



# Hiilijalanjäljen pienentäminen rakennuksen perustuksien suunnittelussa

Eetu Nurminen

OPINNÄYTETYÖ  
Tammikuu 2023  
Rakentamisen ylempi ammattikorkeakoulututkinto

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Rakentamisen ylempi ammattikorkeakoulututkinto

Nurminen Eetu  
Hiilijalanjäljen pienentäminen rakennuksen perustuksien suunnittelussa

Opinnäytetyö 58 sivua  
Tammikuu 2023

---

Opinnäytetyön taustalla oli JM Suomi Oy halu tutkia ja kehittää rakennuksen perustusten hiilijalanjäljen pienentämiseen tähtääviä ratkaisuja osana yrityksen ilmastotavoitteita. Työ koostuu teoriaosuudesta, päästölaskennasta sekä eri perustusratkaisujen vertailusta. Opinnäytetyössä keskitytään kahteen erityyppiseen, 16-kerroksisen betonikerrostalon perustusrakenteeseen, joista toisessa hyödynnetään kallionvaraista anturaa ja toisessa kallionvaraista anturaa paalutuksella. Kumpaakin perustusratkaisua arvioitiin ilmastovaikutusten näkökulmasta käyttäen One Click LCA -ohjelmistoa, ja laskentatuloksia vertailemalla pyrittiin tunnistamaan optimaalisin ratkaisu hiilijalanjäljen vähentämisen kannalta.

Työssä tarkasteltiin lisäksi muualla maailmassa käytettyjä keinoja vähähiilisen rakentamisen tueksi, mikä toi uusia näkökulmia ympäristöystävällisten ratkaisujen soveltamiseen suomalaisessa rakennusympäristössä. Erityistä huomiota kiinnitettiin vähähiilisten materiaalien, kuten vähähiilisen betonin, käyttöön perustuksissa sekä siihen, miten materiaalivalinnat vaikuttavat perustusrakenteiden hiilidioksidipäästöihin. Tulosten perusteella vähähiilisen betonin käyttö vähentää merkittävästi rakennuksen perustusten aiheuttamaa hiilijalanjälkeä. Tämän lisäksi tutkimuksessa arvioitiin muita vähähiilisyysluokituksia ja rakennusmateriaalien ominaisuuksia, kuten eristeiden ja kivimurskeen vaikutusta hiilijalanjälkeen. Työn tulokset tukevat rakennusalalla käytäviä keskusteluja vähähiilisten rakennusratkaisujen tärkeydestä ja konkreettisista hyödyistä, erityisesti, kun otetaan huomioon Suomessa voimaan astuvat ympäristövaatimukset ja vuoden 2025 rakentamislaki. Tulokset osoittavat, että vähähiilisen betonin käytöllä ja materiaalien optimoinnilla voidaan saavuttaa suuri vähennys perustusratkaisujen hiilidioksidipäästöissä. Hiilijalanjäljen vähentäminen ei ainoastaan tue yritysten ympäristötavoitteita, vaan myös parantaa rakennusalan kilpailukykyä pitkällä aikavälillä.

Opinnäytetyö tarjoaa tietoa, jota voidaan hyödyntää rakennusalan suunnitteluprosesseissa ja strategisessa päätöksenteossa. Tuloksia voidaan käyttää tukena kehitettäessä vähähiilisiä rakennesuunnitteluohjeita, joilla on merkittävä rooli ilmastotavoitteiden saavuttamisessa ja uusien vähähiilisyysluokitusten soveltamisessa rakennusalalla. Vähähiilisen rakentamisen ratkaisut tuovat laajempia etuja myös kiertotalouden näkökulmasta, sillä ne mahdollistavat materiaalitehokkaiden ja ympäristöystävällisten valintojen integroimisen rakentamisen elinkaaren kaikkiin vaiheisiin.

Asiasanat: perustukset, hiilijalanjälki, päästövertailu

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Master's Degree in Construction

Nurminen Eetu  
Reducing the carbon footprint in building foundation design

Bachelor's thesis 58 pages  
January 2023

---

The background of this thesis was JM Suomi Oy's desire to explore and develop solutions aimed at reducing the carbon footprint of building foundations as part of the company's climate goals. The work consists of a theoretical section, emission calculations, and a comparison of different foundation solutions. The thesis focuses on two types of foundation structures for a 16-story concrete apartment building, one utilizing a rock-bearing footing and the other a rock-bearing footing with additional piling. Both foundation solutions were evaluated in terms of climate impact using the One Click LCA software, and by comparing the calculation results, the goal was to identify the optimal solution for reducing the carbon footprint.

The thesis also examined methods used elsewhere in the world to support low-carbon construction, providing new perspectives on the application of environmentally friendly solutions in the Finnish construction context. Special attention was given to the use of low-carbon materials, such as low-carbon concrete, in foundations and to how material choices impact the carbon dioxide emissions of foundation structures. Based on the results, the use of low-carbon concrete significantly reduces the carbon footprint of building foundations. In addition, the study evaluated other low-carbon classifications and the properties of construction materials, such as the impact of insulation and crushed stone on the carbon footprint.

