



Hiilensidonta rakennuksiin nykytilaselvitys

04/2026

Hiilensidonta rakennuksiin nykytilaselvitys

Elina Fast, Auli Ülle ja Paula Eskola, Motiva Oy

Saatesanat

Loppuraportissa kuvataan Motivan kirjallisuusselvityksenä tekemän koontin tuloksena tunnistetut rakennuksen hiilensidontaan liittyvät selvitykset, tutkimukset sekä toteutetut pilotit. Koottu aineisto ei ole täydellinen, mutta sen tavoitteena on muodostaa mahdollisimman kattava kokonaiskuva aihepiiristä ja siihen liittyvästä nykytiedosta. Raportin liitteeksi (liite 1) on koostettu tiivis yhteenveto tunnistetuista rakennusten hiilensidontaan liittyvistä standardeista.

Loppuraporttiin on koottu myös tulokset loppusyksystä rakennusalan keskeisille toimijoille ja yrityksille toteutetusta kyselystä. Kysely toteutettiin Webropol-kyselynä 21.11.-18.12.2025 välisenä aikana. Kyselyyn saatiin 22 vastausta. Suurin osa vastaajista on yrityksistä, lisäksi vastaajissa on mukana järjestöjä, toimialaliittoja sekä tutkimuslaitoksia. Vastaajat edustavat eri kokaisia toimijoita rakennusalan arvoketjusta. Tarkempi yhteenveto kyselyn vastauksista on loppuraportin liitteenä (liite 2). Lisäksi kirjallisuusselvitystä ja kyselyä on täydennetty muutamilla tarkentavilla asiantuntijahaastatteluilla.

Motivan selvitystyön rinnalla on toteutettu *Hiilensidonta rakennusten teknisillä järjestelmillä* -selvitys. Selvitys on tehty erillisenä kirjallisuusselvityksenä 11.12.2025-31.3.2026 välisenä aikana ja sen toteutti Granlund Oy. Selvitykseen ei sisälly hiilen varastointiteknologioita eikä rakennusmateriaalien hiilen varastointia. Tarkastelu on rajattu Euroopan alueelle. Loppuraportissa esitetään tiivis yhteenveto selvityksen keskeisistä havainnoista ja johtopäätöksistä. Liitteenä on Granlundin laatima selvityksen loppuraportti (liite 3).

Loppuraportissa kuvatut tulokset ja johtopäätökset ovat suuntaa antavia aiheen jatkokastelun pohjaksi.

Hiilensidonta rakennuksiin nykytilaselvityksen ovat Motiva Oy:ssä toteuttaneet asiantuntijat Elina Fast ja Auli Ülle sekä johtava asiantuntija Paula Eskola. Selvityksessä on käytetty generatiivisia tekoälyjä (ChatGPT5, Copilot) tekstin muotoilun tukena. Lisäksi tekoälyä on hyödynnetty tiedonhaussa.

Sisällysluettelo

Saatesanat	3
1 Johdanto	5
2 Tilannekuva	6
2.1 Puu ja muut biopohjaiset materiaalit rakennuksen hiilivarastona	6
2.1.1 Tutkimuksia, selvityksiä ja hankkeita puun roolista rakennuksen hiilivarastona	6
2.1.2 Biopohjaisiin materiaaleihin liittyviä uudenlaisia teknologioita ja menetelmiä	9
2.1.3 Havaintoja puun ja biopohjaisten materiaalien hiilivarastosta	10
2.2 Betoni rakennuksen hiilivarastona	10
2.2.1 Tutkimuksia, selvityksiä ja hankkeita betonin roolista rakennuksen hiilivarastona	11
2.2.2 Betoniin liittyviä uusia teknologioita ja menetelmiä	12
2.2.3 Havaintoja betonin roolista rakennuksen hiilivarastona	13
2.3 Rakennuksen hiilensidonnin ja hiilivarastojen arviointi	14
2.3.1 EU:n hiilenpoistojen sertifiointikehys (Carbon Removal Certification Framework, CRCF)	14
3 Rakennusalan toimijoiden näkemyksiä rakennusten hiilensidonnin nykytilasta	17
3.1 Kysely	17
3.1.1 Nykytila	17
3.1.2 Suurimmat esteet	19
3.1.3 Edistävät tekijät ja mahdollisuudet	19
3.2 Täydentävät haastattelut	20
3.2.1 Haastattelujen keskeiset havainnot	20
3.3 Keskeiset johtopäätökset kyselystä ja täydentävistä haastatteluista	21
4 Hiilensidonta rakennuksen teknisillä järjestelmillä	22
4.1 Tiivistelmä	22
5 Yhteenveto ja johtopäätökset	23
5.1 Hiilensidonta rakennuksiin nykytilaselvityksen yhteenveto	23
5.1.1 Johtopäätökset ja suositukset jatkotoimiksi	24
5.2 Hiilensidonta rakennusten teknisillä järjestelmillä selvityksen yhteenveto ja johtopäätökset	25
5.2.1 Toimenpidesuosituksien rakennuskohtaisen hiilensidonnin ja -varastoinnin tehostamiseksi	26
Lähteet	28
Liitteet	31

1 Johdanto

Uudelleen laadittu rakennusten energiatehokkuusdirektiivi (EPBD, Energy Performance of Buildings Directive) laajentaa rakennusten päästöjen tarkastelua elinkaaripohjaiseksi. Direktiivin artiklan 7 kohdan 6 mukaisesti jäsenvaltioiden tulee huomioida paitsi rakennusten aiheuttamat hiilidioksidipäästöt myös niihin liittyvät hiilidioksidipoistumat. Direktiivi velvoittaa jäsenvaltioita käsittelemään hiilen varastointia rakennuksissa ja niiden järjestelmissä osana kokonaisvaltaista ilmastovaikutusten arviointia.

Tämä tarkoittaa, että jäsenvaltioiden tulee:

- huomioida biogeeninen hiilivarastointi rakennusmateriaalien kautta, kuten puun ja muiden uusiutuvien, hiiltä sitovien materiaalien muodossa;
- ottaa huomioon myös mahdolliset rakennuksen järjestelmien kautta tapahtuvat hiilidioksidin poistot tai varastoinnit (esim. teknologiat, jotka sitovat hiiltä ilmakehästä tai estävät sen vapautumisen);
- kehittää laskenta- ja raportointimenetelmiä, joilla nämä hiilensidonnat voidaan integroida rakennuksen elinkaaren hiilitaseeseen (life cycle global warming potential, GWP).

Tarkoituksena on siirtyä kohti rakennusten elinkaaren nettonollapäästöjä, jossa ei tarkastella vain energiankäytön aiheuttamia päästöjä, vaan myös rakennusmateriaalien ja rakenteiden roolia hiilen sitomisessa. Tämä laajentaa perinteistä energiatehokkuusajattelua ja kannustaa käyttämään biopohjaisia, pitkäikäisiä hiilivarastoina toimivia rakennusmateriaaleja sekä innovoimaan uusia ratkaisuja hiilidioksidin tekniseen varastointiin rakennuksissa tai niiden järjestelmissä, edistämään hiilen varastoitumista edistävää kiertotaloutta ja materiaalitehokkuutta.

Samanaikaisesti valmistellaan hiilenpoistojen sertifiointikehystä (CRCF, Carbon Removal Certification Framework), jonka tavoitteena on varmistaa hiilenpoistojen luotettava mittaaminen ja todentaminen eri sektoreilla, myös rakennusalalla.

Motivan selvityshankkeen tavoitteena on luoda tilannekuva tehdyistä selvityksistä, kokeiluista ja pilottihankkeista sekä tunnistaa hyvät käytännöt ja mahdolliset toteutuksen katvealueet ja esteet. Tavoitteena on myös koontiselvityksen tulosten pohjalta tehdä politiikka- ja toimenpidesuosituksia. Tuloksia käytetään mahdollisesti myös kansallisen rakennusten peruspärrannussuunnitelman osana.

Tässä selvityksessä rakennusten hiilensidonnalla tarkoitetaan rakennusmateriaaleihin (esim. puu ja muut materiaalit) sitoutunutta hiiltä, joka varastoituu rakennuksen käyttöänsä ajaksi. Energiankäyttöön liittyvät päästövähennykset eivät sisälly tarkasteluun. Selvityksen ulkopuolelle on rajattu hiilensidonta rakennusten teknisillä järjestelmillä. Tämä huomioidaan erillisessä kirjallisuusselvityksessä, jonka toteuttaja on Granlund Oy (liite 3).

2 Tilannekuva

Rakennusallalla on huomattava rooli Suomen kasvihuonekaasupäästöissä. Kansalliset ja kansainväliset ilmastotavoitteet edellyttävät toimenpiteitä, joilla rakennusalan päästöjä saadaan kuriin. Rakennusten energiatehokkuutta on parannettu ja ohjattu säästöksi jo pidemmän ajan. Suomessa rakennusten erityisesti uudiskohteiden osalta energiatehokkuus onkin jo erittäin hyvällä tasolla (Rakennusteollisuus). Materiaalien merkitys rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljelle kasvaa, kun energiantuotanto muuttuu vähähiilisemmäksi ja rakennusten energiatehokkuus paranee (Ilmasto-opas.fi).

Nykyisten tutkimusten ja hankkeiden perusteella rakennusten hiilivarastot Suomessa perustuvat pääasiassa puurakentamiseen, betonin karbonatisoitumiseen ja pilotointivaiheessa oleviin CO₂-sitoviin betoniteknologioihin sekä rakenteiden käyttöiän pidentämiseen ja kiertotalousratkaisuihin.

2.1 Puu ja muut biopohjaiset materiaalit rakennuksen hiilivarastona

Puupohjaiset rakennusmateriaalit sitovat itseensä hiiltä koko rakennuksen elinkaaren ajan. Puutuotteiden pitkä elinkaari on olennaista hiilivarastojen kannalta, puutuotteita voidaan korjata, käyttää uudelleen ja hyödyntää kierrätysmateriaalina uusiutuotteissa. Näin hiili pysyy varastoituneena jopa satoja vuosia. Puun hiilen varastointiaika riippuu puutuotetyypistä ja elinkaaren lopun käsittelystä (Rakentamisen hiilivarasto, VTT).

Kansallisen kasvihuonekaasuinventaarion mukaan vuonna 2024 puutuotteisiin sitoutui noin 2,1 miljoonaa tonnia hiilidioksidia. Nielu kasvoi 0,5 Mt CO₂-ekv. vuodesta 2023 (LUKE, 2025). Pitkällä aikavälillä Suomen rakennuskannan puurakenteisiin on arvioiden mukaan sitoutunut hiiltä noin 23 miljoonaa tonnia (noin 84 milj. tonnia CO₂-ekv). Valtaosa hiilestä on talorakennuskannassa, erityisesti pientaloissa. Rakennuskannan hiilivarasto on kasvanut noin 0,2 miljoonaa tonnia vuodessa 1980–2016 (Rakentamisen hiilivarasto, VTT).

Puuhiilivarastopotentiaali on suuri, mutta on huomioitava, että puurakenteisiin varastoituneen hiilidioksidin pysyvyys riippuu materiaalin elinkaaren lopun käsittelystä. Hiilidioksidi voi vapautua takaisin ilmakehään esimerkiksi, jos käytöstä poistetut puutuotteet poltetaan energiksi tai hajoavat, kun taas uudelleenkäytön tai kierrätyksen kautta hiili voi säilyä varastoituneena pidempään. Lisäksi rakennusmateriaalien elinkaarilaskelmat ottavat vain rajallisesti huomioon sen, että metsästä poistuu hakkuissa hiilensidontakapasiteettia (Puutuotteet hiilivarastona ja uusiutumattomien materiaalien korvaajina, SYKE).

2.1.1 Tutkimuksia, selvityksiä ja hankkeita puun roolista rakennuksen hiilivarastona

- **Carbon sequestration potential of wooden residential buildings.** Aalto-yliopisto, diplomityö (2024). **Kuvaus:** Diplomityössä arvioidaan puurunkoisten asuinrakennusten hiilensidontapotentiaalia elinkaarinäkökulmasta. Työssä tarkastellaan erityisesti puumateriaalien biogeenistä hiilivarastoa sekä sen suuruutta suhteessa rakennuksen elinkaariin päästöihin

ja vaihtoehtoihin rakenneratkaisuihin. **Keskeiset johtopäätökset:** Puurakennukset voivat toimia merkittävinä biogeenisen hiilen varastoina koko käyttöikänsä ajan. Hiilensidontavai-
kutuksen riippuu ratkaisevasti rakennuksen käyttäjästä ja elinkaaren lopun käsittelystä. Pelkkä
hiilivarasto ei tee rakennuksesta hiilineutraalia, mutta se parantaa kokonaisilmastotasetta
verrattuna ei-biogeenisiin ratkaisuihin.

[https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/d99f169b-82ec-4048-8053-
fe5260f28682/content](https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/d99f169b-82ec-4048-8053-fe5260f28682/content)

- **Vähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki osana sääntelyä – haasteet ja mahdollisuudet.** Gaia Consulting (2021). **Kuvaus:** Selvitys tarkastelee hiilikädenjäljen käsitettä rakennusmateriaalien sääntelyssä ja arvioi sen soveltuvuutta osaksi vähähiilisen rakentamisen ohjausta. Puumateriaalit ja niiden hiilivarastot ovat keskeinen tarkastelukohde. **Keskeiset johtopäätökset:** Puutuotteiden hiilivarasto tunnustetaan potentiaalisena positiivisena ilmastovaikutuksena, mutta sen huomiointi sääntelyssä on toistaiseksi rajallista. Sääntelyssä korostuu tarve erottaa väliaikainen hiilivarasto pysyvistä hiilenpoistoista.
[https://rt.fi/wp-content/uploads/2023/12/vahahiilisten-rakennusmateriaalien-
hiilikadenjalki-tulostiivistelma.pdf](https://rt.fi/wp-content/uploads/2023/12/vahahiilisten-rakennusmateriaalien-hiilikadenjalki-tulostiivistelma.pdf)
- **Puutuotteet hiilivarastona ja uusiutumattomien materiaalien korvaajina - Puurakentamisen lisäämisen vaikutukset kasvihuonekaasutaseisiin Suomessa vuoteen 2035 mennessä.** Suomen ympäristökeskus (SYKE) (2021). **Kuvaus:** Selvityksessä tarkastellaan puurakentamisen lisäämisen vaikutuksia Suomen kasvihuonekaasutaseeseen. Analyysi kattaa puutuotteiden hiilivarastot sekä fossiilisten materiaalien korvaamisesta syntyvät päästövähennykset. **Keskeiset johtopäätökset:** Puurakentaminen kasvattaa rakennettuun ympäristöön sitoutunutta hiilivarastoa merkittävästi tietyin edellytyksin. Raportin mukaan puutuotteet voivat tuottaa ilmastohyötyjä vain silloin, kun niiden käyttö ei heikennä metsien hiilinielua, kun puu ohjautuu pitkäikäisiin tuotteisiin ja kun materiaalien korvausvaikutus toteutuu todellisissa rakentamisratkaisuissa. Puutuotteiden ilmastovaikutus ei synny yhdestä tekijästä, vaan siitä, miten metsien hiilinielut, puutuotteisiin sitoutuva hiili ja muiden materiaalien korvaamisesta syntyvät hyödyt yhdessä toteutuvat. Jos jokin näistä kolmesta toimii heikosti, esimerkiksi metsien hiilinielu pienenee hakkuiden takia, kokonaisvaikutus voi jäädä pieneksi tai jopa kääntyä negatiiviseksi.
<https://helda.helsinki.fi/items/0a3dad04-c613-4fd6-9b1c-7a0120501f42>
- **Puutuotteet hiilivarastona Suomessa.** Maa- ja metsätalousministeriön ja ympäristöministeriön infomateriaali (PDF) (2024). **Kuvaus:** Ministeriöiden yhteinen infomateriaali kokoaa yhteen peruseräkkeet puutuotteiden hiilivarastosta, sen laskennasta ja merkityksestä ilmastopolitiikassa. **Keskeiset johtopäätökset:** Puutuotteet varastoivat hiiltä niiden käyttöajan ajan. Hiilivaraston suuruus ja pysyvyys riippuvat tuotetyypistä ja elinkaaren lopun ratkaisusta. Puutuotteiden hiilivarastot ovat osa kansallista hiilitaseen tarkastelua, mutta eivät rinnastu pysyviin hiilenpoistoihin.
[https://mmm.fi/documents/1410837/7764238/Puutuotteet+hiilivarastoina+16092020.pdf/
d834c572-03c9-efa5-79fa-
4a31b1602fc7/Puutuotteet+hiilivarastoina+16092020.pdf?t=1721125063433](https://mmm.fi/documents/1410837/7764238/Puutuotteet+hiilivarastoina+16092020.pdf/d834c572-03c9-efa5-79fa-4a31b1602fc7/Puutuotteet+hiilivarastoina+16092020.pdf?t=1721125063433)
- **Embodied carbon reduction potential of wooden buildings – meta-analyysi.** Amiri & Junnila, Aalto-yliopisto (2025). **Kuvaus:** Meta-analyysi 92 kansainvälisestä tapaustutkimuksesta, joissa vertaillaan puurakennuksia ja tavanomaisia betoni-, teräs- ja tiiliratkaisuja alkuvaiheen (embodied) päästöjen näkökulmasta. **Keskeiset johtopäätökset:** Puurakennukset voivat pienentää alkuvaiheen päästöjä keskimäärin noin 30 %. Tulokset ovat johdonmukaisia

eri maissa ja rakennustyypeissä. Päästövähennykset eivät perustu vain hiilivarastoon, vaan myös materiaalien tuotantopäästöihin. (Tieteellinen artikkeli, ei sähköisenä)

- **Building materials could store more than 16 billion tonnes of CO₂ annually.** Science (2024). **Kuvaus:** Kansainvälinen tutkimus, jossa arvioidaan rakennusmateriaalien (erityisesti puun ja mineraalipohjaisten materiaalien) globaalia hiilensidontapotentiaalia. **Keskeiset johtopäätökset:** Rakennusmateriaalit voisivat teoriassa sitoa jopa yli 16 Gt CO₂ vuodessa globaalisti. Puumateriaalit muodostavat merkittävimmän osan tästä potentiaalista. Toteutuminen edellyttää mittavia muutoksia rakentamistapoihin ja materiaalivirtoihin. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adq8594>
- **Built to remove carbon. Building materials could facilitate long-term removal of atmospheric carbon dioxide.** Science (2023). **Kuvaus:** Artikkelitarkastelee rakennusmateriaaleja osana pitkän aikavälin hiilenpoistoja ja hiilivarastoja, yhdistäen puun biogeenisen hiilen ja mineraalipohjaisten materiaalien karbonatisoitumisen. **Keskeiset johtopäätökset:** Rakennukset voivat toimia pitkäaikaisina hiilivarastoina, mutta varaston pysyvyys vaihtelee materiaalin mukaan. Puutuotteet tarjoavat väliaikaisen hiilivaraston, mineraalipohjaiset materiaalit mahdollisesti pysyvämmän. Rakennussektori voisi tukea ilmastotavoitteita myös hiilenpoistojen näkökulmasta, jos sääntely kehittyy. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu7379>
- **Rakentamisen hiilivarasto.** VTT tutkimusraportti (2017). **Kuvaus:** VTT:n selvitys, jossa vertaillaan eri runkoratkaisujen (mm. CLT- ja tilaelementtiratkaisut) vaikutusta rakennuksen hiilivarastoon ja elinkaariin päästöihin Suomen olosuhteissa. **Keskeiset johtopäätökset:** Rakennuksen puumäärän kasvu näkyy suoraan suurempana biogeenisen hiilen varastona. Hiilivarasto säilyy rakennuksessa koko käyttöajan ajan. Elinkaaren lopun ratkaisut ovat keskeisiä hiilivaraston todellisen ilmastovaikutuksen kannalta. <https://sarjaweb.vtt.fi/julkaisut/muut/2017/VTT-CR-04958-17.pdf>
- **Assessing the Carbon Impacts of Five Apartment Buildings with Different Timber - tapaustutkimus.** Westerholm (2024). **Kuvaus:** Tutkimuksessa verrattiin viiden eri kerrostalon elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä ja hiilitasetta, kun niiden runkorakenteena käytettiin erilaisia puupohjaisia ratkaisuja. Tarkastelussa oli useita puurakenteisia vaihtoehtoja, kuten massiivipuu-elementit, kevyt puurakenne ja hybridiratkaisut, ja vertailu kohdistettiin myös betonirunkoiseen referenssiin. Analyysi kattoi rakennuksen koko elinkaaren (materiaalit, rakennusvaiheen päästöt, käyttö ja loppukäsittely) ja painotti erityisesti rakenteisiin sitoutuneen hiilen (embodied carbon) vaikutuksia. **Keskeiset johtopäätökset:** Tutkimuksen perusteella puu toimii rakennuksessa merkittävänä biogeenisen hiilen varastona ja pienentää rakennusten elinkaarisia kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna tavanomaisiin betonirakenteisiin. Puurakenteiden hiilivarasto on suurempi kuin betonirakenteissa, joissa hiilensidonta perustuu lähinnä karbonatisoitumiseen ja materiaalien sivutuotteisiin. Tutkimus osoittaa kuitenkin, että puurakentamisen nykyiset ratkaisut eivät vielä hyödynnä puun hiilivarastopotentiaalia täysimääräisesti, sillä merkittävä osa päästöistä syntyy muista rakennusosista, kuten välipohjista, eristeistä ja pintamateriaaleista. Myös rakenteelliset vaatimukset (esim. paloturvallisuus, ääneneristys) voivat lisätä ei-biogeenisten materiaalien käyttöä, mikä heikentää puurakenteen ilmastoetuja ilman kokonaisvaltaista huomiointia. <https://journal.fi/architecturalresearchfinland/article/view/147227>
- **Balancing carbon in the expanding city: Assessing the viability of buildings as climate champions.** Aalto-yliopisto, väitöskirja (2025). **Kuvaus:** Väitöskirja tarkastelee rakennetun ympäristön hiilitaseita laaja-alaisesti kaupunkikehityksen kontekstissa. Tutkimus yhdistää

rakennusten, kaupunkivihreän, maaperän ja biogeenisten rakennusmateriaalien hiilensidontapotentiaalit sekä analysoi niiden välisiä vuorovaikutuksia ja sääntelyllisiä reunaehtoja. **Keskeiset johtopäätökset:** Väitöskirjan mukaan biogeeniset rakennusmateriaalit, kaupunkivihreä ja maaperän hiilivarannot muodostavat yhdessä rakennetun ympäristön keskeiset hiilensidonnan ja hiilen varastoinnin muodot. Rakennusten hiilivarastopotentialin hyödyntäminen on kuitenkin monimutkaista ja riippuu useista toisiinsa kytkeytyvistä tekijöistä, kuten maankäytöstä, suunnitteluratkaisuista ja rakennusten käyttöistä. Tutkimuksen keskeinen johtopäätös on, että nykyinen sääntely ei vielä mahdollista hiilensidonnan ja varastoinnin potentiaalin täysimääräistä hyödyntämistä rakennetussa ympäristössä. Ilmastopositiivisen kaupunkikehityksen saavuttaminen edellyttäisi kunnianhimoisempaa ja kokonaisvaltaisempaa sääntelyä sekä kaupunkisuunnittelun ja -kehittämisen malleja, jotka tukevat pitkäikäistä, vähähiilistä ja hiiltä varastoivaa rakentamista.

<https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/878be328-feca-48cf-b4d3-65b7218d27bc/content>

- **#Hiilijemma - Puutuotteet hiilivarastoina -hanke.** Tapio Oy, Suomen ympäristökeskus (SYKE). **Kuvaus:** #Hiilijemma on Suomen puualan ja ympäristöalan yhteistyöhanke, jonka tavoitteena on lisätä ymmärrystä puutuotteiden hiilivaraston merkityksestä ilmastonmuutoksen hillinnässä. Hankkeessa on toteutettu mm. animaatio metsistä ja pitkäikäisistä puutuotteista hiilivarastona. **Keskeiset johtopäätökset:** Puutuotteet toimivat hiilivarastoina, koska puun kasvu sitoo ilmakehän CO₂:ta ja tämä hiili säilyy tuotteen koko käyttöajan. Rakennuksista huolehtiminen ja puumateriaalien uusiokäyttö pitää hiilen varastossa jopa satoja vuosia. <https://tapio.fi/projektit/hiilijemma/hankkeen-aineistoja/>
- **Puurakentamisella luodaan pitkäikäisiä hiilivarastoja.** #Hiilijemma -hankkeen tiedote (2021). Tiedote esittelee #Hiilijemma-hankkeen keskeisiä tavoitteita ja perusteluja miksi puutuotteet ovat merkittävä hiilivarasto ja miten puurakentaminen voi olla osa ratkaisua rakennusalan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. **Keskeiset johtopäätökset:** Puurakentaminen luo pitkäikäisiä hiilivarastoja, jotka sitovat hiiltä rakennusten elinkaareksi. Hiilivaraston hyöty riippuu puutuotteiden käyttöistä ja elinkaaren lopun käsittelystä, eli hiili pysyy poissa ilmakehästä niin kauan kuin rakennus on käytössä ja mahdollisesti käytössä uudelleenkin. <https://tapio.fi/tiedotteet/puurakentamisella-luodaan-pitkaikaisia-hiilivarastoja/>
- **Puun Aika -hanke.** **Kuvaus:** Puun Aika on Luonnonvarakeskuksen käynnistämä verkostohanke, joka kokoaa vuosina 2025–2027 yhteen alueellisia toimijoita, yrityksiä, rahoittajia ja toimialajärjestöjä. Puun Aika-verkostot tukevat arvoketjujen vahvistumista ja monipuolistumista, tuotteiden ja palveluiden arvon kasvua, arvoketjujen toimijoiden ja eri sidosryhmien yhteispeliä kasvun saavuttamiseksi ja uusien vientimarkkinoiden avaamiseksi. Näihin verkostoihin tulee keskeisenä toimintasektorina kuulumaan puun käyttö rakentamisessa ja puutuotteissa. <https://www.luke.fi/fi/projektit/puun-aika>

2.1.2 Biopohjaisiin materiaaleihin liittyviä uudenlaisia teknologioita ja menetelmiä

- Elementicin kehittämä rakennusmateriaali on hiilinegatiivinen, kestävä ja monikäyttöinen, ja se valmistetaan metsäteollisuuden sivuvirroista, erityisesti ligniinistä. Materiaali sitoo hiiltä jo valmistusvaiheessa biologisen hiilensidonnan menetelmällä, varastoiden jopa kolme kiloa hiilidioksidia per kilo. Rakennuksissa käytettynä se voi muuttua ne hiilivarastoiksi, joiden ilmastovaikutus ylittää rakennusaikaiset päästöt. Elementicin ratkaisu tarjoaa uudenlaisen

tavan hyödyntää puun alihyödynnettyjä osia, edistää kiertotaloutta ja parantaa Suomen metsäteollisuuden arvoa ilman lisähakkuita.

<https://www.sttinfo.fi/tiedote/71177348/lapimurto-rakentamisessa-uusi-suomalaismateriaali-muuttaa-rakennukset-paastojen-lahteista-hiilivarastoiksi?publisherId=69821323&lang=fi>

2.1.3 Havaintoja puun ja biopohjaisten materiaalien hiilivarastosta

Seuraavassa on koottu kappaleissa 2.1.1 ja 2.1.2 esitellyissä tutkimuksissa ja selvityksissä esiin nousseita toistuvia havaintoja:

- Puu ja muut biopohjaiset materiaalit toimivat rakennuksissa hiilivarastoina koko käyttöiän ajan. Hiilivaraston suuruus ja ilmastovaikutus riippuvat erityisesti materiaalin käyttöiästä sekä elinkaaren lopun käsittelystä.
- Hiilivarasto on luonteeltaan väliaikainen, sillä varastoituneen hiilen pysyvyys riippuu materiaalien elinkaaren lopun käsittelystä. Hiili voi vapautua esimerkiksi poltossa tai biologisessa hajoamisessa, ellei materiaaleja hyödynnetä uudelleen tai kierrätetä.
- Puurakennusten ilmastovaikutukset muodostuvat useista tekijöistä. Hiilivaraston lisäksi merkitystä on esimerkiksi materiaalien tuotantopäästöillä, rakenteellisilla ratkaisuilla ja muiden rakennusosien vaikutuksilla.
- Hiilivaraston toteutuminen edellyttää kestävää metsien käyttöä sekä sitä, että puu ohjautuu pitkäikäisiin tuotteisiin. Lisäksi kokonaisvaikutukseen vaikuttaa se, miten puu korvaa muita materiaaleja rakentamisessa.
- Biogeenisen hiilen varastointi tunnistetaan positiivisena ilmastovaikutuksena, mutta sen huomiointi sääntelyssä on toistaiseksi rajallista.
- Uusien biopohjaisten materiaalien ja teknologioiden kehitys mahdollistaa hiilen sitomisen jo valmistusvaiheessa ja rakennusten hiilivaraston kasvattamisen esimerkiksi teollisuuden sivuvirtoja hyödyntämällä.

