset järjestelmät tuottavat tilaan ilmaääniä. Ilmaääni aiheuttaa tilan pintojen värähtelyä esimerkiksi seinärakenteissa. Kun rakenteet värähtelevät, se siirtyy myös rakenteen toiselle puolelle ilman värähtelynä, ja näin ääni siirtyy tilojen välillä. Ilmaääneneristyksellä pyritään vähentämään äänen siirtymistä tilojen välillä. (Ääniympäristö 2018, 19.)

ILMAÄÄNENERISTYS

”Rakennusosan, rakennusosien muodostaman kokonaisuuden tai materiaalin kyky eristää äänilähteestä ympäristöön ilman välityksellä leviävää ääntä” (Lahtela ym. 2021).

Rakenteiden ääneneristävyyttä voidaan tutkia laboratorio-olosuhteissa siten, että kahden toisistaan irti olevan huoneen välissä on aukko, johon tutkittava rakenne sijoitetaan. Ääni pääsee kulkemaan lähettävästä huoneesta ainoastaan aukkoon asennetun rakenteen kautta vastaanotettavaan huoneeseen. Lähetyshuoneesta ajetaan voimakasta kohinaääntä kaiuttimella, jonka äänenpainetaso mitataan (L_1). Rakenteen toisella puolella olevassa vastaanot-tahuoneessa mitataan äänenpainetaso (L_2) (kuva 1). (Isover 2023.)



Kuva 1. Ilmaääneneristävyydessä lasketaan rakenteeseen kohdistuva ja sen kautta menevä ääni (kuva mukaillen Asuinrakennus...2009, 6).

Rakenteen ääneneristävyys R' lasketaan kaavalla:

$$R' = L_1 - L_2 + \log_{10} \frac{S}{A}$$

R' Ääneneristävyys

L_1 Äänenpainetaso lähetyshuoneessa

L_2 Äänenpainetaso vastaanottohuoneessa

S Rakenteen ala

A Vastaanottohuoneen absorptioala m^2 (määritetään jälkikäiunta-ajasta)

Ääneneristävyyden mittaustulos ei kerro vain yksittäisen rakennusosan, esimerkiksi väliseinän, ääneneristävyyttä, vaan rakennusosan ja kaikkien ympärillä olevien rakenneosien ja muiden äänen sivureittien yhteisvaikutuksen. Ilmaääneneristävyydsluvusta käytetään lukua $R'w$, kun mittaus on tehty muualla kuin laboratorio-olosuhteissa. Rakennusten ilmaääneneristysvaatimukset esitetään usein valmiin rakennuksen vaatimuksena ja mittaustuloksena, ei siis laboratoriossa tehtyinä mittauksina. Siksi usein nähdään käytettävän merkintää $R'w$. (Asuinrakennusten... 2009, 9–10.)

KOEJÄRJESTELYT

Ääneneristävyyden tutkimusta varten hankkeessa rakennettiin kenttäkoeympäristö Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Puupolille. Koeympäristö (kuva 2) rakennettiin mukaillen ISO 10140-4:2021 -standardia. Rakennelman koko oli 160 x 360 cm (L x P), ja kammiot olivat noin 120 ja 240 cm pitkät. Korkeutta oli 120 cm. Lattia oli tehty ponttiharkoista, jotka täytettiin hiekalla. Seinät oli tehty myös ponttiharkoista ja kiinnitetty liimaamalla uretaanivaahdolla. Rakennelman katto oli tehty useammasta kipsilevykerroksesta liimaamalla. Rakennelma ei ollut standardirakenne, vaan kyseessä oli kenttämittauksia varten pystytetty koejärjestely.



Kuva 3. Ääneneristystestauksen koekappaleet valmiina muoteista irrotukseen (kuva: Miia Sourander).

KOEKAPPALEIDEN MITTAUKSET

Kenttäkoejärjestelyssä ja rakennetussa koeympäristössä tehtiin koemittauksia hankkeessa valetuille koekappaleille ISO 140-4 -standardia mukaillen. Mittauksissa määritettiin koekappaleiden välisiä eroavaisuuksia ilmaääneneristävyydessä.

Koeympäristö koostui kahdesta erillisestä tilasta, jota erotti aukko. Aukkoon asetettiin mitattava koekappale. Mittauksessa käytettiin äänilähteenä kenttämittauksiin soveltuvaa puolipallokaiutinta Norsonic Nor275, ja tehovahvistimena oli Norsonic Nor280. Äänilähde oli sijoitettu lähettävän huoneen takaosaan kallistettuna takaseinään päin. Äänenpainetasot

mitattiin yhdessä pisteessä per kammio. Mittauksessa käytettiin äänitasomittarina reaaliaika-analysointia Norsonic Nor-140 – Multi-tool Analyzer. Äänitasomittari oli asetettu standardin mukaisesti kammion keskipisteeseen, jotta vähimmäisetäisyydet täyttyivät. Mittauksessa käytettiin yhtä mittauspistettä.

Koeympäristön vähimmäisetäisyydet on määritetty standardissa. Suurempia etäisyyksiä tulisi käyttää aina, kun se on mahdollista. Koeympäristö suunniteltiin siten, että vähimmäisetäisyydet saavutettiin koejärjestelyssä ympäröivä tila huomioiden. Standardin mukaan äänitasomittaripaikkojen välinen vähimmäisetäisyys on 0,7 metriä, ja testauksissa käytettiin vain yhtä äänitasomittaria. Etäisyys äänitasomittarin ja huoneen rajojen tai diffuusorien välillä tulee olla vähintään 0,5 metriä. Testaukset suoritettiin vaadittavalla vähimmäisetäisyydellä. Vähimmäisetäisyys äänitasomittarin ja äänilähteen välillä oli standardin mukainen 1,0 metriä. Suora ääni äänilähteestä äänitasomittariin estettiin äänitasomittarin ja äänilähteen suuntauksen avulla. Koejärjestelyssä tehtiin vertailumittauksia kappaleiden välisten erojen osoittamiseksi.

MITTAUSTULOKSET JA YHTEENVETO

Mittaustuloksia tarkastellessa tulee huomioida mahdolliset virhelähteet, joilla voi olla vaikutusta testaustuloksiin. Ääneneristävyyden testaustuloksiin voi vaikuttaa ympäristön olosuhteet, kuten lämpötila ja ilman kosteus, sekä tilan muut taustääänet. Tuloksiin vaikuttaa myös esimerkiksi se, kuinka äänitasomittari on sijoitettu. Ääniä siirtyy rakennetussa koeympäristössä myös sivutiesiirtymänä. Mittausolosuhteet olivat vakioituneet mahdollisimman pitkälle, äänilähde ja äänitasomittari olivat samoilla paikoilla, ja äänilähdettä käytettiin samalla tehotasolla läpi mittauksen. Mittaustulokset ovat vertailukelpoisia keskenään ja määritetty absorptiopinta-ala on suuntaa antava ja menettää merkityksensä vertailevissa mittauksissa. Koekappaleiden välillä oli eroja massan ja biohiilen painoprosentin suhteen. Koekappaleiden kiinnityksen tiivyyttä testattiin mittauksen yhteydessä mittaamalla aukon ja kappaleen välisistä raoista kulkeutuvaa äänenpainetasoa.

Mittaushetkellä koerakenteiden kuivumisajoissa oli eroja. Normaali betoni oli kuivunut kaikista pidemmän aikaa (42 vrk), kun taas A-luokan purkupuunäytteet olivat ehtineet kuivua ainoastaan 30 vuorokautta. Koerakenteiden massat vaihtelivat, ja voi olla mahdollista, että kuivumisaika ja massojen ero vaikuttivat testaustulokseen.

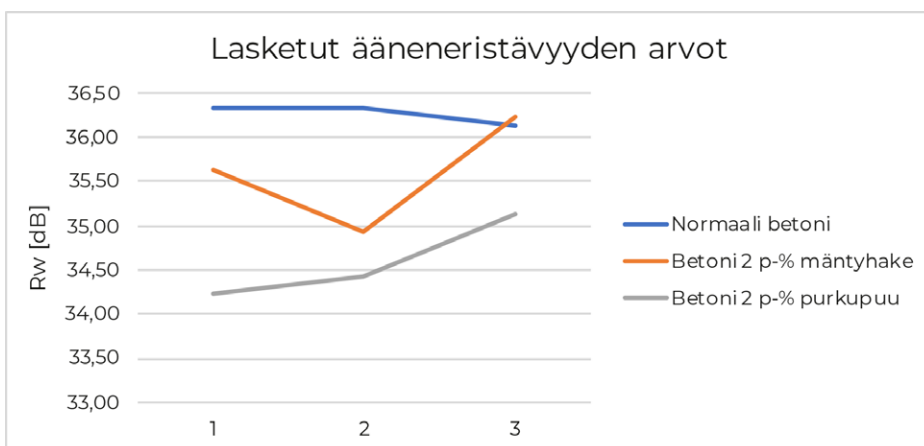
Ääniaallon kohdatessa rakenteen alkaa rakenne värähtelemään. Kevyt rakenne värähtelee saman äänenpaineen seurauksena enemmän kuin raskas rakenne, ja näin ollen raskaampi rakenne on tehokkaampi ääneneristävyydessä. Edellä mainittu ilmiö on ääneneristävyyden massalaki. (Lahtela 2004, 18.)

Taulukossa 2 on esitetty tuloksia. Mitattujen koekappaleiden ääneneristävyyden arvot olivat 34,23–36,33 Rw' ja keskiarvot 34,60–36,26 Rw' . Tulosten keskihajonnan maksimi oli 0,65 Rw' . Tuloksista on nähtävissä, että alhaisin Rw' -keskiarvo oli A-luokan purkupuu koesarjalla. Ristiriitaa tuloksien analysoinnissa aiheuttaa se, että massan hajonnan kasvaessa Rw' -arvo ei kasva. Pienin arvo on kevyimmällä koekappaleella A-luokan purkupuu -näyte (taulukossa vihreä rivi).

Taulukko 2. Ääneneristävyyden tulokset esitetty kootusti keskiarvoilla.

koekappale	lähettävä	vastaan-ottava	tausta	Rw'	massa (kg)
normaali betoni	98,00	54,40	31,00	36,33	43,78
normaali betoni	98,00	54,40	31,00	36,33	43,80
normaali betoni	98,10	54,70	31,00	36,13	42,58
keskihajonta	0,06	0,17	0,00	0,12	0,70
keskiarvo	98,03	54,50	31,00	36,26	43,39
betoni 2 p-% mäntyhake	97,90	55,00	31,00	35,63	43,34
betoni 2 p-% mäntyhake	97,60	55,40	31,00	34,93	43,30
betoni 2 p-% mäntyhake	97,70	54,20	31,00	36,23	43,86
keskihajonta	0,15	0,61	0,00	0,65	0,31
keskiarvo	97,73	54,87	31,00	35,60	43,50
betoni 2 p-% purkupuu	98,10	56,60	31,00	34,23	40,26
betoni 2 p-% purkupuu	97,80	56,10	31,00	34,43	42,78
betoni 2 p-% purkupuu	98,20	55,80	31,00	35,13	42,48
keskihajonta	0,21	0,40	0,00	0,47	1,38
keskiarvo	98,03	56,17	31,00	34,60	41,84

Koerakenteiden tulosten väliset erot ovat pieniä, eikä niitä voi mitata kenttämenetelmällä luotettavasti. Suurin eroavaisuus ilmenee purkupuubiohiilestä valmistetun ja normaalin betonisen koesarjan välillä (kuva 4). Käytetyn koesarjan tulisi olla laajempi, jotta mittaus-tulosten satunnaisia poikkeamia voitaisiin käsitellä tilastollisesti. Testauksessa käytetyn äänitasomittarin mittausepävarmuus oli $\pm 0,4$ dB.