The results support ongoing discussions within the construction industry about the importance and concrete benefits of low-carbon construction solutions, particularly considering the new environmental requirements in Finland and the construction law coming into force in 2025. The findings demonstrate that significant reductions in carbon dioxide emissions from foundation solutions can be achieved through the use of low-carbon concrete and material optimization. Reducing the carbon footprint not only supports corporate environmental goals but also enhances the construction sector's long-term competitiveness.

This thesis provides information that can be used in construction industry design processes and strategic decision-making. The findings can support the development of low-carbon structural design guidelines, which play a significant role in achieving climate goals and implementing new low-carbon classifications in the construction industry. Low-carbon construction solutions also offer broader benefits from a circular economy perspective, as they enable the integration of material-efficient and environmentally friendly choices across all stages of the construction lifecycle.

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT.....	3
SISÄLLYS.....	4
1 Johdanto.....	5
2 JM Suomi Oy:n ilmastosuunnitelma 2020–2030.....	6
3 Ympäristövaatimukset ja tavoitteet.....	9
4 Hiilijalanjäljen laskenta ja sääntely.....	13
4.1 LCA (Life Cycle Assessment).....	13
5 Elinkaariohjelmisto One Click LCA.....	14
5.3 Rakentamisen elinkaarilaskennan näkymät vuodelle 2024.....	15
5.4 Päästöjen vähentyminen LCA-tutkimuksella.....	15
5.5 Käytetty työaika hiilijalanjälkilaskennan arviointiin ja optimointiin.....	17
6 Betonin rooli perustusrakenteiden päästöistä.....	19
6.1 Betonin vaikutukset perustuksien hiilijalanjälkeen.....	19
6.2 Vähähiilinen betoni.....	20
6.3 Vähähiilisen betonin käyttäminen perustusrakenteissa.....	23
6.4 Betonin vähähiilisyysluokituksen selite.....	25
6.5 Huomioitavaa vähähiilistä betonia käytettäessä.....	27
6.6 Vähähiilisen betonin lujuudenkehitys.....	28
7 Rakennusratkaisuja päästöjen vähentämiseen.....	31
7.1 Unidome-teknologia.....	31
7.2 Pecafil perustusratkaisu.....	36
(Pecafil 2024).....	38
8 Perustusratkaisujen päästövertailu.....	43
8.1 Päästötietokanta yleisesti.....	43
8.2 Kallionvarainen antura + paaluperustusratkaisu.....	45
8.3 Kallionvaraisen anturan + paaluperustuksen hiilijalanjäljen optimointi.....	48
8.4 Kallionvarainen antura.....	48
8.5 Kallionvaraisen anturan hiilijalanjäljen optimointi.....	51
8.6 Päästövertailu perustusratkaisujen kesken.....	51
8.7 Päästövertailu: Määrät ja prosenttiosuudet.....	52
8.8 Päästöerot materiaalikohtaisesti.....	53
8.9 Päästöerojen syyt.....	54
9 Johtopäätökset ja pohdinta.....	55
LÄHTEET.....	58

## 1 Johdanto

Työn taustalla oli JM Suomi Oy:n ilmastotavoite vuoteen 2030 mennessä ja yhtenä osana sitä oli tämän opinnäytetyön aihe siitä, miten hiilijalanjälkeä voitaisiin pienentää perustuksien suunnittelussa. Syynä tähän on se, että perustukset tuottavat huomattavan osan uudisrakennuksen hiilijalanjäljestä. Perustuksien aiheuttamia päästöihin ei ole myöskään JM Suomi Oy:llä syvennetty tarkemmin, ennen tätä työtä.

Opinnäytetyön pääpaino on anturoissa sekä anturoiden alapuolisissa rakenteissa (perustusrakenteet). Työssä tutkitaan ratkaisuja perustusrakenteiden päästöjen vähentämiseen esim. voidaanko perustusrakenteita pienentää ja niissä käytettyjä raudoituksia vähentää. Tutkimuksessa vertaillaan myös kahta 16-kerroksista betonikerrostaloa ja niiden perustusratkaisuja, toinen kohteista on perustettu kallioanturamenetelmällä ja toinen kohde on perustettu kallioanturamenetelmällä ja on osittain lisäksi paalutettu.

Hiilijalanjätkilaskennassa on perustukset todettu yhdeksi merkittävimmistä päästölähteistä. Eikä yrityksellä ole vielä perustuksiin perustavaa selkeää hiilijalanjälkeä vähentävää suunnitteluohjetta. Yksinkertaistettuna, mitä vähemmän perustusrakenteisiin joudutaan käyttämään betonia ja rautaa sitä vähemmän CO<sub>2</sub>-päästöjä, että kustannuksia niiden rakentamisesta syntyy.