2.2 Betoni rakennuksen hiilivarastona

Betoni on yksi maailman eniten käytetyistä rakennusmateriaaleista. Sitä valmistetaan noin 14 MRD m³. Sementin valmistus aiheuttaa globaalisti noin 8 % hiilidioksidipäästöistä. Suomessa osuus on selvästi pienempi, alle 2 %. Suuri osuus johtuu betonin valtavista käyttömääristä. Johtuen juuri betonin erittäin merkittävästä roolista rakentamisessa, betonia on hyvin vaikea ja usein mahdotontakin korvata muilla materiaaleilla. Vaikka betonin ominaispäästöt ovat pienet, noin 0,1 kg-CO₂ eq /kg, edelleenkin tehokkain tapa vähentää betonin aiheuttamia päästöjä, on betonin ominaispäästöjen vähentäminen (Aalto-yliopisto, 2025). Toisaalta betoni toimii rakennuksen elinkaaren aikana passiivisena hiilivarastona sitomalla ilmakehän hiilidioksidia kemiallisen karbonatisoitumisprosessin kautta. Reaktio tapahtuu, kun betonin sisältämä kalsiumhydroksidi reagoi ilmakehän CO₂:n kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia.

Rakennuksen käyttöaikana betonin hiilensidonta on maltillista, mutta jatkuvaa. Vaikka prosessi on hidas, se voi vuosikymmenten aikana sitoa merkittävän määrän hiiltä. Suomen betonikannan hiilivaraston suuruusluokaksi voidaan arvioida noin 4 Mt CO₂. ja hiilivarasto kasvaa edelleen rakennuskannan mukana. (Betoniteollisuus ry, CO₂crete Solution -hanke).

Betonin rooli hiilivarastona korostuu erityisesti pitkäikäisissä rakenteissa, joissa sen altistuminen ilmalle jatkuu vuosikymmeniä. Betonin hiilensidontakykyyn vaikuttavat muun muassa rakenteen ominaisuudet, pinta-ala sekä ympäristöolosuhteet. Lisäksi purkuvaihe tarjoaa merkittävän mahdollisuuden betonin hiilensidonnin lisäämiselle, erityisesti silloin kun betonimurskeen karbonatisoitumisolosuhteet voidaan optimoida. Hiilensidontakykyä voidaan myös tehostaa materiaalivalinnoilla ja teknisillä ratkaisulla, kuten käyttämällä huokoisempia betonilaatuja, optimoimalla seossuhteita ja hyödyntämällä vähäpäästöisiä sementtityyppejä.

Hiilensidonta ei tee betonista automaattisesti hiilineutraalia materiaalia, mutta sen kyky sitoa hiiltä elinkaarensa aikana tarjoaa mahdollisuuden osittaiseen päästökompensatioon ja tukee vähähiilisen rakentamisen tavoitteita (Betoniteollisuus ry, CO₂ncrete Solution -hanke).

Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan tarkemmin betonin hiilivarastoa koskevaa tutkimusta, selvityksiä ja hankkeita sekä betoniin liittyviä uusia teknologioita ja menetelmiä.

2.2.1 Tutkimuksia, selvityksiä ja hankkeita betonin roolista rakennuksen hiilivarastona

- **Rakentamisen hiilivarasto.** VTT, tutkimusraportti (2017). **Kuvaus:** Varhainen kooste rakenteisiin varastoituvasta hiilestä ja betonin karbonatisoitumisesta Suomen näkökulmasta. **Keskeiset johtopäätökset:** Betonirakenteet sitovat ilmakehän CO₂:ta karbonatisoitumisen kautta rakennuksen elinkaaren aikana. Betonissa tapahtuva hiilensidonta on hitaampaa ja määrältään rajallisempaa kuin puun biogeeninen hiilivarasto, mutta sillä on merkitystä rakennuskannan mittakaavassa. Hiilivaraston suuruus ja pysyvyys riippuvat rakenteiden iästä, pinta-alasta ja elinkaaren lopun käsittelystä. <https://cris.vtt.fi/>
- **Suomen betonikannan hiilivarasto – CANEMURE, CO₂ncrete Solution -hanke.** RTT, Betoniteollisuus ry, VTT ym. (2021–2024). **Kuvaus:** CO₂ncrete Solution on CANEMURE-hankkeen alainen projekti, jossa selvitettiin Suomen rakennuskannan betonin sisältämä hiilivarasto. **Keskeiset johtopäätökset:** Arvion mukaan Suomen olemassa olevan betonikannan hiilivarasto kasvaa vuosittain noin 100 000 tonnilla, mikä vastaa suuruudeltaan noin 10 prosenttia Suomen sementtiteollisuuden nykyisistä vuosipäästöistä. Suomen betonikannan vuotuinen hiilinielu on noin 56 kilotonnia, mikä vastaa noin seitsemää prosenttia Suomen sementtiteollisuuden vuosipäästöistä. Suomen betonikanta sitoo pysyvästi noin neljä megatonnia hiilidioksidia. Lisäksi kierrätysbetoni voi sitoa merkittäviä määriä CO₂:ta, kun karbonatisoitumisolosuhteet optimoidaan. Tehostettu karbonatisointi tarjoaa realistisen keinon lisätä betonin hiilivarastoa erityisesti purkuvaiheessa. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2024/11/CO2NCRETE-SOLUTION-kirjallisuustutkimus-L.pdf>, <https://kivifaktaa.fi/betonimurskeen-piileva-voima-torjumaan-ilmastonmuutosta>
- **Suomen betonikannan hiilensidontapotentiaali – kirjallisuuskatsaus ja mallinnus.** Oulun ammattikorkeakoulu (2023). **Kuvaus:** OAMK:n kirjallisuuskatsaus ja mallinnus tarkastelevat Suomen betonikannan laajuutta ja purkuvirtoja hiilensidonnin näkökulmasta. Selvityksessä yhdistetään betonimäärät, purkumäärät ja karbonatisoitumisparametrit kansalliseen mitta-kaavaan. **Keskeiset johtopäätökset:** Suomen betonikannan kokonaismääräksi arvioidaan noin 330 Mm³, ja vuosittaisiksi purkuvirroiksi noin 1,5 Mm³. Purkuvaihe tarjoaa merkittävimmän mahdollisuuden betonin hiilensidonnin lisäämiseen. Hiilensidonnin potentiaali on riittävän suuri, jotta sillä voi olla kansallista ilmastopoliittista merkitystä. (Oulun ammattikorkeakoulu, 2023 – CO₂ncrete Solution -aineistot)

- **Hiilinegatiivinen betoni.** Carbonaide. VTT / Carbonaide (2022–2024). **Kuvaus:** Carbonaide on VTT:stä lähtöisin oleva teknologiayritys, joka kehittää CO₂-kovetukseen perustuvaa menetelmää, jossa betoni sitoo enemmän hiilidioksidia kuin sen valmistuksessa vapautuu. **Keskeiset johtopäätökset:** CO₂-kovetus mahdollistaa betonin valmistuksen, joka voi olla hiilinegatiivinen materiaalitasolla. Hiilidioksidi mineralisoidaan pysyvästi osaksi betonin rakenetta. Teknologia edustaa siirtymää passiivisesta karbonatisoitumisesta aktiiviseen hiilensidontaan betonin valmistusvaiheessa. <https://carbonaide.com/>
- **BEHI - Betoni hiilinieluna – ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen -hanke.** Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (2023–2024). **Kuvaus:** Hankkeen päätavoitteena oli edistää betonirakentamisen hiilineutraaliustavoitteita kehittämällä prosessi, jossa betonia käsitellään hiilidioksidilla jo valmistusvaiheessa. **Keskeiset johtopäätökset:** Hanke tuotti tutkimusaiheesta uutta tietoa, joka on hyödynnettävissä betoniteollisuudessa. Hiilidioksidisekoitusmenetelmä tarjoaa lupaavan tavan hyödyntää hiilidioksidia laajamittaisesti myös valmisbetonissa. <https://www.xamk.fi/hanke/betoni-hiilinieluna-ratkaisuja-vahahiiliseen-rakentamiseen-behi/>
- **Topinpuiston pilotit – kierrätysbetonin hiilensidonta.** Turun kaupunki (2022–2024). **Kuvaus:** Topinpuistossa on toteutettu käytännön pilotointeja, joissa tutkitaan kierrätysbetonin karbonatisoitumista kiertotalousympäristössä. Pilotit keskittyvät olosuhteiden, kuten kosteuden ja raekoon, vaikutukseen hiilensidontaan. **Keskeiset johtopäätökset:** Betonimurskeen hiilensidonta voidaan tehostaa merkittävästi oikeilla olosuhdevalinnoilla. Käytännön kokeilut tukevat mallinnusten tuloksia betonin hiilensidontapotentialista. Kiertotalousalueet tarjoavat realistisen ympäristön betonin hiilivaraston kasvattamiseen. <https://www.topinpuisto.fi>
- **Reusing Precast Concrete for a Sustainable Future (ReCreate-projekti).** EU Horizon -hanke (2021–2025). **Kuvaus:** Eurooppalainen hanke, jossa on tutkittu betonin uudelleenkäyttöä ja hiilen varastoitumista. Hankkeessa on analysoitu elementtien käyttöikä, hiilijalanjälkeä ja karbonatisoitumista sekä niiden merkitystä hiilivaraston jatkumiselle. **Keskeiset johtopäätökset:** Betonielementtien uudelleenkäyttö pidentää materiaalin käyttöikä ja samalla siirtää hiilivarastoa seuraavaan elinkaarivaiheeseen. Karbonatisoitunut betoni säilyttää sitoutuneen CO₂:n myös uudelleenkäytössä. Uudelleenkäyttö yhdistää päästöjen välttämisen ja hiilivaraston jatkumisen. <https://recreate-project.eu/2025/01/15/reusing-precast-concrete-for-a-sustainable-future-evaluating-service-life-carbonation-and-carbon-footprint>

2.2.2 Betoniin liittyviä uusia teknologioita ja menetelmiä

- Carbonaide Oy (2023) kaupallistaa VTT:llä kehitettyä hiilidioksidin hyödyntämis- ja varastointiteknologiaa, jolla on mahdollista pienentää betonin hiilijalanjälkeä jopa hiilinegatiiviseksi. Carbonaiden menetelmä perustuu hiilidioksidin kivettämiseen betonituotteisiin. Teknologia mahdollistaa hiilidioksidipäästöjen puolittamisen tavanomaisten betonituotteiden valmistukseen verrattuna tuotantoon tarvittavan pienemmän sementtimäärän ja hiilidioksidin kivettymisen ansiosta. Carbonaiden teknologia ei vain vähennä betonin valmistuksen päästöjä, vaan muuttaa rakenteet aktiivisiksi hiilinieluiksi. Carbonaiden teknologian ensimmäisiä teollisia pilottikumppaneita ovat olleet mm. Rakennusbetoni ja Elementti Oy. <https://betoni.com/lehti/ajankohtaista/carbonaide-rakentaa-hollolassa-maailman-ensimmaista-hiilinegatiivisen-betonin-teollista-pilot-tuotantolinjasto/>

- Betolarin (2025) kehittämä uusi innovatiivinen menetelmä yhdistää metallin erottelun jätemateriaalista sekä vihreän sementin valmistuksen. Betolar korvaa betonin raaka-aineena käytettävää sementtiä sivuvirtapohjaisilla materiaaleilla. Menetelmä hyödyntää muun muassa metalliteollisuuden kuonaa ja kaivosteollisuuden rikastushiekkoja, mikä vähentää betonin hiilidioksidipäästöjä, säästää neitseellisiä luonnonvaroja ja muuntaa sivuvirrat arvokkaammiksi tuotteiksi. Vihreä sementti toimii kiertotaloustuotteena, joka voi korvata perinteistä sementtiä laajasti ja edistää rakennusten roolia pitkäaikaisina hiilivarastoina. <https://www.betolar.com/fi/tiedotteet/betolar-vahvistaa-suomen-ja-eu-n-omavaraisuutta-kriittisissa-ja-strategisissa-raaka-aineissa>)
- Finnsementti kokeilee betonimurskan käyttöä sementin raaka-aineena korvaamaan kalkkikiveä. Tällä pystytään vähentämään sementin valmistuksen CO₂-päästöjä. He käyttävät yleensä lentotuhkaa tähän tarkoitukseen, mutta sen saatavuus vähenee koko ajan. Betonimurska voi toimia tässä jopa paremmin ja oletus on, että betonimursketta voidaan käyttää hieman suurempia määriä korvaamaan neitseellistä kalkkikiveä [Tekniikka& Talous 10.3.2026](#)
- Ruduksen käyttämä Kolmossementti (CEM III) on Finnsementin kehittämä vähähiilinen sementti, jossa osa perinteisestä sementtiklinkkeristä on korvattu teollisuuden sivutuotteena syntyvällä kuonalla. Tämä vähentää merkittävästi sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöjä, sillä klinkkeri on sementin suurin päästölähde. Kolmossementti ei varastoi hiiltä, mutta sen käyttö vähentää rakennusten aiheuttamia päästöjä ja tukee siirtymää kohti kestävämpää rakentamista. <https://www.rudus.fi/ajankohtaista/2021/09/06/uusi-ymparistoystavallinen-betoni-toimii-erinomaisesti-isossakin-kohteessa>
- S-Betonin ekobetoni valmistetaan korvaamalla osa perinteisestä sementistä masuunikuonalla ja lentotuhkalla, jotka ovat teollisuuden sivutuotteita. Tämä vähentää merkittävästi sementtiklinkkerin käyttöä, joka on betonin suurin päästölähde. <https://s-betoni.fi/ekobetoni/>
- Soletair Power on kehittänyt menetelmän hiilidioksidin talteenottoon rakennusten ilmanvaihdosta. Talteen otettu hiilidioksidi nesteytetään rakennuksen yhteydessä toimivassa kontissa ja toimitetaan betonin raaka-aineeksi. Soletair Power tekee tässä yhteistyötä muun muassa suomalaisen Carbonaiden kanssa. Yhdestä rakennuksesta voidaan ottaa talteen keskimäärin Soletair Powerin laitteistolla noin 400 tonnia hiilidioksidia vuodessa. [Tekniikka&Talous 3.3.2026](#)

2.2.3 Havainnot betonin roolista rakennuksen hiilivarastona

Seuraavassa on koottu kappaleissa 2.2.1 ja 2.2.2 esitellyissä tutkimuksissa ja selvityksissä esiin nousseita toistuvia havainnot.

- Betonirakenteiden hiilivarasto perustuu karbonatisoitumiseen, jossa betoni sitoo ilmakehän hiilidioksidia elinkaarensa aikana. Prosessi on hidas ja hiilensidonta määrältään rajallisempaa kuin puulla, mutta sillä on merkitystä rakennuskannan mittakaavassa.
- Betonirakenteiden hiilivaraston suuruus ja kehitys riippuvat rakenteiden iästä, pinta-alasta sekä elinkaaren aikaisista ja lopun olosuhteista. Hiilivarasto kasvaa vähitellen rakennuskannan mukana.
- Purkuvaihe ja kierrätysbetonin käsittely tarjoavat merkittävimmän potentiaalinen betonin hiilensidonnin lisäämiselle, erityisesti kun karbonatisoitumisolosuhteita optimoidaan. Käytännön pilotit tukevat tätä potentiaalia.

- Betonirakenteiden uudelleenkäyttö pidentää materiaalin käyttöikä ja siirtää hiilivarastoa seuraavaan elinkaarivaiheeseen, jolloin sitoutunut hiili säilyy rakenteessa pidempään.
- Uudet teknologiat mahdollistavat siirtymän passiivisesta karbonatisoitumisesta aktiiviseen hiilensidontaan, kuten CO₂-kovetukseen perustuvat ratkaisut, joissa hiilidioksidi sitoutuu pysyvästi osaksi betonin rakennetta ja voi mahdollistaa hiilinegatiivisen betonin materiaali-tasolla.
- Betonimateriaalien kehityksessä korostuvat kiertotalousratkaisut ja teollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen (esim. Betolarin ratkaisu, S-betonin ekobetoni), joilla voidaan vähentää päästöjä ja tukea vähähiilistä rakentamista.

2.3 Rakennuksen hiilensidontan ja hiilivarastojen arviointi

Rakennusten hiilensidontan ja hiilivarastojen arviointi perustuu tällä hetkellä useisiin kansainväliisiin ja eurooppalaisiin standardeihin ja viitekehyksiin, joiden lähtökohtana on elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment, LCA). Hiilen sitoutumista ja varastoitumista ei käsitellä omana, erillisenä standardoituina kokonaisuutenaan, vaan osana rakennustuotteiden ja rakennusten elinkaarisia ilmastovaikutuksia (ISO 14040:2006, European Commission, 2024).

Kansainväliset ISO- ja EN-standardit määrittelevät menetelmälliset periaatteet hiilivarastojen, biogeenisen hiilen ja elinkaaristen päästöjen käsittelylle, kun taas eurooppalaiset viitekehukset, kuten Level(s) ja ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä (luonnos) -ohjeistus (Ympäristöministeriö, 2025) soveltavat näitä periaatteita rakennushankkeiden käytännön laskentaan ja ohjaukseen. Näissä laskennoissa keskeisenä tietolähteenä toimivat EN 15804 -standardin mukaiset ympäristöselosteet (Environmental Product Declarations, EPD), joita käytetään Suomessa ja EU:ssa rakennusmateriaalien elinkaaristen ilmastovaikutusten lähötietona. Raportin liitteeseen (liite 1) on koottu standardeja sekä viitekehyksiä, joiden on tunnistettu liittyvän rakennuksen hiilensidontaan.

Lisäksi EU:n hiilenpoistojen sertifiointikehys (CRCF) laajentaa hiilen varastoinnin tarkastelua pitkäikäisiin tuotteisiin ja voi tulevaisuudessa auttaa rakennussektorin hiilivarastojen todentamista ja raportointia.

2.3.1 EU:n hiilenpoistojen sertifiointikehys (Carbon Removal Certification Framework, CRCF)

EU:n hiilenpoistojen sertifiointikehys (Carbon Removals and Carbon Farming Certification Framework, CRCF) on vuonna 2024 voimaan tullut vapaaehtoinen EU-säädös, jonka tavoitteena on luoda yhteinen ja luotettava järjestelmä hiilidioksidin poistojen ja varastoinnin sertifiointiksi unionin alueella. Kehyksen tarkoituksena on lisätä läpinäkyvyyttä, ehkäistä viherpesua sekä tukea EU:n hiilineutraaliustavoitetta vuoteen 2050 mennessä. CRCF mahdollistaa hiilensidontatoimien todentamisen ja vertailukelpoisuuden erityisesti vapaaehtoisten markkinoiden ja julkisen raportoinnin tarpeisiin (EU 2024/3012).

Kehyksen piiriin kuuluvat kolme pääluokkaa:

- Pysyvät hiilidioksidin poistot (esim. DACCS, BECCS)
- Hiiliviljely ja maaperän päästövähennykset
- Hiilen varastointi pitkäikäisissä tuotteissa, kuten rakennusmateriaaleissa (esim. puu- ja bio-pohjaiset tuotteet).

CRCF perustuu kolmeen keskeiseen periaatteeseen: lisäisyyteen, kestävään varastointiin ja läpinäkyvyyteen. Sertifioitujen hiilensidontatoimien tulee tuottaa aidosti lisäisiä päästövähennyksiä tai hiilivarastoja, varmistaa hiilen säilyminen pitkäaikaisesti sekä olla todennettavissa ja läpinäkyvästi raportoituja. Näiden periaatteiden avulla CRCF luo luotettavan ja vertailukelpoisen pohjan hiilenpoistojen mittaamiselle ja sertifiointille EU:ssa. CRCF:n puitteissa sertifiointi perustuu kolmannen osapuolen varmennukseen ja pitkän aikavälin tavoitteena on EU-tasoinen rekisteri kaikille hyväksytyille hiilenpoistohankkeille.

Rakennusallalla CRCF voi tulevaisuudessa mahdollistaa hiiltä sitovien ratkaisujen, kuten puurakentamisen ja CO₂:ta sitovien betoniteknologioiden, tunnistamisen ja todentamisen. Samalla se asettaa uusia vaatimuksia elinkaaren aikaiselle seurannalle ja hiilivarastojen pysyvyyden osoittamiselle.

CRCF asettaa tiettyjä kriteereitä sekä puurakennuksille että betonirakennuksille, jotka on koottu seuraaviin kappaleisiin (EU 2024/3012).

2.3.1.1 Puurakennuksen arviointi

Hiilensidontavaikutuksen arvioinnissa on tärkeää tarkastella koko rakennuksen elinkaarta. CRCF (EU 2024/3012) mukaan puurakennuksen on täytettävä neljä pääkriteeriä:

1) Määrällinen todentaminen (Quantification)

Hiilensidonta on laskettava nettoperusteisesti, siten että huomioidaan koko elinkaari: metsänhoito, puun hankinta, kuljetus, rakentaminen, käyttö, purku ja loppukäsittely. Hiilivarasto pitää pystyä laskemaan luotettavasti ja standardoidusti.

2) Lisäisyys (Additionality)

Hiilivarasto syntyy vain, jos hanke ylittää "business-as-usual" -tason. Esim. puurakenteen tulee tuottaa lisähiilivarasto verrattuna tavanomaiseen rakentamiseen.

3) Pitkäaikaisuus (Long-term storage)

Hiilen on pysyttävä varastoituneena riittävän pitkään. Rakennuksissa tämä liittyy käyttöikään (kymmeniä–satoja vuosia) sekä purku- ja loppukäsittelyratkaisuihin. Rakenteen tulisi olla purettavissa ja puuosien uudelleenkäyttö tulisi mahdollistaa. Varaston pitkäaikaisuuden arvioinnissa tulee huomioida myös riskit hiilen vapautumisesta materiaalin elinkaaren lopussa, esimerkiksi rakennuksen purkamisen jälkeisessä käsittelyssä, kuten poltossa, palamisessa tai biologisessa hajoamisessa.

4) Kestävyys (Sustainability)

Ei saa aiheuttaa merkittäviä haittoja biodiversiteetille, maankäytölle, kiertotaloudelle tai resurssien käytölle. Puun tulee olla kestävästi tuotettua (linjassa EU:n metsä- ja biodiversiteettisääntelyn kanssa), eikä käyttö saa johtaa esim. metsäkatoon tai metsien hiilinielujen tai biodiversiteetin heikkenemiseen.

2.3.1.2 Betonirakennuksen arviointi

Betonirakennusten hiilensidontavaikutusten arviointi poikkeaa jonkin verran puurakennusten arvioinnista, mutta tässäkin on tärkeää tarkastella koko rakennuksen elinkaarta. CRCF (EU 2024/3012) mukaan betonirakennuksen on täytettävä neljä pääkriteeriä:

1) Määrällinen todentaminen (Quantification)

Hiilensidonnan arvioinnissa on osoitettava, kuinka paljon hiilidioksidia on mineralisoitunut betoniin. Tässä huomioidaan myös mahdollinen CO₂-varastointi/ injektio sekä luonnollinen tai tehostettu karbonatisoituminen. Hiilivarasto pitää pystyä todentamaan luotettavasti ja standardoidusti. Tässä teknisenä haasteena on karbonatisoitumisen hitaus ja epätasaisuus.

2) Lisäisyys (Additionality)

Hiilivarasto syntyy vain, jos hanke ylittää "business-as-usual" -tason, eli betonirakenteen tulee tuottaa lisähiilivarasto verrattuna tavanomaiseen rakentamiseen. Tämä on haaste betonirakenteissa. Esimerkiksi tehostettu karbonatisoituminen voisi tässä täyttää kriteerin.

3) Pitkäaikaisuus (Long-term storage)

Hiilen on pysyttävä varastoituneena riittävän pitkään. Tämä kriteeri täyttyy helposti betonirakenteissa, sillä betoni on käytännössä pysyvä hiilivarasto. Betonin kohdalla hiilen vapautumisen riskit ovat myös pieniä.

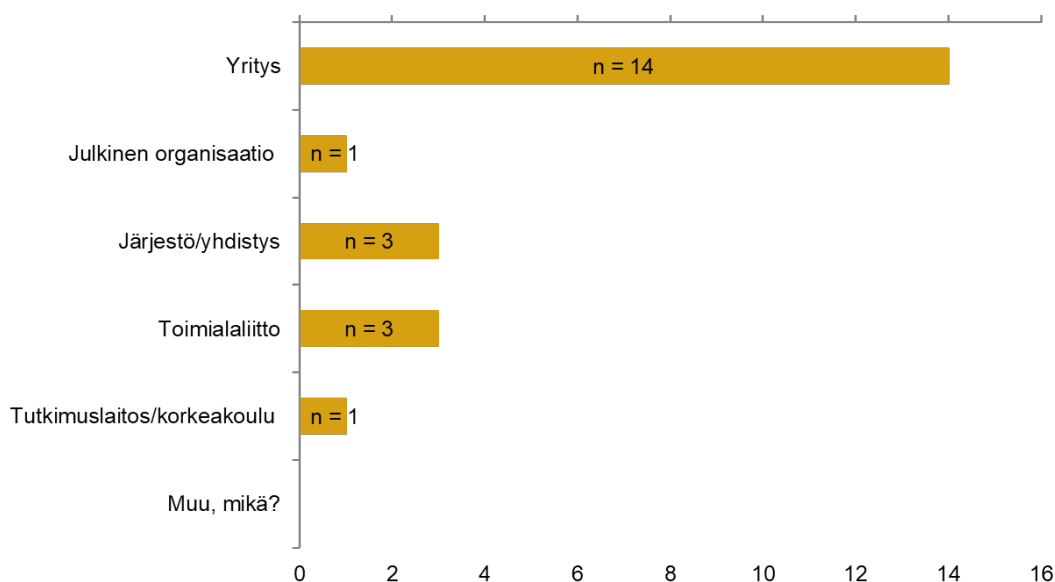
4) Kestävyys (Sustainability)

Ei saa aiheuttaa merkittäviä haittoja: biodiversiteetille, maankäytölle, kiertotaloudelle tai resurssien käytölle. Betonin kohdalla merkittävimmät haitat syntyvät sementin valmistusvaiheessa (merkittävä luonnonvarojen käyttö ja suuret CO₂-päästöt)

3 Rakennusalan toimijoiden näkemyksiä rakennusten hiilensidonnasta nykytilasta

Motiva toteutti loppusyksystä 2025 kyselyn, jonka tavoitteena oli koota rakennusalan toimijoiden näkemyksiä rakennusten hiilensidonnasta nykytilasta, tunnistaa mahdollisuuksia ja haasteita sekä kerätä tietoa mahdollisesti toteutetuista piloteista tai käytännön ratkaisuista.

Webropolilla toteutettu kysely kohdennettiin Suomessa toimiville rakennusalan yrityksille sekä keskeisiksi toimijoiksi tunnistetuille tahoille, kuten toimialaliitot, tutkimuslaitokset sekä korkeakoulut. Kysely lähetettiin noin 100 toimijalle ja vastauksia saatiin 22. Vastaajista suurin osa (14) edusti yrityksiä, ja kaiken kaikkiaan vastaajat koostuivat eri rakennusalan toimijaryhmien edustajista. Suurin toimialaryhmä oli uudisrakentaminen (6). Lisäksi vastaajissa oli materiaalien ja rakennustuotteiden valmistajia, korjausrakentamisen ja kierrätysmateriaalien parissa toimivia yrityksiä, suunnittelu- ja konsultointipalveluiden edustaja sekä teknologian toimittaja.

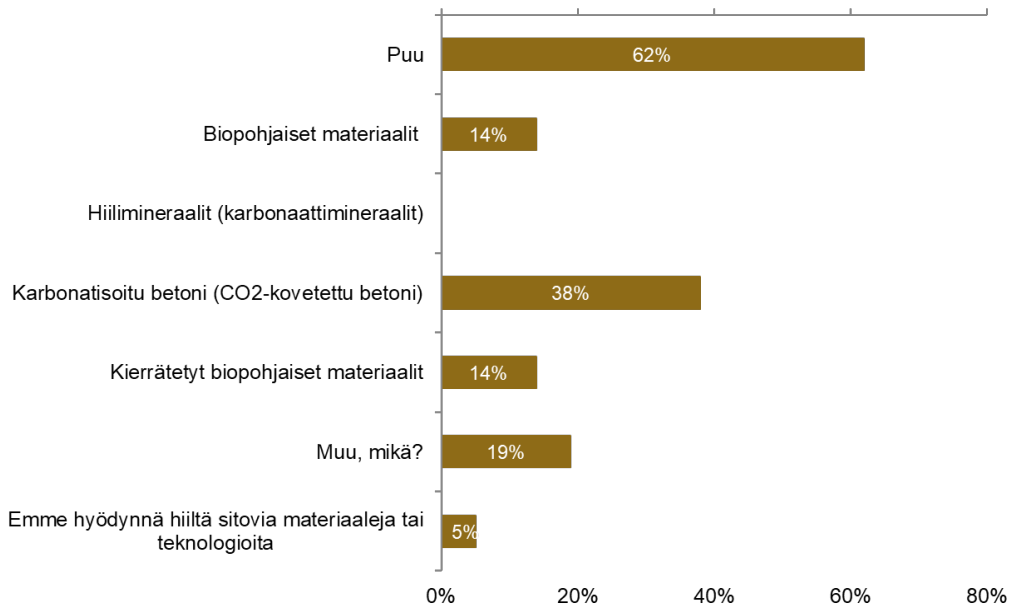


Kuva 1 Vastaajien edustamat organisaatiot.