Kuva 4. Koesarjojen kolmen kappaleen tuloksissa nähtävissä normaalin betonin tasaisin laatu.

Lisätutkimukselle on ehdottomasti tarvetta. Tutkimus biohiilen vaikutuksesta betonin ääneneristävyyteen tulisi toteuttaa vakioituissa laboratorio-olosuhteissa, jotta tuloksiin vaikuttavien muuttujien määrä saataisiin hallittua. Biohiili–sementtikorvaussuhdetta kasvattamalla voisi mahdollisesti saada selkeämpiä eroja ääneneristävyydessä verrattuna normaaliin betoniin. Myös biohiilen partikkelikoon vaikutusta betonin ääneneristävyyden ominaisuuksiin olisi hyvä tarkastella. Tulosten eroavaisuudet koesarjojen välillä olivat hyvin pieniä. Poikkeama keskiarvojen välillä oli suurimmillaan 1,66 dB (taulukko 2).

LÄMMÖNJOHTAVUUDEN TESTAUS

Erilaisilla rakennusmateriaaleilla on merkittäviä eroja niiden lämmönjohtavuudessa. Lämmönjohtamisella on suora vaikutus siirtyvään lämpöenergiaan: kun lämmönjohtavuus kaksinkertaisuus, siirtyvä lämpöenergia myös kaksinkertaistuu. Betonin lämmönjohtavuus on noin 1,7 W/mK, puun noin 0,13 W/mK, tiilen noin 0,6 W/mK ja mineraalivillan noin 0,05 W/mK. Voidaan siis karkeasti arvioida, että betoniseinän lävitse kulkeutuu noin 34 kertaa enemmän energiaa kuin saman paksuisen mineraalivillaseinän läpi. (Rakenteiden lämpötekniikka s.a.)

Eri tutkimukset ovat osoittaneet, että biohiilen lisääminen betoniin on laskenut rakenteen lämmönjohtavuutta. Cuthbertson ym. (2019) osoittivat tutkimuksessaan, että biohiili voisi toimia betonissa lämmöneristeenä. Kahden prosentin biohiililisäys antoi tutkimuksessa alhaisimman lämmönjohtavuuslukeman ja saavutti arvon 0,192 W/(mK). Sama biohiililisäys paransi lisäksi betonin puristuslujuutta. (Cuthbertson ym. 2019.) Biohiilen lisäämisen vaikutuksen betonin lämmönjohtumiseen voidaan olettaa johtuvan biohiilen huokosista, jotka rikkovat sementtimäisten materiaalien lämpösillan ja näin parantavat kappaleen

lämmöneristävyyttä. Portlandsementin korvaaminen biohiilellä sementtipohjaisissa komposiiteissa näyttäisi johtavan alhaisempaan tiheyteen niin tuoreen kuin kovettuneen betonin tarkastelussa. Tämän katsotaan johtuvan siitä, että biohiilellä on pienempi ominaispaino. (Akinyemi & Adesina 2020.)

KOEJÄRJESTELYT

Biohiilen lisäyksen vaikutusta betonin lämmönjohtavuuteen tutkittiin tarkoitusta varten valmistettujen koekappaleiden avulla. Koekappaleet asetettiin Kingspan Therma TP10 eristyslevyistä rakennetun kolmikerroksisen lämpölaatikon päälle (kuva 5).



Kuva 5. Lämmönjohtavuusmittauksissa käytetty lämpölaatikko (kuva: Mikko Hokkanen)

Lämpölaatikon sisään asennettu halogeenivalaisin toimi koejärjestelyn lämmönlähteenä. Halogeenivalaisimeen asennettiin himmennin ja tehomittari, jolloin valaisimen ottoteho (10 W) voitiin säätää tavoitearvoonsa jokaisen mittauksen aluksi. Koejärjestelyssä lämpötilojen mittaukseen käytettiin neljää K-tyypin termoparia, jotka kiinnitettiin lämpölaatikon sisälle, koekappaleen sisä- ja ulkopinnalle sekä lämpölaatikon ulkopuolelle. Mittausdata kerättiin Squirrel 2010 -dataloggerilla, josta se tallennettiin Excel-muotoon analysointia varten. Mittaukset suoritettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun talotekniikan energialaboratoriossa pääosin yöaikaan, jolloin esimerkiksi tilan muuttuvat lämpökuormat pysyivät minimissään. Yhden koekappaleen mittausjakso oli 1–2 päivää, jonka aikana koekappaleen sisä- ja ulkopuoliset lämpötilaerot vakiintuivat. Mittauksen alkuosat jätettiin tuloksista huomioimatta, koska koekappaleiden sisä- ja ulkopintojen lämpötilaerot muuttuivat koekappaleen lämpötilan nousun aikana. Mittauksen jatkuessa kappaleen lämpötila vakioitui pisteeseen, jossa se pysyi, ellei ympäröivän tilan lämpötila muuttunut merkittävästi. Ympäröivän tilan lämpötilamuutokset poistettiin mittausdatasta, jolloin eri mittauksista saatiin vertailukelpoisia.

Materiaalin lämmönjohtavuus λ määritettiin lämpövirran Q avulla: (Pulatovich 2021)

$$Q = \lambda \frac{t_i - t_o}{d}; \lambda = Q \frac{d}{\Delta T}; \left[\frac{W}{mK} \right]$$

t_i = kappaleen sisäpinnan lämpötila

t_o = kappaleen ulkopinnan lämpötila

ΔT = $t_i - t_o$

d = koekappaleen korkeus (100 mm)

Koekappaleen lämmönvastus R määritettiin kaavalla: (Pulatovich 2021)

$$R = \frac{d}{\lambda}; \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

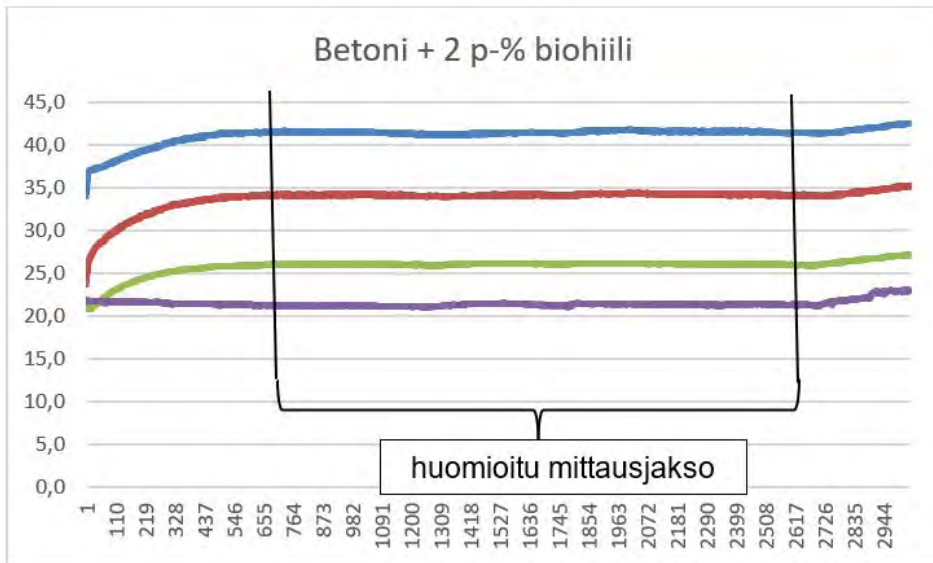
Maksimi lämpövirta koekappaleen läpi määritettiin kaavalla:

$$Q_{max} = \frac{10 W}{0,0729 m^2} = 137,14 \frac{W}{m^2}$$

jossa $0,0729 m^2$ on koekappaleen pinta-ala.

MITTAUSTULOKSET JA YHTEENVETO

Kuvassa 6 on esitetty esimerkki Excel-muodossa olevasta mittausdatasta. Kuvassa ylin/ensimmäinen käyrä on lämpölaatikon sisälämpötila, toinen koekappaleen sisäpinnan lämpötila, kolmas koekappaleen ulkopinnan lämpötila ja neljäs ympäröivän tilan lämpötila. Kuvaajan alussa näkyy kappaleen lämpötilan nousu sekä lopussa ympäröivän tilan lämpötilan nousu, jotka on jätetty laskennan ulkopuolelle.



Kuva 6. Esimerkki mittausdatasta

Tuloksia arvioitaessa huomioitiin, että mittaukset suoritettiin kenttäolosuhteissa, joissa kaiken lämpövirran oletettiin johtuvan kappaleen kahden pinnan välillä. Todellisuudessa tapahtuu myös konvektiota ja lämpösäteilyä, joten määritettyjä lämmönjohtavuuden λ ja lämmönvastuksen R arvoja ei voida pitää absoluuttisina ja siten vertailukelpoisina esimerkiksi kirjallisuudessa esitettyihin betonin λ -arvoihin. Tulosten analyysissa oletettiin, ettei betoniin lisätyllä biohiilellä ole vaikutusta lämmönjohtumisen, konvektion ja säteilyn suhteellisiin osuuksiin ja menetelmän avulla saadut tulokset olisivat siten keskenään vertailukelpoisia. Mittaustuloksista lasketut lämmönjohtavuuksien ja lämmönvastusten arvot on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Koekappaleille lasketut lämmönjohtavuuksien ja lämmönvastusten arvot

λ – lämmönjohtavuus, W/mK						
MATERIAALI	1	2	3	λ_{average}	λ_{diff}	λ_{stdev}
0 p-% biohiili	1,67	1,68	1,62	1,66	0	0,032
2 p-% biohiili	1,69	1,53	1,66	1,63	-0,03	0,085
5 p-% biohiili	1,63	1,67	1,48	1,59	-0,07	0,096

R – lämmönvastus, m ² K/W						
MATERIAALI	1	2	3	R _{average}	R _{diff}	R _{stdev}
0 p-% biohiili	0,060	0,059	0,062	0,060	0	0,0012
2 p-% biohiili	0,059	0,065	0,060	0,062	0,0013	0,0033
5 p-% biohiili	0,061	0,060	0,067	0,063	0,0027	0,0039

Mitattujen koekappaleiden lämmönjohtavuuksien arvot olivat 1,48–1,69 W/mK ja keskiarvot 1,59–1,66 W/mK. Tulosten keskihajonnan maksimi oli 0,096 W/mK. K-tyypin termoparien toimivuutta mittausjärjestelyssä arvioitiin mittausten keskihajonnan perusteella. Mitattujen lämpötilojen keskihajonnat olivat valituilla mittausjaksoilla tyypillisimmin 0,2–0,3 °C. Lämpötilojen mittausten keskihajonnasta johdettu mittausepävarmuus lämmönjohtavuuden arvolle on $\pm 0,04$ W/mK.