Työstä on rajattu pois tontin valintaan liittyvät kysymykset. Tontin valinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi perustuksissa syntyviin päästöihin. Paalutus tuottaa paljon päästöjä paalujen valmistuksesta, että niiden asentamiseen tarvittavien työkonoiden päästöistä. Myös stabilointiin käytettävä kalkkisementtiseos, joka sekoitetaan saveen. Tuottaa päästöjä stabilointimassan valmistamisesta sekä työkonoiden polttoainekulutuksesta. Valitsemalla tontteja, joiden maaperä on kantava eikä paalutusta tarvita saadaan etuja päästölaskelmissa. Helsingissä, joka on työnantajani päämarkkina-alue asuntorakentamisessa, on harvakseltaan jäljellä tontteja, joiden maaperä on sellaista, että paalutusta tai massanvaihtoa ei tarvita.

## 2 JM Suomi Oy:n ilmastosuunnitelma 2020–2030

JM Suomen johtoryhmä on nyt päättänyt, että päästötön työmaakonsepti otetaan Suomessa käyttöön ensi vuodenvaihteesta alkaen. Tämä tarkoittaa, että vuodenvaihteen jälkeen rakentamisen aloittavat projektit käyttävät fossiilitonta energiaa. Fossiiliton työmaa tarkoittaa käytännössä sitä, että työmailla käytetään päästötöntä kaukolämpöä ja sähköä sekä uusiutuvia polttoaineita. Fossiiliton työmaa koskee työmaan aitojen sisällä olevaa toimintaa (sähköä, lämmitystä ja työkooneita). Fossiilittomuus ei siis vielä tässä vaiheessa kosketa kuljetuksia työmaalle tai rakennusmateriaalien tuotantoa. (JM Suomi Oy 2023).

Muutos vaikuttaa hankintoihimme, sähkön ja kaukolämmön sopimuksiin sekä urakoitsijoille asettamiimme vaatimuksiin käyttäen uusiutuvia polttoaineita (esim. NesteMY-polttoöljy). Hankinta on jo keskustellut aiheesta kumppaneidemme kanssa. Tuotantoon muutos tarkoittaa aiempaa tarkempaa seurantaa sähkön, kaukolämmön ja polttoaineiden kulutuksesta työmaalla.

Suurin polttoaineen kulutus työmaillamme tapahtuu tyypillisesti maanrakentamisen aikana. Mikäli uusiutuvan energian käyttö ei ole mahdollista joissain toiminnoissa, myönnetään tapauskohtaisesti poikkeuksia.

Fossiilittoman työmaan kustannusarvio on Suomessa samassa suuruusluokassa kuin Ruotsissa, eli noin 2-3 euroa per bruttoneliö. (JM Suomi Oy 2023).

Päästöjä on vähennettävä nopeasti, jotta ilmasto voidaan vakauttaa Pariisin sopimuksen tavoitteen mukaisesti. Rakennus- ja kiinteistöalan osuus päästöistä on merkittävä. Pohjoismaissa, joissa JM toimii, sektorin osuus päästöistä on jopa kolmannes. JM haluaa ottaa vastuuta päästöjen vähentämisestä ja on asettanut oman tavoitteensa vähentää päästönsä lähes nollaan vuoteen 2030 mennessä, mikä vastaa arviolta noin 15 prosentin päästötaso. Tavoitteena on vähentää ilmastopäästöjä jopa 85 prosenttia muutamassa vuodessa. Etusijalla on tällä hetkellä vähentää oman arvoketjumme päästöjä päästökompensoinnin sijaan. (JM Suomi Oy 2023).

JM:n hiilidioksidipäästöjen kokonaismääräksi vuonna 2022 arvioitiin 89 253 tonnia CO<sub>2</sub>e. Vuosittainen ilmastovaikutus riippuu siitä, kuinka monta asuntoa vuoden aikana valmistuu, joten ilmastotavoite on intensiteettitavoite. Kasvihuonekaasuprotokollassa (Greenhouse Gas Protocol, GHG), joka on tunnustettu standardi kasvihuonekaasupäästöjen laskennassa ja raportoinnissa, kasvihuonekaasupäästöt jaetaan kolmeen luokkaan, joita kutsutaan scope nimityksellä. (JM Suomi Oy 2023).

Scope 1 ja scope 2 viittaavat yrityksen omien toimintojen energiankäyttöön sekä yrityksen omiin matkoihin ja kuljetuksiin liittyviin päästöihin, ja scope 3 kattaa muut arvoketjun päästöt, joita tietty toiminta aiheuttaa epäsuorasti. JM:n tapauksessa kyse on pääasiassa rakentamisprosessista ja JM:n rakentamien asuntojen tulevasta käytöstä aiheutuvista päästöistä. JM:n hiilidioksidipäästöt esitetään scope-kohtaisesti vuosikertomuksessa ja vastuullisuusraportissa. (JM Suomi Oy 2023).