3.1 Kysely

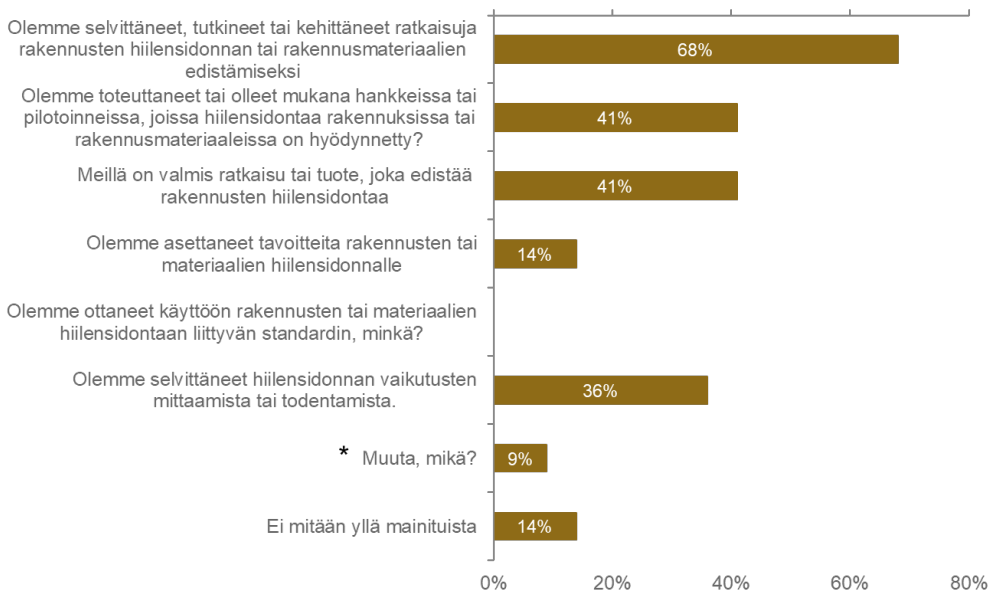
3.1.1 Nykytila

Vastausten pohjalta voidaan todeta, että rakennusalan toimijoilla on perusymmärrys hiilensidonnasta, mutta yhteiset määritelmät, mittaukset ja aikajänteet puuttuvat. Käytetyimmät hiiltä sitovat materiaalit ovat puu sekä karbonatsoitu tai CO₂-kovetettu betoni. Lisäksi vastaajat kertoivat edistävänsä rakennusten hiilensidontaa tutkimuksella, tuottamalla biohiiltä sekä uudelleen käytettävillä rakennuksilla. Yhdellä vastaajista on käytössä uusiokäyttöbetoni.



Kuva 2 Vastaajien edustaman organisaation hyödyntämä hiiltä sitova materiaali tai teknologia.

Nykyinen toiminta painottuu pilotteihin, tutkimukseen ja yksittäisiin ratkaisuihin, eikä vakiintuneita toimintamalleja ole vielä muodostunut. Vain harvalla vastaajista on asetettu hiilensidontaan liittyviä tavoitteita.



Kuva 3 Organisaatioiden rakennusten hiilensidontaan liittyvä nykyinen toiminta.

Rakennusalan toimijat ovat täydentävien vastausten perusteella olleet mukana hankkeissa ja piloteissa, jotka liittyvät rakennusten hiilensidontaan, hiilivarastoihin ja vähähiilisiin ratkaisuihin. Toiminta on kohdistunut muun muassa betonin hiilensidontaa koskeviin tutkimus- ja pilotointi-hankkeisiin, puutuotteiden käyttöön rakennusten hiilijalanjäljen pienentämiseksi sekä biohiilen ja CO₂-kovetuksen kaltaisten ratkaisujen kehittämiseen. Lisäksi vastausten mukaan hiilensidonta on huomioitu kumppanuussopimuksissa, sisäisessä osaamisen kehittämisessä ja tuotteiden

EPD-raportoinnissa. Yksi toimijoista kertoo rakentavansa rakennusmääräyksen mukaisia siirrettäviä puurakennuksia (puukouluja ja -päiväkoteja).

3.1.2 Suurimmat esteet

Vastaajia pyydettiin nimeämään kolme suurinta estettä rakennusten hiilensidonnan hyödyntämiselle. Suurimpina esteinä nähdään kustannukset, tiedon puute ja kilpailutusten hintakeskeisyys. Vastaajien mukaan kilpailutuksissa hinta syrjäyttää ympäristökriteerit. Näiden lisäksi vastauksista nousee esille tekniset ratkaisut, lainsäädäntö sekä hiilensidonnan todentamisen tai mittaamisen vaikeus. Lainsäädäntöön liittyviä esteitä ei vastauksissa tarkemmin yksilöity.

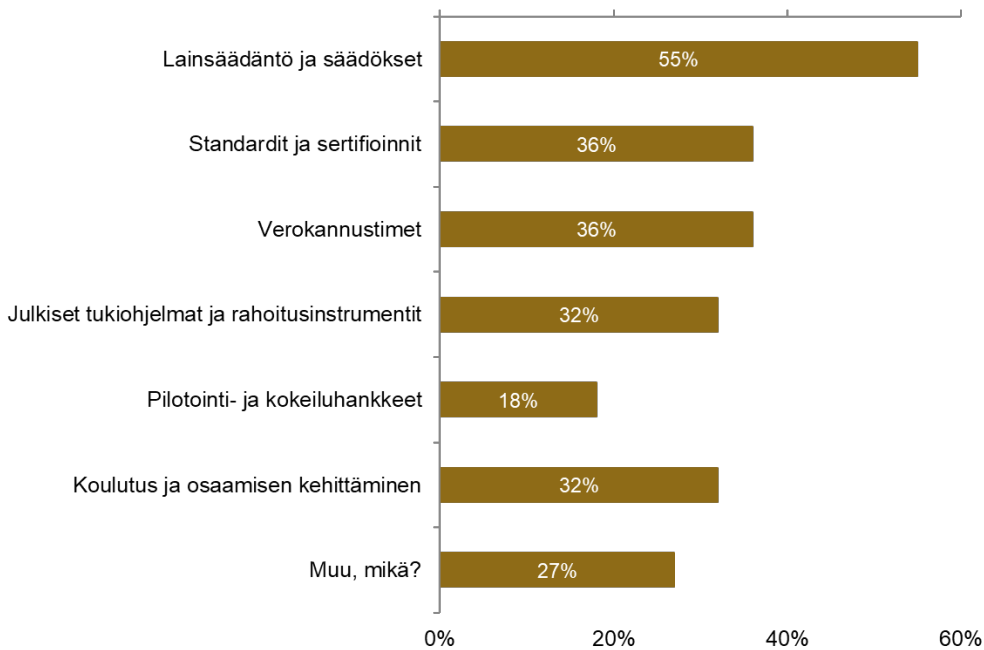


Kuva 4 Esteet rakennusten hiilensidonnan hyödyntämiselle.

3.1.3 Edistävät tekijät ja mahdollisuudet

Vastaajia pyydettiin nimeämään kolme suurinta tekijää, jotka edistäisivät rakennusten hiilensidonnan toteutumista. Vastausten mukaan suurin vaikutus syntyy ohjauksesta, kuten tilaajavaatimukset, yhteiset laskentamallit sekä sääntely ja taloudelliset kannustimet.

Edistävien tekijöiden lisäksi betonin hiilensidonta ja purkumateriaalien hyödyntäminen nähdään merkittävänä mahdollisuutena. Vastausten mukaan CO₂:n sitominen betoniin (myös jälkikäteen, biohiilen käyttö sekä purkubetonin ja purkupuun jatkojalostaminen voivat vähentää päästöjä ja pidentää hiilen varastoitumista. Toisaalta myös puun käytön lisääminen rakentamisessa nähdään mahdollisuutena. Myös rakentamisen kiertotalous ja materiaalivalinnat nousivat mahdollisuuksina esille.



Kuva 5 Rakennusten hiilensidontaa edistävät tekijät.

3.2 Täydentävät haastattelut

Tässä luvussa esitetään yhteenveto täydentävistä asiantuntijahaastatteluista. Haastatteluja toteutettiin kolme, joista kaksi kohdistui betonin rooliin rakennuksen hiilivarastona ja yksi puumateriaaleihin. Haastateltavat edustivat ammattikorkeakoulu- ja yliopistokentän tutkimukseen osallistuvia tutkijoita ja asiantuntijoita, ja mukana oli myös uuden teknologian kehittämiseen ja kaupallistamiseen liittyvää asiantuntemusta.

3.2.1 Haastattelujen keskeiset havainnot

Haastattelujen perusteella useat havainnot tukevat kirjallisuusselvityksessä ja kyselyssä esille tulleita tuloksia puun ja betonin roolista rakennusten hiilivarastoina.

Puun osalta haastatteluissa korostettiin, että hiilivarasto on sidoksissa rakennuksen käyttökään ja elinkaaren hallintaan. Puuhun sitoutunut hiili säilyy rakennuksessa käyttöiän ajan, mutta sen pysyvyys elinkaaren lopussa riippuu jatkokäsittelystä.

Betonin osalta todettiin, että hiilensidonta perustuu karbonatisoitumiseen, jossa hiilidioksidi sitoutuu betonin rakenteeseen. Prosessi on hidas, mutta jatkuva. Sen merkitys korostuu pitkällä aikavälillä sekä erityisesti purkuvaiheessa ja murskatun betonin käsittelyssä.

Karbonatisoitumisen todettiin tiivistävän betonin mikrorakennetta, mikä parantaa sen kosteuskestävyyttä ja voidaan nähdä merkittävänä hyötynä hiilensidonnalla ohella. Karbonatisoituminen mielletään usein negatiiviseksi, koska se voi altistaa betonin sisällä olevat teräsrakenteet ruostumiselle. Riski on kuitenkin hallittavissa huolehtimalla riittävästä suojakerroksesta.

Haastateltavat pitivät betonin hiilensidonnasta suuruusluokkaa pääosin luotettavana, mutta toivat esiin siihen liittyviä epävarmuuksia. Erityisesti luonnolliseen karbonatisoitumiseen liittyy vaihtelua, joka riippuu muun muassa ympäristöolosuhteista, kuten ilman CO₂-pitoisuudesta ja kosteudesta, betonimateriaalin ominaisuuksista, sekä rakenteellisista tekijöistä (pinnoitteet,

halkeamat, altistuminen sääolosuhteille). Todettiin, että selvityksissä esitetyt arviot pohjautuvat usein laboratorio-olosuhteisiin, jotka voivat poiketa todellisista käyttöolosuhteista.

Haastatteluissa myös todettiin, että hiilivarastolaskennassa voidaan tukeutua rakennusmateriaalien ympäristöselosteisiin (EPD). Lisäksi viitattiin hiilenpoistojen sertifiointikehyksen (CRCF) viimeisimpään versioon, jossa on esitetty rakennusmateriaaleja koskevia kriteereitä.

Lisäksi todettiin, että vähähiilisten materiaalien ja ratkaisujen käyttöönotto on vielä rajallista ja perustuu pitkälti yksittäisiin hankkeisiin ja tilaajien asettamiin tavoitteisiin. Nykyiset ohjaukset tai sääntely, eivät vielä tue vähähiilisten rakennusmateriaalien käyttöönottoa Suomessa, toisin kuin muualla Euroopassa.

Sekä puun että betonin osalta korostettiin, että hiilivarastoa ei tule tarkastella erillisenä tekijänä, vaan osana rakennuksen koko elinkaaren ilmastovaikutuksia. Lisäksi korostettiin, ettei biopohjaisia rakennusmateriaaleja, kuten puuta ja betonia pidä vertailla keskenään, koska ovat täysin eri luontoisia materiaaleja. Rakennuksissa tarvitaan molempia ja niiden käyttö tukee toisiaan.

3.3 Keskeiset johtopäätökset kyselystä ja täydentävistä haastatteluista

Kyselyn vastausten perusteella hiilensidonta ei vielä ohjaa rakentamista, mutta se tunnustetaan tärkeäksi. Suurin osa vastaajista arvioi hiilensidontan merkityksen kasvavan lähivuosina.

Vastaajien näkemysten mukaan hiilensidontan huomioiminen rakentamisessa liittyy erityisesti laskennan ja todentamisen yhdenmukaistamiseen, kilpailutusten pisteytyksen kehittämiseen hiilensidontaa tukevasti sekä tilaajavaatimuksiin. Lisäksi vastaajat nostivat esiin, että hiilensidontaa tulisi tarkastella osana rakennusten käyttöikä, uudelleenkäyttöä, kierrätettävyyttä sekä rakentamisen kiertotaloutta ja materiaalivalintoja.

Haastattelujen perusteella rakennusten hiilensidontaa tulisi tarkastella osana rakennuksen koko elinkaaren ilmastovaikutuksia, ei erillisenä tekijänä. Puun hiilivarasto nähdään käyttöikänsä ja elinkaaren hallintaan sidoksissa olevana, kun taas betonin hiilensidonta perustuu karbonatisoitumiseen, jonka suuruusluokkaa pidetään pääosin luotettavana, vaikka siihen liittyy epävarmuuksia erityisesti luonnollisten olosuhteiden vaihtelun osalta. Myös haastattelujen perusteella voidaan myös todeta, että hiilensidontan huomiointi on vielä rajallista ja painottuu yksittäisiin hankkeisiin.

4 Hiilensidonta rakennuksen teknisillä järjestelmillä

4.1 Tiivistelmä

Selvityksen tavoitteena oli koota olemassa oleva tieto rakennusten teknisiin järjestelmiin integroiduista hiilensidontaratkaisuksista Euroopan alueella. Tarkastelussa havaittiin, että teemaa koskeva akateeminen tutkimus on vielä vähäistä ja hyvin hajanaista. Tarkasteltavia teknologioita tunnistettiin selvityksessä pienempi määrä kuin mitä lähtötilanteessa arvioitiin tunnistettavan. Tarkasteluun sisällytettiin HVAC DAC- sekä stand-alone-DAC-teknologiat, lähinnä levän fotosynteesiin perustuvat bioaktiiviset julkisivujärjestelmiin asennettavat ratkaisut sekä suppeasti myös vielä kehitysvaiheessa olevat, rakennuksiin soveltuvat passiiviset hiilentalteenoton ratkaisut. Tarkasteltavat teknologiat olivat yleisesti vielä suhteellisen varhaisessa vaiheessa: kaupallisia EU-tason toimijoita tutkittujen teknologioiden puitteissa tunnistettiin stand-alone-DAC-tyyppisissä ratkaisuisa muutama sekä HVAC DAC-ratkaisuisa yksi.

Stand-alone-DAC-ratkaisut ovat pohjateknologiaaltaan toimiva ja skaalattavia, mutta taloudellisen kannattavuuden osalta niiden käyttöönotto voi olla hankalasti perusteltavissa. HVAC DAC-teknologiassa integraatio rakennuksen IV-järjestelmään tuo selkeää hyötyä energiatehokkuuden ja järjestelmän energiataseen tasapainottamisen näkökulmasta. Bioaktiiviset järjestelmät, kuten leväreaktorit, tuovat lisäarvoa energian ja biomassan tuotannon kautta, mutta ovat toistaiseksi konseptivaiheessa ja vaativat merkittävää kehitystä ennen laajamittaista käyttöönottoa. Passiiviset ratkaisut, kuten MOF-materiaalit (metalliorgaaniset kehykset, metal-organic frameworks, MOF) ja sorbenttipohjaiset suodattimet, voivat tukea aktiivisia järjestelmiä ja tasata CO₂-pitoisuuksia energiatehokkaasti, mutta niiden vaikutus yksinään on rajallinen. Näiden teknologioiden rooli on todennäköisesti hybridiratkaisuisa.

Keskeiset haasteet liittyvät investointi- ja huoltokustannuksiin, ilmastovaikutusten systemaattiseen mittaamiseen ja elinkaarivaikutusten arviointiin. Järjestelmien energiatehokkuuden, talteen otetun hiilidioksidin varastointiin ja hyötykäyttöön. Talteen otetun hiilen käsittely edellyttää selkeitä vastuunjakoja ja infrastruktuuria. Lisäksi raportoinnin ja mittauksen läpinäkyvyys on välttämätöntä, jotta ratkaisut voidaan huomioida elinkaarilaskennoissa ja päästötaseissa.

Selvityksen toteuttivat Granlund Oy:ssä Elina Ruoho ja Kerli Maiste. Selvitys löytyy kokonaisuudessaan tämän raportin liitteenä (liite 3).

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

5.1 Hiilensidonta rakennuksiin nykytilaselvityksen yhteenveto

Tässä selvityksessä muodostettiin tilannekuva rakennusten hiilensidonnasta kokoamalla yhteen keskeisiä tutkimuksia, selvityksiä, hankkeita ja pilotteja sekä rakennusalan toimijoiden näkemyksiä.

Tarkastelun perusteella rakennusten hiilivarastot perustuvat tällä hetkellä pääasiassa puu-pohjaisiin materiaaleihin sekä betonin karbonatisoitumiseen ja kehittymässä oleviin CO₂:ta sitoviin teknologioihin. Hiilensidontan merkitys rakennusallalla tunnustetaan, mutta sen käytännön soveltaminen on vielä rajallista.

Selvityksen perusteella keskeisinä toimintamalleina ja käytäntöinä korostuvat pitkäikäiset puutuotteet, betonin karbonatisoitumisen hyödyntäminen sekä kiertotalouteen liittyvät ratkaisut, kuten materiaalien uudelleenkäyttö ja kierrätys. Näiden toteutuminen vaikuttaa suoraan hiilivarastojen suuruuteen ja pysyvyyteen.

Hiilensidontaan voidaan vaikuttaa parhaiten jo suunnitteluvaiheessa, eli suunnittelemalla rakennukset alun perin mahdollisimman pitkäikäisiksi, muunneltaviksi ja korjattaviksi, sekä mahdollistamalla rakennusosien ja -materiaalien hyödyntäminen, kun rakennus joskus puretaan. Materiaalivalinnoissa kannattaa huomioida ensisijaisesti käyttötarkoitus ja soveltuvuus, eli käyttämällä eri materiaaleja niihin parhaiten soveltuviin tarkoituksiin.

Puun osalta hiilivarasto perustuu biogeeniseen hiileen, joka sitoutuu materiaaliin sen elinkaaren ajaksi. Hiilivaraston suuruus ja ilmastovaikutus riippuvat erityisesti rakennuksen käyttötavasta sekä rakennusmateriaalien elinkaaren lopun ratkaisuista. Tässä tulee huomioida metsien hiilinielut, puumateriaaleihin/tuotteisiin sitoutuva hiili sekä muiden materiaalien korvaamisesta syntyvät hyödyt. Betonin hiilensidonta perustuu karbonatisoitumiseen, joka on hidas mutta jatkuva prosessi ja jonka merkitys korostuu pitkällä aikavälillä sekä erityisesti purkuvaiheessa. Suuruusluokaltaan puupohjaisiin materiaaleihin sitoutunut hiilivarasto on Suomessa selvästi suurempi kuin betonin karbonatisoitumiseen perustuva hiilivarasto. Rakennuskannan puurakenteisiin sitoutuneen hiilen on arvioitu olevan kymmeniä miljoonia tonneja CO₂-ekvivalenttia, kun taas betonikannan hiilivarasto on arvioiden mukaan vain muutamien megatonnien suuruusluokkaa. Molempien materiaalien osalta hiilivarastoa tulee tarkastella osana rakennuksen koko elinkaaren ilmastovaikutuksia.

Selvityksessä tunnustettiin myös katvealueita ja esteitä hiilensidontan hyödyntämiselle. Keskeiset haasteet liittyvät hiilensidontan todentamiseen ja yhtenäisten käytäntöjen puutteeseen. Lisäksi kustannukset, tiedon puute sekä kilpailutusten hintakeskeisyys tunnustettiin kyseisissä ja osin haastatteluissa keskeisiksi tekijöiksi, jotka hidastavat hiilensidontaa tukevien ratkaisujen laajempaa käyttöönottoa. Hiilensidontan huomiointi on tällä hetkellä pitkälti hankekohdasta ja perustuu yksittäisiin pilotteihin sekä tilaajien asettamiin tavoitteisiin.

Selvityksen perusteella hiilensidontaa edistävät erityisesti rakennusten pitkä käyttöikä sekä materiaalien uudelleenkäyttö ja kierrätys, jotka vaikuttavat hiilivarastojen säilymiseen. Lisäksi hiilensidontan huomioiminen osana rakennuksen koko elinkaaren ilmastovaikutuksia tukee sen tarkastelua käytännön hankkeissa. Pilotit ja hankkeet sekä tilaajien asettamat tavoitteet ovat

keskeisessä roolissa hiilensidontaa tukevien ratkaisujen käyttöönnotossa. Ohjauskeinojen ja sääntelyn kehittäminen tunnistettiin keskeiseksi tekijäksi hiilensidonnan laajemmassa edistämisessä.

Taulukko 1. Puu ja muut biopohjaiset materiaalit sekä betoni rakennuksen hiilivarastona – yhteenveto.

Materiaali	Hiilivaraston muodostuminen	Nykytila	Potentiaali	Epävarmuudet
Puu ja muut biopohjaiset materiaalit	Hiilivarasto perustuu biogeeniseen hiileen, joka sitoutuu materiaaliin rakennuksen käyttöänsä ajaksi. Varaston suuruus ja ilmastovaikutus riippuvat käyttöiästään sekä elinkaaren lopun käsittelystä	Suomen rakennuskannan puurakenteisiin varastoitunut hiili on arviolta yhteensä noin 84 Mt CO ₂ -ekv.	Hiilivarastopotentiaali on suuri, mutta elinkaaren lopun ratkaisut ovat keskeisiä todellisen ilmastovaikutuksen kannalta. Pitkä käyttöikä sekä uudelleenkäyttö ja kierrätys pidentävät hiilen varastoitumista.	Hiilivarasto on luonteeltaan väliaikainen, sillä varastoituneen hiilen pysyvyys riippuu elinkaaren lopun käsittelystä. Hiili voi vapautua esimerkiksi poltossa, palamisessa tai biologisessa hajoamisessa, ellei materiaalia hyödynnetä uudelleen tai kierrätetä. Lisäksi elinkaarilaskennassa huomioidaan rajallisesti metsän hiiliinluon liittyviä vaikutuksia.
Betoni	Hiilivarasto perustuu karbonatisoitumiseen, jossa betoni sitoo ilmakehän CO ₂ :ta elinkaarensa aikana. Prosessi on hidasta mutta jatkuva. Karbonatisoituminen alentaa betonin pH-arvoa ja voi altistaa teräsrakenteiden korroosiolle.	Suomen betonikantaan on varastoitunut hiiliä arviolta noin 4 Mt CO ₂ .	Suurin hiilensidontapotentiaali liittyy purkuvaiheeseen ja kierrätysbetonin käsittelyyn, jossa murskaus lisää karbonatisoitumiselle altista pinta-alaa ja nopeuttaa hiiliidioksidin sitoutumista betoniin. Uudet teknologiat, kuten CO ₂ -kovetus, voivat lisätä hiilen pysyvää sitoutumista materiaaliin.	Hiilensidonta on hidasta ja vaihtelee olosuhteiden, materiaalin ominaisuuksien ja rakenteellisten tekijöiden mukaan. Arviot perustuvat pääosin laboratorio-olosuhteisiin, jotka voivat poiketa käytännön tilanteista. Lisäksi hiilensidonnan määrä on rajallinen suhteessa betonin valmistuksen päästöihin.

5.1.1 Johtopäätökset ja suositukset jatkotoimiksi

1. Laskenta ja todentaminen

Hiilensidonnan laajempi hyödyntäminen rakennusalalla edellyttää yhtenäisiä laskenta- ja todentamiskäytäntöjä sekä ohjauskeinoja, jotka tukevat hiiltä sitovien ratkaisujen huomiointia rakentamisessa.

Suositus jatkotoimiksi:

- Suositellaan kansallisen rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän (YM 2025) käyttöä mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, mahdollisesti jo suunnittelu- vaiheessa.
- Suositellaan, että laskentaohjeen (luonnos) päivityksessä ympäristöministeriö varmistaa hiilivarastojen arvioinnin yhtenäisen soveltamisen biogeenisten materiaalien (puu) ja betonin karbonatisoitumisen osalta.
- Ehdotetaan, että selvitetään mahdollisuutta edistää rakennuksen vähähiilisyttä julkisissa hankinnoissa.

2. CRCF:n soveltaminen rakennusalalle

EU:n hiilenpoiston sertifiointikehys (CRCF) luo edellytyksiä hiilivarastojen todentamiselle ja vertailtavuudelle, mutta sen soveltaminen rakennusalalla edellyttää tarkempia menetelmiä ja käytäntöjä.

Suositus jatkotoimiksi:

- Määritellään kansallisesti, mitkä rakennuksiin liittyvät hiilivarastot (esim. puutuotteet ja CO₂:ta sitovat betoniratkaisut) voivat täyttää CRCF-kriteerit, sekä laaditaan

ohjeistus siitä, miten kriteerien täytyminen osoitetaan käytännössä huomioiden li-säisyys, pysyvyys ja hiilivarastojen rajaus. Yhteensovitetaan CRCF-periaatteet osaksi kansallisia arviointimenetelmiä, kuten rakennuksen vähähiilisyden arviointia. CRCF:n käytännön soveltaminen edellyttää rakennusalan toimijoiden välistä yhteis-työtä.

3. Hankinnat ja tilaajavaatimukset

Hiilensidonnan huomiointi rakennuksissa on tällä hetkellä hankekohtaista ja perustuu yksit-täisiin pilotteihin sekä tilaajien asettamiin tavoitteisiin. Kilpailutuksia ohjaa pääsääntöisesti hinta.

Suositus jatkotoimiksi:

- Ehdotetaan, että ympäristöministeriö selvittää mahdollisuutta ottaa hiilensidonta mu-kaan julkisten hankintojen kriteereihin, esimerkiksi vaatimuksena elinkaarilaskenta, jos-sa huomioidaan hiiltä sitovat materiaalit ja ratkaisut. Lisäksi ehdotetaan selvitettäväksi määritellä tilaajille selkeät vaatimukset hiilensidonnan huomioimiseksi, jotta se ei jää vapaaehtoiseksi.

4. Elinkaari ja pysyvyys

Rakennuksen hiilivarasto on keskeisesti sidoksissa rakennuksen pitkäikäisyyteen, uudel-leenkäyttöön ja kiertotalouteen, jotka vaikuttavat hiilivarastojen pysyvyyteen ja ilmastovai-kutuksiin. Elinkaaren lopun ratkaisut ovat keskeisiä hiilivaraston todellisen ilmastovaikutuk-sen kannalta. Rakentamislaki edellyttää (751/2023, 39 §), että rakentamishankkeeseen ryh-tyvän on huolehdittava, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla elinkaariominaisuuksiltaan ekologiseksi sekä tavoitteelliselta teknisel-tä käyttöikänsä pitkäikäiseksi.

Suositus jatkotoimiksi:

- Suositellaan, että lainsäädännön vaatimuksia pitkäikäisyydestä ja kiertotaloudesta konkretisoidaan ohjeistuksissa ja käytännön hankkeissa niin, että niiden yhteys hiiliva-rastojen pysyvyyteen tulee näkyväksi. Tämä edellyttää ympäristöministeriön ohjausta sekä tilaajien ja ohjeistusta tuottavien toimijoiden aktiivista roolia vaatimusten jalkaut-tamisessa.

5.2 Hiilensidonta rakennusten teknisillä järjestelmillä selvityksen yhteenveto ja johtopäätökset

Rakennusten teknisiin järjestelmiin perustuva hiilensidonta tarjoaa teoriassa kiinnostavaa po-tentiaalia hajautetun hiilenpoiston toteutukseen, mutta laajamittainen käyttöönotto edellyttää vielä kaikkien teknologioiden kehitystä, kustannusten alentamista, MRV-standardointia ja sel-keitä toimintamalleja hiilen varastoinnin ja raportoinnin osalta. Toimintaympäristön ajurit eivät tällä hetkellä ainakaan Suomessa todennäköisesti synnytä riittävään laajaa painetta rakentami-sen saralla, jotta teknologiat lähtisivät laajamittaisesti skaalautumaan. Skaalautuminen edellyt-täisi mahdollisesti siis joko yleistä ilmastotoimien kunnianhimon tason nousua, teknologioiden tarkoituksellista tukemista esimerkiksi rahoituksen kautta tai jonkun teknologian nopeaa kehi-tystä erityisesti kustannusten ja energiatehokkuuden näkökulmasta. HVAC DAC nousi kehitys-

tarpeistaan huolimatta kaupallisen valmiuden sekä oheishyötyjen näkökulmasta selkeimmin esiin, kun taas bioaktiiviset ja passiiviset ratkaisut vaativat vielä tutkimusta ja pilotointia ennen kaupallistamista.