Saatuja lämmönjohtavuuksien arvoja vertailtiin siten, että biohiiltä sisältämätön (normaali betoni) koekappale valittiin vertailukohteeksi, johon kaksi ja viisi painoprosenttia biohiiltä sisältävien koekappaleiden lämmönjohtavuuksien tuloksia verrattiin. Tuloksista nähdään, että lämmönjohtavuuksien keskiarvot ovat kaksi painoprosenttia biohiiltä sisältävillä koekappaleilla 0,03 W/mK pienemmät ja viisi painoprosenttia biohiiltä sisältävillä koekappaleilla 0,07 W/mK pienemmät kuin vertailukappaleilla. Mittaustulosten keskihajonta kaksi ja viisi painoprosenttia biohiiltä sisältävien koekappaleiden osalta on 0,085–0,096 W/mK, joten havaittu λ -arvojen muutos koekappaleiden biohiilipitoisuuden kasvaessa on pienempi kuin koesarjan keskihajonta. Näin ollen havaittu poikkeama saattaa aiheutua myös muista kuin materiaalin ominaisuuksiin liittyvistä tekijöistä, eikä tulosten perusteella voida osoittaa, että biohiilen kahden ja viiden painoprosentin lisäyksillä olisi vaikutusta käytetyn betonimateriaalin lämmönjohtavuuteen ja lämmönvastukseen.

Käytetyn koejärjestelyn avulla osoitettiin, että vastaavien biohiilipitoisuuksien vaikutuksia betonin lämmönjohtavuuteen tulisi mitata laboratorio-olosuhteissa, jolloin mittauksen ympäristöolosuhteet (lämpötila ja kosteus) hallitaan paremmin. Koekappaleiden pintalämpötilojen mittaamiseksi tulisi käyttää useampaa mittauspistettä, jolloin satunnaiset poikkeamat koemateriaalin rakenteessa saataisiin paremmin hallittua. Käytetyn koesarjan tulisi olla laajempi, jotta mittaustulosten satunnaisia poikkeamia voitaisiin käsitellä tilastollisesti.

KOSTEUDEN SIIRTYMISEN TESTAUS

Sisäilman terveellisyys on tärkeä osa rakennuksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Rakennuksen kosteustekninen toimivuus kuuluu terveellisen sisäilman hallintaan. Kun rakennushankkeeseen ryhdytään, on huolehdittava, että rakennuksen kosteus- ja lämpöolosuhteet ovat terveelliset ja turvalliset. (Suomen rakentamismääräyskokoelma s.a.) Esimerkiksi rakennusosien ja rakenteiden on toimittava kosteusteknisesti niin sisäisissä kuin ulkoisissa kosteusrasituksissa koko niiden suunnitellun käyttöiän (Rakennusten kosteustekninen toimivuus 2020, 9). Kosteus voi aiheuttaa rakenteille ja rakennuksille vaurioita sekä välisesti vakavia terveysriskejä käyttäjille (Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille s.a., 68, 77).

Rakennuksen kosteudenhallintaan liittyvät vaatimukset ovat määritelty useissa laeissa. Maankäyttö- ja rakennuslain 117 c §:ssä on rakennuksen terveellisyyteen liittyviä seikkoja, joissa kosteus on yksi osa-alue (Maankäyttö- ja rakennuslaki (alueidenkäyttölaki) 5.2.1999/132). Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta pohjautuu maankäyttö- ja rakennuslakiin, ja siinä määritellään niin uuden rakennuksen kosteusteknistä toimivuutta kuin olemassa olevien rakennuksien korjaus- ja muutostöitä sekä rakennuksen käyttötarkoituksen muutosta. (Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 24.11.2017/782, 1 §.)

On tärkeää tiedostaa, että monien materiaalien fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet voivat muuttua kosteudelle altistettuna. Ne voivat esimerkiksi kadottaa jonkun ominaisuutensa tai saada jopa jonkun lisäominaisuuden. Materiaalit imevät ja luovuttavat kosteutta eri tavalla. Osa materiaaleista imee itseensä kosteutta enemmän. Myös eri materiaalien nopeus imeä ja luovuttaa kosteutta vaihtelee. Erityisen oleellista on tunnistaa käytettävän materiaalin kosteuskäyttäytyminen, jotta pystytään säilyttämään kyseisen materiaalin laatuominaisuudet tarkoituksenmukaisena. (Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille s.a., 52.)

Betonirakentamisen kannalta tärkeitä tietoja ovat betonin ominaisuus, rakenneratkaisu ja ympäröivät olosuhteet, sillä ne vaikuttavat rakenteen kuivumisen nopeuteen. Kuitenkin voidaan pääsääntöisesti sanoa, että betonirakenteet kuivuvat suhteellisen hitaasti. (Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille s.a., 64.) Betoni on hygroskooppinen materiaali, ja se pyrkii ympäristön kanssa kosteustasapainoon. Betonissa on aina kosteutta, ja sen sisältämä kosteus on tärkeässä roolissa siinä tapahtuville kemiallisille ja fysikaalisille reaktioille. Vaikka betonille itselleen kosteudesta ei ole haittaa, aiheuttaa se seuraavanlaisia ongelmia (Köliö 2023.):

- Betonia ympäröivät kosteudelle herkät materiaalit saattavat vaurioitua ja aiheuttaa sisäilmaan ongelmia.
- Betonin pinnoitettavuudessa voi olla haasteita.
- Haitallisten aineiden kulkeutuvuus.
- Jäätyminen aiheuttaa betoniin vaurioita.
- Edesauttaa sähkökemiallisen korroosion etenemistä.

Betonin hydratoitumisreaktiossa osa kosteudesta poistuu, ja tähän vaikuttaa valmistamiseen käytetty vesi–sementtisuhte. Betonin lopullinen kuivuminen tapahtuu haihtumiskuivumisena. (Köliö 2023.)

KOEJÄRJESTELY JA MITTAUSTULOKSET

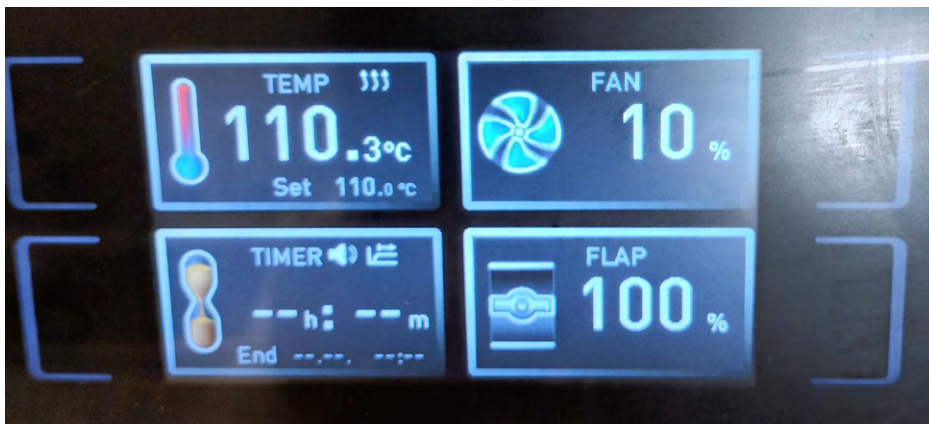
Tutkimuksen tarkoituksena oli vertailla normaalin betonin ja biohiilibetonin kosteuden tasaantumisen eroavaisuuksia eli veden haihtumista ja sitoutumista näytteissä.

Laboratoriokokeisiin suunniteltiin ja valmistettiin koesarja, joka sisälsi kolme eri betoni-seosta:

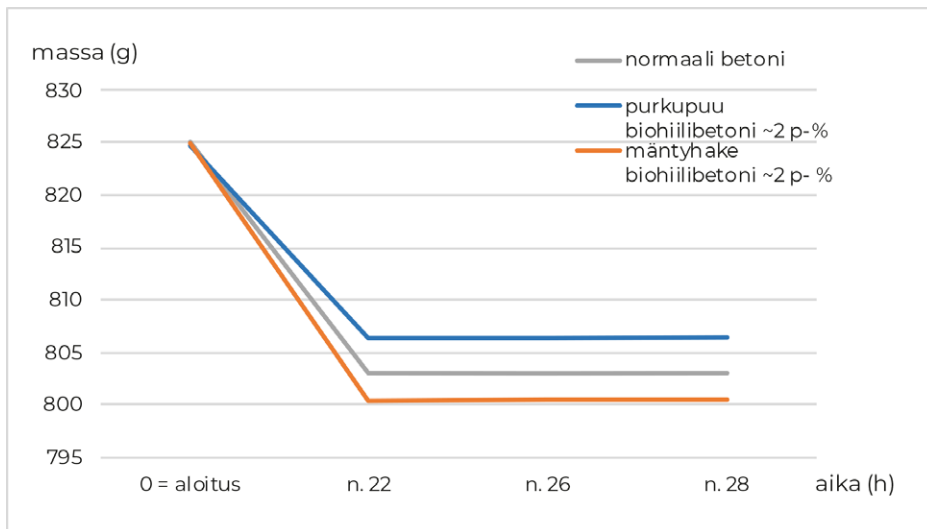
- normaali betoni, ei lisätty biohiiltä
- biohiilibetoni, jossa sementtiä korvattu -2 p-%:n mäntyhakebiohiilellä
- biohiilibetoni, jossa sementtiä korvattu -2 p-%:n purkupuubiohiilellä.

Testauksen tulokset eivät ole yleistettävissä, ja ne ovat vertailtavissa kokeessa käytettävien näytteiden välillä. Tuloksia tarkastellaan näytesarjojen kolmen rinnakkaisnäytteen keski-arvoilla.

Ennen laboratoriokokeen aloitusta valetut koekappaleet murskattiin ja siivlöitiin neljän millimetrin seulakokoa käyttäen. Yksittäisen näytteen määrä oli kokeessa 800 grammaan. Kokeessa mukailtiin standardia SFS-EN-1097-5. Kokeen ensimmäisessä vaiheessa näytteet kuivattiin kosteuden poistamiseksi. Näytteet asetettiin lämpökaappiin, jossa lämpötila ohjelmoitiin 110 °C:seen (tasalaatuisuus +/- 5 °C) (kuva 7). Näytteet asetettiin kolmelle lämpökaapin hyllytasolle. Jokaiselle hyllylle laitettiin kolme näytettä, jotka olivat jokaisen sarjan rinnakkaiset näytteet. Tällä asettelulla luotiin näytteiden välille tasapuoliset olosuhteet, jos kaapin hyllytasojen välillä sattuisi olemaan olosuhteissa poikkeavuutta. Näytteille tehtiin punnituksia siihen asti, kunnes näytteiden niin sanottu vakioomassa saavutettiin (kuva 8).



Kuva 7. Lämpökaapin olosuhdeasetukset kuivatuksen aikana (kuva: Anna Dunderfelt).