JM:n päästöistä suurin osa syntyy rakennusprosessissa, joten siihen ensisijaisesti keskitytään. Myös rakennusten käytöllä on suuri ilmastovaikutus ja olemassa oleva rakennuskanta tuottaa suurimman osan kiinteistö- ja rakentamisalan päästöistä. Pienennämme rakennusten käytön aikaisia päästöjä esimerkiksi rakentamalla kaikki JM-kodit energiatehokkaiksi. (JM Suomi Oy 2023).

Vuoden 2022 päästöjakauma rakennusprosessissa, jossa päästöt ovat suurimmat:

Kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	
Materiaalivalmistus A1–A3	356
Kuljetukset A4	23
Rakennusvaihe A5	64
Yhteensä	443

Maanrakennustöiden ja tulevien toimintojen tai purkamisen ja loppukäsittelyn päästöjä ei ole sisällytetty JM:n ilmastotavoitteeseen, koska tavoitteiden asettaminen niille on eri syistä haastavaa. Tutkimus kuitenkin vähähiilisyttä edistävästä ratkaisusta on myös meneillään näillä osa-alueilla.

(JM Suomi Oy 2023).

### 3 Ympäristövaatimukset ja tavoitteet

2025 alussa voimaan astuva uusi rakennuslaki tuo merkittäviä muutoksia rakennusprojekteihin hiilijalanjäljen vähentämisen osalta. Eduskunta on hyväksynyt lain, joka integroi ilmastonmuutoksen torjunnan osaksi rakentamisen sääntelyä kokonaisvaltaisella tavalla. Lain tarkoituksena on myös helpottaa rakentamisprosessia, edistää kiertotaloutta ja digitalisaatiota sekä parantaa rakentamisen laatua. Suurin ero nykyiseen maankäyttö- ja rakennuslakiin on se, että ilmastonmuutoksen hillitseminen tuodaan aiempaa keskeisemmin osaksi rakennushankkeita. Tämä laki ohjaa rakentamaan vähähiilisesti, eli ottamaan huomioon rakennuksen koko elinkaaren aikaiset ilmastovaikutukset. Käytännön säädökset, kuten rakennuksen ilmastaselvitys, materiaaliluettelo ja hiilijalanjäljen raja-arvot, sisällytetään myöhemmin Suomen rakentamismääräyksiin. Laki tukee kiertotaloutta rakennusalalla. Uudet tekniset vaatimukset edellyttävät rakennusten suunnittelua pitkäikäisiksi ja helposti muunneltaviksi. Lisäksi uusissa ja purettavissa rakennuksissa on selvitettävä käytetyt ja vapautuvat materiaalit, pois siirrettävä maa- ja kiviaine sekä vaarallisen jätteen määrä.

(Ympäristöministeriö 2024)

#### 3.1 Ympäristölainsäädännön vaikutukset suunnitteluprosessiin

Jos olisi mahdollista, että ilmaston lämpeneminen saataisiin rajattua alle kahden asteen, ilmaston olosuhteet ovat jo muuttuneet. Sen vuoksi rakennusten tulee jatkossa kestää uudenlaisia sääolosuhteista johtuvia rasituksia. Mitä enemmän ilmasto lämpenee, sitä enemmän merenpinta kohoaa ja sään ilmiöt, kuten voimakkaat tuulet, rankkasateet ja hellejaksot, lisääntyvät. (Rakennustieto Oy)

Rakennustietosäätiön laatimassa ohjekortissa RT 103170 "Ilmastonmuutos. Hillintä ja sopeutuminen rakennetussa ympäristössä" tunnistetaan neljä pääteema, jotka tulisi huomioida rakennusten suunnittelussa sopeutumisen osalta: kuumuus, sateet ja tulvat, lumi sekä kosteus (A-Insinöörit 2023).

Vuonna 2025 tulevan rakentamislain myötä ympäristölainsäädännön rooli kasvaa merkittävästi rakennusten suunnittelussa Suomessa. Uuden lain olennainen uudistus on ilmastonmuutoksen torjunnan tuominen osaksi rakentamissääntelyä. Se tarkoittaa, että kaikkien rakennushankkeiden tulee täyttää entistä tiukempia

ympäristövaatimuksia. Uudet säädökset tuovat suunnittelijoille lisävelvoitteita, mutta samalla mahdollisuuden edistää vähähiilisiä ratkaisuja rakennusalalla. (Ympäristöministeriö 2023)

Laki edellyttää, että uusissa rakennushankkeissa huomioidaan koko elinkaaren kattavat hiilijalanjäljen raja-arvot. Tämä vaatii suunnittelijoilta tarkkaa materiaalien ja rakenneratkaisujen arviointia ja optimointia niin, että rakennuksen hiilijalanjälki pysyy asetettujen rajojen sisällä. Raja-arvot määrittyvät EN 15978 -standardin perusteella, joka kattaa rakennuksen koko elinkaaren aikaiset päästöt alkaen materiaalien tuotannosta aina purkamiseen ja kierrätykseen. Uusi vaatimus kannustaa suunnittelijoita ottamaan huomioon hiilijalanjäljen jo alkuvaiheessa, kun tehdään päätöksiä rakennuksen perusrakenteista ja materiaaleista. (Ympäristöministeriö 2023)