5.2.1 **Toimenpidesuositukset rakennuskohtaisen hiilensidonnan ja -varastoinnin tehostamiseksi**

Rakennuskohtainen hiilenpoisto ja siihen liittyvät tekniset ratkaisut tarjoavat potentiaalia hiilidioksidin poistamiseen ilmakehästä sekä erilaisten oheishyötyjen luomiseen hankkeissa. Rakennuskohtaisten hiilensidontaratkaisujen edistäminen edellyttää kuitenkin samanaikaisia toimenpiteitä teknologian kehityksen, ohjauksen ja markkinarakenteiden osalta.

1. **Teemaan liittyvän tutkimuksen etenemisen seuraaminen.** Aihetta koskeva tutkimus on vielä rajallista; kirjallisuuskatsauksessa sen havaittiin kuitenkin julkaisujen määrän olleen kasvussa viime vuosina. Jatkuva tiedon seuranta mahdollistaa ratkaisujen arvioinnin ajantasaisella tietopohjalla.
2. **Tunnistettava ja mahdollisesti edelleen kehitettävä käyttöönottoa ohjaavia ajureita.** Nykyisellä kustannusrakenteella ja teknologian kehitystasolla rakennuskohtaiselle hiilenpoistolle ei välttämättä ainakaan Suomessa ole tällä hetkellä riittävästi selkeitä ajureita tai kannustimia, jotka ohjaisivat ratkaisujen laajamittaiseen käyttöönottoon. Jos jotakin teknologiaa halutaan tavoitteellisesti edistää, voi olla tarpeen miettiä lisäkannustimia, ellei yleinen ilmastotoimien kunnianhimon tason merkittävästi nouse.
3. **Pilottihankkeissa teknologioiden testaamisen rinnalla painotettava erityisesti mittaamista, raportointia ja tulosten verifointia ja näiden kehitystä sekä tiedon läpinäkyvää jakamista,** jotta ratkaisujen todelliset ilmastovaikutukset voidaan osoittaa luotettavasti ja niistä saadaan tietoa. Samalla on tärkeää kehittää ratkaisuja suuntaan, jossa hiilidioksidin varastointi on pysyvää ja elinkaarivaikutukset kokonaisuutena ilmaston kannalta positiivisia.
4. **Systemaattinen käytännön kokemusten kokoaminen ja analysointi.** Nykyinen tietopohja perustuu pitkälti yksittäisiin pilotteihin ja tapaustutkimuksiin, eikä ratkaisujen soveltuvuudesta eri käyttökohteisiin ole vielä riittävä kokonaiskuva tai systemaattisia vertailuja. Teknologiakohtaista tarkastelua tulisi syventää, jotta voidaan tunnistaa kunkin teknologian parhaat käyttökohteet.

Lisäksi on tarpeen käydä sekä periaatteellista että metodologista keskustelua siitä, miten rakennuskohtaiset hiilensidontaratkaisut huomioitaisiin eri viitekehyksissä ja laskentamalleissa. Tämä koskee erityisesti kansallista ilmastaselvitystä sekä GHG-protokollan mukaista organisaatiotason hiilijalanjälkilaskentaa. Selkeiden pelisääntöjen puute voi muodostua merkittäväksi esteeksi ratkaisujen laajemmalle hyödyntämiselle.

Kuvat

- Kuva 1 Vastaajien edustamat organisaatiot.
- Kuva 2 Vastaajien edustaman organisaation hyödyntämä hiiltä sitova materiaali tai teknologia.
- Kuva 3 Organisaatioiden rakennusten hiilensidontaan liittyvä nykyinen toiminta.
- Kuva 4 Esteet rakennusten hiilensidontaan hyödyntämiselle.
- Kuva 5 Rakennusten hiilensidontaa edistävät tekijät.

Taulukko

- Taulukko 1 Puu ja muut biopohjaiset materiaalit sekä betoni rakennuksen hiilivarastona - yhteenveto.

Lähteet

Aalto-yliopisto. (2024). Carbon sequestration potential of wooden residential buildings (Diplomityö). <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/d99f169b-82ec-4048-8053-fe5260f28682/content>

Aalto-yliopisto. (2025). Balancing carbon in the expanding city: Assessing the viability of buildings as climate champions (Väitöskirja). <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/878be328-feca-48cf-b4d3-65b7218d27bc/content>

Aalto-yliopisto. (2025). Vähähiilisen betonin tiekartta. https://betoni.com/wp-content/uploads/2025/06/Vahahiilisen-betonin-tiekartta_Tiivistelma.pdf

Amiri, N., & Junnila, S. (2025). Embodied carbon reduction potential of wooden buildings.

Betolar. (2025). Tiedote. <https://www.betolar.com/fi/tiedotteet/betolar-vahvistaa-suomen-ja-eu-n-omavaraisuutta-kriittisissa-ja-strategisissa-raaka-aineissa>

Betoni.com. Viitattu 29.1.2026. Betonin hiilensidonta. <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/betonin-hiilensidonta/>

Betoni.com. Viitattu 8.4.2026. Vähähiilisen betonin tiekartta. <https://betoni.com/lehti/2025/06/27/vahahiilisen-betonin-tiekartta/>

Betoniteollisuus ry, Rakennustuoteteollisuus RTT, & VTT. (2021–2024). CO₂ncrete Solution -hanke. <https://betoni.com/wp-content/uploads/2024/11/CO2NCRETE-SOLUTION-kirjallisuustutkimus-L.pdf>

Carbonaide. (2022–2024). Hiilinegatiivinen betoni. <https://carbonaide.com/>

Euroopan komissio. (2026). Komission delegoitu asetus hiilenpoiston sertifiointimenetelmistä, annettu 3.2.2026, täydentäen asetusta (EU) 2024/3012 hiilenpoiston sertifiointikehyksestä. https://climate.ec.europa.eu/document/download/96845e08-0311-45b4-b6c0-7040e31d9cd0_en?filename=C_2026_553_1_EN_ACT_part1_v5.pdf

Euroopan parlamentti ja neuvosto. (2024). Asetus (EU) 2024/3012 hiilenpoiston sertifiointikehyksestä (Carbon Removal Certification Framework).

Gaia Consulting. (2021). Vähähiilisten rakennusmateriaalien hiilikädenjälki osana sääntelyä – haasteet ja mahdollisuudet. <https://rt.fi/wp-content/uploads/2023/12/vahahiilisten-rakennusmateriaalien-hiilikadenjalki-tulostiivistelma.pdf>

Härkönen, T. (2024). Betonimurskeen piilevä voima torjumaan ilmastonmuutosta. Kivifaktaa. <https://kivifaktaa.fi/betonimurskeen-piileva-voima-torjumaan-ilmastonmuutosta>

Ilmasto-opas.fi. (2024). Rakennusten hiilijalanjälkeä voidaan pienentää vaikuttamalla energiankulutukseen. <https://ilmasto-opas.fi/artikkelit/rakennusten-hiilijalanjalkea-voidaan-pienentaa-vaikuttamalla-energiankulutukseen>

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. (2023–2024). BEHI – Betoni hiilinieluna: Ratkaisuja vähähiiliseen rakentamiseen. <https://www.xamk.fi/hanke/betoni-hiilinieluna-ratkaisuja-vahahiiliseen-rakentamiseen-behi/>

Luonnonvarakeskus. (uutinen 15.12.2025). Maankäyttösektori pysyy suurena päästölähteenä, mutta metsät ovat pieni nielu kasvihuonekaasuinventaarion 2024 ennakkotiedoissa. <https://www.luke.fi/fi/uutiset/maankayttosektori-pysyy-suurena-paastolahteena-mutta-metsat-ovat-pieni-nielu-kasvihuonekaasuinventaarion-2024-ennakkotiedoissa>

Luonnonvarakeskus. (2025–2027). Puun Aika -hanke. <https://www.luke.fi/fi/projektit/puun-aika>

Maa- ja metsätalousministeriö, & Ympäristöministeriö. (2024). Puutuotteet hiilivarastona Suomessa. <https://mmm.fi/documents/1410837/7764238/Puutuotteet+hiilivarastoina+16092020.pdf>

Oulun ammattikorkeakoulu. (2023). Suomen betonikannan hiilensidontapotentiaali – kirjallisuuskatsaus ja mallinnus. CO₂crete Solution -hankkeen aineistot.

Rakennusteollisuus. (n.d.). Energiatehokkuus ja vähähiilinen rakentaminen. <https://rt.fi/tietoa-alasta/ymparisto-ja-ilmasto/vahahiilinen-rakentaminen/energiatehokkuus/>

ReCreate-project. (2021–2025). Reusing precast concrete for a sustainable future. <https://recreate-project.eu/2025/01/15/reusing-precast-concrete-for-a-sustainable-future-evaluating-service-life-carbonation-and-carbon-footprint>

Rudus. (2021). Uusi ympäristöystävällinen betoni toimii erinomaisesti isossakin kohteessa. <https://www.rudus.fi/ajankohtaista/2021/09/06/uusi-ymparistoystavallinen-betoni-toimii-erinomaisesti-isossakin-kohteessa>

S-Betoni. Viitattu 29.1.2026. Ekobetoni. <https://s-betoni.fi/ekobetoni/>

Science. (2023). Built to remove carbon. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adu7379>

Science. (2024). Building materials could store more than 16 billion tonnes of CO₂ annually. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adq8594>

STT Info. Viitattu 29.1.2026. Läpimurto rakentamisessa: Uusi suomalaismateriaali muuttaa rakennukset päästöjen lähteistä hiilivarastoiksi. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/71177348/lapimurto-rakentamisessa- uusi-suomalaismateriaali-muuttaa-rakennukset-paastojen-lahteista-hiilivarastoiksi>

Suomen ympäristökeskus. (2021). Puutuotteet hiilivarastona ja uusiutumattomien materiaalien korvaajina. <https://helda.helsinki.fi/items/0a3dad04-c613-4fd6-9b1c-7a0120501f42>

Tapio Oy, & Suomen ympäristökeskus. (n.d.). #Hiilijemma-hanke. <https://tapio.fi/projektit/hiilijemma/hankkeen-aineistoja/>

Tapio Oy. (2021). Puurakentamisella luodaan pitkäikäisiä hiilivarastoja. <https://tapio.fi/tiedotteet/puurakentamisella-luodaan-pitkaikaisia-hiilivarastoja/>

Topinpuisto. (2022–2024). <https://www.topinpuisto.fi>

VTT. (2017). Rakentamisen hiilivarasto. <https://sarjaweb.vtt.fi/julkaisut/muut/2017/VTT-CR-04958-17.pdf>

Westerholm, T. (2024). Assessing the carbon impacts of five apartment buildings with different timber. <https://journal.fi/architecturalresearchfinland/article/view/147227>

Ympäristöministeriö. (2025). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2025 (luonnos). <https://ym.fi/documents/1410903/248663305/Rakennuksen%20v%C3%A4h%C3%A4hiilisyyden%20arviointimenetelm%C3%A4%202025.pdf/1dd14e94-202e-79c2-a954-de2cc4f56c90?t=1770103310147>

Liitteet

- Liite 1 Yhteenveto: Kysely rakennusten hiilensidonnan nykytilasta, Motiva Oy
- Liite 2 Rakennuksen hiilensidontaan liittyviä standardeja
- Liite 3 Hiilensidonta rakennuksen teknisillä järjestelmillä – asiantuntijaselvityksen loppuraportti, Granlund Oy

A photograph of a modern building facade. The upper part features a curved glass window with a white frame, set against a clear blue sky with a few white clouds. Below the glass is a large, curved section of the building with a textured, light brown wood-grain finish. The lower part of the image shows a glass-walled entrance area with a curved, metallic-looking frame, reflecting the surrounding environment.

MOTIVA

Hiilensidonta rakennuksissa nykytila

**Kysely yrityksille ja keskeisille
toimijoille**

Yhteenveto 28.1.2026

Kyselyn tausta ja tavoite

Rakennusten hiilensidonnan nykytila, mahdollisuudet ja haasteet

Kyselyn taustalla on rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD, Energy Performance of Buildings Directive) uudistus, joka edellyttää, että rakennusten ilmastovaikutuksissa huomioidaan myös hiilen varastoituminen rakennuksiin* ja niiden järjestelmiin. Tämä tarkoittaa esimerkiksi biopohjaisiin rakennusmateriaaleihin sitoutunutta hiiltä. Tavoitteena on, että rakennukset voivat toimia hiilivarastoina ja tukea siirtymää kohti elinkaaren nettonollapäästöisyyttä. Samanaikaisesti valmistellaan hiilenpoistojen sertifiointikehystä (CRCF, Carbon Removal Certification Framework), jonka tavoitteena on varmistaa hiilenpoistojen luotettava mittaaminen ja todentaminen eri sektoreilla, myös rakennusalalla.

Kyselyn tavoitteena oli koota rakennusalan toimijoiden näkemyksiä rakennusten hiilensidonnan nykytilasta, tunnistaa mahdollisuuksia ja haasteita sekä kerätä tietoa mahdollisesti toteutetuista piloteista tai käytännön ratkaisuista.

Webropolilla toteutettu kysely kohdennettiin Suomessa toimiville rakennusalan yrityksille sekä keskeiseksi toimijoiksi tunnistetuille tahoille, kuten toimialaliitot, tutkimuslaitokset sekä korkeakoulut. Kysely lähetettiin noin 100 toimijalle ja vastauksia saatiin 22.

Kysely toteutettiin 21.11.—18.12.2025 välisenä aikana. Kyselyn toteutti Motiva Oy.

Yhteenveto

1/2

- Vastaajia 22, joista valtaosa yrityksistä (64 %), lisäksi vastaajat edustavat järjestöjä, liittoja sekä tutkimuslaitoksia.
- Vastaajissa on mukana eri kokoisia toimijoita rakennusalan arvoketjusta.
- Alan toimijoilla on kohtuullinen perusymmärrys, mutta yhteinen näkemys hiilensidonnan määritelmistä, mittaamisesta ja aikajännteistä puuttuu.
- Hiilensidonta koetaan merkitykselliseksi ja kasvavaksi teemaksi rakennusalalla. Suurin osa vastaajista (64 %) arvioi hiilensidonnan merkityksen kasvavan erittäin tai melko tärkeäksi seuraavan viiden vuoden aikana.
- Yleisimmät käytössä olevat materiaalit ovat puu ja karbonatisoitu/CO₂-kovetettu betoni.
- Nykyinen toiminta painottuu pilotteihin, tutkimukseen ja yksittäisiin ratkaisuihin, ei vakiintuneisiin toimintamalleihin.
- Vastausten perusteella vain harvalla yrityksellä on asetettu rakennusten hiilensidontaan liittyviä tavoitteita.

Yhteenveto

2/2

- Suurimmat esteet: kustannukset, tiedon puute ja kilpailutuksen hintakeskeisyys (hinta syrjäyttää ympäristökriteerit).
- Edistävät tekijät: Suurin vaikutus syntyy ohjauksesta, kuten tilaajavaatimukset, yhteiset laskentamallit sekä sääntely ja taloudelliset kannustimet.
- Betonin hiilensidonta ja purkumateriaalien hyödyntäminen nähdään merkittävänä mahdollisuutena: CO₂:n sitominen betoniin (myös jälkikäteen), biohiilen käyttö sekä purkubetonin ja purkupuun jatkojalostaminen voivat vähentää päästöjä ja pidentää hiilen varastoitumista. Toisaalta myös puun käytön lisääminen rakentamisessa nähdään mahdollisuutena.
- Rakentamisen kiertotalous ja materiaalivalinnat nähdään myös mahdollisuutena: rakennusten uudelleenkäyttö ja kierrätettävyyys, puun ja muiden biopohjaisten materiaalien harkittu käyttö sekä hybridiratkaisut voivat tukea vähähiilistä rakentamista, erityisesti jos niitä ohjataan sääntelyn, hankintojen ja kaavoituksen kautta.

Nostoja vastaajien muista huomioista

1/2

- **Hiilensidonta koetaan vaikeaksi käsitteeksi** – ymmärrystä, määritelmiä ja merkitystä tulee selkeyttää ennen laajaa käyttöönottoa.
- **Keinotekoisista ja yleispätevistä raja-arvoista tulisi luopua** ja siirtyä kohdekohtaiseen tarkasteluun.
- Rakennusala ohjaa tehokkaimmin **pakko tai taloudellinen ohjaus**; nykyinen betonilähtöisyys ei muutu ilman sääntelyä tai kannustimia.
- Nopeasti muuttuvat raja-arvot koetaan haastaviksi, ja **vastuu jää liikaa yksittäisille toimijoille**, vaikka kyse on koko alan yhteisestä haasteesta.
- **Pitkäkestoinen hiilensidonta ja uudelleenkäytettävyys** tulisi olla tavoitteena; modurakentaminen nähdään lupaavana ratkaisuna, jota pitäisi tukea määräyksin.
- **Laskentakäytännöt vaihtelevat merkittävästi**, eikä yhtä vahvistettua mallia ole, tämä johtaa jatkuvaan kyseenalaistamiseen ja päätösten lykkäämiseen.
- Tehokkaimmat ohjauskeinot ovat: verotus, rahoituksen ehdot, tilaajan vaatimukset.

Nostoja vastaajien muista huomioista

2/2

- **Kilpailutusten vaatimukset ja pisteytys on keskeisessä roolissa:** jos hinta painaa eniten, hiilikriteerit jäävät marginaaliin ja vaikutus kilpailutuksessa on pieni.
- Hiilensidontaa tarkasteltaessa tulee huomioida myös **muut luontokadon ajurit**, jotta vältetään osaoptimointi.
- Hiilensidonnassa tulisi käyttää **teknologioita, joissa hiili sitoutuu oikeasti.**
- **Puun hiilivarastovaikutukseen suhtaudutaan kriittisesti:**
 - puun käyttö rakennuksissa ei välttämättä vähennä kokonaispäästöjä
 - hiilen takaisin sitoutuminen kestää vuosikymmeniä
 - *”Hiilensidonnassa tulisi käyttää teknologioita, joissa hiiltä oikeasti sitoutuu. Puun käyttö rakennuksissa kyllä sitoo hiiltä rakennukseen, mutta aiheuttaa samalla puun arvoketjun muissa osissa ja hakkuun jälkeen metsässä monin verroin suuremman hiilipäästön”.*
- Puun “varastoimisen” ilmastohyötyjä tulisi tarkastella realistisesti ja koko järjestelmän tasolla, ei yksittäisen rakennuksen näkökulmasta.

*Puurakentamisen lisäämisen vaikutukset kasvihuonekaasutaseisiin Suomessa vuoteen 2035 mennessä. Sampo Soimakallio, Tarja Häkkinen, Jyri Seppälä. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 45 | 2021. <https://helda.helsinki.fi/items/0a3dad04-c613-4fd6-9b1c-7a0120501f42>

Keskeiset johtopäätökset

- Hiilensidonta ei vielä ohjaa rakentamista.
- Suurimmat esteet eivät ole teknologiassa vaan:
 - kustannuksissa
 - tiedon ja yhteisten pelisääntöjen puutteessa
 - kilpailutusten hintakeskeisyydessä.
- Ilman tilaajavaatimuksia hiilensidonta jää:
 - vapaaehtoiseksi ja projektikohtaiseksi.
- Tarvittava muutos:
 - laskenta ja todentaminen yhdenmukaistetaan
 - kilpailutusten pisteytys tukee hiilensidontaa
 - sääntely ja taloudelliset kannustimet ohjaavat markkinaa.
- Hiilensidonta tulisi kytkeä:
 - rakennusten pitkäikäisyyteen
 - uudelleenkäyttöön ja kierrätettävyyteen
 - vähähiiliseen kokonaisratkaisuun.

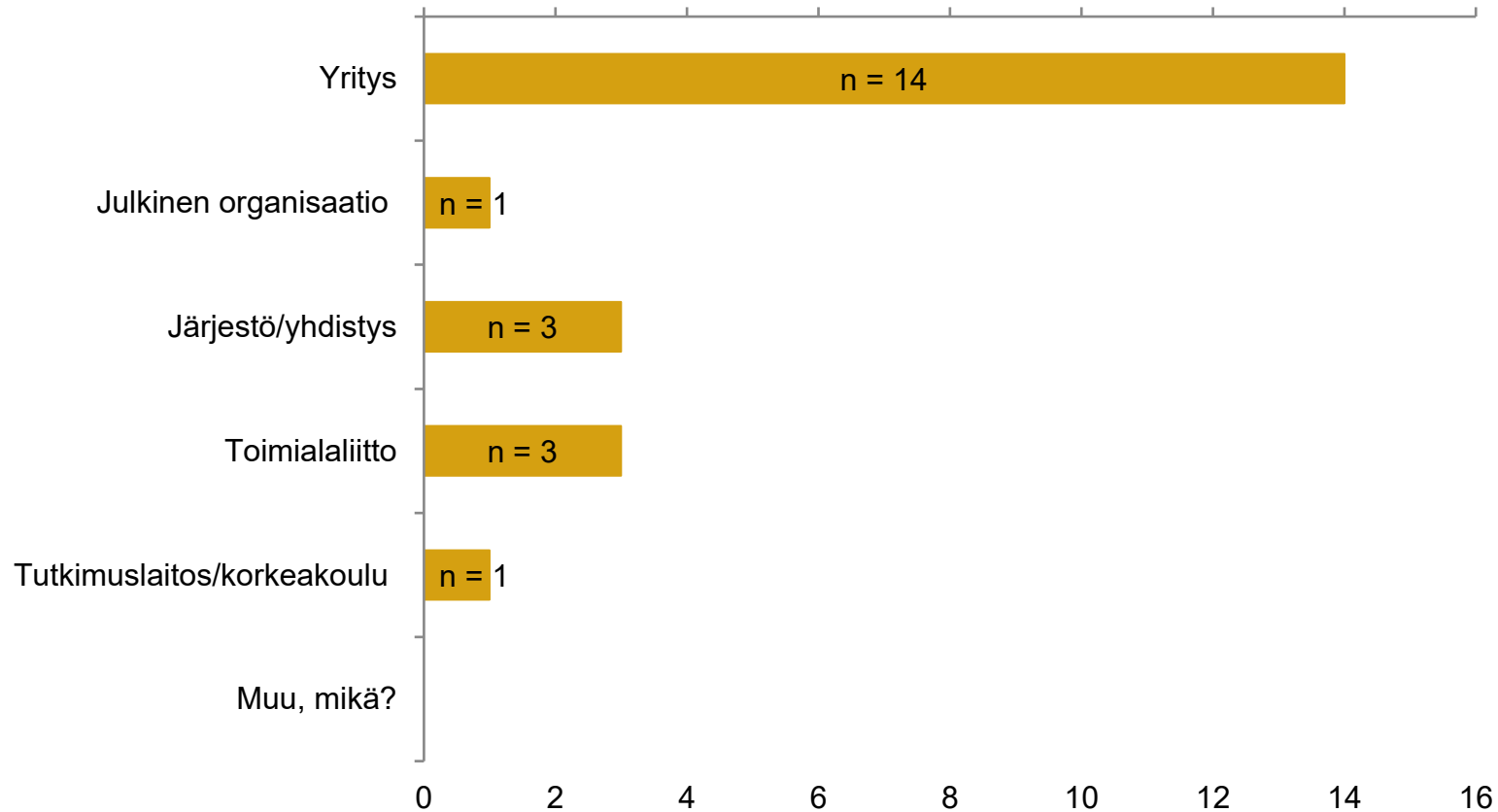
Vastaajien taustatiedot



Kyselyn vastaajat

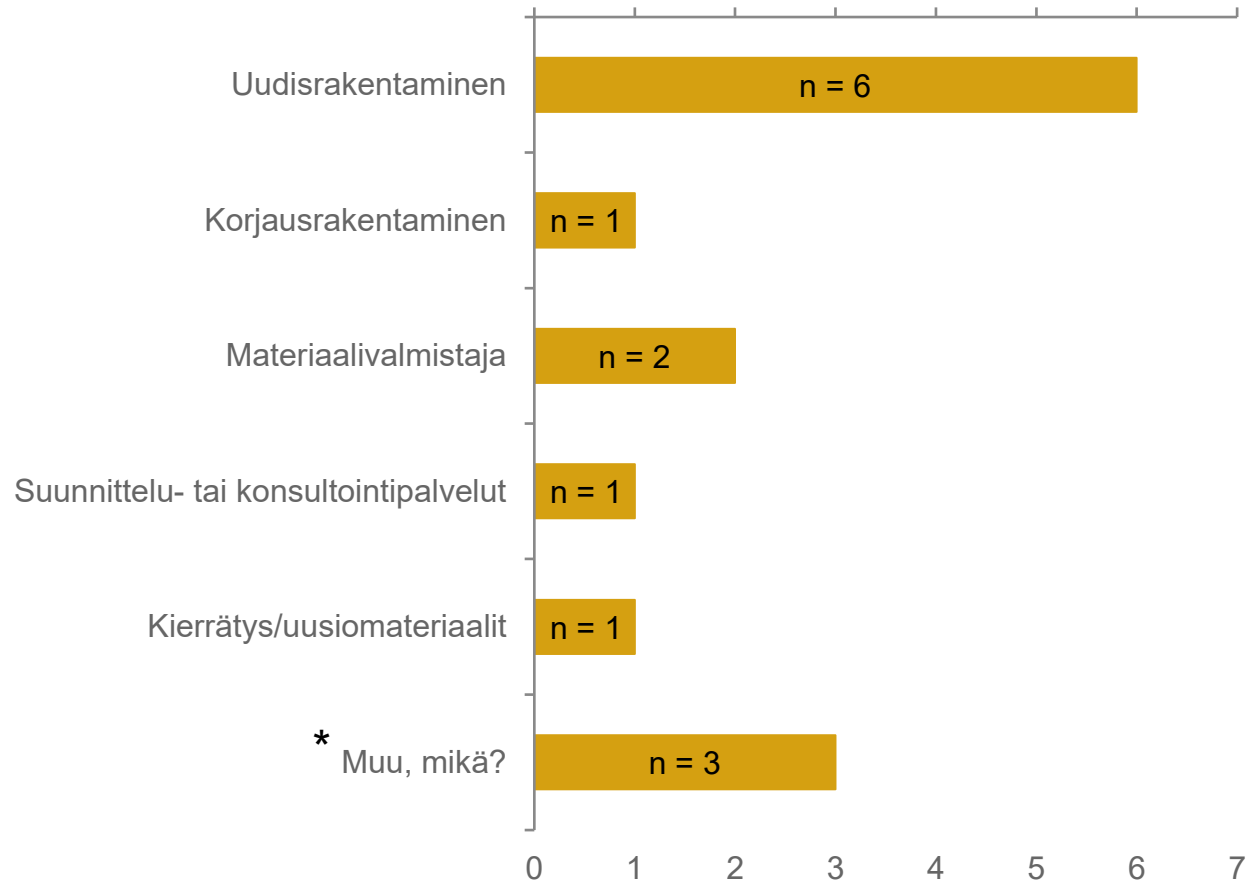
1/3

Vastaajan edustama organisaatio. Vastaajia 22.



Kyselyn vastaajat 2/3

Vastaajan edustaman organisaation toiminnan painopiste. Vastaajia 22.