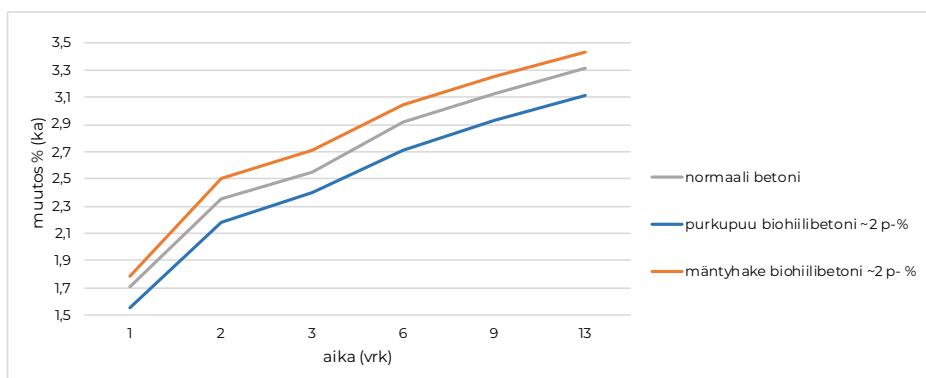
Kuva 8. Näytteiden massassa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia noin 22 tunnin kuivatuksen jälkeen.

Näytteet siirrettiin kuivatuksen jälkeen olosuhdekaappiin (kuva 9), johon määritettiin vakioitu lämpötila 25 °C ja suhteellinen kosteus 85 % RH. Näytteitä punnittiin säännöllisesti, minkä avulla selvitettiin näytteiden sitomaan kosteuden määrää. Näytteille tehtiin punnituksia vaa'alla säännöllisin väliajoin ja tällä seurattiin massan muuttumista. Punnituksia tehtiin, kunnes tulokset osoittivat, että näytteiden kosteuden sitoutumisesta tuli tasaista. Tämä oli havaittavissa siitä, että näytteiden massa ei tullut enää nousupiikkejä punnitusten välillä. Betonimateriaali sitoo kosteutta itseensä hyvin pitkän aikaa, mutta kokeita ei ollut mahdollista jatkaa niin pitkään. Näytteet olivat olosuhdekaapissa yhteensä 13 vuorokauden ajan.



Kuva 9. Näytteet olosuhdekaapissa kolmessa tasossa, hyllyllä yksi jokaisesta koesarjasta (kuva: Miia Sourander).

Kuvassa 10 on esitetty, kuinka näytteet sitoivat itseensä kosteutta olosuhdekaapissa. Betoninäyte, jossa oli sementin korvaamiseen käytetty noin kahden painoprosentin mäntyha-kebiohiiltä, sitoi itseensä kosteutta eniten. Kuvassa on lisäksi nähtävissä, kuinka kosteuden sitoutuminen jatkuu edelleen, mutta käyrä näyttää noudattelevan samaa linjaa eikä näyt-teiden massaan tullut enää nousupiikkejä punnitusten välillä.



Kuva 10. Näytteiden käyrät nousivat tasaisesti seurantajakson loppuvaiheessa.

YHTEENVETO

Betoni on hygroskooppinen materiaali, ja se ilmenee näytteiden kuivatuksen sekä kosteuden tasaantumisen seurannassa. Kokeissa tuli esille se, että betonimateriaalilla on kyky sitoa kosteutta itseensä ja vapauttaa myös sitä. Koe oli vertaileva, jossa biohiilibetonia verrattiin normaaliin betoniin.

Koejärjestelyn aikana näytteiden kosteuspitoisuuden muutoksien erot olivat hyvin pieniä, mutta molemmassa kokeiden osioissa kuitenkin noin kahden painoprosentin mäntyhakebiohiilibetoninäyte sekä haihdutti että sitoi kosteutta prosentuaalisesti enemmän kuin muut näytteet.

Betonin kosteuden tasapainottuminen ympäristön kanssa voi kestää pitkiä aikoja, mutta kokeessa ei ollut mahdollista venyttää seuranta-aikaa. Kokeen lopetus tehtiin sillä perusteella, että kosteuden tasaantuminen oli hyvin tasaista ja käyrät noudattivat omaa linjaansa.

Kokeessa ei ilmennyt betoninäytteiden välillä merkittäviä eroja. Virhelähteitä on voinut kokeessa aiheuttaa esimerkiksi näytteiden valmistuksessa, hienontamisessa ja punnituksessa tapahtuneet erot. Kokeen tuloksia ei voi verrata kokonaisuudessaan betoninäytteisiin, koska koe-kappaleet oli jauhettu. Suuremmalla biohiilen ja sementin korvausosuudella voisi mahdollisesti havaita merkittävämpiä eroja verrattuna normaaliin betoniin. Biohiilellä itsellään on hyvä kosteudensitomiskyky, ja sen kosteudenhallintaominaisuuksia tulisi tutkia enemmän betonin raaka-aineesta. Kosteudenhallinta on tärkeää rakennusteollisuudessa, ja olisi merkittävää saada tutkimustietoa esimerkiksi biohiilen vaikutuksesta betonin kuivumisprosessin nopeuttamiseen. Onnistunut kosteudenhallinta vaikuttaa rakennuksen koko elinkaareen niin taloudellisesti, laadullisesti kuin terveydellisesti.

LÄHTEET

Akinyemi, B. & Adesina, A. 2020. Recent advancements in the use of biochar for cementitious applications: A review. *Journal of Building Engineering*. Volume 32, November 2020, 101705. s.1–13. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101705> [viitattu 9.8.2023].

Asuinrakennusten äänitekniiikan täydentävä suunnitteluohje. 2009. Rakennusteollisuus. *Betoni*. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAIQw7AJahcKEwiAodjyp-fL_AhUAAAAAHQAAAAAQAg&url=https%3A%2F%2Fwww.elementtisuunnittelu.fi%2FDownload%2F21797%2FSuunnitteluohje_final_osa1.pdf&psig=AOvVaw0iXU-QH7ShJtot-CN0s2NOF&ust=1688465382407723&opi=89978449 [viitattu 24.4.2023].

Cuthbertson, D, Berardi, U., Briens C. & Berruti, F. 2019. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. *Biomass and Bioenergy* 120 (2019), pp. 77-83. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.007> [viitattu 17.4.2023].

Isover. 2023. Ilmaääneneristävyys (R'). WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.iso-ver.fi/artikkeli/ilmaaaneneristavyys-r#ilmaaaneneristys_mittaustapa [viitattu 24.4.2023].

Kylliäinen, M., Latvanne, P., Kuusinen, A. & Kekki, T. 2017. Puukerrostalojen äänieristys. *Asiantuntijaselvitys. Karelia ammattikorkeakoulu C:44*. Joensuu. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132864/C44_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 6.6.2023].

Köliö, A. 2023. Betonirakenteiden kosteus. *Betonirakenteiden korjaaminen 2023*. Renovatek Oy. Tampereen yliopisto, korjausrakentaminen. *Betoniyhdistys*. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssit/betonirakenteiden-korjaaminen-ja-tutkiminen/luento2.kolio_betonirakenteiden_kosteus_pruju2023.pdf [viitattu 22.6.2023].

Lahtela, T. 2004. Ääneneristys puutalossa. *Puurakenteisen asuinrakennuksen ääneneristävyyden suunnitteluohje*. Wood Focus Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/07/%C3%84%C3%A4neneristys-puutalossa-web.pdf> [viitattu 2.5.2023].

Lahtela, T., Kylliäinen, M., Lietzén, J., Kovalainen, V. & Talus, L. 2021. Ääneneristys puutalossa. *Puuinfo Oy*. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2021/05/Aanikirja_kokonainen-1.pdf [viitattu 24.4.2023].

Maankäyttö- ja rakennuslaki (alueidenkäyttölaki) 5.2.1999/132.

Pulatovich, M. 2021. Energy Efficient Building Materials for External Walls of Residential Buildings Physical Properties of Heat. International Journal of Culture and Modernity. Vol 9. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.researchgate.net/profile/Bobur-Matyokubov/publication/369023535_International_Journal_of_Culture_and_Modernity_Energy_Efficient_Building_Materials_for_External_Walls_of_Residential_Buildings_Physical_Properties_of_Heat/links/6405bc0d98a97717e1c1fe/International-Journal-of-Culture-and-Modernity-Energy-Efficient-Building-Materials-for-External-Walls-of-Residential-Buildings-Physical-Properties-of-Heat.pdf [viitattu 20.6.2023].

Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. s.a. Kosteus. Terveet tilat 2028 -ohjelma. Ympäristöministeriö. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://tilatjaterveys.fi/documents/39510712/102937006/Rakennusfysiikan+oppimateriaali+insinöörinkoulutukseen_Kosteus.pdf [viitattu 3.8.2023].

Rakennusten kosteustekninen toimivuus. 2020. Ympäristöministeriön ohje. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje_Rakennusten-kosteustekninen-toimivuus-2020-F3A686EA_E374_4983_A396_CC15D6830B7B-156354.pdf/323bffe4-19f4-9b97-6c59-d314db622cb4/Ohje_Rakennusten-kosteustekninen-toimivuus-2020-F3A686EA_E374_4983_A396_CC15D6830B7B-156354.pdf?t=1603260109033 [viitattu 3.8.2023].

Rakenteiden lämpötekniikka s.a. Sisäilmayhdistys ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Rakenteiden-lampotekniikka> [viitattu 3.8.2023].

SFS-EN-1097-5. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 5. Kosteuspitoisuuden määrittäminen kuivaamalla tuuletetussa lämpökaapissa.

Suomen rakentamismääräyskokoelma. s.a. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/rakentamismaaraykset> [viitattu 9.5.2023].

Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 24.11.2017/782.

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen ääniympäristöstä annetun ympäristöministeriön asetuksen 5 ja 6 §:n muuttamisesta 360/290.

Ääniympäristö. 2018. Ympäristöministeriön ohje rakennuksen ääniympäristöstä. Ympäristöministeriö. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ymparistoministerion-ohje-rakennuksen-aaniymparistosta-2852D34E_DA43_4DCA_9CEE_47DBB9EFCB08-138568.pdf/5e3efaa4-9566-17ae-83c6-2b5805fcdf9d/Ymparistoministerion-ohje-rakennuksen-aaniymparistosta-2852D34E_DA43_4DCA_9CEE_47DBB9EFCB08-138568.pdf?t=1603260126601 [viitattu 27.4.2023].

BIOHIILEN VAIKUTUS BETONIN HIILIJALANJÄLKEEN

Anna Dunderfelt & Miia Sourander & Auli Lämsä

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan kahta eri asiaa. Ekologiseen jalanjälkeen pohjautuva hiilijalanjälki tarkoittaa planeetan uusiutumiskyvyn mittaria, jolla mitataan, kuinka paljon ihmistoiminta (luonnonvarojen käyttö, tuotteiden valmistus ja jätteet) heikentää luonnon uusiutumiskykyä ja hiilensidontaa. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, kuinka paljon metsää tarvittaisiin sitomaan tuotetut päästöt niin, ettei hiilidioksidi kertyisi ilmakehään. Toinen, uudempi hiilijalanjälki-termi tarkoittaa ihmisperäisiä kasvihuonekaasupäästöjä hiilidioksidiekvivalenttina ilmaistuna. (Mancini ym. 2016.) Hiilijalanjälkilaskentaa ohjaa ISO 14067 -standardi.

Hiilijalanjäljen lisäksi voidaan tarkastella tuotteen tai palvelun hiilitehokkuutta, joka vertaa päästöjä ja tuotettuja hyödykkeitä, palveluita sekä elämänlaatua (Säynäjoki ym. 2014, 5). Hiilijalanjälkeä voidaan myös esittää hiili-intensiteetillä, joka tarkoittaa organisaation kasvihuonekaasupäästöjen suhdetta liikevaihtoon (tCO₂/€) (Tulevaisuussanasto s.a.). Hiilijalanjälkilaskennassa huomioidaan yleensä kuuden eri kasvihuonekaasun yhteismäärä hiilidioksidiekvivalenttina: hiilidioksidi, metaani, dityppioksidi, fluorihiiilivedyt, perfluorihiiilivedyt ja rikkiheksafluoridit (UN 1998, 3, 19).