Betonirakenteiden osalta uudet hankkeet veloitetaan käyttämään vähähiilisiä betonilaatuja, jotka noudattavat BY-Vähähiilisyysluokituksen vaatimuksia. Luokitus asettaa rajat eri betonilaatujen hiilidioksidipäästöille eri rakenteissa, ohjaten suunnittelijoita valitsemaan ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja jo suunnitteluvaiheessa. Tällöin materiaalien valinta on varmistettava rakennusluvan saamisen ehtojen mukaisesti. (Ympäristöministeriö 2023)

Elinkaariarviointi (LCA) saa entistä suuremman roolin uudessa lainsäädännössä, ja sen käyttö nousee keskeiseksi suunnitteluprosessin osaksi. Suunnittelijoiden tulee hyödyntää LCA-työkaluja, esimerkiksi One Click LCA -ohjelmistoa, arvioidakseen ja optimoidakseen eri materiaalien ja rakennusosien vaikutuksia koko elinkaaren ajan. Elinkaariarvioinnin avulla voidaan tunnistaa rakennuksen elinkaaren kannalta keskeiset päästölähteet, materiaalit ja työvaiheet ja löytää keinoja vähentää kokonaispäästöjä. Suunnitteluprosessissa on tarpeen tehdä entistä tiiviimpää yhteistyötä eri toimijoiden, kuten arkkitehtien, insinöörien, urakoitsijoiden ja materiaalitoimittajien kanssa. Yhteistyön kautta voidaan kehittää ratkaisuja, jotka pienentävät rakennuksen hiilijalanjälkeä säilyttäen samalla toiminnalliset ja turvallisuusvaatimukset. (Ympäristöministeriö 2023)

Lainsäädännön vaatimus laajempaan ympäristönäkökulman huomiointiin tarkoittaa, että suunnitteluun tarvitaan enemmän aikaa ja resursseja. Tämä voi pidentää suunnitteluvaihetta sekä vaatia lisätyövaiheita, kuten päästötietojen keräämistä, laskentaa ja raportointia. Lisäksi suunnittelijoiden tulee varmistaa, että kaikki hankkeeseen osallistuvat ymmärtävät sääntelyvaatimusten tuomat uudet vastuut ja velvoitteet. Tämä voi edellyttää lisäkoulutusta ja resursseja, jotta kaikkien osapuolten tavoitteet vastaisivat hiilijalanjäljen vähentämistavoitteita. (Ympäristöministeriö 2023)

Uusien säädösten myötä rakentamisen kustannukset voivat lyhyellä aikavälillä nousta. Yritykset, jotka panostavat vähähiilisyyteen ja ympäristöystävällisiin ratkaisuihin, voivat pitkällä aikavälillä saavuttaa kilpailuetua uusista liiketoimintamahdollisuuksista. Se voi tarjota etulyöntiaseman tarjouskilpailuissa, joissa ympäristönäkökohdat painottuvat entistä enemmän. Suunnittelijoiden tulee myös ottaa huomioon vähähiilisten materiaalien saatavuus ja kustannustehokkuus, mikä voi vaatia syvempää yhteistyötä materiaalitoimittajien kanssa. Näin voidaan varmistaa, että tarvittavat vähähiiliset materiaalit ovat sekä saatavilla että kustannustehokkaita. Lainsäädännön muutokset asettavat uusia vaatimuksia suunnitteluprosessille, mutta samalla luovat mahdollisuuden kehittää kestävämpiä ja innovatiivisempia ratkaisuja. On tärkeää, että suunnittelijat omaksuvat aktiivisen asenteen ja hyödyntävät uusia työkaluja ja menetelmiä, jotka tukevat sekä lainsäädännön että ympäristötavoitteiden täyttämistä. (Ympäristöministeriö 2023)

### **3.2 Hiilineutraali Suomi vuonna 2035**

Suomi tähtää hiilineutraaliuteen vuonna 2035, ja useat kunnat asettavat vieläkin varhaisempia hiilineutraaliustavoitteita. Suomi on myös sitoutunut täyttämään EU:n ilmastotavoitteet ja Pariisin sopimuksessa asetetut päästövähennystavoitteet. Rakennuskannan merkittävä päästöjen vähentäminen on välttämätön osa tätä laajaa tehtävää, ja tulevat vuosikymmenet ovat ratkaisevia ilmastokriisin hillitsemisen kannalta. Pariisin sopimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi rakennusten keskimääräisen energiatehokkuuden on parannuttava maailmanlaajuisesti

30 % vuoteen 2030 mennessä. Suomessa tilojen lämmitys muodostaa suurimman osan rakennusten energiankulutuksesta. Jotta Suomi voi saavuttaa hiilineutraaliustavoitteen, uusien rakennusten keskimääräisen lämmitysenergiantarpeen on pienennettävä noin 9–24 % vuoteen 2030 mennessä, rakennustyypistä riippuen. (Suomen ympäristökeskus. 2020)