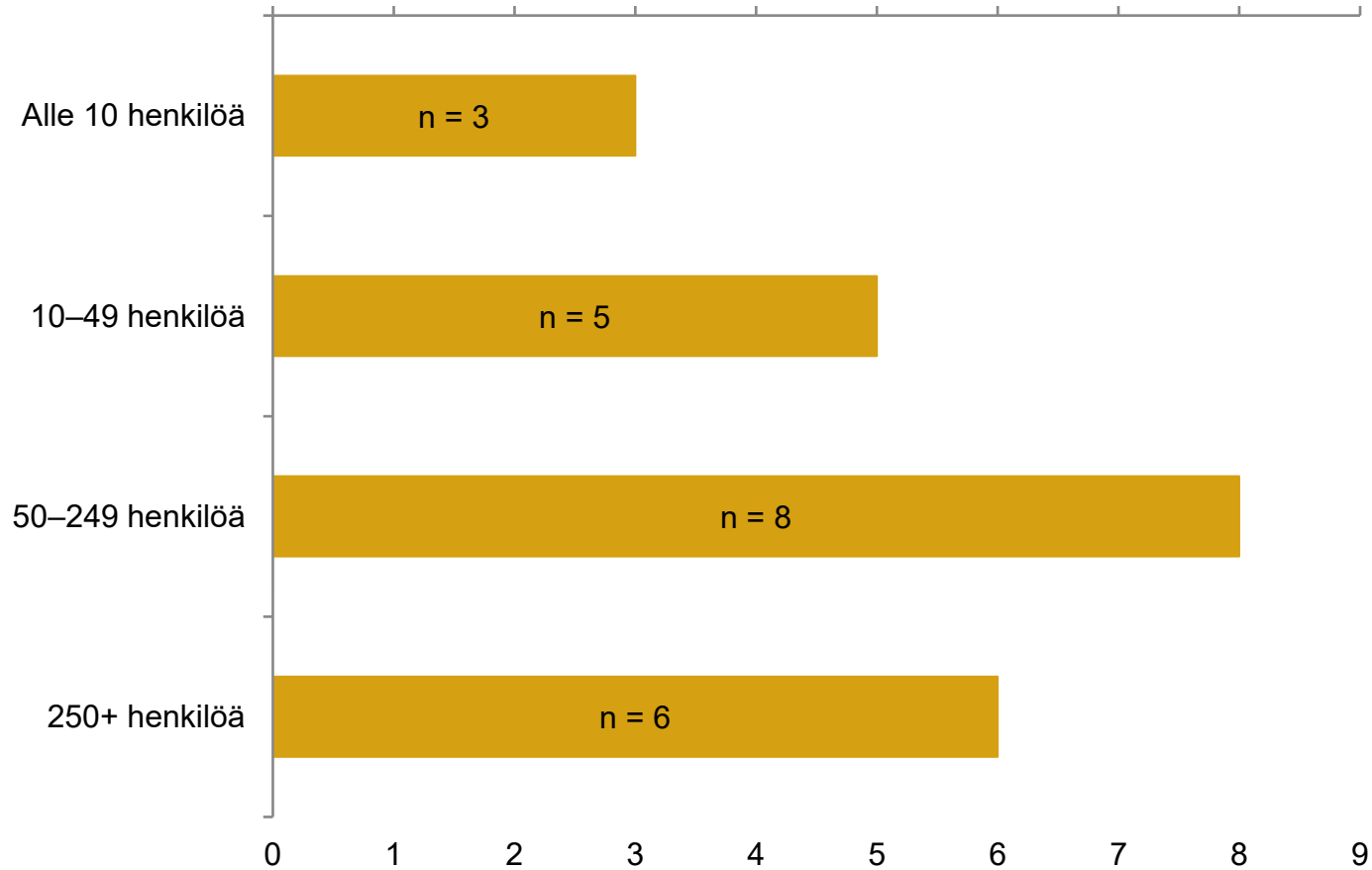


*

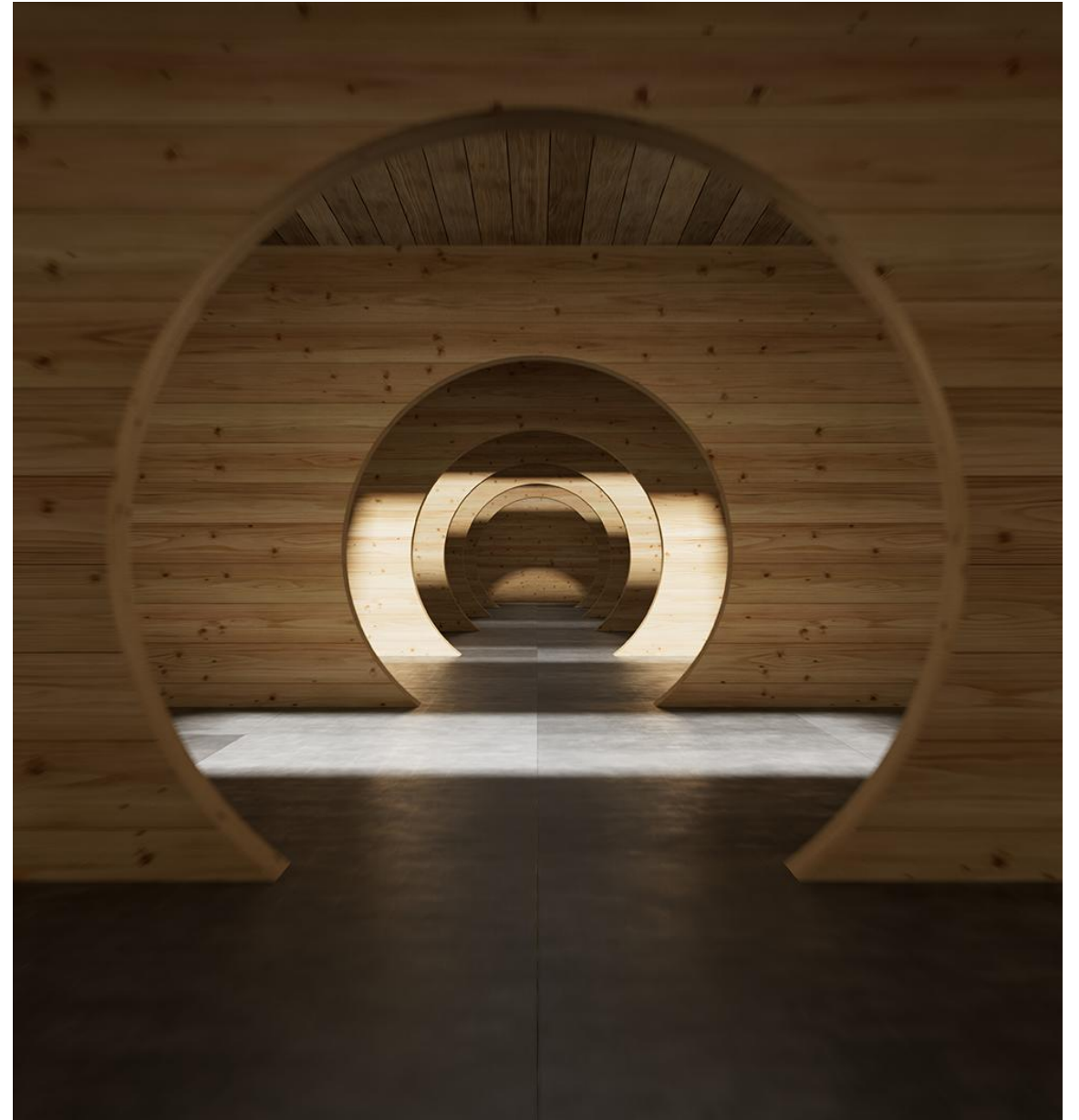
- Rakennustuotevalmistaja
- Teknologian toimittaja
- Uudis- ja korjausrakentaminen

Kyselyn vastaajat 3/3

Vastaajan edustaman organisaation koko. Vastaajia 22.

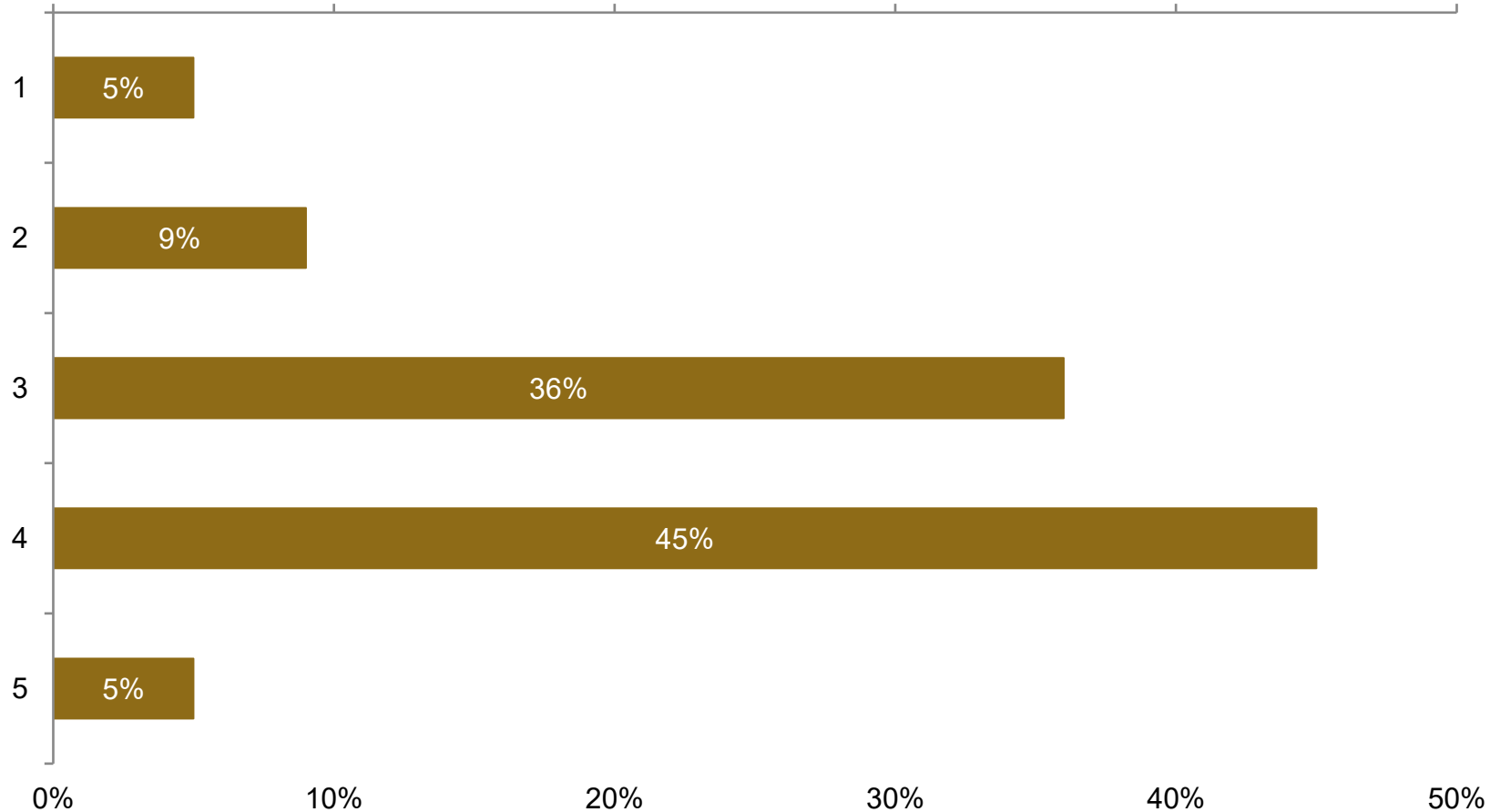


Organisaatioiden hiilensidontaan liittyvän toiminnan nykytilanne



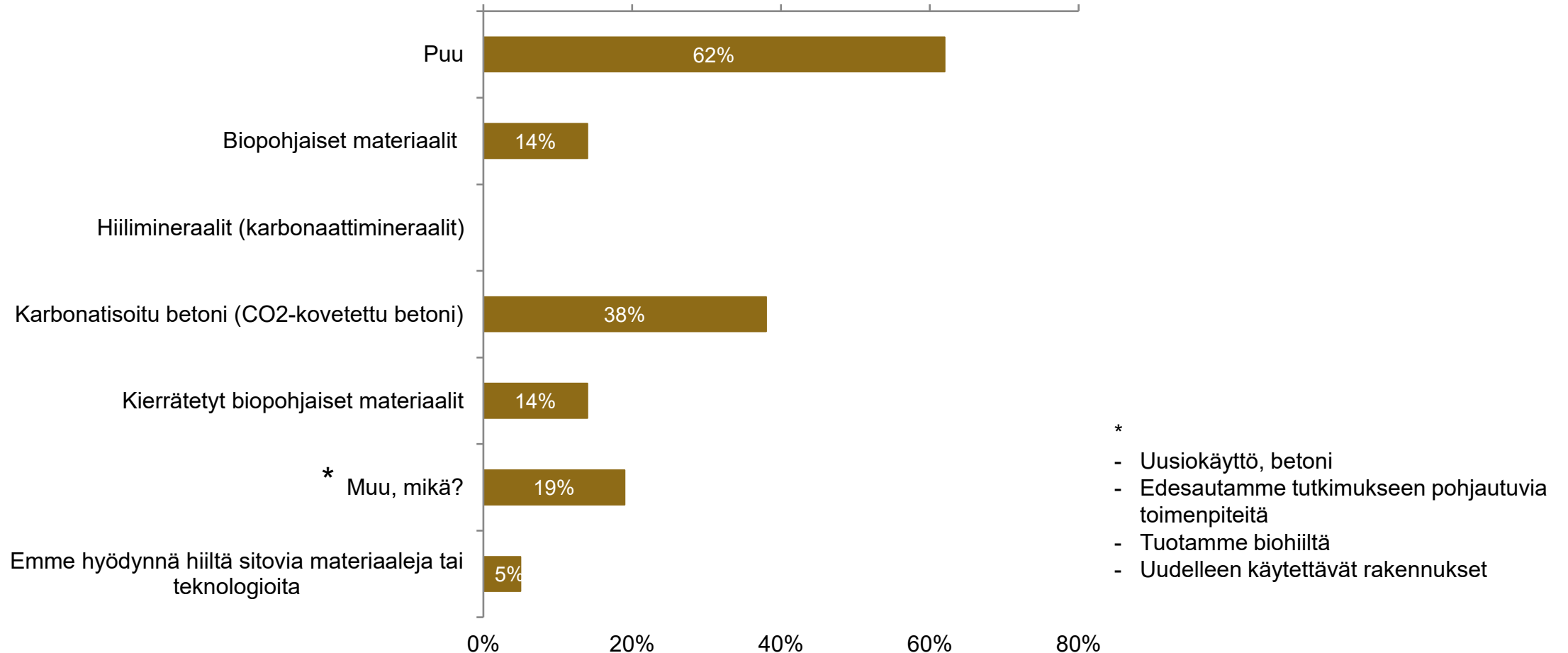
Vastaajien tietämys rakennusten hiilensidonnan nykytilanteesta

Arviointiasteikko 1-5, 1=ei lainkaan, 5=erittäin hyvin. Vastaajia 22.



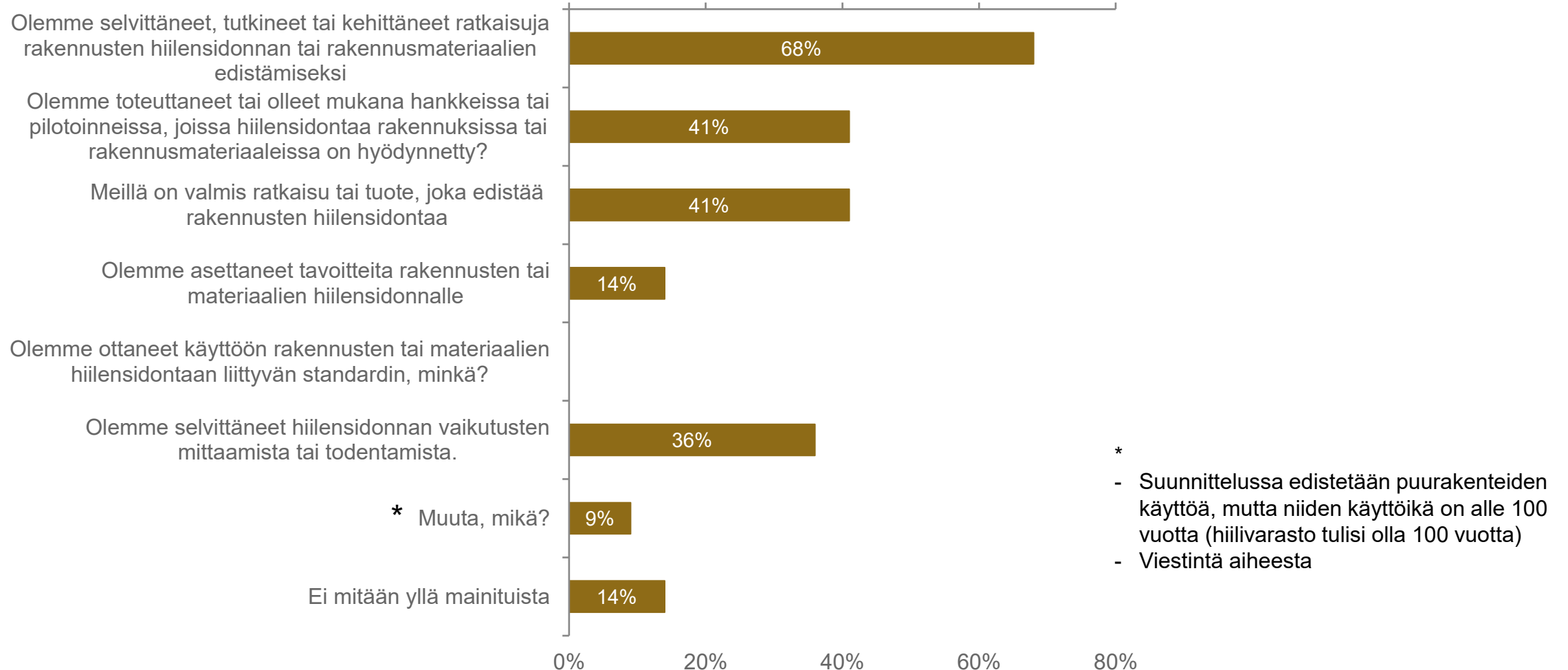
Käytössä olevat hiiltä sitovat materiaalit tai teknologiat

Vastaajan edustaman organisaation hyödyntämä hiiltä sitova materiaali tai teknologia. Vastaajia 22.



Organisaatioiden rakennusten hiilensidontaan liittyvä toiminta

Toiminnan nykytilanne. Vastaajia 22.



Tarkentavat tiedot toteutetuista hankkeista tai ratkaisuksista 1/2

Toiminnan nykytilanne. Vastaajia 22.

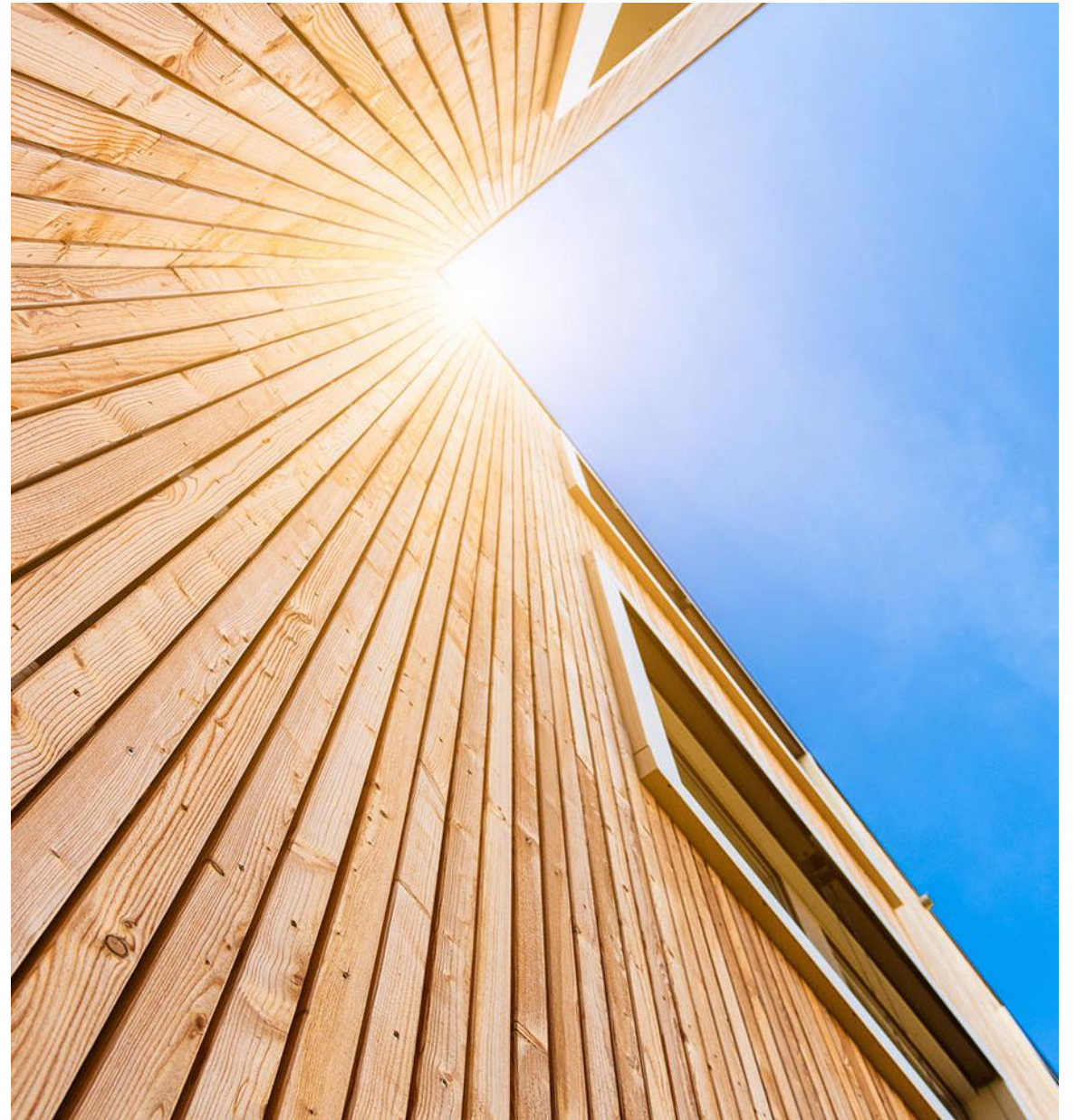
- Teema lisätty kumppanuussopimuksissa. Lisäksi toteutettu teeman jalkautusta omassa henkilökunnassa, lähinnä toimihenkilöille lisätty sisäistämistä ja oppimista.
- Betonin hiilensidontaa koskeva CO2ncrete Solution-hanke: <https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/betonin-hiilensidonta/>
- Olemme olleet mukana rahoittamassa useampia hiilensidontaan liittyvää tieteellistä tutkimusta sekä konsulttityötä.
- Olemme olleet useammassa projektissa, jossa puutuotteillamme saavutetaan matalampi hiilijalanjälki.
- Olemme olleet ja olemme nyt mukana useissa hankkeissa, joissa biohiilen käyttöä betonin tai asfaltin hiilijalanjäljen pienentämiseen tutkitaan. Norjassa toteutetussa hankkeessa edettiin betonituotteiden pilotointiin asti.

Tarkentavat tiedot toteutetuista hankkeista tai ratkaisuista 2/2

Toiminnan nykytilanne. Vastaajia 22.

- Meneillä on hanke CO2 kovettamasta betonista. Tavoite on vähentää sementin käyttöä ja sitä kautta CO2-päästöjä.
- Uudelleen käytettävässä rakennuksessa hiili on rakennukseen sitoutuneena pidemmän aikaa ja rakennus voi palvella usealla asennuspaikalla elinkaarensa aikana.
- EPD raportti tuotteestamme.
- Rakennamme pysyvän rakennusmääräyksen täyttäviä puukouluja ja -päiväkoteja, joita voi siirtää sinne missä lapsia vielä on. Miten tämä huomioidaan yhteiskunnallisessa keskustelussa ja hiilijalanjälkimittauksessa?
- Hiilensidonnin ongelma on aikajänteen määrittäminen. Esim. puun tapauksessa rakennuksen pitäisi olla pystyssä 100 vuotta, mutta sen todentaminen on mahdotonta. Jos sidonta tehdään johonkin oikeasti pysyvään rakenteeseen, on tilanne parempi.

Mahdollisuudet, esteet ja edistävät tekijät



Mahdollisuudet

1/2

Vastaajia pyydettiin nostamaan esille 1-3 tärkeintä mahdollisuutta. Vastaajia 15.

- Betoniin sidottu hiili. Puurakenteet.
- Hyvä lisä, muttei ratkaisu hiilipäästöjen pienentämiseen, joten emme keskity tähän.
- Tietoisuus asiasta ja sitä kautta eri materiaalien vertailua hankintaprosessin yhteydessä.
- Puretun betonin fiksulla jälkikäsitteilyllä betonimurskeeseen voidaan sitoa nopeasti merkittävä määrä hiilidioksidia.
- Paljon mahdollisuuksia, vaati toimialan, lainsäädännön, koodien etc. muutoksia. Miten saadaan Suomen teollisuus siirtymään betonista puuhun? Tai hybridiratkaisuihin?
- 1) Sementin tuotannon hiilidioksidin talteenotto ja hyödyntäminen jatkojalosteena sekä tähän liittyvän regulaation kehittäminen kannustavaksi. 2) Purkumateriaalien jatkojalostaminen, tässä etenkin purkupuun jatkojalostaminen uusiksi tuotteiksi (tällä hetkellä purkupuuta menee polttoon, jolloin hiili vapautuu suhteellisen lyhyen ajanjakson jälkeen ilmaan) 3) Teknologiset hiilinielut ja markkinaehtoisten kannustimien kehittäminen niiden käytön vauhdittamiseksi.
- Puutuotteilla saavutettaisiin merkittäviä päästöpienennyksiä.

Mahdollisuudet

2/2

Vastaajia pyydettiin nostamaan esille 1-3 tärkeintä mahdollisuutta. Vastaajia 15.

- 1. Biohiili on valmis, saatavilla oleva teollinen tuote, jonka kohtuullisen vähäisellä lisäyksellä voidaan vähentää tai nollata betonin hiilijalanjälki. Vaatii 1) reseptiikan luomisen 2) biohiilen laatukriteerien asettamisen (esim. haluttu partikkelikoko) 3) tarvittavan testauksen, jotta tuote hyväksytään rakennuskäyttöön ja 4) ohjeistuksen jonka avulla asiakkaat (betoniasemat) pystyvät toimimaan.
- Betonin käyttö hiilivarastona (ei irtoa sieltä kuten puusta poltettaessa). Kaavarajoitusten tarkastelua, että sallitaan korkeampien rakennusten tekeminen (3 kerroksen sijaan 4 tai 5).
- Uudelleen käytettävyyden korostaminen vaatimuksissa ja tavoitteissa.
- Puun käytön lisääminen rakentamisessa olisi erittäin tehokas toteuttamistapa
- Kannattaa käyttää mahdollisimman paljon uusiutuvaa materiaalia, ja kierrätyskelpoista materiaalia.
- Hiilensidonta haastaa kehittämään uusia rakennusmateriaaleja, jotka toteuttavat sitä.
- 1. Rakennusten kierrätettävyys ja uudelleenkäyttö 2. Betonin hiilensidonta 3. Biopohjaisten rakennusmateriaalien kehitys.
- Esim. puun tapauksessa hiili on jo sidottu metsään eli en oikein itse ymmärrä, miten puun kaataminen on ympäristöteko. CO₂:n pumppaaminen esim. betoniin toimii, mutta mittakaava on aivan liian pieni. Tärkeintä on siis toimia vähähiilisesti.

Suurimmat esteet hiilensidonnan hyödyntämiselle rakennuksissa

Kolme tärkeintä estettä. Vastaajia 21.



TOP 3

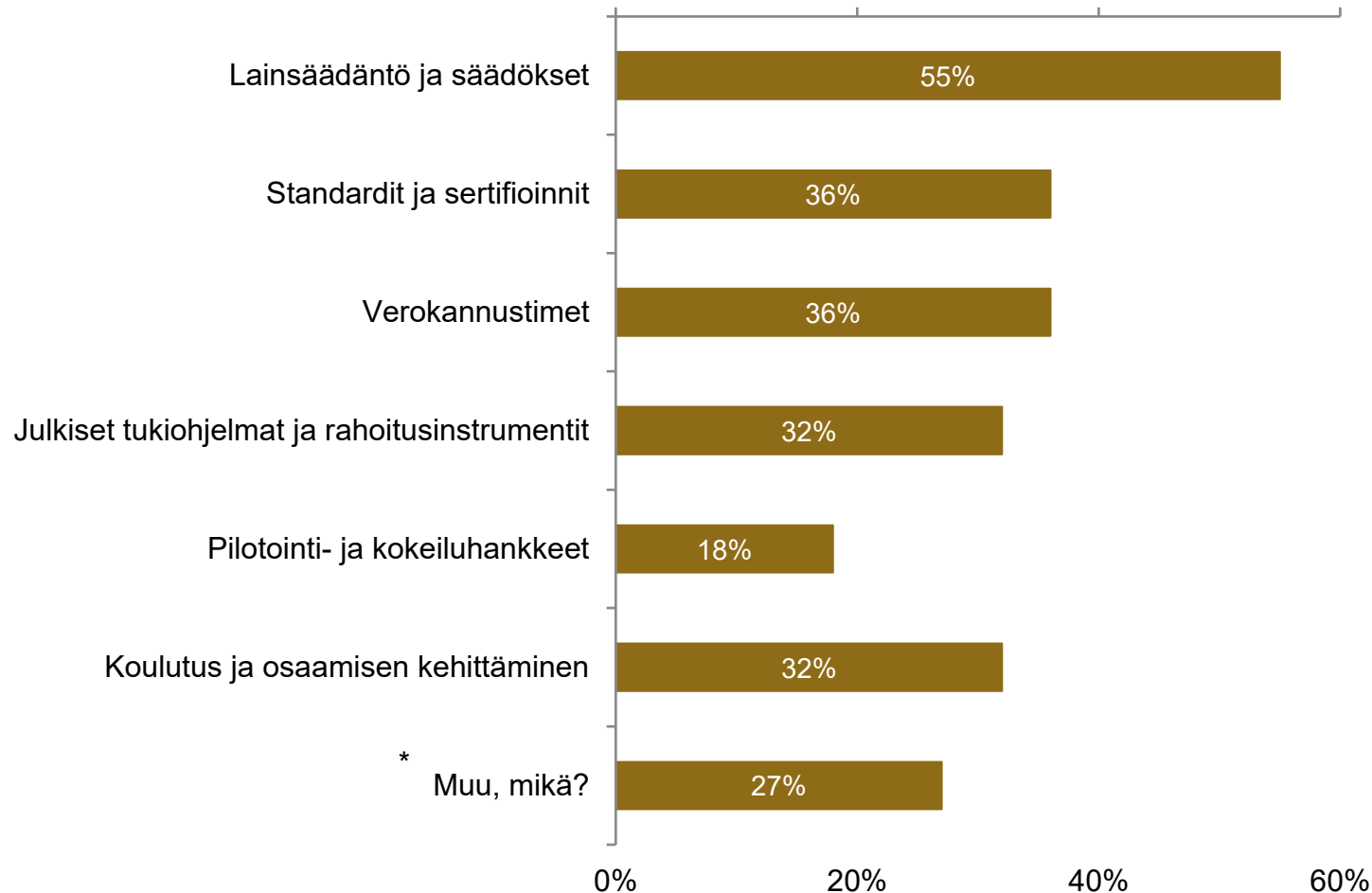
1. Kustannukset ja tiedon puute.
2. Tekniset ratkaisut ja soveltuvuus.
3. Lainsäädäntö.