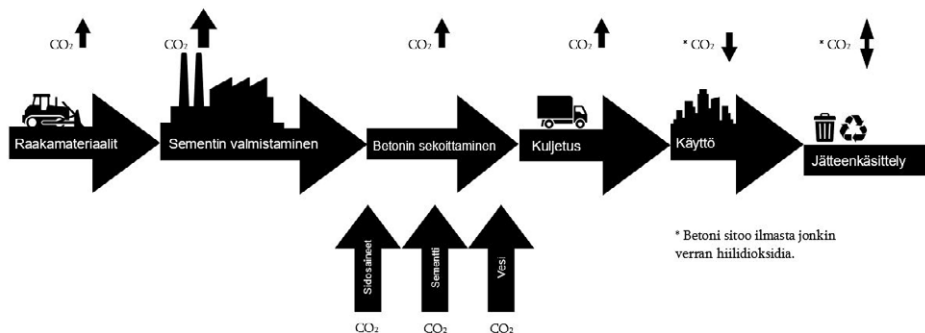
Hiilijalanjälkilaskenta antaa vain hyvin karkean kuvan tuotteen tai palvelun ympäristövaikutuksista verrattuna elinkaariarvioon, ja se voi myös ainoana indikaattorina vääristää ympäristövaikutuksien arviointia. Esimerkiksi biopolttoaineiden matala hiilijalanjälki voi antaa kuvan, että ne ovat täysin ekologinen vaihtoehto fossiilille polttoaineille. Biopolttoaineiden todelliset ympäristövaikutukset tulevat näkyviin vasta tarkasteltaessa niiden vaikutuksia maankäyttöön sekä edelleen sademetsiin ja muihin tärkeisiin elinalueisiin. Kuitenkin hiilijalanjälkiarviointia voidaan käyttää vertailtaessa kahta tai useampaa samantyyppistä tuotetta. Hiilijalanjälkeä laskettaessa on myös tärkeää ottaa huomioon systeemin rajat eli se, mitä laskuissa huomioidaan, ja näin tuotevertailuakin on mielekäästä tehdä. (Weidema ym. 2008, 3–4.)

Hiilijalanjälkilaskennassa raaka-aineen määrä kerrotaan kyseisen raaka-aineen päästökertoimella. Päästökerroin ilmaistaan usein arvona CO₂eq/kg, mutta myös CO₂eq/m³ ja CO₂eq/l ovat käytössä. Tuotteen koostuessa useasta raaka-aineesta lasketaan ensin raaka-ainemäärät, jotka kerrotaan seuraavaksi päästökertoimilla. Näin saadut raaka-aineiden hiilijalanjäljet lasketaan yhteen, jolloin saadaan koko tuotteen hiilijalanjälki.

BETONIN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET TARKASTELUSSA

Sementti ja betoni ovat eniten käytettyjä rakennusmateriaaleja johtuen niiden raaka-aineiden hyvästä saatavuudesta, helposta työstettävyydestä ja monipuolisuudesta. Maailman kasvihuonekaasupäästöistä kolmasosa tulee materiaalien valmistuksesta, ja vuonna 2019 kokonaispäästöistä kymmenen prosenttia johtui sementin ja betonin valmistuksesta, kuljetuksesta ja betonirakenteiden hajottamisesta. Vaikka betonieollisuus on yksi suurimpia saastuttajia, se on myös yksi hankalimpia muutettavia: jatkuva populaation kasvu lisää betonituotteiden kysyntää nyt ja tulevaisuudessa. Betonia käytetään rakennusten lisäksi laajasti kriittisessä infrastruktuurissa, kuten vedenpuhdistusjärjestelmissä. Sementtiä käytetään betonin lisäksi myös kipsissä ja laastissa. Ihmisperäisistä kasvihuonekaasupäästöistä kahdeksan prosenttia tulee sementin valmistuksesta (1,5 miljardia tonnia), ja portlandsementtiä tuotetaan vuosittain noin neljä miljardia tonnia (vuonna 2022 jo 4,4 miljardia tonnia) – eli saman verran kuin ruokaa. Betonin määrä maapallolla ylittää jo elävän biomassan määrän, ja pelkästään runkoaineiden valmistuksen arvioidaan lisääntyvän 31 gigatonnilla vuoden 2011 määrästä vuoteen 2060 mennessä. (Belaïd 2022, 1–2; Winters ym. 2022, 2.)

Portlandsementin valmistuksessa vapautuu noin tonni hiilidioksidia yhtä tonnia portlandsementtiä kohden. Iso osa päästöistä syntyy klinkkerin valmistuksesta. Hiilidioksidipäästöt tulevat valmistusprosessissa pääosin kolmesta eri lähteestä: kalsinoinnista (kalkkikiven sitoma hiilidioksidi vapautuu), fossiilisten polttoaineiden poltosta ja energiantuotannosta. Klinkkerin määrä sementissä on keskimäärin 70–80 prosenttia, loput seoksesta ovat kalkkikiveä, lentotuhkaa, kuonaa, pozzolaania ja kalsinoitua savea. Betonin valmistus puolestaan sitoo jonkin verran hiilidioksidia (kuva 1): betonin kovettuessa hiilidioksidi reagoi kalsiumsilikaattien ja hydrataatiotuotteiden kanssa muodostaen karbonaatteja. Betonin hiilensidontaa voidaan lisätä tehostamalla näitä reaktioita, mutta se vaatii tarkat olosuhteet ja reaktiota on hankala kontrolloida. (Neville 2008, 63; Thomas 2020; Winters ym. 2022, 2–4.)



Betonin elinkaaren hiilidioksidipäästöt

Kuva 1. Betonin hiilidioksidivaikutukset sen elinkaaren aikana (mukailleen Concrete s.a.).

Betoni- ja sementtiteollisuuden vihreän siirtymän tiellä olevia esteitä ovat muun muassa rakennusteollisuuden nopeat aikataulut ja eri maiden toisistaan poikkeavat rakennustandardit. Rakennusteollisuuden liiketoimintamalli perustuu nopeisiin aikatauluihin, ei elinkaariajatteluun, tuotteen elinkaaren aikaisiin säästöihin tai materiaalin ja energian säästämiseen. Vihreä siirtymä vaatii tuotannon hiilidioksidipäästöjen pienentämistä, valmistuksen aikaisen energiankäytön vähentämistä tai fossiilisista polttoaineista luopumista. Esimerkiksi betoniseoksissa käytettävistä terveydelle ja ympäristölle haitallisista kemikaaleista tulisi luopua. Lisäksi sementin korvaamista toisilla materiaaleilla ja betonin kierrättämistä pitäisi tehostaa. Tämä vaatii myös valmistajien ja käyttäjien asenteiden muuttumista ja uudenlaista sääntelyä. (Bambang 2014, 306, 316.)

Arkkitehtoniset standardit ja rakennusmääräykset määrittelevät globaalisti, mitä materiaaleja rakennusteollisuudessa saa käyttää, mutta ne eivät tällä herkellä sisällä hiilineutraalia betonia, mikä takia urakoitsijat ja insinöörit käyttävät edelleen yleisesti perinteistä betonia (Winters ym. 2022, 12). Rakennusmääräysten päivittäminen vaatii rakennuksen hiilijalanjäljen selvittämistä. Suomen uudistunut maankäyttö- ja rakennuslaki on tulossa voimaan vuoteen 2025 mennessä, jolloin myös velvoite hiilijalanjälkilaskennalle ja elinkaariarvioinnille astuu voimaan. Tämä tarkoittaa, että rakennusmateriaalien hiilidioksidipäästöjen tulee olla laskettuna jo rakennusten lupavaiheessa. Velvoite on osa vuonna 2017 julkistettua vähähiilisen rakentamisen tiekarttaa (Ympäristöministeriö 2023). Suomen betoniyhdistys on luonut vapaaehtoisen betonin vähähiilisyysluokituksen. Kyseessä on kansallinen menetelmä betonin hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Vähähiilisyysluokituksella luodaan betonialalle tuotemerkeistä riippumaton yhtenäinen tapa kertoa vähähiilisistä betonilaauduista. (BY-vähähiilisyysluokitus s.a.) Norjassa vastaavanlainen luokitus on ollut käytössä jo vuodesta 2016, ja sen avulla päästöjä on vähennetty noin 20 prosenttia (Tompuri 2022).

Betonin hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää lyhyellä aikavälillä ottamalla käyttöön enenevässä määrin seosmenttejä. Kuitenkin tulevaisuudessa on löydettävä uusia seosaineita betoniin, sillä esimerkiksi masuunikuonan saatavuus ei välttämättä tule riittämään jatkuvasti kasvavan kysynnän vuoksi. Samankaltaisia haasteita liittyy lentotuhkaan. Lentotuhkan on arvioitu loppuvan Suomen lähialueilta varsin pian. (Punkki 2021, 78.)

BIOHIILEN VAIKUTUS BETONIN HIILIJALANJÄLKEEN

Biohiilen käyttö on lisääntynyt, koska se vähentää biomassan negatiivisia ympäristövaiikutuksia. Rakennusteollisuudessa sitä on käytetty muun muassa betonin raaka-aineena. Biohiili parantaa sementin hydrataatiota betoninvalmistusprosessissa ja vähentää runkoaineista peräisin olevien orgaanisten epäpuhtauksien liikettä betonissa. Se saattaa näin mahdollistaa myös kierrätettyjen tai epäpuhtaampien runkoaineiden käytön. Biohiilen korkea pH ja vedenpidätyskyky vähentävät betonissa olevan vapaan veden määrää, mikä vähentää kapillaarihuokosien muodostumista kovettumisen aikana ja parantaa betonin kestävyyttä. (Armah ym. 2023, 39.)

Biohiiltä ja kalsiumkarbonaattia on pidetty mahdollisuuksina sitoa hiilidioksidia betoniin, mikä vähentää samalla sementin tarvetta ja sementin valmistuksesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Biohiiltä on yleisimmin käytetty maaperässä, ja tässä käytössä sitä onkin tutkittu runsaasti. Biohiili pysyy maaperässä pitkiä aikoja (yli tuhat vuotta), mikäli hapen ja hiilen moolisuhde on alle 0,2. Mikäli moolisuhde ylittää arvon 0,6, puoliintumisaika on alle sata vuotta. Rakennusmateriaaleissa biohiilen sitoutuminen ei ole niin suurelta osin riippuvainen biohiilen kemiallisista ominaisuuksista, joten se voi tarjota paremman ja ehkä pysyvemmän vaihtoehdon hiilensidonnalle kuin käytettäessä maaperässä. (Winters ym. 2022, 1–2.)