Rakennuskanta uudistuu 1–2 % vuosivauhdilla, joten on kiireesti vähennettävä myös olemassa olevien rakennusten päästöjä. Jotta hiilineutraalius voidaan saavuttaa, olemassa olevien rakennusten keskimääräisen lämmitysenergiantarpeen on pienennettävä suunnilleen samassa suuruusluokassa kuin uusienkin rakennusten, rakennustyypistä riippuen noin 12–23 % vuoteen 2030 mennessä. Rakennuksen elinkaarin hiilijalanjälki kuvastaa sen ilmastovaikutusta koko elinkaarensa aikana. Tämä sisältää päästöt, jotka syntyvät rakennusmateriaalien valmistuksessa, rakennustyömaan toiminnoissa, energiankulutuksessa, kunnossapidossa sekä rakennuksen purkamisessa ja kierrättämisessä. Elinkaarisen hiilijalanjäljen avulla voidaan arvioida, missä vaiheissa saavutetaan suurimmat päästösäästöt ja millä toimenpiteillä. (Suomen ympäristökeskus. 2020)

Aiemmin rakennusmateriaalien päästöjä pidettiin vähäisinä käyttövaiheen päästöihin verrattuna. Kuitenkin energiatehokkaimmissa rakennuksissa materiaalien osuus voi olla yli 50 % koko elinkaarista hiilijalanjäljestä.

(Suomen ympäristökeskus. 2020)

## 4 Hiilijalanjäljen laskenta ja sääntely

Rakennuksen hiilijalanjälkeä voidaan arvioida eri ohjelmistoilla, ja Suomessa vahvistettu standardi on eurooppalainen EN 15978:2011. Standardin mukaista laskentaa tulee soveltaa riippumatta käytetystä työkalusta. Rakennuksen hiilijalanjälkeä aiotaan säännellä Suomen rakentamismääräyksissä vuoteen 2025 mennessä, ja ympäristöministeriö kehittää kansallista laskentamenetelmää.

Rakennuksen hiilijalanjäljen sääntely voi vaikuttaa tarjouskilpailuihin, ja on tärkeää, että tarjoajat käyttävät yhdenmukaisia laskentamenetelmiä. Ympäristöministeriö kehittää parhaillaan kansallista laskentamenetelmää rakennuksen hiilijalanjäljen määrittämiseksi.

(Suomen ympäristökeskus. 2020)

### 4.1 LCA (Life Cycle Assessment)

LCA (Life Cycle Assessment) eli elinkaariarviointi on menetelmä, joka arvioi tuotteen tai palvelun ympäristövaikutuksia sen koko elinkaaren ajan, aina raaka-ainneiden hankinnasta tuotantoon, käyttöön ja lopulta hävittämiseen tai kierrätykseen asti. Elinkaariarviointi ottaa huomioon resurssien käytön, energiankulutuksen, päästöt ilmaan, veteen ja maaperään sekä jätteiden synnyn eri vaiheissa. LCA:n avulla voidaan saada kokonaisvaltainen kuva tuotteen tai palvelun ympäristövaikutuksista, ja se auttaa tunnistamaan, missä vaiheissa elinkaarta ympäristökuormitus on suurinta. Tämän tiedon avulla voidaan tehdä parempia päätöksiä kestävämmän suunnittelun ja tuotannon tavoittelemiseksi. Rakennusalalla LCA:ta voidaan käyttää esimerkiksi arvioimaan rakennusmateriaalien ympäristövaikutuksia ja vertailemaan eri rakennusvaihtoehtojen kestävyyttä.

(One Click LCA (2023))

## **5 Elinkaariohjelmisto One Click LCA**

One Click LCA on helppokäyttöinen elinkaariarviointiohjelmisto, minkä avulla rakennushankkeiden, tuotteiden sekä projektisalkkujen ympäristövaikutuksia voidaan tehokkaasti mitata ja optimoida. Sitä käytetään yli 170 maassa, ja se tarjoaa rakennushankkeiden osapuolille työkalut hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen koko rakentamisen arvoketjussa.

(Symetri 2024)

### **5.1 Rakennuksen elinkaariarviointi (Building LCA)**

Ohjelmisto mahdollistaa luotettavan ja nopean elinkaariarvioinnin rakennuksille. Ohjelma tukee elinkaariarvioiden ja elinkaarikustannusten laskentaa, auttaa kehittämään vähäpäästöisempiä ja kiertotaloutta edistäviä hankkeita sekä tukee vastuullisen rakentamisen vaatimia sertifiointeja. Se soveltuu niin rakennuksiin, infrastruktuuriin, peruskorjauksiin kuin rakennustuotteisiin ja -materiaaleihin sekä laajempiin portfoliosovelluksiin. Se sisältää laajan, jatkuvasti päivittyvän tietokannan, joka kattaa yli 200 000 rakennusmateriaalin päästötiedon ja kaikki maailmanlaajuiset ympäristöselosteet. Laskelmat voidaan mukauttaa esim. BREEAM-, LEED-, HQE-, ja muiden yli 80 sertifikaatin vaatimuksiin sekä vertailuanalyysiin.