*

- Markkinaehtoisten kannustimien puute.
- Haluttomuus.
- Testaus, reseptiikka, verifiointi.
- Kilpailutuksissa ei painoteta tätä. Hinta ratkaisee useasti.
- Rakennuksen laskennallinen käyttöikä vs. hiilivarastolle asetettu 100 v vaatimus.

Mitkä tekijät edistäisivät rakennusten hiilensidonnan toteuttamista

Kolme tärkeintä tekijää. Vastaajia 22.



TOP 3

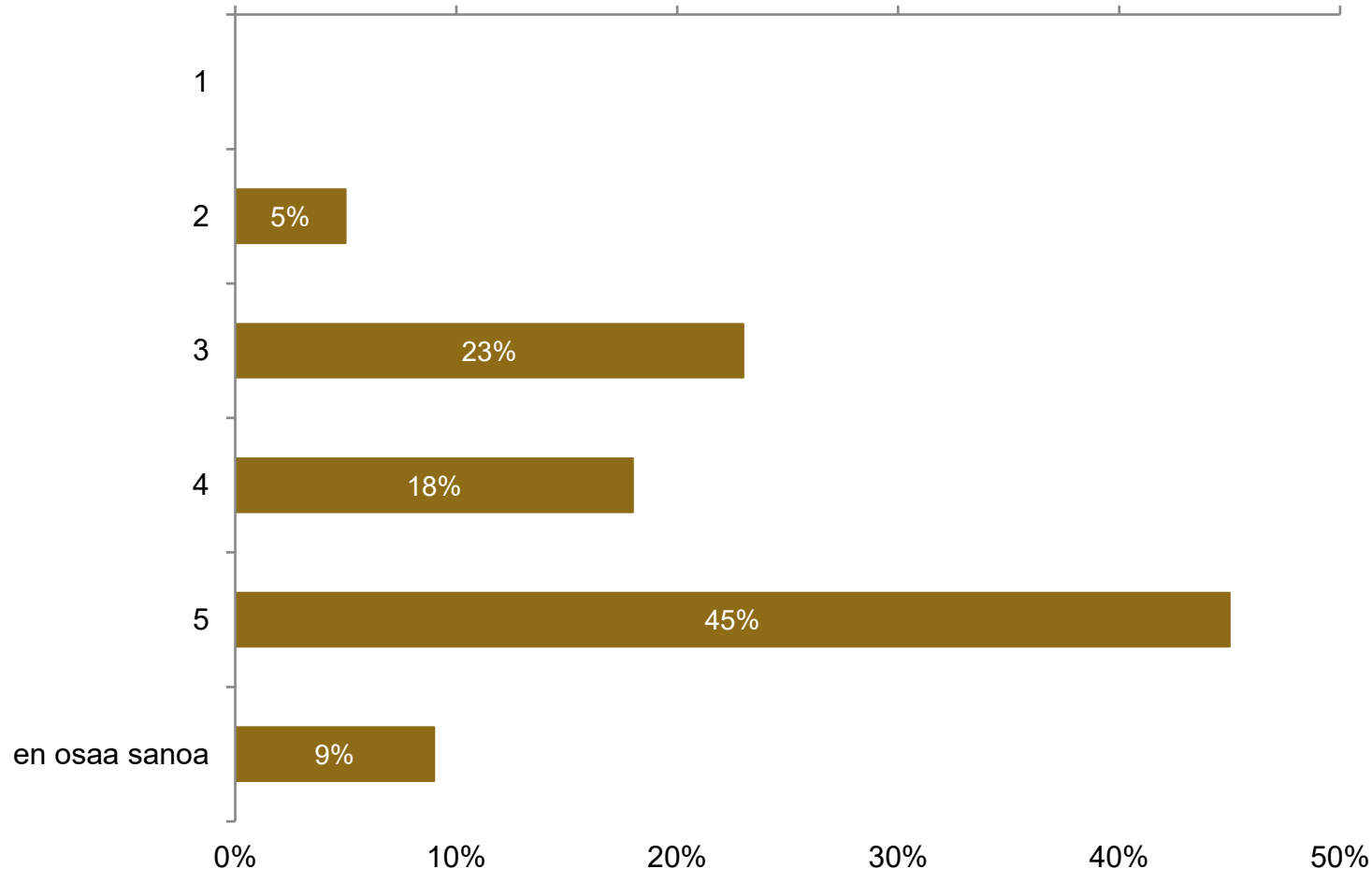
1. Lainsäädäntö ja säädökset.
2. Standardit, sertifiointit ja verokannustimet.
3. Julkiset tukiohjelmat, rahoitusinstrumentit sekä koulutus ja osaamisen kehittäminen.

*

- Asiakaskunnan halukkuus edistää hiilensidontaa.
- Ohjeita hankinnan kilpailuttamisen toteuttajille.
- Rakennustuotekehitys.
- Tilaajan toive ja maksuvalmius.

Arvio hiilensidonnan merkityksestä oman organisaation toiminnan kannalta 5 vuoden aikana

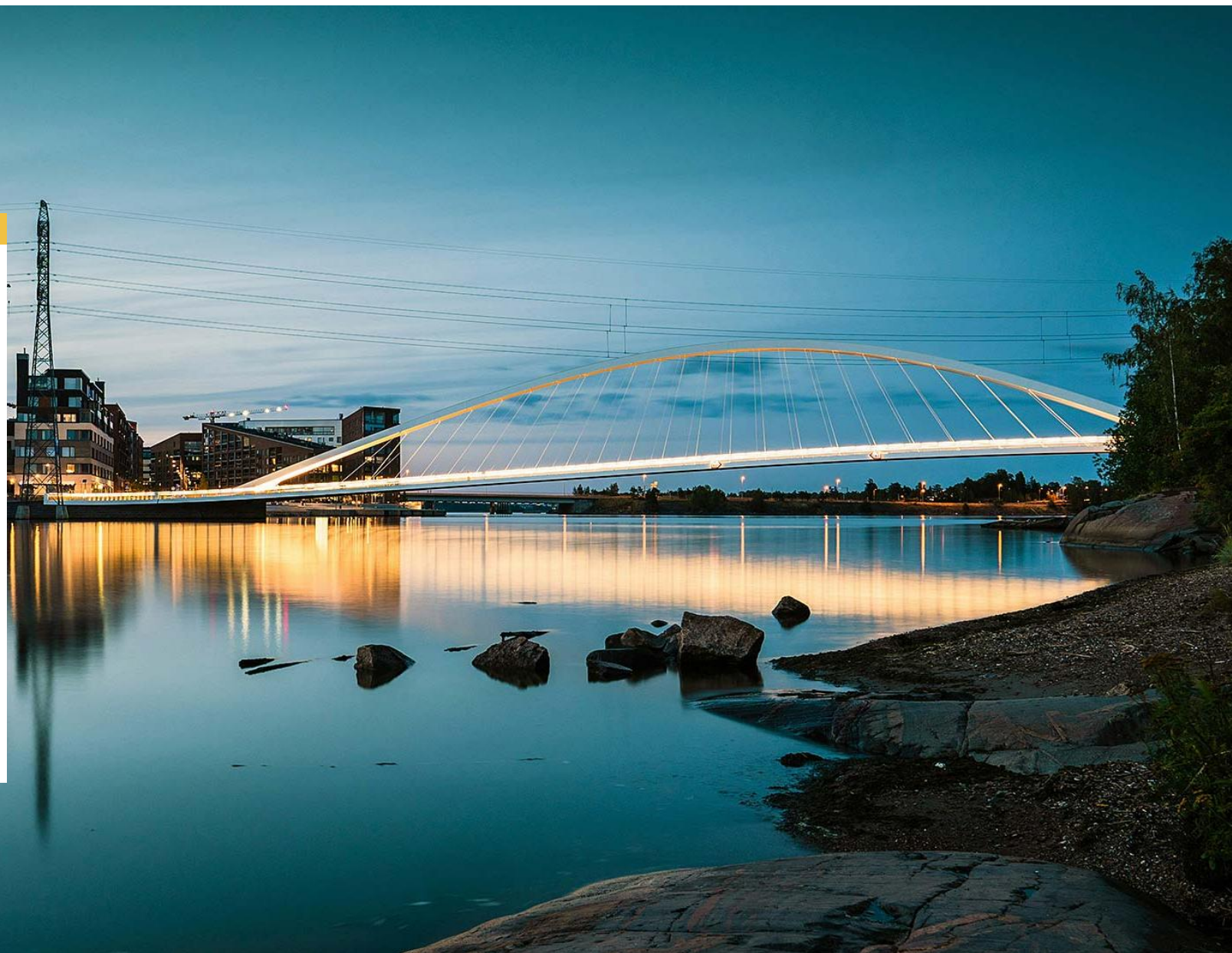
Arviointiasteikko 1-5, 1=ei lainkaan merkitystä, 5=erittäin tärkeä. Vastaajia 22.



MOTIVA

Lisätietoja:
elina.fast@motiva.fi

[motiva.fi](https://www.motiva.fi)   



Kooste rakennusten hiilensidontaan liittyvistä standardeista

Alla olevaan taulukkoon on koottu standardeja sekä viitekehyksiä, joiden on tunnistettu liittyvän rakennuksen hiilensidontaan. Standardeissa on mukana sekä olemassa että valmistella olevat. Taulukon tiedoissa kuvataan standardin nimi, lyhyt sisältö ja sen liityntä rakennusten hiilensidontaan.

Taulukko 1 Rakennusten hiilensidontaan liittyvät standardit.

Standardi	Lyhyt kuvaus	Liityntä rakennusten hiilensidontaan
ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework	Määrittelee elinkaariarvioinnin (LCA) peruseriaatteen ja vaiheet.	Tarjoaa metodisen perustan hiilensidontan ja hiilivarastojen arvioimiselle osana LCA:ta.
ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines	Antaa yksityiskohtaiset ohjeet LCA:n toteutukseen ja raportointiin.	Ohjaa biogeenisen hiilen, allokaation ja systeemirajojen käsittelyä hiilensidontaa arvioitaessa.
ISO 14067:2018 Greenhouse gases – Carbon footprint of products	Kuvaa tuotteiden hiilijalanjäljen laskennan periaatteet.	Soveltuu rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen ja sidotun hiilen laskentaan.
ISO 14064-2:2019 Greenhouse gases – Project level quantification, monitoring and reporting	Ohjeistaa päästövähennys- ja hiilensidontahankkeiden raportointia.	Käytetään hiilensidontapilottien ja - projektien todentamiseen ja sertifiointiin.
ISO 21930:2017 Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products	Kansainvälinen EPD-standardi rakennustuotteille.	Sisältää ohjeet biogeenisen hiilen ja hiilivarastojen ilmoittamiseen EPD:issä.
EN 15804:2012 + A2:2019 Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules	Määrittelee rakennustuotteiden EPD- laskennan säännöt.	Velvoittaa ilmoittamaan biogeenisen hiilen sitoutumisen ja vapautumisen eri elinkaarivaiheissa.
CEN/TR 15941:2022 EPD – Methodology for selection and use of generic data	Täydentävä ohje EPD-tietojen valintaan ja biogeenisen hiilen käsittelyyn.	Täsmentää, miten hiilivarastot ilmoitetaan rakennustuotteen ja rakennuksen tasolla.
EN 15978:2011 / EN 15978- 1:2024 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method	Rakennusten elinkaaren ympäristövaikutusten laskentastandardi.	Uudistettu versio sisältää hiilivarastojen ja dynaamisen hiilen sidonnan huomioinnin.

Hiilensidonta rakennuksiin nykytilaselvitys
LIITE 2

Level(s) European framework for sustainable buildings	EU:n vapaaehtoinen viitekehys rakennusten kestävyden mittaamiseen.	Sisältää mittarin 1.2 'Life-cycle Global Warming Potential', jossa hiilivarastot voidaan ilmoittaa erikseen.
YM:n ohje Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä 2025 (luonnos)	Ohje (2026–2027) rakennuksen hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen arvioimiseksi.	Ohjeistaa huomioimaan rakennustuotteiden biogeenisen hiilen EN 15804 -mukaisten EPD-arvojen perusteella.
CEN/TC 350 WG6 (valmisteilla) – Guideline on carbon storage and timing in construction products and buildings	Kehitteillä oleva eurooppalainen ohjeistus hiilen varastoinnin ja ajallisen ulottuvuuden huomioimiseksi.	Tavoitteena yhtenäistää hiilen sidonnan ja varastoinnin ("temporal storage" laskenta rakennusalalla.

Hiilensidonta rakennuksen teknisillä järjestelmillä

Asiantuntijaselvitys



Asiantuntijaselvitys

SISÄLLYSLUETTELO

1	Yleistä	2
1.1	Tilaaja ja vastuuhenkilöt	2
1.2	Tausta ja tavoitteet	2
1.3	Laajuus ja rajaukset.....	2
2	BICC (Building Integrated Carbon Capture) -teknologioiden ajurit ja merkitys	3
3	Rakennuskohtaisten hiilenpoistoratkaisujen tarkastelu teknologioittain	4
3.1	IV-järjestelmiin integroitu Direct Air Capture (HVAC DAC).....	4
3.2	Rakennusten yhteyteen sijoitetut erilliset DAC-laitteet (stand-alone DAC).....	6
3.3	Bioaktiiviset järjestelmät rakennuksissa.....	8
3.4	Passiiviset hiilidioksidin sieppausratkaisut teknisissä järjestelmissä.....	9
4	Teknologioiden vertailu.....	10
4.1	TARKASTELTUJEN RATKAISUJEN VERTAILU	10
4.2	MAHDOLLISUUDET.....	11
4.3	Haasteet ja kehitystarpeet.....	12
5	Talteenotetun hiilidioksidin jatkokäyttö ja varastointi	13
6	Ratkaisujen ilmastovaikutusten kvantifiointi (MRV ja LCA)	14
7	Toimenpidesuosituksat rakennusten hiilensidontan ja -varastoinnin tehostamiseksi	15
8	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	15
9	Lähteet	17

1 Yleistä

1.1 TILAAJA JA VASTUUHENKILÖT

Tilaja	Motiva Oy
Yhteyshenkilö	Kirsi-Maaria Forssell
Raportin päiväys	10.4.2026
Tekijät	Elina Ruoho, Granlund Oy Kerli Maiste, Granlund Oy

1.2 TAUSTA JA TAVOITTEET

Työn tavoitteena on koota tiedot rakennusten taloteknisillä tai talokohtaisilla järjestelmillä tehtävästä tai -järjestelmiin liittyvästä hiilenpoistosta EU:n alueella. Selvityksen tavoitteena on kartoittaa olemassa oleva tieto: mitä tietoa on jo saatavilla ja kuinka laajasti. Koontiselvityksen tavoitteena on luoda selkeä tilannekuvan teemaa koskevista aiemmista tutkimuksista, kokeiluista ja pilottihankkeista. Selvityksen tavoitteena on myös parhaiden käytäntöjen ja lupaavimpien teknologioiden sekä toisaalta toteutuksen esteiden ja katvealueiden tunnistaminen. Toimenpidesuosituksen pohjalta Motiva laatii toimenpidesuosituksia, joita voidaan hyödyntää osana kansallista rakennusten perusparannussuunnitelmaa.

Selvityksessä vastataan seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä olemassa olevia teknologioita tai teknisiä ratkaisuja on hiilen sitomiseen tai rakennuksen hiilensidontan tukemiseen?
- Mitä mahdollisuuksia, esteitä tai kehitystarpeita liittyy rakennuksen hiilensidontaan rakennuksen teknisten järjestelmien tai laitteiden avulla?
- Millaisia toimenpidesuosituksia on olemassa rakennusten teknisten järjestelmien tai laitteiden avulla tapahtuvaan hiilensidontaan tai -varastointiin?

1.3 LAAJUUS JA RAJAUKSET

Selvitys kattaa sekä uudisrakennukset että olemassa olevan rakennuskannan. Tarkastelu koskee rakennuksen sisäisiä taloteknisiä järjestelmiä sekä rakennukseen liitettäviä järjestelmiä ja niiden hiilen talteenottoratkaisuja. Rakennusmateriaalien rooliin hiilen varastoinnissa ja muihin varastointiteknologioihin ei perehdytä. Tämä selvitys on luonteeltaan kevyt markkinakartoitus, ei kattava markkina-analyysi. Tarkastelu kohdistuu Euroopan alueelle. Selvityksen painopiste on olemassa olevan tiedon kokoamisessa, jäsentämisessä ja analysoinnissa.

Työssä on hyödynnetty tekoälyä lähdemateriaalien keräämisessä ja suuren tietomäärän jäsentämisessä.

2 BICC (Building Integrated Carbon Capture) -teknologioiden ajurit ja merkitys

Hiilenpoiston rooli globaalissa ilmastopolitiikassa

Hiilenpoisto ja päästövähennykset nähdään usein keskenään kilpailevina tai vastakkaisina keinoina. Tarpeeksi nopeat päästövähennykset ovatkin ensisijainen ja välttämätön keino ilmastomuutoksen torjuntaan. IPCC:n kuudes arviointiraportti kuitenkin esittää, että hiilidioksidin aktiivisella poistamisella ilmakehästä ja hiilen pitkäikäisellä varastoinnilla on päästövähennysten rinnalla tärkeä täydentävä rooli ilmaston lämpenemisen rajoittamisessa kaikissa 1.5 °C ja 2 °C skenaarioissa (IPCC, 2023, SPM). Kaikkia päästöjä ei voida poistaa kokonaan, joten hiilenpoistoa tarvitaan sekä vaikeasti vähennettävien jäännöspäästöjen neutralointiin nettonollan tavoittelussa että ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden laskemiseen pitkällä aikavälillä (IPCC, 2023, SPM). Samalla IPCC korostaa myös, että hiilenpoistomenetelmien kapasiteetti, kustannukset ja riskit vaihtelevat suuresti, ja liiallinen luottaminen poistoteknologioihin voi viivästyttää kriittisiä päästövähennyksiä (IPCC, 2023, SPM C.3).

Kansainvälisen energijärjestö IEA:n (International Energy Agency) mukaan rakennusten käytönaikainen energiankulutus on noin 30 % maailman loppuenergiankulutuksesta ja rakennusten käytön energiaperäiset päästöt noin 26 % maailman energiaperäisistä päästöistä (IEA, 2022a). Lisäksi rakennettu ympäristö kuluttaa globaalisti noin 40 % kaikista luonnonvaroista (WorldGBC, 2021). Rakennetun ympäristön kasvu sekä korjausrakentamisen jatkuva tarve avaavat mahdollisuuksia hiilenpoistoteknologioiden käyttöönotolle rakennuskannassa. Rakennetun ympäristön merkitys sekä ilmastomuutoksen hillinnässä että siihen sopeutumisessa on olennainen, ja ilmastotoimien kohdentaminen sektorille siksi perusteltua.

Rakennetun ympäristön rooli hiilenpoistossa

Koska hiilenpoistoa tarvitaan täydentämään päästövähennyksiä, on tärkeää tarkastella sektoreita, joissa sen käyttöönotolle voisi olla mahdollisuuksia: rakennettu ympäristö on yksi näistä sektoreista. Rakennuskohtainen hiilenpoisto (Building Integrated Carbon Capture and Storage, BICC) tuo hiilidioksidin talteenottoon, hyötykäyttöön ja varastointiin (CCUS, Carbon Capture, Utilisation and Storage, CCUS) uuden lähestymiskulman. Toistaiseksi hiilenpoistoratkaisut ovat kohdistuneet pääasiassa suuriin pistemäisiin päästölähteisiin: näissä mittakaava mahdollistaa kustannustehokkuuden, mutta edellyttää samalla toimivaa kuljetus- ja varastointi-infrastruktuuria (IEA, 2023a). Rakennuksissa on valmiiksi taloteknisiä järjestelmiä, joihin hiilenpoistoratkaisuja voidaan integroida. Esimerkiksi ilmanvaihtoon liitettävät ratkaisut voivat samanaikaisesti parantaa sisäilman laatua ja hyödyntää matalalämpöisiä energialähteitä (Elaouzy & Zaabout, 2025.). Rakennuskohtainen toteutustapa voi mahdollistaa ratkaisujen asteittaisen käyttöönoton osana uudis- ja korjausrakentamista. Skaalautuessaan rakennuskohtaiset ratkaisut voisivat luoda hajautettua hiilen talteenottopotentiaalia erityisesti kaupunkiympäristössä.

Potentiaalisia ajureita rakennuskohtaisten hiilenpoistoratkaisujen käyttöönotolle voisivat tarjota muun muassa yritysten lisääntyvät nettonollatavoitteet sekä rakennusten hiilijalanjälkeen kohdistuva ohjaus tai sääntely esimerkiksi Suomessa ja muissa Pohjoismassa. Tämä vaatisi kuitenkin yleisen ilmastotoimien kunnianhimon ja tavoitetason nousua sekä menetelmällistä kehitystä sen suhteen, miten CCUS-teknologioiden vaikuttavuutta mitataan ja miten ne huomioidaan GHG- ja elinkaarilaskennassa.

BICC-teknologioita koskeva tutkimus

Teemaan liittyvä tutkimus on vielä hajanaista ja varhaista, vaikka kiinnostus on lisääntynyt viime vuosina. CCUS-teknologioita (Carbon Capture, Use and Storage) on tutkittu laajasti jo 15–20 vuoden ajan, mutta tutkimuksen painopiste on ollut pääasiassa teollisuus- ja energiasektorin suurissa ratkaisuisa. Rakennuksiin integroitavan CCUS:n osalta tutkimus on selvästi vähäisempää ja tuoreempaa. Rakennuskohtaisiin CCUS-teknologioihin liittyviä taloudellisia, teknisiä tai turvallisuuskysymyksiä ei myöskään ole tutkimuksessa juurikaan käsitelty (Elaouzy & Zaabout, 2025.). Tätä selvitystä varten teknologioiden kokonaiskuva koostettiin useista tapaustutkimuksista ja yksittäisiä teknologioita käsittelevistä artikkeleista sekä yhdestä koontijulkaisusta (Elaouzy & Zaabout, 2025).

3 Rakennuskohtaisten hiilenpoistoratkaisujen tarkastelu teknologioittain

Selvitykseen sisällytetyt teknologiat

Kokonaisuudessaan rakennuskohtaiset hiilentalteenottoratkaisut ovat vielä pitkälti kehitysvaiheessa. Tässä selvityksessä HVAC-järjestelmiin integroitava aktiivinen hiilidioksidin suoratalteenotto (HVAC-integrated DAC / HVAC DAC) nousi esiin yhtenä potentiaalisena ratkaisuna. Mukaan tarkasteluun otettiin myös perinteinen, pienen mittakaavan DAC-teknologia, jossa hiilidioksidia otetaan talteen ulkoilmasta (stand-alone DAC). Perusteena tälle oli se, että vaikka stand-alone-ratkaisuja ei integroida suoraan rakennuksiin, pienikokoisia yksiköitä voidaan teoriassa sijoittaa esimerkiksi rakennusten katoille tai piha-alueille.

Selvityksessä tarkastellaan lisäksi bioaktiivisten ratkaisujen sekä passiiviseen hiilidioksidin talteenottoon perustuvien teknologioiden potentiaalia muutamien tapaustutkimusten pohjalta. Näiden ratkaisujen kehitys on kuitenkin pääosin tutkimus- ja pilotointivaiheessa, minkä vuoksi niiden potentiaalia voidaan arvioida vain rajallisesti.

Viherseinät ja -rakenteet sekä viherrakentaminen jätettiin tarkastelun ulkopuolelle, sillä niiden tuottama hiilensidonta ja -varastointi on lyhytaikaista. Myös rakennusmateriaalien kautta tapahtuva hiilensidonta rajattiin pois, vaikka sitä käsitellään lyhyesti yhtenä vaihtoehtona muilla menetelmillä talteen otetun hiilidioksidin varastoinnissa.

3.1 IV-JÄRJESTELMIIN INTEGROITU DIRECT AIR CAPTURE (HVAC DAC)

Teknologian yleiskuvaus: HVAC DAC

IV-järjestelmiin integroitavat Direct Air Capture -ratkaisut (HVAC DAC) perustuvat hiilidioksidin poistamiseen rakennuksen sisäilmasta tai ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirroista sorbenttien avulla. HVAC DAC -ratkaisuisa voidaan hyödyntää olemassa olevaa ilmanvaihtoinfrastruktuuria. Tällöin käsiteltävät ilmamäärät ovat pienempiä kuin ulkoilmaan perustuvassa talteenotossa, mikä voi parantaa prosessin energiatehokkuutta. Sisäilman hiilidioksidipitoisuus on ulkoilmaa korkeampi, mikä parantaa talteenoton tehokkuutta tilavuusyksikköä kohden. (Elaouzy & Zaabout, 2025.)

Hiilidioksidin poistaminen sisäilmasta mahdollistaa ilmanvaihdon osittaisen kierrättämisen ja vähentää ulkoilman tarvetta ilmanvaihdossa, mikä voi pienentää ilmanvaihdon energiakuormaa (Harrouz et al., 2022). Harrouz et al. (2022) osoittavat, että erityisesti MOF-pohjaiset adsorptioratkaisut voivat vähentää ulkoilman tarvetta ja ilmanvaihdon kuormitusta. Metalliorgaanisista kehyksistä (metal-organic frameworks, MOF) ovat metallisoluista ja orgaanisista linkkereistä muodostuvia huokoisia kiderakenteita, joita pidetään lupaavina adsorbentteina niiden erittäin suuren ominaispinta-alan sekä muokattavien huokosrakenteiden ansiosta (Kumari et al., 2025). Eräässä Libanonin kuumiin ja kosteisiin ilmasto-olosuhteisiin perustuvassa simuloitussa tapauksessa ulkoilman vaatimusta voitiin pienentää jopa noin 72,6 % ja ilmanvaihdon kuormitusta noin 36 % huippukuormakuukautena (Harrouz et al. 2022).

Tutkimusyhteisössä HVAC DAC- ratkaisujen käytännön sovellettavuutta on alettu arvioida myös tapaustutkimuksin. Milic et al. (2024) ovat tarkastelleet DAC-yksikön integroimista kuntosalin ilmanvaihtoon. Kyseisessä tapaustutkimuksessa noin 600 m²:n tilassa hiilidioksidin talteenottopotentiaali oli 54–83 kg/vrk. Laajemmassa, useampaa kuntosalia koskevassa kokonaisuudessa (24 760 m²) vuosittainen talteenotto oli 588–750 tCO₂. Milic et al. 2024 korostavat erityisesti sorbentin regeneroinnin ajoittamista rakennuksen käyttöajan ulkopuolelle sekä matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntämistä energiatehokkuuden parantamiseksi. Parhaassa skenaariossa hiilidioksidin poistokustannukseksi arvioitiin noin 663 SEK/tonni. (Milic et al., 2024.)

HVAC DAC -järjestelmien energiankulutus koostuu DAC-tekniikan tavoin sekä sähkö- että lämpöenergiasta. DAC-tekniikoiden energiankulutuksen vaihteluväli tekniikasta ja rajoituksista riippuen on IPCC:n mukaan 1–11 kWh/kgCO₂ (IPCC 2022, Chapter 12, Table 12.3). HVAC DAC -järjestelmien erityispiirre on niiden kytkeytyminen rakennuksen muihin energijärjestelmiin. Kiinteisiin sorbentteihin perustuvissa DAC-ratkaisuissa sorbentin regenerointi edellyttää tyypillisesti noin 80–120 °C prosessilämpötilaa (McQueen et al., 2021), ja regenerointivaihe edellyttää lämpöenergiaa (Elaouzy & Zaabout, 2025). HVAC DAC -järjestelmät voidaan yhdistää rakennuksen muihin energijärjestelmiin siten, että matalalämpöisiä lämmönlähteitä, kuten hukkalämpöä, voidaan hyödyntää DAC-prosessin energiantarpeen kattamisessa (Elaouzy & Zaabout, 2025; Milić et al., 2024). Lisäksi prosessissa syntyvää matalalämpöistä hukkalämpöä voidaan hyödyntää rakennuksen matalalämpöisissä lämmitysjärjestelmissä, kuten lattialämmityksessä tai pattereissa (Soletair Power & Søren Jensen Engineering, 2024). HVAC DAC -ratkaisut voivat myös vähentää ulkoilman tarvetta ja siten pienentää ilmanvaihdon energiankulutusta (Elaouzy & Zaabout, 2025). Tämän seurauksena järjestelmän nettovaikutus rakennuksen energiankulutukseen voi joissain tapauksissa olla selvästi pienempi kuin pelkkä hiilidioksidin talteenotto-prosessin energiantarve antaisi ymmärtää. Energiankulutus ja energiatase ovat vahvasti kohdekohtaisia ja riippuvat useista tekijöistä, kuten käytettävissä olevan lämmön lähteestä ja lämpötilatasosta, ilmanvaihtojärjestelmän toteutuksesta, ilmavirroista sekä järjestelmän käyttöprofiilista.