Sementin korvaaminen on kaikista olemassa olevista keinoista tehokkain betoniteollisuuden kasvihuonekaasupäästöjen vähentäjä. Mikäli sementtiä korvataan, tulee ottaa huomioon, että betonin karbonatisoitumiskyky eli hiilensidonta hiilidioksidin reaktioiden kautta säilyy kovettumisprosessin aikana. Jos sementin korvaaminen johtaa karbonatisoitumisen heikentymiseen, sillä voi olla kokonaisuuden kannalta jopa negatiivisia vaikutuksia. Biohiiltä voi lisätä betoniin sementin korvaajaksi tai lisäaineeksi, ja sillä voi myös korvata runkoaineita (hiekkä ja sora). Määrällisesti biohiiltä voi olla betonissa enemmän, mikäli sillä korvataan runkoaineita. Tiettyyn pisteeseen asti biohiili lisää myös betonin puristuslujuutta, mutta betonin ja biohiilen välistä vaikutusta ei ole kuitenkaan toistaiseksi tutkittu kattavasti. (Winters ym. 2022, 2, 4.)

Biohiilen valmistusprosessissa, riippuen valmistusolosuhteista ja biomassalähteestä, kasvihuonekaasujen nettopäästöjä voidaan vähentää jopa 870 kg CO₂eq per 1000 kg kuivaa raaka-ainetta. Valmistus vähentää myös tavallisesta jätteenkäsittelystä johtuvia metaani- ja typpioksidipäästöjä. Rakennusmateriaaleissa biohiili voi sitoa hiilidioksidia myös suoraan ilmasta, sillä biohiilen huokokset absorboivat hiilidioksidia. Esimerkiksi biohiilipinnoitetujen kipsipellettien havaittiin absorboivan hiilidioksidia. Valmistettaessa puubiomassasta biohiiltä, jota käytetään runkoaineiden korvaajana, hidastaa se hiilidioksidipäästöjä sadoilla tai jopa tuhansilla vuosilla verrattuna luonnollisen hajoamisen (lahoamisen) päästönopeuteen. (Winters ym. 2022, 4, 6–7.)

HANKKEEN HIILIJALANJÄLKILASKELMA

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun BiBe-hankkeessa tutkittiin biohiilen käyttökohteita ja mahdollisuuksia rakennusteollisuudessa betonin raaka-aineena. Hiilijalanjälkilaskennan avulla vertailtiin perinteisen betonin ja vihreän betonin hiilijalanjälkeä.

Yhteistyökumppani Hyperion Robotics Oy tarjosi omalle tuotteelleen valmiiksi lasketun hiilijalanjäljen, ja vertailua varten laskettiin normaalin betonin hiilijalanjälki. Lisäksi laskelma tehtiin seoksille, joissa sementtiä on korvattu biohiilellä 2 ja 5 painoprosentin verran (kuva 2). Näitä korvaussuhteita tarkasteltiin pääasiallisesti sementin korvaajana hankkeen muissa toimenpiteissä.



Kuva 2. Hankkeen kokeissa biohiilellä korvattiin sementtiä eri seossuhteilla (kuva: Anna Dunderfelt).

Hiilijalanjäljen vertailu tehtiin tuhannelle kilolle valmista betonia. Vertailu suoritettiin laskemalla kullekin raaka-ainemäärälle (hiekkä, sora, sementti, vesi) päästökertoimella kerrottu hiilidioksidiekvivalenttiarvo, ja nämä arvot yhteenlaskettuna ilmoittavat tuotteen hiilijalanjäljen. Laskutavan ulkopuolelle rajautui monia eri tekijöitä, jotka vaikuttavat tuotteen elinkaaren aikaisiin päästöihin, mutta tulos on kuitenkin suuntaa antava etenkin vertailtaessa biohiilen määrän vaikutusta hiilijalanjälkeen. Taulukossa 1 on nähtävissä perinteisen betonin ja kolmen erilaisen biohiilibetonin tulokset.

Taulukko 1. Hiilijalanjätkilaskennan tulokset.

	Normaali betoni	Hyperion-betoni	Korvattu sementtiä 5 p-%	Korvattu sementtiä 2 p-%
Kokonaismassa (kg)	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00
Sementin massa (kg)	167,00		158,65	163,66
Sementti (kg CO2 eq/kg)	118,57		112,64	116,20
Veden määrä (litra)	83,00	150,00	79,33	81,83
Vesi (kg CO2 eq/kg)	0,02		0,02	0,02
Biohiili (kg)		24,00	8,35	3,34
Yhteensä (kg CO2 eq/kg)	284,69	200,00	279,00	282,56
Muutos vrt. normaali betoni		30 %	2 %	1 %

YHTEENVETO

Biohiili on hyvä vaihtoehto betoniteollisuuden vihreän siirtymän mahdollistajana, mutta sillä ei voida täysin korvata sementtiä, joka on suurin betoninvalmistuksen päästölähde. Sementtiä korvattaessa on tärkeää samalla kuitenkin säilyttää betonin kestävyysominaisuudet. Tämä luo haastetta käytettäessä biohiiltä. Tiettyyn pisteeseen saakka biohiili sementin korvaajana parantaa betonin kestävyttä, mutta suuria määriä sementtiä ei voi pelkästään biohiilellä korvata. Kuten laskelmistakin kävi ilmi, pienikin määrä biohiiltä näkyy heti betonin hiilijalanjäljessä. Biohiilen positiiviset ympäristövaikutukset eivät jää ainoastaan siihen. Biohiiltä voidaan valmistaa esimerkiksi hakkuujätteistä, jotka maatuessaan vapauttaisivat ilmakehään ylimääräistä hiilidioksidia. Kun biohiiltä valmistetaan puupohjaisesta purkujätteestä, positiiviset ympäristövaikutukset lisääntyvät entisestään. Purkupuu tarjoaa erinomaisen vaihtoehdon biohiilen raaka-aineena, sillä se vahvistaa kiertotaloutta samalla tukien ympäristöministeriön suosituksia rakentamisen kiertotaloudesta.

Biohiilen valmistus pyrolyysillä aiheuttaa melko vähän hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi valmistusprosessin sivuvirrat voidaan kaikki hyödyntää. Biohiili on kevyttä, ja haasteita (päästöjen vähennykselle) aiheuttaa sen logistiikka. Mitä lähempänä loppukäyttäjää biohiiltä pystytään valmistamaan, sen vähemmän varastointi ja logistiikka aiheuttavat haasteita. Valmistusprosessi, kuljetus ja varastointi kuten myös biohiilen stabiilisuus pystytään huomioimaan lopputuotteen LCA-arvioinnissa. Se antaa tarkemman arvion ympäristövaikutuksista ja mahdollistaisi tuotantovaiheiden sekä yksikköprosessien ympäristövaikutusten tarkemman vertailun. Elinkaariarviointikaan ei nykyisellään pysty ottamaan huomioon aivan kaikkea, sillä mittaristossa on vielä puutteita. Tuote- ja palvelujärjestelmien hahmottelussa on myös tehtävä rajauksia, koska muuten arviointi muuttuisi liian monimutkaiseksi.

Kiertotalouden kannalta on oleellista, että materiaali pysyy kierrossa mahdollisimman pitkään ja jätteiden määrä pystytään minimoimaan. Biohiilen valmistamiseen voidaan käyttää erilaisia jäte- ja sivuvirtoja, jolloin biohiilituotanto on kestäväällä pohjalla sekä edistää kiertotaloutta. Biohiilelle on jo tunnistettu useita käyttökohteita ja sitä pidetään keskeisenä tekijänä kestävien kiertotalousratkaisuiden tarkastelussa. Biohiili voi olla potentiaalinen keino hillitä hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi toimimalla hiilivarastona rakennustuotteissa.

EU:n kierrätysvelvoitteiden ja vähähiilisen rakentamisen saavuttamiseksi tarvitaan uudenlaisia ja rohkeita ratkaisuja. Hiilijalanjälkilaskennan ja LCA-arvioinnin ottaminen osaksi rakennusteollisuutta kannustaa urakoitsijoita ja muita alan toimijoita tekemään kestäviä ratkaisuita, etenkin jos se näkyy kilpailutuksessa. Ainoastaan innovaatiot eivät kuitenkaan riitä, vaan lisäksi tarvitaan rakennusalan sääntelyn ja asenteiden muutosta. Biohiilen soveltamista rakennustuotteisiin tulee tarkastella ja tutkia lisää myös liiketaloudellisesti sekä lainsäädännöllisesti, jotta sen käyttö mahdollistuu tulevaisuudessa ja siitä saadaan toimiva ratkaisu rakennusteollisuuteen. Suomessa voimaan tulevassa uudessa rakennuslainsäädännössä onkin otettu aivan uudella tavalla huomioon myös ympäristö- ja ilmastokysymykset. Säädos ohjaa tulevaisuudessa hyödyntämään entistä enemmän vihreitä ratkaisuja.

LÄHTEET

Armah, E. K., Chetty, M., Adedeji, J. A., Estrice D. E., Mutsvene, B., Singh, N. & Tshemese Z. 2023. Biochar: Production, Application and the Future. Biochar, Productive Technologies, Properties and Applications, s. 23–49. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://mts.intechopen.com/storage/books/11537/authors_book/authors_book.pdf [viitattu 18.6.2023].

Bambang, S. 2014. Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering* 95, s. 305–320. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814032494> [viitattu 16.6.2023].

Belaïd, F. 2022. How does concrete and cement industry transformation contribute to mitigating climate change challenges? *Resources, Conservation & Recycling Advances* 15. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.xamk.fi/science/article/pii/S26667378922000220?via%3Dihub> [viitattu 6.6.2023].

BY-vähähiilisyysluokitus s.a. Suomen Betoniyhdistys ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://vahahiilinenbetoni.fi/> [viitattu 4.8.2023].

Concrete. s.a. Carbon impact of Concrete. Carbon Smart Material Palette. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://materialpalette.org/concrete/> [viitattu: 4.7.2023.]

Mancini, M. S., Galli, A., Niccolucci, V., Lin, D., Bastianoni, S., Wackernagel, M. & Marchettini, N. 2016. Ecological Footprint: Refining the carbon Footprint calculation. *Ecological Indicators*, 61. Vuosikerta, 390–403. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.040> [viitattu 10.6.2023].

Neville, A. M. 2002. *Properties of Concrete*. 4. painos. Lontoo: Pearson Education Limited.

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. *Betoni verkkolehti*. Tutkimus ja kehitys. nro 4/2021. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/2021/12/10/betonin-sideaineet-tulevaisuudessa/> [viitattu 1.8.2023].

Säynäjoki, E., Heinonen, J., Säynäjoki, A., Ala-Mantila, S. & Pääkkönen, L. 2014. Työkaluja vähähiiliseen aluerakentamiseen. *MALTTI – matalahiilisen aluekehityksen tukityökalu*. Aalto-yliopiston julkaisusarja. Tiede + teknologia 7/2014. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://aalto.doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/13361/isbn9789526057293.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 4.8.2023].

Thomas, E. 2020. US Cement Standards: Accelerating the green transition. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.worldcement.com/special-reports/16042020/us-cement-standards-accelerating-the-green-transition/> [viitattu 13.6.2023].

Tompuri, V. 2022. Vähähiilinen betoni on nyt laskettavissa. Betoni verkkolehti 4/2022. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://betoni.com/lehti/2022/12/08/vahahiilinen-betoni-on-nyt-laskettavissa/> [viitattu 4.8.2023].

Tulevaisuussanasto. s.a. Sitra. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/hiili-intensiteetti/> [viitattu 4.8.2023].