(Symetri 2024)

### **5.2 Tuotteen elinkaariarviointi ja rakennusmateriaalien päästötietokanta (EPD database)**

Ohjelmisto tuottaa tuotteen elinkaariarvioinnin luotettavasti ja tehokkaasti. Ohjelmisto tukee myös kolmannen osapuolen varmentamien ympäristöselosteiden (EPD) luontia, EN- ja ISO-standardien mukaisesti. Päästötietokannan ansiosta voidaan hyödyntää sekä valmistajakohtaisia että keskimääräisiä paikallisia materiaalitietoja, mikäli valmistajan omaa ympäristöselostetta ei ole saatavilla. Siihen lisätään jatkuvasti uusia ympäristöselosteita, ja ohjelmistolla on mahdollista pyytää niitä valmistajilta. Kaikki tietokannan tiedot käyvät läpi huolellisen varmenusprosessin, tiedon luotettavuuden varmistamiseksi. (Symetri 2024).

### 5.3 Rakentamisen elinkaari-laskennan näkymät vuodelle 2024

Rakentamisen elinkaariarviointi ja sitä koskevan hiilidioksidin asiantuntijoiden näkymät 2024-raportti analysoi rakennusala ja siihen liittyvillä aloilla työskentelevien ammattilaisten maailmanlaajuisen kyselyn tuloksia. Kysely suoritettiin One Click LCA -yrityksen toimesta elokuun 2023 ja syyskuun 2023 välillä. Kysymykset keskittyivät elinkaariarvioinnin (LCA) käytäntöihin, ympäristötuotetietoihin (EPD), resurssitarpeisiin sekä huomattuihin rajoituksiin LCA:n ja rakenteellisen hiilen edistymisessä. (One Click LCA. (2023))

Tämä raportti perustuu 129 asiantuntijan vastauksiin, jotka kerättiin sosiaalisen median, ammatillisten verkostojen ja sähköpostiuutiskirjeiden avulla. Kysely oli avoin kaikille, ja siinä tarjottiin mahdollisuus anonyymiin osallistumiseen. Vastaukset luokiteltiin vastaajien ammattialan ja asuinmaan mukaan, minkä jälkeen ne yhdistettiin analyysiä varten sopiviin alueisiin. Suurin osa vastaajista työskenteli konsultointialalla, ja eniten vastauksia saatiin Iso-Britanniasta ja Irlannista, kummankin osuuden ollessa noin 40 %. Tämä raportti jatkaa vuonna 2021 julkaistua "Rakentamisen elinkaariarviointi ja rakenteellinen hiili -asiantuntijoiden näkymät" -selvitystä, ja vertailua vuoden 2021 tuloksiin tehdään tarvittaessa. Kyselystä saadut tiedot ovat olennaisia laadittaessa rakennusalan hiilidioksidipäästöjä vähentäviä säädöksiä, ja tulokset jaetaan säädöksiä laativien päätöksentekijöiden ja viranomaisten käyttöön.

(One Click LCA (2023))

### 5.4 Päästöjen vähentyminen LCA-tutkimuksella

Hiilidioksidipäästöjen vähenemismahdollisuus LCA- tai päästötutkimuksen avulla oli havaittavissa 59 % vastaajista rakennushankkeissa, missä kyseistä menetelmää käytettiin, ja näissä kohteissa vähennys ylitti 10 %. Ammattiryhmittäin tarkasteltuna puolet konsultointialan vastaajista arvioi vähennyspotentiaalin olevan 10–20 %, kun taas kolmasosa osapuolten toimijoista ilmoitti, ettei merkittävää vähennysmahdollisuutta ollut (pienen otoskoon huomioiden). (One Click LCA. (2023))

Alla oleva taulukko (taulukko 1) esittää vertailun LCA- tai päästötutkimuksilla saavutettavasta hiilidioksidipäästöjen vähentämispotentiaalista vuosina 2021 ja 2023. Vastaukset on tiivistetty vaihtoehtoihin "10–20 %", "20–30 %" ja "yli 30 %". Vuoden 2021 One Click LCA -raporttiin verrattuna luottamus vähintään 10 % päästövähennyksiin on kuitenkin laskenut Euroopassa ja muualla maailmassa. (One Click LCA. (2023))

Taulukko 1 Päästöpotentiaalit esitetty (One Click LCA. (2023))