DAC-tekniikoiden peruseriaatteet ovat hyvin tunnettuja. Rakennuksiin integroitaviin HVAC DAC -ratkaisuihin liittyy kuitenkin pitkälti samoja haasteita kuin Direct Air Capture -tekniikoihin yleensä. Keskeisiä kehityskohteita ovat järjestelmien korkea energiankulutus sekä hiilidioksidin talteenoton korkeat kustannukset, jotka heikentävät tekniikan nykyistä kaupallista toteutettavuutta. Viimeaikainen tutkimus viittaa kuitenkin siihen, että energiatehokkuudessa ja kustannustasossa on tapahtumassa suotuisaa kehitystä. Tästä huolimatta HVAC DAC -järjestelmien laajempi käyttöön otto edellyttää edelleen parannuksia erityisesti energiatehokkuudessa sekä toiminnallisessa joustavuudessa, kuten kyvyssä mukautua muuttuviin käyttö- ja ilmanlaatuvaatimuksiin (Elaouzy & Zaabout, 2025).

Case-esimerkit: HVAC DAC

Kaupallisten ratkaisujen tasolla HVAC DAC-tekniikan kehitys on vielä varhaisessa vaiheessa, mutta yksittäisiä pilotoiteja ja ensimmäisiä kaupallisia toteutuksia on jo käynnissä. Suomalainen start-up-yritys Soletair Power

oli selvityksessä ainoa tunnistettu eurooppalainen kaupallinen toimija, joka myy HVAC DAC-teknoologiaan pohjautuvia ratkaisuja.

Soletair Powerin järjestelmä on suunniteltu kompaktiksi ja modulaariseksi, ja se voidaan asentaa joko kokonaisratkaisuna tai rakennuksen olemassa olevaan ilmanvaihtoon. Standardikokoinen yksikkö, joka käsittelee 3,3 m³/s ilmavirtaa, tuottaa noin 50 kgCO₂ päivässä eli noin 20 t CO₂ vuodessa. (Soletair Power, 2022.). Soletair Powerin HVAC DAC-teknoologia voidaan integroida rakennusten ilmanvaihtojärjestelmiin kolmella pääasiallisella tavalla: kiertoilman, tuloilman ja poistoilman kautta. Kiertoilmaan perustuvassa ratkaisussa hiilidioksidi poistetaan IV-koneen kierrättämästä sisäilmasta, jolloin tiloihin voidaan palauttaa CO₂-köyhempää ilmaa ja samalla pienentää ilmanvaihdon energiankulutusta. Haittapuolena on, että talteenotettavan hiilidioksidin määrä voi jäädä rajalliseksi erityisesti alhaisilla ilmavirroilla. Tuloilman CO₂-talteenotossa hiilidioksidi poistetaan ulkoa tulevasta korvausilmasta ennen sen syöttämistä sisätiloihin, mikä parantaa sisäilman laatua ja vähentää ilmanvaihdon energiantarvetta. Tämä ratkaisu on kuitenkin riippuvainen ulkoilman hiilidioksidipitoisuudesta. Hiilidioksidi voidaan myös ottaa talteen rakennuksen poistoilmasta. Tämä tapa sopii erityisesti kohteisiin, joissa on useita pieniä ilmanvaihtokanavia, ja sen etuna on joustava asennus. Se ei kuitenkaan paranna sisäilmaolosuhteita eikä vähennä ilmanvaihdon energiankulutusta. (Soletair Power & Søren Jensen Engineering, 2024.)

HVAC DAC-teknoologian käytännön soveltamista on toistaiseksi testattu rajallisessa määrässä pilottikohteita. Soletair Power on toteuttanut demonstraatiohankkeita erityyppisissä rakennuksissa, kuten toimistoissa ja teollisuuskohteissa. Esimerkiksi Wärtsilän Sustainable Technology Hub -rakennuksessa Vaasassa teknologiaa hyödynnetään osana toimistorakennuksen ilmanvaihtoa, kun taas Vantaalla järjestelmää on sovellettu teollisuusympäristössä hiilidioksidin hyödyntämiseen synteettisten tuotteiden valmistuksessa. Tanskassa Aarhusissa Soletair Powerin vanhemmalla teknologialla toteutetussa toimistokohteessa HVAC-DAC-järjestelmän energiankulutus oli noin 7–9 kWh/kg CO₂. Engineering on myös toteuttanut Tanskan Arhusin kohteesta LCA-pohjaisen laskennan; heidän tulostensa perusteella kyseisessä tapauksessa järjestelmän päästövaikutus elinkaaren todettiin nettopositiiviseksi. (Soletair Power & Søren Jensen Engineering, 2024.)

Yhteenveto: HVAC DAC

HVAC DAC- järjestelmissä DAC-teknoologian integrointi rakennuksen järjestelmiin tuo selkeästi lisähyötyjä stand-alone-DAC- teknoologiaan verrattuna, kun rakennuksen lämmönlähteitä on mahdollista hyödyntää prosessia ja samalla toimintalogiikka auttaa vähentämään ilmanvaihdon energiankulutusta muutoin kuin poistoilmaan asennettuna. Prosessin muodostaman matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntäminen parantaa ratkaisun Kehityskohtina esiin nousevat erityisesti energiatehokkuuden ja kustannustason kehittäminen edelleen sekä kokemuspohjan laajentaminen toteutuista ratkaisuista erityyppisissä kohteissa.

3.2 RAKENNUSTEN YHTEYTEEN SIOITETUT ERILLISET DAC-LAITTEET (STAND-ALONE DAC)

Teknologian kuvaus: Direct Air Capture (DAC)

Direct Air Capture (DAC) -teknoologian avulla hiilidioksidia otetaan talteen suoraan ilmakehästä. Ilma johdetaan kontaktoriin, jossa hiilidioksidi sitoutuu kemiallisesti joko kiinteään sorbenttiin tai nestemäiseen liuottimeen. Tämän jälkeen hiilidioksidi vapautetaan regenerointivaiheessa muuttamalla esimerkiksi lämpötilaa. Sen jälkeen se voidaan puristaa ja joko varastoida pysyvästi tai hyödyntää esimerkiksi teollisissa prosesseissa (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019; Ozkan, 2021). Keskeinen haaste DAC-teknoologiassa

liittyy ulkoilman alhaiseen hiilidioksidipitoisuuteen, mikä tekee prosessista energiantensiivisen verrattuna korkeampipitoisiin päästölähteisiin (Ozkan, 2021). Nykyiset DAC-ratkaisut perustuvat kiinteisiin sorbentteihin tai nestemäisiin liuottimiin (Ozkan, 2021).

Perinteisen hiilidioksidin talteenoton (Carbon Capture and Storage, CCS) ja DAC:in keskeinen ero on se, että DAC ei ole sidottu yksittäisiin pistemäisiin päästölähteisiin, kuten voimalaitoksiin tai teollisuusprosesseihin, vaan se poistaa hiilidioksidia suoraan ilmakehästä (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019). Tämän vuoksi DAC-järjestelmille on ominaista sijoittelun joustavuus, vaikka käytännössä niiden toteutusta ohjaavat erityisesti energiantarve sekä hiilidioksidin jatkokäsittelyyn liittyvä infrastruktuuri (Ozkan, 2021). DAC-teknologian energiankulutus koostuu sekä sähkö- että lämpöenergiasta. Sähköä tarvitaan pääasiassa ilman siirtämiseen ja prosessin ohjaukseen, kun taas lämpöä käytetään sorbentin regenerointiin (Ozkan, 2021). IPCC:n arvion mukaan erilaisten DAC-teknologioiden energiankulutuksen vaihteluväli (muunnettuna muotoon kWh/CO₂) on noin 1,2–11 kWh/kgCO₂ (IPCC 2022, Chapter 12, Table 12.3). Direct Air Capture (DAC) -teknologioiden energiankulutusluvut vaihtelevat merkittävästi laskentarajauksesta ja prosessityypistä riippuen. Talteenoton kustannukset vaihtelevat suuresti teknologian kehitystason ja mittakaavan mukaan. Nykyisissä ratkaisuissa kustannukset voivat olla korkeita, mutta kirjallisuudessa esitetyt arviot pitkälle skaalautuneille järjestelmille asettuvat välille 100–600 USD/tCO₂. (Young et al., 2023.)

Perinteisen hiilidioksidin talteenoton (Carbon Capture and Storage, CCS) ja DAC:n keskeinen ero on se, että DAC ei ole sidottu yksittäisiin pistemäisiin päästölähteisiin, kuten voimalaitoksiin tai teollisuusprosesseihin, vaan se poistaa hiilidioksidia suoraan ilmakehästä (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019, luvut 1–2). Tämän vuoksi DAC-järjestelmille on ominaista sijoittelun joustavuus, ja niitä voidaan periaatteessa sijoittaa hajautetusti eri ympäristöihin riippumatta päästölähteiden sijainnista, joskin varauksin (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019, luku 5). DAC-järjestelmien sijoittelua ohjaavat erityisesti vähähiilisen energian saatavuus sekä hiilidioksidin jatkokäsittelyyn liittyvä infrastruktuuri, kuten kuljetus ja varastointi (IEA, 2021).

DAC-teknologioita kehitetään pääasiassa teollisen mittakaavan sovelluksiin, mutta niitä voidaan toteuttaa myös pienemmissä, modulaarisissa yksiköissä. Tällaisia ratkaisuja voidaan suunnitella hajautettuun käyttöön, esimerkiksi rakennusten yhteyteen. Esimerkkinä tällaisista toimijoista voidaan mainita suomalainen Soletair Power. Tässä selvityksessä tämän tyyppisiin pieniin hajautettuihin ratkaisuihin viitataan termillä stand-alone DAC.

Case-esimerkit: Stand-alone DAC

Ilmastoteknologiayritys Climeworks otti vuosina 2016–2017 käyttöön maailman ensimmäisen kaupallisen DAC-laitoksen Hinwilissä Sveitsissä. Jätteidenpolttolaitoksen katolle sijoitettu laitos jossa hyödynsi energialähteenä pääosin matalalämpöistä hukkalämpöä. Laitoksen nimellinen talteenottokapasiteetti oli noin 900 tCO₂ vuodessa. Hiilidioksidi siirrettiin viereiseen kasvihuoneeseen vihannestuotantoon, jossa sillä korvattiin fossiilisperäistä hiilidioksidia. (Climeworks, 2015.). Laitoksen kaupallinen käyttö päättyi vuonna 2022 Climeworksin siirtyessä kohti pysyvään hiilenpoistoon ja varastointiin perustuvia ratkaisuja (Climeworks 2022).

ZBT:n Hydrogen Test Fieldissä Duisburgissa Saksassa on käytössä Soletair Powerin ulkokäyttöön suunniteltu modulaarinen DAC-yksikkö, joka toimii osana power-to-gas -prosessiketjua. Järjestelmä tuottaa hiilidioksidia metanointiprosessiin, jossa pyritään suljettuun hiilikiertoon. Laite toimii noin 12 tuntia vuorokaudessa ja pystyy poistamaan ilmasta noin 21 kg CO₂ päivässä, puristaen sen yli 10 barin paineeseen yli 98 %:n puhtaudella. Yksikkö on sijoitettu konttirakenteeseen rakennuksen läheisyyteen, ja se käyttää hiilidioksidin sitomiseen anionihartsia. (Soletair Power, 2023; ZBT, 2022.)

Yhteenveto: Stand-alone DAC

Yhteenvetona stand-alone-ratkaisuiden pohjateknologia on sinänsä toimiva, rakennuskohtaisissa sovelluksissa keskeiseksi haasteeksi nousee erityisesti taloudellinen kannattavuus. Prosessi on energiaintensiivinen. Käytännössä jatkokäyttömahdollisuus hiilidioksidille paikan päällä tai mahdollinen hiilimarkkinoiden kautta saatava rahoitus ovat edellytyksiä sille, että ratkaisun taloudelliselle kannattavuudelle olisi selkeitä perusteita. Energiataseen näkökulmasta stand-alone-dac on energiankuluttuja. Laajassa mittakaavassa DAC-teknologian käyttöönottoa rajoittavat edelleen korkeat kustannukset, korkea energiantarve sekä hiilidioksidin kuljetukseen ja varastointiin liittyvät infrastruktuurihaasteet.

3.3 BIOAKTIIVISET JÄRJESTELMÄT RAKENNUKSISSA

Teknologian kuvaus: Bioaktiiviset järjestelmät

Bioaktiiviset hiilenpoistojärjestelmät perustuvat fotosynteesiin, jossa mikrolevät sitovat hiilidioksidia ja tuottavat biomassaa. Mikroleviä pidetään potentiaalisena teknologiana hiilidioksidin talteenotossa ja hyödyntämisessä niiden fotosynteesin tehokkuuden vuoksi (Vijay et al., 2020), ja niiden hiilensidontakyvyksi on arvioitu noin 1,8 kg CO₂ tuotettua biomassakiloa kohden (Vijay et al., 2020). Mikroleviä kasvatetaan tyypillisesti suljetuissa fotobioreaktoreissa, jotka mahdollistavat kasvuolosuhteiden, kuten valon, ravinteiden ja hiilidioksidin, tarkan hallinnan (Pruvost et al., 2016). Mikrolevien tuotantoon vaikuttavat keskeisesti järjestelmän suunnitteluratkaisut ja ympäristöolosuhteet, kuten valon saatavuus, sijainti ja prosessiolosuhteet (Slegers et al., 2013).

Näitä järjestelmiä voidaan soveltaa myös rakennusympäristössä, jossa leväkasvatus voidaan integroida osaksi rakennuksen toimintoja (Slegers et al., 2013). Rakennuksiin integroidut mikroleväjärjestelmät voivat parantaa rakennuksen energiatehokkuutta esimerkiksi aurinkosuojauksen ja lämpökuorman hallinnan kautta sekä tuottaa biomassaa (Kim, 2014). Järjestelmien suorituskyky on kuitenkin riippuvainen ympäristöolosuhteista, kuten valon määrästä ja lämpötilasta, ja ne edellyttävät jatkuvaa ravinteiden, veden ja biologisen prosessin hallintaa (Pruvost et al., 2016).

Case-esimerkit: Bioaktiiviset järjestelmät

Euroopassa on toteutettu useita tutkimus- ja konseptihankkeita, joissa mikroleviä sisältäviä fotobioreaktoreita on integroitu rakennusten julkisivuihin tai rakenteisiin. Näissä järjestelmissä mikrolevät sitovat hiilidioksidia fotosynteesin avulla.

BIQ House Hampurissa oli maailman ensimmäinen rakennus, jonka julkisivuun integroitiin vuonna 2013 mikroleviin perustuva fotobioreaktorijärjestelmä, SolarLeaf. Järjestelmä koostui 129 lasipaneelistä, joissa mikrolevät kasvoivat suljetussa ravinneliuoksessa. Paneelit tuottivat biomassaa ja lämpöä, joka ohjattiin rakennuksen energiajärjestelmään hyödynnettäväksi esimerkiksi tilojen ja käyttöveden lämmityksessä. SolarLeaf toimi myös aurinkosuojana, sillä leväkasvusto vähensi auringon säteilykuormaa ja vaikutti rakennuksen lämpöolosuhteisiin. Leväjärjestelmille tyypillisesti järjestelmän tuotanto ja levän kasvunopeus vaihtelivat vuodenaikojen ja auringonsäteilyn mukaan. Kokonaisuudessaan hanke toimi demonstraationa rakennuksiin integroitujen bioaktiivisten järjestelmien mahdollisuuksista. (Arup 2026.)

ALGUESENS on Pariisiin rakennettu maailman ensimmäinen asuinrakennus, jonka julkisivuun on integroitu täysimittainen mikroleviin perustuva biofaçade-järjestelmä. Järjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa on

hyödynnetty Ranskassa aiemmin toteutettuja tutkimus- ja pilotointihankkeita. Se koostuu kaksikerroksisesta lasijulkisivusta, jonka sisäpuolella mikroleviä kasvatetaan fotobioreaktoreissa. Rakennuksen katolle on lisäksi asennettu kolme raceway-reaktoria biomassan tuotannon tehostamiseksi. Kasvatettu biomassa on tarkoitettu korkean lisäarvon sovelluksiin, kuten kosmetiikkaan ja lääketieteeseen. ALGUESENS on tutkimus- ja demonstraatioprojekti, ei kaupallinen hanke, ja sen tavoitteena on testata mikroleväjulkisivujen teknistä toimivuutta sekä niiden soveltuvuutta todellisiin rakennuskohteisiin. Hanke valmistui vuonna 2021. (XTU Architects 2021; Viry 2021.)

Yhteenveto: Bioaktiiviset järjestelmät

Bioaktiiviset ratkaisut muodostavat teoriassa kiinnostavan mahdollisuuden rakennuskohtaiseen hiilensidontaan. Bioaktiivisten ratkaisujen saralla toteutuneet esimerkit ovat kuitenkin tähän mennessä olleet tutkimus- ja demonstraatioprojekteja. Varsinaisia kaupallisia esimerkkejä ei selvityksessä löytynyt. Positiivisina puolina nousevat esille aurinkosuojana ja lämpökuormituksen tasaajana toimiminen sekä lämmön sekä biomassan tuotanto. Järjestelmien taustainfrastruktuuriin vaatimasta energiankulutuksesta tai mahdollisesta energiataseesta ei löytynyt tarkempaa analyysiä. Haasteita rakennusnäkökulmasta puolestaan ovat erityisesti korkea huoltotarve ja huoltokustannukset sekä rajattu hiilensidontapotentiaali sekä vaihteleva suorituskyky eri ilmasto-olosuhteissa. Lisäksi ilmastönäkökulmasta lopullisen vaikutuksen ratkaisee se, mikä levään talteenotetulle hiilidioksidille tapahtuu: bioaktiivisten ratkaisujen kohdalla voi olla HVAC DACia tai stand-alone DACia haasteellisempaa löytää levään sitoutuneelle hiilidioksidille pitkäaikaisia tai pysyviä varastointimenetelmiä: esimerkiksi SolarLeaf-hankkeessa biomassa hyödynnettiin biokaasun tuotannossa.

3.4 PASSIIVISET HIILIDIOKSIDIN SIEPPAUSRATKAISUT TEKNISSÄ JÄRJESTELMISSÄ

Teknologian yleiskuvaus: Passiiviset ratkaisut

Passiivisilla hiilensidontaratkaistuilla tarkoitetaan materiaaleja ja tekniisiä järjestelmiä, jotka sitovat hiilidioksidia ilman jatkuvaa energiankulutusta. Rakennuskäytössä nämä ratkaisut toimivat tyypillisesti aktiivisten DAC-järjestelmien tukena. Ne voivat tasata sisäilman hiilidioksidipitoisuuksia ja vähentää aktiivisten järjestelmien kuormitusta. Ratkaisut ovat pääosin vasta tutkimus- ja kehitysvaiheessa.

Yksi aktiivisesti tutkittu materiaalityyppi ovat metalliorganiset kehykset (metal–organic frameworks, MOF), joita pidetään lupaavina adsorbentteina niiden suuren ominaispinta-alan ja muokattavien huokosrakenteiden ansiosta (Kumari et al., 2025). Rakennusympäristöön soveltuvia ratkaisuja on kehitetty erityisesti amorfisista MOF-pelleteistä, joita voidaan valmistaa esimerkiksi teollisuuden sivuvirroista. Singh et al. (2025a) mukaan pelletit pystyvät poistamaan hiilidioksidia sisäilmasta ja kestävät useita käyttösyklejä, minkä vuoksi ne ovat lupaavia DAC-ratkaisuihin. Helsingin yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa raportoitiin, että amorfiset MOF-pelletit saavuttavat 0,6–1,2 mmol/g CO₂ adsorptiokapasiteetin 500 ppm:n pitoisuudessa, ja niiden suorituskyky säilyy toistuvissa käyttösykleissä. (Singh et al., 2025a.)

MOF-materiaalien ohella passiivisia hiilensidontaratkaisuja kehitetään myös niin kutsuttujen moisture swing -sorbenttien avulla. Nämä materiaalit sitovat CO₂:ta kuivissa olosuhteissa ja vapauttavat sen kosteuden noustessa, mikä mahdollistaa vähäenergisien hiilidioksidin talteenoton. Teknologia perustuu sorbentin ja ilman kosteuden väliseen vuorovaikutukseen eikä vaadi jatkuvaa lämmitystä tai jäähdytystä. (Singh et al., 2025b.)

Yhteenveto: Passiiviset järjestelmät

Yllä kuvatut passiiviset hiilensidontaratkaisut ovat pääosin tutkimus- ja kehitysvaiheessa. Ne voivat tarjota energiatehokkaan ja huoltovapaan lisän rakennuskohtaiseen hiilensidontaan. Niiden hiilensidontakapasiteetti yksin on kuitenkin pieni, jolloin todennäköisin käyttötapa on hybridiratkaisuissa, täydentämässä aktiivisia DAC-järjestelmiä. Ne eivät muodosta pysyvää hiilinielua ilman erillistä hiilidioksidin varastointia tai kemiallista sitomista

4 Teknologioiden vertailu

Rakennuksiin integroidut hiilensidontaratkaisut tarjoavat useita mahdollisuuksia, mutta niiden hyödyntämisessä on myös teknisiä, taloudellisia ja operatiivisia haasteita.

4.1 TARKASTELTUIJEN RATKAISUJEN VERTAILU

Vertailtava asia	HVAC DAC	Stand-alone DAC	Bioaktiiviset ratkaisut	Passiiviset ratkaisut
Soveltuvuus	-Soveltuvuus uusiin ja olemassa oleviin rakennuksiin (pl. pienrakennukset kannattavuussyistä) -Ei välttämättä tilantarpeen johdosta sijoitettavissa kaikkiin korjauskohteisiin	-Soveltuvuus sekä uusiin että olemassa oleviin rakennuksiin esimerkiksi katoille ja piha-alueille -Soveltuu parhaiten kohteisiin, joissa on mahdollisuus laajempaan hiilidioksidin hyödyntämiseen ja/tai -varastointiin	-Soveltuvuus erityisesti uudisrakentamiseen (vaatii taustainfrastruktuurin julkisivuun, mikä voi muodostaa korjauskohteissa haasteen)	-Soveltuvuus sekä uusiin että olemassa oleviin kohteisiin -Sijoitettavuus rakennuksiin ja rakenteisiin -Soveltuu parhaiten hybridiratkaisuihin aktiivisten järjestelmien tueksi
Hyödyt	-Ilmanvaihdon energiankulutuksen vähentäminen (asennettuna) -Rakennuksen lämmönlähteiden, kuten hukkalämmön, hyödyntäminen sorbentin regeneroinnissa -Prosessissa syntyvän matalalämpöisen hukkalämmön hyödyntämismahdollisuus rakennuksessa -Sisäilman laadun parantaminen	-Helppo jälkiasentaa -Modulaarisuus ja skaalautuvuus -Teknologian toimivuus perustasolla, vaikka kehitystarve on edelleen olemassa	-Biomassa ja lämmön tuotto -Rakennuksen aurinkosuojauksen parantaminen ja lämpökuormituksen tasaaminen: potentiaali ilmastonmuutokseen sopeutumisessa -Arkkitehtonisten ja visuaalisten mahdollisuuksien tarjoaminen kaupunkirakentamisessa	-Ei energiankulutusta -Yksinkertainen toteutus -Alhainen tekninen riski muihin ratkaisuihin verrattuna -Sisäilmahyödyt
Haasteet	-Korkea investointikustannus -Tilantarve -Suorituskyvyn ja hyötyjen riippuvuus ilmastosta, ilmajirroista ja	-Korkea investointikustannus -Energiaintensiivisyys -Taloudellisen kannattavuuden haastavuus: ainoa hyöty rakennukselle on	-Korkea huoltotarve ja -kustannukset -Herkkyys sää- ja ilmasto-olosuhteille -Rajallinen rakennuskohtainen hiilensidontavolyymi	-Hidas hiilensidontanopeus -Rajallinen kapasiteetti pinta-alaa kohden -Hiilidioksidin pysyvä varastointi vaatii lisäratkaisuja

	<p>rakennuksen käyttöprofiilista</p> <ul style="list-style-type: none"> -Hiilidioksidin talteenoton energiantensiivisyys -Rajallinen käyttökokemus -Ilmastovaikutusten riippuvuus hiilidioksidin jatkokäsittelystä 	<p>hiilidioksidin tuotto, jolloin kannattavuus riippuvainen esimerkiksi hiilikrediteistä</p> <ul style="list-style-type: none"> -Ilmastovaikutusten riippuvuus hiilidioksidin jatkokäytöstä 	<ul style="list-style-type: none"> -Biomassa pitkäaikaisen varastoinnin haasteet ja käyttökohteiden lyhytikäisyys -Ilmastovaikutuksen riippuvuus hiilidioksidin jatkokäsittelystä 	<p>teknologioiden tueksi</p>
Kehityskohteet	<ul style="list-style-type: none"> -Investointikustannusten pienentäminen -Energiatehokkuuden parantaminen -Kooltaan kompaktimpien ratkaisujen kehittäminen -Ilmastovaikutusten mittaaminen, raportointi ja todentaminen -LCA-pohjainen tarkastelu huomioiden hiilidioksidin eri loppusijoituskenaariot 	<ul style="list-style-type: none"> -Investointikustannusten pienentäminen -Energiatehokkuuden parantaminen -Ilmastovaikutusten mittaaminen, raportointi ja todentaminen -LCA-pohjainen tarkastelu huomioiden hiilidioksidin eri loppusijoituskenaariot 	<ul style="list-style-type: none"> -Järjestelmän optimointi vaihteleviin ilmastoihin -Huoltotarpeiden hallinta ja järjestelmien kestävyuden kehittäminen -Kustannusten alentaminen -Ilmastovaikutusten mittaaminen, raportointi ja todentaminen -LCA-pohjainen tarkastelu huomioiden hiilidioksidin eri loppusijoituskenaariot 	<ul style="list-style-type: none"> -Sorbenttimateriaalien talteenottokapasiteetin kehittäminen -Hiilidioksidin pitkäaikaisen varastoinnin tai jatkokäytön ratkaisujen selkeyttäminen -LCA-pohjainen tarkastelu huomioiden hiilidioksidin eri loppusijoituskenaariot
Teknologian kypsyysaste	<p>Pilotointivaihe / varhainen kaupallistumisvaihe</p>	<p>Teollinen DAC kaupallinen teknologia, pienemmät stand-alone-yksiköt varhaisemmassa kaupallistumisen vaiheessa</p>	<p>Tutkimus- ja pilotointivaihe</p>	<p>Tutkimusvaihe</p>

4.2 MAHDOLLISUUDET

HVAC DAC-ratkaisut mahdollistavat hiilidioksidin talteenoton hyödyntämällä olemassa olevaa ilmanvaihtoinfrastruktuuria, mikä parantaa prosessin energiatehokkuutta verrattuna erillisiin stand-alone -ratkaisuihin. Integraatio mahdollistaa myös rakennuksen sisäisten energialähteiden, kuten hukkalämmön, hyödyntämisen sorbentin regeneroinnissa sekä talteenotto-prosessin sivuvirtojen, kuten matalalämpöisen lämmön, hyödyntämisen muissa käyttötarkoituksissa. Näin hiilidioksidin talteenotto voidaan kytkeä osaksi rakennuksen kokonaisenergiatassetta, mikä parantaa järjestelmän kokonaishyötysuhdetta. Optimaalisissa olosuhteissa asennettuna ja hyödynnettynä järjestelmän kokonaisenergiataseessa voidaan nykyteknologioilla päästä merkittävästi lähemmäs nollaa kuin puhtaassa stand-alone DAC-teknologiassa.

Stand-alone DAC -teknologian hyötyinä korostuvat teknologian suhteellinen kypsyys sekä modulaarisuus. Teknologia on mahdollista ottaa joustavasti käyttöön ja skaalata sitä ilman syvää integraatiota rakennuksen järjestelmiin. Tämä voi olla etu kohteissa, joissa olemassa oleva infrastruktuuri ei mahdollista integraatoratkaisuja.

Bioaktiiviset järjestelmien hyötyjä ovat auringonsäteilyn hallinta, lämmöntuotanto, biomassan hyödyntäminen

sekä visuaaliset ja arkkitehtoniset näkökulmat. Ne voivat tukea laajemmin kaupunkisuunnittelun tavoitteita paitsi hiilen talteenoton, myös ilmastonmuutokseen sopeutumisen näkökulmasta.

Passiiviset materiaaliratkaisut tarjoavat energiatehokkaan ja teknisesti yksinkertaisen lähestymistavan hiilidioksidin sitomiseen. Niiden vahvuutena ovat vähäinen huoltotarve, helppo integroitavuus sekä mahdollisuus tasata sisäilman hiilidioksidipitoisuuksia ilman jatkuvaa energiankulutusta. Näiden ratkaisujen merkittävin potentiaali liittyy hybridiratkaisuihin, joissa ne voivat vähentää aktiivisten järjestelmien kuormitusta ja parantaa kokonaisjärjestelmän toimintaa.