UN 1998 Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> [viitattu 4.8.2023].

Ympäristöministeriö. 2023. Eduskunta hyväksyi rakentamisen päästöjä pienentävät ja digitalisaatiota edistävät lait. Tiedote. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/-/eduskunta-hyvakysi-rakentamisen-paastoja-pienentavat-ja-digitalisaatiota-edistavat-lait> [viitattu 20.6.2023].

Weidema, B., Thrane, M., Christensen P., Schmidt J. & Løkke, S. 2008. Carbon Footprint – A Catalyst for Life Cycle Assessment? Journal of Industrial Ecology. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1530-9290.2008.00005.x> [viitattu 4.8.2023].

Winters D., Boakye K. & Simske S. 2022. Toward Carbon-Neutral Concrete through Biochar–Cement–Calcium Carbonate Composites: A Critical Review. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su14084633> [viitattu 18.6.2023].

TOIMIJAVERKOSTON AKTIVOINTI JA TULEVAISUUDEN DEMONSTRAATIO- MAHDOLLISUUDET

Jussi Heinimö

Mikkelissä on tehty useamman vuoden ajan aktiivisesti biohiileen liittyvää tutkimus-, kehitys- ja edistämistyötä. Biohiilelle on löydetty uusia markkina-alueita, joissa korkeamman jalostusasteen biohiiltä voidaan käyttää raaka-aineena. BiBe-hankkeen molemmat toteuttajaorganisaatiot Mikkelin kehitysyritys Miksei Oy ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu ovat molemmat tehneet tätä kehitystyötä omalla osaamisalueellaan. Biohiilen käyttäminen rakennustuoteollisuuden materiaalina voisi tuoda markkinoille uusia vähähiilisiä tai jopa hiilinegatiivisia kaupallisia ratkaisuja. Mikkelissä ja laajemmin Etelä-Savon alueella on halua panostaa kiertotalouteen sekä vähähiilisyuden edistämiseen esimerkiksi kehittämällä uusia ratkaisuja ja menetelmiä osana tulevia julkisia rakennushankkeita.

Miksein osuutena BiBe-hankkeessa oli tunnistaa ja koota uusien tuotteiden ja sovellusten kaupallistamisessa tarvittavia (yritysvetoisia) toimijaverkostoja sekä selvittää ja valmistellaan mahdollista Mikkelin kaupungin tulevien rakentamishankkeiden yhteydessä toteutettavaa demonstraatiohanketta. Miksei osallistui hankkeessa seuraavien toimenpiteiden (osatehtävä) toteutukseen: ”Arvioidaan erilaisten biohiilien mahdollisuuksia ja ominaisuuksia rakennusteollisuuden raaka-aineena” ja ”Toimijaverkoston aktivointi, demonstraatiomahdollisuuksien kartoittaminen sekä kaupallistamisen edistäminen”.

BIOHIILEN MAHDOLLISUUDET RAKENNUS- TEOLLISUUDEN RAAKA-AINEENA -SELVITYS

Hankkeessa toteutettiin vuoden 2021 aikana biohiilen mahdollisuuksien arviointiin liittyvä asiantuntijatyö ”Biohiilen käyttömahdollisuudet rakennusmateriaaleissa”, joka keskittyi biohiilen mahdollisuuksiin osana betonirakentamisen tuotteita. Työn tavoitteena on löytää biohiilelle uusia nopeasti käyttöönotettavia ja kaupallistettavia käyttömahdollisuuksia ja -kohteita rakennusmateriaaleissa ja rakenteissa. Työn toteutti Gaia Consulting Oy. Työssä kartoitettiin tehtyjä tai parhaillaan meneillään olevia kokeiluja biohiilen hyödyntämisestä betonirakentamisessa sekä haastateltiin alan toimijoita.



Kuva 1. Hankkeelle toteutettu ”Biohiilen käyttö rakennusmateriaaleissa” -selvitystyö (Gaia Consulting Oy).

Selvitystyössä nousi esiin, että biohiilen kaupalliselle käytölle rakennusmateriaaleissa on vielä paljon ratkaistavia haasteita, jotka vaativat lisätutkimusta ja -kehittämistä. Toisaalta työssä nousi myös esiin, että nopeimmin kaupallistettavia sovelluskohteita voisivat olla matalan teknisen vaatimustason tuotteet, kuten pihalaatat, betoniporsaat ja kasvatusruukut puistopuille. Selvitystyön ja sen tulokset esiteltiin hankkeen ohjausryhmän jäsenistä koostuvalle hankkeen projektiryhmälle.

TOIMIJAVERKOSTON AKTIVOINTI, DEMONSTRAATIO-MAHDOLLISUUKSIEN KARTOITTAMINEN SEKÄ KAUPALLISTAMISEN EDISTÄMINEN

Demonstraatiomahdollisuuksia kartoitettiin keskittyen biohiiltä sisältävän betonin demonstroimiseen osana Mikkelin kaupungin tulevia rakentamisen hankkeita. Demomahdollisuuksien arvioinnissa hyödynnettiin myös hankkeessa toteutetun ”Biohiilen käyttö rakennusmateriaaleissa” -selvitystyön tuloksia keskittyen matalan vaatavuustason soveltamiskohteisiin. Demomahdollisuuksien kartoittamisessa yhteistyötä tehtiin kaupungin kunnallistekniikan rakentamisen yksikön kanssa. Hankkeen aikana selvitettiin ja kartoitettiin laajasti erilaisia demonstraatioideoita. Hankkeen aikana betonin 3D-tulostuksessa todettiin tapahtuneen edistymistä. 3D-tulostamisella voidaan toteuttaa betonista kappaleita tai rakenteita, joita perinteisellä valumenetelmällä ei voida toteuttaa, ja lisäksi 3D-tulostus mahdollistaa monissa ratkaisuisissa huomattavan materiaalisäästön perinteisiin valmistustekniikoihin verrattuna. Betonin 3D-tulostuksessa käytettävät betoniseokset ovat myös kehittyneet, ja niissä voidaan käyttää erilaisia raaka-aineita, muun muassa teollisuuden

sivutuotevirtoja. Biohiilen käyttö 3D-tulostettavassa betonissa voisi mahdollistaa menetelmän materiaalisäästön ja hiilen sitomisen yhteisvaikutuksena huomattavasti perinteisiin betoniratkaisuihin verrattuna ilmastovaikutuksiltaan parempia ratkaisuja. Aluksi 3D-tulostettavan betonin demomahdollisuuksia kartoitettiin ja selvitettiin, miten 3D-tulostusta voidaan hyödyntää puustoaineiden, kuten penkkien ja ruukkujen, valmistuksessa. Demomahdollisuuksien ideoinnissa tehtiin yhteistyötä Mikkelin kaupungin kunnallistekniikan rakentamisyksikön sekä betonin 3D-tulostusteknologiaa kaupallistavan yrityksen kanssa. Ideoinnissa kiinnostavimmaksi ratkaisuksi nousi esille meluaitarakenteen toteuttaminen. Ideoinnin tuloksena syntyi hahmotelmia 3D-tulostettavasta meluaitarakenteesta.



Kuva 2. Visualisointi 3D-tulostuksella toteutettavasta betonisesta meluaitarakenteesta (kuva: Mikko Hokkanen).

Työn aikana havaittiin, että 3D-tulostettavaa biohiiltä sisältävää betoniseosta ei ole kaupallisesti saatavilla. Demomahdollisuuksien edistämiseksi hankkeessa kehitettiin ostopalvelutyönä 3D-tulostettava, biohiiltä sisältävä betoniseos. Seos koostuu 3D-tulostukseen soveltuvasta, kaupallisesti tarjolla olevasta betoniseoksesta, johon on lisätty biohiiltä. Seoksessa on mahdollista korvata sementtikomponentista 4–6 painoprosenttia biohiilellä, jolloin biohiilen osuus lopputuotteessa on noin 2,5 painoprosenttia. Kehitystyön osana tehtyjen alustavien testien perusteella biohiili laskee betoniseoksen puristuslujuutta noin kymmenellä prosentilla, mutta lujuus pysyy kuitenkin yli 50 MPa:ssa. Kehitettyä seosta on mahdollista käyttää kehitystyön seuraavana vaiheena olevassa demohankkeessa.



Kuva 3. Biohiiltä sisältävä 3D-tulostettavan seoksen kehittäminen (kuvat: Hyperion Robotics Oy).

Demohankkeessa kartoitettiin myös ELY-keskuksen ja Maakuntaliiton rahoitusmahdollisuuksia EAKR- ja JTF-rahoitusohjelmista.

KIERTOTALOUDEN EDISTÄMISTÄ YHDESSÄ INNOVOIDEN

Anna Dunderfelt & Kati Jordan & Miia Sourander & Juha Lipponen

Ilmastonmuutoksen hillintä kannustaa etsimään uusia tapoja hiilensitomiseen sekä vaihtoehtoisia prosesseja ja tuotteita, joiden avulla toiminnan hiilijalanjälkeä voidaan pienentää. Naumasan ym. (2019) mukaan innovaatiot auttavat kehittämään uudenlaisia ratkaisuja globaaleihin haasteisiin. Yksi tärkeä osa-alue on ekologinen kestävyys, johon tarvitaan nopealla vauhdilla innovatiivisia ratkaisuja. Kestävää kehitystä tukeva liiketoiminta on viime vuosien aikana tullut yhdeksi keskeisimmäksi tekijäksi yhteiskunnassa talouden ja työllisyyden osa-alueilla. Yhteiskunnallisiin ratkaisuihin vastaamisen lisäksi kestävä kehityksen innovaatioiden tulisi tuottaa lisäarvoa ja kasvumahdollisuuksia yrityksille, jotka niitä kehittävät. On arvioitu, että kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamiseen liittyy paljon liiketoimintamahdollisuuksia. Innovoinnilla edistetään niin uusien kuin jo vakiintuneiden teknologioiden kehitystä. Innovaatioiden tavoite on luoda tämänhetkistä kestävämpiä teknologioita, palveluita ja liiketoimintamalleja. Tuotteiden suunnittelu ja kierrätettävyys ovat keskeisessä osassa materiaalien kiertotalouden edistämistyössä. (Naumanen ym. 2019, 10–13, 18, 23.)

Eri sektorien yhteistyö ja uudenlaisten teknologia- ja toimijaverkostojen syntyminen ovat avainasemassa, kun luodaan uutta liiketoimintaa ja toimintatapoja kiertotalouden ympärille. Kiertotalouden ratkaisuja saadaan aikaiseksi useimmiten silloin, kun monipuolista osaamista tuodaan yhteen. Näin ollen on erittäin tärkeää, että kiertotalouden edistämiseksi vahvistetaan yhteistyötä eri tutkimuslaitosten, yritysten ja muiden innovaatiotoimijoiden kesken. (Kiertotalouden innovaatiot, digitalisaatio ja osaaminen s.a.)

INNOVOINTIA YHTEISTYÖSSÄ

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) kaksi hanketta BiBe – Biohiilen uudet käyttökohteet rakennusmateriaalina ja Mekstiili – Tehokasta tekstiilikiertotaloutta Etelä-Savoon järjestivät yhteisen ideapajan, jossa yhdistettiin rohkeasti kaksi erilaista kiertotalouden haastetta. BiBe-hankkeen tavoitteena oli selvittää, kuinka biohiili soveltuu betoni- ja rakennusteollisuuteen uutena materiaalivaihtoehtona. Hankkeessa kehitettiin ja testattiin biohiilipohjaisia ratkaisuja sekä aktivoitiin sidosryhmiä kehitystyöhön mukaan. Biohiilen hyödyntäminen osana rakennusmateriaaleja voi vähentää uusiutumattomien raaka-aineiden ja ympäristöä kuormittavien tuotantomenetelmien käyttöä rakentamisessa ja edistää

rakennusteollisuuden vähähiilisyttä. Mekstiili-hanke pilotoi poistotekstiilien keräystä ja lajittelua sekä innovoi uusia tehokkaampia tapoja kierrätysmateriaalin hyödyntämiseen. Tekstiilikiertotalous on vauhdittunut uuden jäteasetuksen myötä, joka astui voimaan vuoden 2023 alussa. Jäteasetus velvoittaa kuntia järjestämään tekstiilijätteelle alueellisen vastaanoton. Tekstiilikiertotalouden murros on luonut uusia avauksia, jotka edistävät luonnonvarojen kestävästä käytöstä ja kiertotalousliiketoimintaa.

Hankkeiden yhteisessä ideapajassa haluttiin tuottaa uusia ideoita ja tuoda yhteen eri alan toimijoita, yrityksiä ja opiskelijoita. Tilaisuuden kohderyhminä olivat Xamkin Mikkelin ja Savonlinnan kampusten biotuotetekniikan, ympäristötekniikan ja teollisen puurakentamisen opiskelijat sekä tekstiilikiertotalouden, biohiilialan ja betonteollisuuden yritykset. Toteutustavaksi valikoitui kaikille avoin hybriditapahtuma, joka mahdollisti myös paikasta riippumattoman osallistumisen (kuva 1).

Poistotekstiili ja biohiili kiertotaloudessa ideapaja

XAMK

Mikkeli, Savonlinna ja online 13.4.2023 klo 10-15

Bibe- ja Mekstiili-hankkeiden yhteisessä ideapajassa innovoidaan ratkaisuja biohiilen ja poistotekstiilin hyödyntämiseen kiertotaloudessa. Tule mukaan kuuntelemaan alan asiantuntijoita sekä ideoimaan ratkaisuja aiheeseen liittyviin haasteisiin.

Ilmoittaudu 2.4.2023 mennessä

European Unionin rahoittama
Euroopan unioni
Kiertotalous EU:lta 2014-2020
Etelä-Savon maakuntaliitto
Mikkelin KIERTO-TALOUS-PÄIVÄT

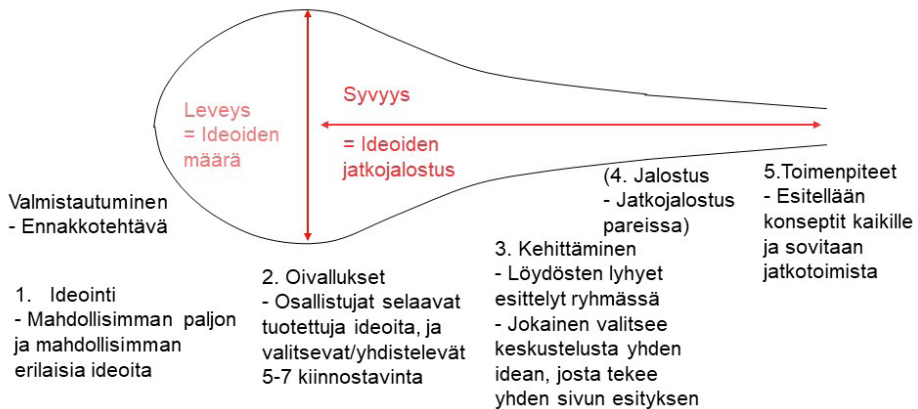
Kuva 1. Kiertotalouden sanomaa ideapajan mainoksessa. Tilaisuus oli osa Mikkelin kiertotalouspäiviä.

Kiertotalous oli hankkeita yhdistävä tekijä, jonka ympärille oli mahdollista koota toimiva ja kiinnostava ohjelma. Tapahtuma oli yksipäiväinen. Ennen varsinaista innovointiosuutta kuultiin kolmen eri yrityksen pohjustukset aiheisiin. Anna Garton Lounais-Suomen Jätehuolto Oy:stä (LSJH) johdatteli osallistujat tekstiilikiertotalouden ja kuluttajapoistotekstiilien maailmaan. LSJH on poistotekstiilikierrätyksen edelläkävijä. Yritys on ollut mukana suunnittelemassa poistotekstiilin jalostuslaitosta, jossa on tarkoitus käsitellä koko Suomen kuluttajapoistotekstiilit. Laitoksessa voidaan tulevaisuudessa valmistaa poistotekstiilistä uudelleenkäytettävää kierrätyskuitua. (Poistotekstiilin jalostuslaitos s.a.) Toisena aihetta pohjusti Tuomo Leppänen SoilCare Oy:stä. Yritys valmistaa ja myy biohiiltä ja sen valmistuslaitteita.

Yrityksen taustalla ovat alaa Suomessa kehittäneet pioneerit. Leppänen kertoi biohiilen valmistuksesta ja mahdollisuuksista sekä kilpailueduista. Kolmas tilaisuudessa alustanut yritys oli Hyperion Robotics Oy. Kyseessä on teknologiayritys, jonka muodostavat asiantuntijat suunnittelun, rakentamisen, 3D-tulostuksen ja robotiikan aloilta. Yrityksen Fernando De los Rios kertoi 3D-tulostusteknologian ja vähähiilisen betonin hyödyistä ja mahdollisuuksista. Yritysten tilaisuuden esitysmateriaalit ovat avoimesti saatavilla hankkeiden verkkosivuilla.

IDEOISTA KOHTI IDEAKONSEPTEJA

Innovoinnin työkaluna käytettiin BrainGrouping-menetelmää, jossa hyödynnetään yksilö-, pari- ja pienryhmätyöskentelyn vahvuuksia. Innotiimin Veikko Mantereen kehittämässä innovointityötavassa ideoita jalostetaan ideakonsepteiksi. Menetelmässä on viisi varsinaista työvaihetta: ideointi, oivallukset, kehittäminen, jalostus ja toimenpiteet (kuva 2). Ennen varsinaista työpajaa voi olla valmistautumistehtävä, jonka avulla osallistujat virittävät aiheeseen.



Kuva 2. BrainGrouping-työtavan teho perustuu ideoinnin leveyden (ideoiden määrä) ja jalostavan ajattelun (ideoiden jalostamisen syvyys) yhdistämiseen.

Poistotekstiili ja biohiili kiertotaloudessa -ideapajan innovointiosuuden vetäjänä toimi Xamkin ja Aalto-yliopiston yhteinen työelämäprofessori Juha Lipponen. Ideapajaan sisältyi ennakkotehtävä, jossa osallistujat perehtyivät aihepiiriin ja tuottivat noin 5–20 alustavaa ideaa. Raakaideoiden itsenäistä tuottamista jatkettiin vielä ideapajassa. Tämän työvaiheen tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman paljon ideoita ja lyhyitä ehdotuksia. Raakaidea voi olla sellainen, että se on mahdoton edes toteuttaa. Sen ei ole edes tarkoitus jalostua varsinaiseksi ideaksi. Raakaideoinnin apuna voi käyttää esimerkiksi internetin kuvahakuja tai niin kuin tässä ideapajassa, haaste annettiin osallistujien lisäksi tekoäly ChatGPT:lle ratkottavaksi, joka tuotti lisäideoita ”ihmisosallistujien” lisäksi. Tulokset toimivat hyvinä johdattelijoina seuraaviin ideoinnin vaiheisiin niin itselle kuin muille osallistujille.

Toisessa vaiheessa osallistujat valitsivat itselleen 5–7 kiinnostavaa aihetta omista ja muiden ideoista. Tämän jälkeen muodostettiin pienryhmät, joissa käytiin keskustellen läpi edellisessä työvaiheessa osallistujien valitsemat oivallukset. Jokainen pienryhmän jäsen valitsi itselleen yhden aiheen, josta kehitti yhdelle PowerPoint-dialle kiinnostavan ja houkuttelevan konseptiaihion fasilitoijan ohjeiden mukaisesti:

- Konseptin lyhyt kuvaus (mistä piirteistä se koostuu)
- Mikä tässä on ”kova juttu”? Keskeiset edut ja hyödyt
- Mitä haasteita pitää ratkaista?
- Mitä tehtävä seuraavaksi?

Lopuksi jokainen esitteli oman konseptiaihionsa lyhyessä hissipuheessaan ja aihioista keskusteltiin fasilitoijan johdolla. Hanketoimijat kokosivat konseptiaihiot ja viestivät ideapajan tuloksista omille sidosryhmilleen.

YHTEENVETO

Ideapaja mahdollisti opiskelijoiden ja yritysten välisen kohtaamisen ja verkostoitumisen sekä uuden tiedon ja käytäntöjen viestimisen eri kohderyhmille. Kahden eri aiheen ja hankkeen yhdistäminen ideapajan muodossa osoittautui toimivaksi ratkaisuksi. Kiertotalous toimi kantavana teemana, ja yhteistyö mahdollisti resurssien tehokkaan hyödyntämisen. Myös ideapajasta kerätyn osallistujapalautteen perusteella tapahtuma oli onnistunut. Aiheet olivat mielenkiintoisia ja ajankohtaisia. Asiantuntijoiden puheenvuorot toivat työelämälähtöisyyden lähelle opiskelijoita. Työskentelymenetelmä koettiin innostavana ja toimivana myös etäyhteyden välityksellä.

BrainGrouping menetelmänä tuki ja rohkaisi osallistujia ennakkoluulottomaan innovointiin, ja ideapajan tuloksena saatiin paljon erilaisia ja ajatuksia herättäviä ideoita. Osa ideoista oli potentiaalisia jatkojalostettavia konseptiaihioita, joiden kehittämiseksi tarvitaan monialaista asiantuntijuutta. Tällaisella monialaisella yhteistyöllä vauhditetaan kiertotaloutta ja pidetään Suomi kilpailukykyisenä kansainvälisillä markkinoilla.



Kuva 3. Ideoimalla harmaasta biohiilibetonisesta kukkaruukustakin voi saada värikkäämmän (kuva: Anna Dunderfelt).

LÄHTEET

Kiertotalouden innovaatiot, digitalisaatio ja osaaminen. s.a. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/kiertotalousohjelma/kiertotalouden-innovaatiot-digitalisaatio-ja-osaaminen> [viitattu 2.8.2023].

Naumanen, M. (toim.), Heimonen, R., Koljonen, T., Lamminkoski, H., Maidell, M., Ojala, E., Sajeva, M., Salminen, V., Toivanen, M., Valonen, M. & Wessberg, N. 2019. Kestävän kehityksen innovaatiot: Katsaus YK:n Agenda 2030 kehitystavoitteisiin ja vastaaviin suomalaisiin innovaatioihin. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2019:62. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-795-6> [viitattu 2.8.2023].

Poistotekstiilin jalostuslaitos. s.a. Lounais-Suomen Jätehuolto Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://lsjh.fi/lsjh/poistotekstiilin-jalostuslaitos/> [viitattu 11.8.2023].