Kokonaishyödyiltään ja tekniseltä ja kaupalliselta valmiusasteeltaan selvityksessä vahvimmin esille nouseva teknologia on HVAC DAC. Tähänkin teknologiaan liittyen kuitenkin useita haasteita ja kehitystarpeita, joita on käsitelty seuraavassa kappaleessa.

Rakennuskohtaiset hiilentalteenoton ratkaisut tarjoavat kuitenkin teoriassa kiinnostavan mahdollisuuden hajautettuun hiilenpoistoon, jolla on mahdollista täydentää kunnianhimoisia päästövähennystoimia sekä laajan mittakaavan teollista CCS:ää. Huomioiden, että hiilidioksidin kuljetukseen ja varastointiin koskeva infrastruktuuri on vasta kehittymässä, pienille hiilidioksidivirroille voi olla myös helpompi löytää mahdollisuuksia pitkäaikaiseen varastointiin esimerkiksi tuotteisiin, kun yksittäiset erät eivät ole suuria.

4.3 HAASTEET JA KEHITYSTARPEET

Mahdollisuuksien rinnalla tarkasteltaviin teknologioihin useita teknisiä, taloudellisia ja metodologisia haasteita, jotka rajoittavat niiden laajamittaista käyttöönottoa. Teknologioiden valmiuden osalta passiiviset ratkaisut ovat tutkimus- ja kehitysvaiheessa ja bioaktiiviset ratkaisut pilottitasolla. HVAC DAC-ratkaisut ovat pilotointi-/varhaisen kaupallistumisen vaiheessa, mutta käytännön toteutuksia on vielä hyvin rajattu määrä.

Myös järjestelmien korkea energiankulutus (erityisesti stand-alone DAC, mutta myös HVAC DAC) sekä investointikustannukset nousevat tällä hetkellä haasteiksi. HVAC DAC:in osalta on huomioitava, että vaikka integraatio rakennuksen järjestelmiin parantaa energiatasetta, kokonaisenergiatase riippuu vahvasti kohteen käyttöprofiilista, käytettävissä olevista energialähteistä sekä järjestelmän ohjauksesta ja on hyvin kohdekohtainen. Stand-alone DAC-teknologian osalta haasteena on erityisesti ratkaisun yleinen taloudellinen kannattavuus hyödyn syntyessä vain talteen otetusta hiilidioksidista. Bioaktiivisten ratkaisujen osalta korostuvat myös korkea huoltotarve ja -kustannukset sekä järjestelmien herkkyys erilaisilla ilmastoilla ja sääolosuhteille. Passiivisissa ratkaisuissa ydinhaasteita ovat rajallinen hiilensidontakapasiteetti ja se, että ne eivät yksin tuota pysyvää hiilensidontaa.

Hiilidioksidin jatkokäsittely on keskeinen tekijä ilmastovaikutusten osalta kaikissa teknologioissa. Ratkaisujen skaalautuminen vaatisi sitä, että hiilidioksidin pitkäaikaisen tai pysyvän varastoinnin mahdollistavat ratkaisut skaalautuisivat samaa tahtia.

Rakennustason ratkaisuissa myös käyttöönottoa edistävien tai siihen pakottavien ajureiden riittävyys järjestelmien käyttöönottamiseksi voi myös nousta tällä hetkellä kysymykseksi. Koska investointikustannukset ovat toistaiseksi suhteellisen korkealla tasolla, voi olla, että nykyisellä ilmastotoimien kunnianhimon tasolla rakennushankkeissa on laajassa mittakaavassa rajattu valmius tarkastella tutkitun tyyppisiä ratkaisuja. Tällöin mikäli teknologioita halutaan edistää, käytännössä tämä voisi vaatii jonkinlaista tukimuotoista rahoitusta.

5 Talteenotetun hiilidioksidin jatkokäyttö ja varastointi

Ilmastovaikutusten näkökulmasta se mitä hiilidioksidille tapahtuu talteenoton jälkeen, määrittää toiminnan ilmastollisen vaikuttavuuden. Pysyvä tai pitkäaikainen varastointi on osa hiilenpoiston määritelmää (IPCC, 2022, Chapter 12; IEA, 2022b). Myös EU:n hiilenpoiston sertifiointikehyksessä (Carbon Removal Certification Framework, CRCF) korostetaan pysyvyyden, lisäisyyden ja todentamisen vaatimuksia hiilenpoistotoimille (European Parliament and Council of the European Union, 2024)).

Pysyvyydsvaatimusten täyttäminen edellyttää toimivaa kuljetus- ja varastointiketjua, mutta Euroopassa tämä infrastruktuuri on vasta kehittymässä. EU on asettanut tavoitteeksi noin 50 Mt CO₂:n vuosittaisen geologisen varastointikapasiteetin (injektiokapasiteetti) luomisen vuoteen 2030 mennessä (European Commission, 2024). Geologisen varastoinnin potentiaali sijoittuu Pohjanmerelle (European Commission, 2015; IEA 2023b). Erilaiset pilottihankkeet kuten Northern Lights (Norja), Porthos (Hollanti) ja Greensand (Tanska) edustavat tämän kehityksen kärkiä (CATF, 2026; Equinor, 2026; Porthos, 2026). Suomessa merkittäviä potentiaalisia sijaintikohteita varastoinnille ei sen sijaan ole tunnistettu, eikä hiilidioksidin geologinen varastointi ole tällä hetkellä lain mukaan sallittua (Kujanpää, 2023).

Kun pysyvää varastointia ei ole saatavilla, hiilidioksidia voidaan ohjata myös hyötykäyttöön (CCU). CCU:n ilmastohyöty riippuu kuitenkin käytön luonteesta. Globaalilla tasolla suuri osa hiilidioksidin hyötykäytöstä liittyy lannoiteteollisuuteen ja tehostettuun öljyntuotantoon (IEA, 2023b). Näiden hyötykäyttökohteiden ilmastohyöty on rajallinen. Uusien hyötykäyttökohteiden, kuten synteettisten polttoaineiden, kemikaalien ja rakennusmateriaalien, odotetaan kasvavan, mutta niiden volyymit ovat vielä pieniä suhteessa kokonaispotentiaaliin (IEA, 2023b). Vaikka hiilidioksidin hyötykäyttö voi vähentää neitseellisten raaka-aineiden tarvetta ja korvata fossiilisia prosesseja, suurin osa CCU-sovelluksista ei täytä hiilenpoiston kriteerejä, koska hiilidioksidi vapautuu takaisin ilmakehään tuotteen elinkaaren aikana. IPCC:n mukaan CCU tuottaa pysyvää ilmastohyötyä vain silloin, kun hiilidioksidi sidotaan pitkäikäisiin tuotteisiin tai materiaaleihin, joiden varastointiaika ylittää sadan vuoden mittaluokan (IPCC, 2022, Chapter 6). IEA korostaa, että nykyiset suurivolyymit CCU-sovellukset, kuten lannoiteteollisuus ja synteettiset polttoaineet, johtavat tyyppillisesti lyhyen kierron hiileen, jolloin ilmastohyöty jää rajalliseksi (IEA, 2023b). Tästä syystä CCU:n rooli rakennuskohtaisissa hiilenpoistoratkaisuissa on ensisijaisesti täydentävä, ja sen ilmastovaikutus riippuu siitä, voidaanko hiilidioksidi ohjata pitkäikäisiin tuotteisiin tai varastointiprosesseihin.

Rakennustuotteisiin perustuva hiilidioksidin varastointi voidaan jakaa pääasiassa mineralisaatioon ja biologiseen varastointiin. Mineralisaatio on yksi harvoista hiilidioksidin hyötykäyttömuodoista, joka tuottaa pysyvää varastointia, sillä CO₂ reagoi mineraalien kanssa muodostaen geologisesti stabiileja karbonaatteja (IPCC, 2022). IEA:n mukaan mineralisaatio on erityisen lupaava rakennusmateriaalien, kuten betonin ja teollisten sivuvirtojen, yhteydessä, koska se mahdollistaa sekä materiaalien ominaisuuksien parantamisen että pysyvän hiilensidonnan (IEA, 2023b). Ratkaisun ilmastohyöty riippuu kuitenkin myös prosessin energiankulutuksesta ja siitä, korvaako lopputuote korkean hiilijalanjäljen materiaaleja.

Mineralisaatiossa hiilidioksidi sitoutuu kemiallisesti mineraaleihin muodostaen stabiileja karbonaatteja, ja keskeisiä toteutustapoja ovat betonin karbonatisoituminen, CO₂-kovetus (carbon curing) sekä teollisten sivuvirtojen, kuten kuonan ja tuhkien, hyödyntäminen (IPCC, 2022, Chapter 12; IEA, 2023b). Näitä ratkaisuja kehittävät useat toimijat, kuten CarbonCure, Solidia, CarbiCrete ja Carbon8, kun taas Ecocem keskittyy vähähiilisiin sementtiratkaisuihin, jotka voivat tukea mineralisaatiopohjaisia lähestymistapoja. Biologinen varastointi perustuu puolestaan biogeenisen hiilen sitomiseen, esimerkiksi biohiilen käyttöön rakennusmateriaaleissa, ja alan toimijoihin kuuluu esimerkiksi Carbo Culture (IEA, 2023b; Kujanpää, 2023).

Rakennuskohtaiset hiilentalteenoton ratkaisut ovat hajautettuja, jolloin yksittäiset CO₂-virrat ovat pieniä. Hajautettujen virtojen vuoksi varastointiratkaisun on oltava skaalautuva myös pienille CO₂-määrille. Hiilidioksidin kuljetukselle ja varastoinnille pitäisi löytyä ratkaisu, joka huomioi virtojen koon ja hajanaisuuden. Suomesta hiilidioksidi pitäisi joko kuljettaa muualle geologiseen varastoon tai sille on löydettävä Suomessa mahdollisuus pitkäaikaiseen varastointiin esimerkiksi tuotteisiin. Suomen kontekstissa kiinnostava, pitkäaikainen vaihtoehto etenkin pienemmille virroille on hiilidioksidin mineralisaatio rakennustuotteisiin, kuten betoniin. Rakennustuotteiden kohdalla yksittäisten laitosten mineralisaatiokapasiteetti jää tyypillisesti alle 0,1 Mt CO₂ vuodessa (Kujanpää, 2023), mikä rajoittaa ratkaisun skaalautuvuutta suuressa mittakaavassa.

Kokonaisuutena voidaan todeta, että hiilidioksidin jatkokäsittely muodostaa kriittisen osan rakennuskohtaisten hiilenpoistoratkaisujen arvoketjua. Ilman skaalautuvaa kuljetusta, luotettavaa varastointia ja kestäviä käyttökohteita talteenoton ilmastohyödyt jäävät toteutumatta.

6 Ratkaisujen ilmastovaikutusten kvantifiointi (MRV ja LCA)

Rakennuskohtaisten hiilidioksidin talteenottoratkaisujen todellisia ilmastovaikutuksia täytyy pystyä tarkastelemaan ja vertailemaan kvantitatiivisesti. Luotettavat MRV-järjestelmät (monitorointi, raportointi ja verifiointi) ovat edellytyksiä hiilensidontan uskottavuudelle ja ilmastohyötyjen todentamiselle

Elinkaariarvioinnilla (LCA, Life Cycle Analysis) pystytään laskemaan, tuottaako ratkaisu elinkaarinäkökulmasta nettohyötyä ilmastolle. Ilman LCA:ta on haastavaa arvioida, ylittävätkö järjestelmän elinkaaren aikana synnyttämät päästöt sen tuottamat poistot. Hajautetuissa järjestelmissä LCA-arvioinnin merkitys korostuu, kun syntyvät CO₂-virrat ovat suhteellisen pieniä, mutta laitteiden ja infrastruktuurin valmistus vaatii kuitenkin resursseja. Elinkaariarvioinnissa tulisi huomioida myös talteenotetun hiilidioksidin jatkokäsittelyn ja -varastoinnin eri skenaarit, jotta hiilidioksidin jatkokäsittelyä pystytään suuntaamaan ilmaston kannalta tarkoituksenmukaisesti. Mikäli rakennuskohtainen hiilentalteenotto lähtisi skaalautumaan, tulisi esimerkiksi Suomessa tehdä metodologista pohdintaa ja periaatteellista keskustelua sen suhteen, miten rakennuskohtaiseen hiilidioksidin talteenottoon suhtaudutaan Ilmastonselvityksen mukaisessa hiilijalanjäljen laskennassa. Siihen ei tällä hetkellä ole olemassa suoria linjauksia. Tämän lisäksi ratkaisujen skaalautuessa tulisi pohdittavaksi myös, miten ratkaisujen vaikutukset huomioidaan GHG-protokollan mukaisessa organisaatiotason hiilijalanjälkilaskennassa.

MRV-näkökulmasta rakennuskohtaiset ratkaisut ovat pieniä, kohdekohtaisia ja olosuhteiltaan merkittävästi vaihtelevia. Tämä vaikeuttaa perusolekusten tekemistä ja luotettavaa vertailua eri kohteiden välillä. Mittausteknologiaan liittyy epävarmuuksia. DAC-ratkaisuissa talteenotetun hiilidioksidin määrää ei useinkaan mitata suoraan, vaan se joudutaan arvioimaan epäsuorasti esimerkiksi ilmavirtojen ja pitoisuuserojen perusteella, tämän lisäksi suorituskyky vaihtelee käyttöolosuhteiden mukaan (IEA, 2022b). Samantyyppisiä haasteita kohdataan oletettavasti muissakin teknologioissa. Keskeinen kysymys on myös hiilidioksidin varastoinnin pysyvyyden osoittaminen. Lisäksi mikäli ratkaisuille haluttaisiin hakea rahoitusta hiilimarkkinan kautta, tulisi pystyä osoittamaan myös ratkaisujen lisäisyys eli se että ne tuottavat todellista lisähyötyä verrattuna perusuratilanteeseen ilman toimenpidettä. Jatkossa tarvitaan yhtenäisiä menetelmiä, jotka määrittelevät mittaustavoille sekä hyväksyttävälle oletuksille eri käyttötilanteissa

Kaikki järjestelmien kokonaisvaltaisia ilmastovaikutuksia koskeva kvantifiointi edellyttää avointa, läpinäkyvää ja saatavilla olevaa tietoa järjestelmien ominaisuuksista, rakenteesta ja materiaaleista, energiankulutuksesta ja energiataseesta sekä hiilidioksidin loppukäytön skenarioista.

7 Toimenpidesuosituksukset rakennusten hiilensidonnan ja -varastoinnin tehostamiseksi

Rakennuskohtainen hiilenpoisto ja siihen liittyvät tekniset ratkaisut tarjoavat potentiaalia hiilidioksidin poistamiseen ilmakehästä sekä erilaisten oheishyötyjen luomiseen hankkeissa. Rakennuskohtaisten hiilensidontaratkaisujen edistäminen edellyttää kuitenkin samanaikaisia toimenpiteitä teknologian kehityksen, ohjauksen ja markkinarakenteiden osalta.

Ensinnäkin on tärkeää seurata aktiivisesti teemaan liittyvää tutkimusta etenemistä. Aihetta koskeva tutkimus on vielä rajallista; kirjallisuuskatsauksessa sen havaittiin kuitenkin julkaisujen määrän olleen kasvussa viime vuosina. Jatkuva tiedon seuranta mahdollistaa ratkaisujen arvioinnin ajantasaisella tietopohjalla.

Toiseksi keskeistä on tunnistaa ja mahdollisesti edelleen kehittää käyttöönottoa ohjaavia ajureita. Nykyisellä kustannusrakenteella ja teknologian kehitystasolla rakennuskohtaiselle hiilenpoistolle ei välttämättä ainakaan Suomessa ole tällä hetkellä riittävästi selkeitä ajureita tai kannustimia, jotka ohjaisivat ratkaisujen laajamittaiseen käyttöönottoon. Jos jotakin teknologiaa halutaan tavoitteellisesti edistää, voi olla tarpeen miettiä lisäkannustimia, ellei yleinen ilmastotoimien kunnianhimon tason merkittävästi nouse.

Kolmanneksi mahdollisissa pilottihankkeissa tulisi painottaa teknologioiden testaamisen rinnalla erityisesti mittaamista, raportointia ja tulosten verifiointia ja näiden kehitystä sekä tiedon läpinäkyvää jakamista, jotta ratkaisujen todelliset ilmastovaikutukset voidaan osoittaa luotettavasti ja niistä saadaan tietoa. Samalla on tärkeää kehittää ratkaisuja suuntaan, jossa hiilidioksidin varastointi on pysyvää ja elinkaarivaikutukset kokonaisuutena ilmaston kannalta positiivisia.

Neljänneksi tarvitaan systemaattista käytännön kokemusten kokoamista ja analysointia. Nykyinen tietopohja perustuu pitkälti yksittäisiin pilotteihin ja tapaustutkimuksiin, eikä ratkaisujen soveltuvuudesta eri käyttökohteisiin ole vielä riittävä kokonaiskuva tai systemaattisia vertailuja. Teknologiakohtaista tarkastelua tulisi syventää, jotta voidaan tunnistaa kunkin teknologian parhaat käyttökohteet.

Lisäksi on tarpeen käydä sekä periaatteellista että metodologista keskustelua siitä, miten rakennuskohtaiset hiilensidontaratkaisut huomioitaisiin eri viitekehyksissä ja laskentamalleissa. Tämä koskee erityisesti kansallista ilmastoseelvitystä sekä GHG-protokollan mukaista organisaatiotason hiilijalanjälkilaskentaa. Selkeiden pelisääntöjen puute voi muodostua merkittäväksi esteeksi ratkaisujen laajemmalle hyödyntämiselle.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Selvityksen tavoitteena oli koota olemassa oleva tieto rakennusten teknisiin järjestelmiin integroiduista hiilensidontaratkaisuista Euroopan alueella. Tarkastelussa havaittiin, että teemaa koskeva akateeminen tutkimus on vielä vähäistä ja hyvin hajanaista. Tarkasteltavia teknologioita tunnistettiin selvityksessä pienempi määrä kuin mitä lähtötilanteessa arvioitiin tunnistettavan. Tarkasteluun sisällytettiin HVAC DAC- sekä stand-alone-DAC-teknologiat, lähinnä levän fotosynteesiin perustuvat bioaktiiviset julkisivujärjestelmiin asennettavat ratkaisut sekä suppeasti myös vielä kehitysvaiheessa olevat, rakennuksiin soveltuvat passiiviset hiilentalteenoton ratkaisut. Tarkasteltavat teknologiat olivat yleisesti vielä suhteellisen varhaisessa vaiheessa: kaupallisia EU-tason toimijoita tutkittujen teknologioiden puitteissa tunnistettiin stand-alone-DAC-tyyppisissä ratkaisuissa muutama sekä HVAC DAC-ratkaisuissa yksi.

Stand-alone-DAC-ratkaisut ovat pohjateknologiaaltaan toimiva ja skaalattavia, mutta taloudellisen kannattavuuden osalta niiden käyttöönotto voi olla hankalasti perusteltavissa. HVAC DAC-teknologiassa integraatio rakennuksen IV-järjestelmään tuo selkeää hyötyä energiatehokkuuden ja järjestelmän energiataseen tasapainottamisen näkökulmasta. Bioaktiiviset järjestelmät, kuten leväreaktorit, tuovat lisäarvoa energian ja biomassan tuotannon kautta, mutta ovat toistaiseksi konseptivaiheessa ja vaativat merkittävää kehitystä ennen laajamittaista käyttöönottoa. Passiiviset ratkaisut, kuten MOF-materiaalit ja sorbenttipohjaiset suodattimet, voivat tukea aktiivisia järjestelmiä ja tasata CO₂-pitoisuuksia energiatehokkaasti, mutta niiden vaikutus yksinään on rajallinen. Näiden teknologioiden rooli on todennäköisesti hybridiratkaisuissa.

Keskeiset haasteet liittyvät investointi- ja huoltokustannuksiin, ilmastovaikutusten systemaattiseen mittaamiseen ja elinkaarivaikutusten arviointiin. järjestelmien energiatehokkuuteen, talteenotetun hiilidioksidin varastointiin ja hyötykäyttöön. Talteen otetun hiilen käsittely edellyttää selkeitä vastuunjakoja ja infrastruktuuria. Lisäksi raportoinnin ja mittauksen läpinäkyvyys on välttämätöntä, jotta ratkaisut voidaan huomioida elinkaarilaskennoissa ja päästötaseissa.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että rakennusten teknisiin järjestelmiin perustuva hiilensidonta tarjoaa teoriassa kiinnostavaa potentiaalia hajautetun hiilenpoiston toteutukseen, mutta laajamittainen käyttöönotto edellyttää vielä kaikkien teknologioiden kehitystä, kustannusten alentamista, MRV-standardointia ja selkeitä toimintamalleja hiilen varastoinnin ja raportoinnin osalta. Toimintaympäristön ajurit eivät tällä hetkellä ainakaan Suomessa todennäköisesti synnytä riittävään laajaa painetta rakentamisen saralla, jotta teknologiat lähtisivät laajamittaisesti skaalautumaan. Skaalautuminen edellyttäisi mahdollisesti siis joko yleistä ilmastotoimien kunnianhimon tason nousua, teknologioiden tarkoituksellista tukemista esimerkiksi rahoituksen kautta tai jonkun teknologian nopeaa kehitystä erityisesti kustannusten ja energiatehokkuuden näkökulmasta. HVAC DAC nousi kehitystarpeistaan huolimatta kaupallisen valmiuden sekä oheishyötyjen näkökulmasta selkeimmin esiin, kun taas bioaktiiviset ja passiiviset ratkaisut vaativat vielä tutkimusta ja pilotointia ennen kaupallistamista.

9 Lähteet

Arup (2026) *SolarLeaf – The BIQ House*. [Viitattu 5.3.2026]. Saatavilla: <https://www.arup.com/projects/solarleaf>

CATF (2025) *Carbon capture and storage in Europe: Slow but significant progress in 2025*. [Viitattu 1.4.2026]. Saatavilla: <https://www.catf.us/2025/11/carbon-capture-storage-europe-slow-but-significant-progress-2025/>

Climeworks (2015) *Climeworks' first industrial-scale direct air capture plant in Hinwil*. [Viitattu 1.4.2026]. Saatavilla: <https://climeworks.com/news/climeworks-builds-first-commercial-scale-direct-air-capture-plant>

Climeworks (2022) *Commercial operations of Climeworks' 1st gen technology are completed*. [Viitattu 9.4.2026]. Saatavilla: <https://climeworks.com/press-release/climeworks-completes-commercial-operations-in-hinwil>

Equinor (2026) *Northern Lights: What we do*. [Viitattu 1.4.2026]. Saatavilla: <https://www.equinor.com/energy/northern-lights>

Elaouzy, Y. and Zaabout, A. (2025) Carbon capture, utilization and storage in buildings: Analysis of performance, social acceptance, policy measures, and the role of artificial intelligence', *Building and Environment*, 275, 112817. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112817>

European Commission (2015) *Assessment of CO₂ Storage Potential in Europe (CO₂StoP)*. Brussels: European Commission, Directorate-General for Energy. Saatavilla: https://energy.ec.europa.eu/publications/assessment-co2-storage-potential-europe-co2stop_en

European Commission (2024) *Communication on a European Industrial Carbon Management Strategy*. Brussels: European Commission. COM (2024) 62 final. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52024DC0062>

European Parliament and Council of the European Union (2024) Regulation (EU) 2024/3012 of the European Parliament and of the Council of 13 March 2024 establishing a Union certification framework for carbon removals and putting forward rules on monitoring, reporting and verification. Official Journal of the European Union, L 109, 17 April 2024. Saatavilla: [Regulation - EU - 2024/3012 - EN - EUR-Lex](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R3012)

Harrouz, J. P., Ghali, K., Hmade, M. and Ghaddar, N. (2022) 'Carbon capture from indoor air as an alternative ventilation technique', *CLIMA 2022 Conference Proceedings*. Saatavilla: <https://doi.org/10.34641/clima.2022.49>

IEA (2021) *Direct Air Capture: A key technology for net zero*. Paris: International Energy Agency. Saatavilla: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>

IEA (2022a) *Technology and Innovation Pathways for Zero-Carbon-Ready Buildings by 2030*. Paris: International Energy Agency. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/technology-and-innovation-pathways-for-zero-carbon-ready-buildings-by-2030>

IEA (2022b) *Direct Air Capture 2022*. Paris: International Energy Agency. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022>

IEA (2023a) *Carbon Capture, Utilisation and Storage – Tracking Clean Energy Progress 2023*. Paris: International Energy Agency. Saatavilla: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>

IEA (2023b) *CO₂ transport and storage*. Paris: International Energy Agency. [Viitattu 1.4.2026]. Saatavilla: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-transport-and-storage>

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment*

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. Saatavilla: <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

IPCC (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC. Saatavilla: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Kujanpää, L. et al. (2023) *Carbon dioxide use and removal: Prospects and policies*. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/server/api/core/bitstreams/a061bc4f-9705-4ccb-aa0f-cb192a9fdb97/content>

Kumari, S., Gusain, M., Lamba, B. Y. and Kumar, S. (2025) 'A critical review on recent advancements in metal-organic frameworks for CO₂ capture, storage and utilization', *Journal of Materials Chemistry A*, 13, pp. 21352–21388. Saatavilla: <https://doi.org/10.1039/D5TA02338F>

McQueen, N., Gomes, K.V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M. and Wilcox, J. (2021) A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future', *Progress in Energy*, 3(3), 032001. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abf1ce>

Milić, V., Larsson Ståhl, A., Granli, A. and Moshfegh, B. (2024) 'Exploring small-scale direct air capture in a building ventilation system: A case study in Linköping, Sweden', *Frontiers in Energy Research*, 12, 1443974. Saatavilla: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1443974>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*. Washington, DC: The National Academies Press. Saatavilla: https://www.nationalacademies.org/projects/DELS-BASCPR-16-01/publication/25259?utm_source=chatgpt.com

Ozkan, M. (2021) 'Direct air capture of CO₂: A response to meet the global climate targets', *MRS Energy & Sustainability*, 8, pp. 51–56. Saatavilla: <https://doi.org/10.1557/s43581-021-00005-9>

Porthos (2026) *Project*. [Viitattu 1.4.2026]. Saatavilla: <https://www.porthosco2.nl/en/project/>

Pruvost, J., Cornet, J.-F. ja Legrand, J. (2016). Industrial photobioreactors and scale-up concepts. *Advances in Chemical Engineering*, 48, 257–310. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/bs.ache.2015.11.002>

Kim, K.-H. (2014). *A feasibility study of an algae façade system*. Proceedings of the International Conference on Sustainable Building. Saatavilla: https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC26782.pdf

Singh, B., Kemell, M., Heikkilä, M. J. and Repo, T. (2025a) 'Indoor direct air capture using amorphous MOF pellets from blast furnace slag', *Chemical Engineering Journal*, 505, 159416. Saatavilla: <https://helda.helsinki.fi/bitstreams/2d8b2cd4-3e34-4cfb-aada-9c98a82af1d1/download>

Singh, B., Gorji, Z. E., Charbonneau, L. and Repo, T. (2025b) 'Harnessing humidity for direct air capture: Moisture swing sorbent design and mechanisms', *Carbon Capture Science & Technology*, 17. Saatavilla: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/a73c5f2c-0e9c-48bd-8a56-52675f4f488c/content>

Slegers, P. M. et al. (2013) 'Design scenarios for algae-based façade systems', Abstrakti. Saatavilla: [Abstract Algal biomass summit - Towards large scale microalgae plants](#)

Soletair Power (2022) *Technical Specifications of HVAC Integrated Direct Air Capture Unit – How Building CO₂ Capture Works*. Saatavilla: <https://www.soletairpower.fi/technical-specs-of-hvac-unit-soletair-power>

Soletair Power and Søren Jensen Engineering (2024) *White Paper: Building Carbon Capture with HVAC Integrated Direct Air Capture – Aarhus Office Case Study*. Saatavilla kirjautumisen jälkeen: www.soletairpower.fi

Viry (2021) *Alguesens Biofaçade – Project description*. Fayat Metal. [Viitattu 9.4.2026]. Saatavilla: <https://metal.fayat.com/en/our-achievements/alguesens-biofaca>

WorldGBC (2021) *An integrated approach to a sustainable built environment: the co-benefits of resources & circularity*. World Green Building Council. Saatavilla: <https://worldgbc.org/article/an-integrated-approach-to-a-sustainable-built-environment-the-co-benefits-of-resources-circularity/>

XTU Architects (2021) *Biofaçades*. Projektokuvaus. Saatavilla: <https://www.xtuarchitects.com/biofaca>

Young, J. et al. (2023) The cost of direct air capture and storage: A review of the literature', *Progress in Energy*, 5(3). Saatavilla: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590332223003007>

ZBT – Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (2022) *CO₂ capture: New direct air capture unit at ZBT's Hydrogen Test Field*. Projektokuvaus. Saatavilla: <https://zbt.de/en/news/co2-capture-new-direct-air-capture-unit-at-zbts-hydrogen-test-field/>