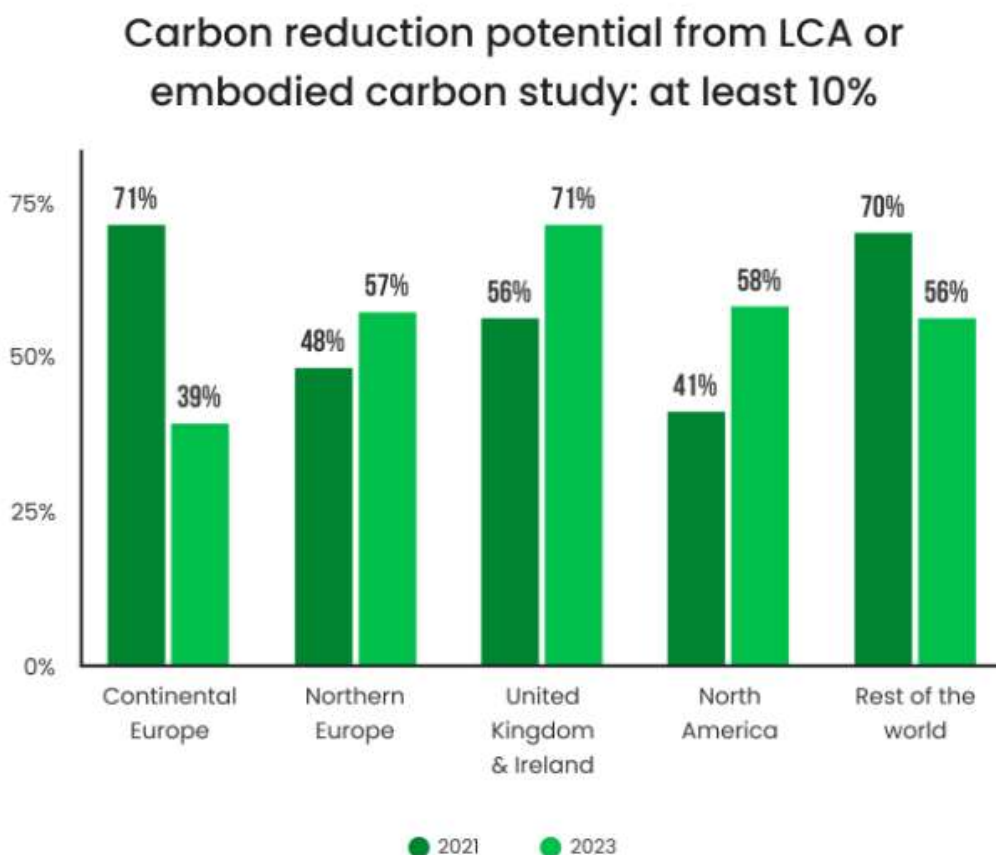


Fig 3. At least 10% carbon reduction potential from conducting an LCA or embodied carbon study

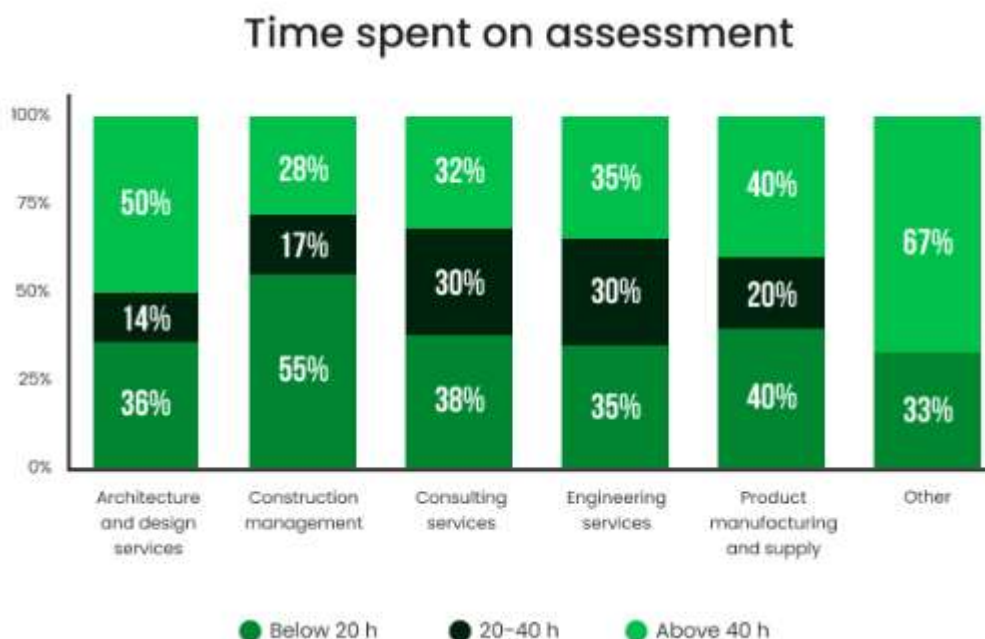
Suurimmaksi LCA ja hiilijalanjäljen edistymisen esteeksi vastaajat mainitsivat kansallisten määräysten ja politiikan puutteen, jonka 50 % kaikista vastaajista näki rajoittavana tekijänä. Kun yhdistettiin vaihtoehdot "jonkin verran rajoittava" ja "merkittävästi rajoittava", nousi esiin kehittäjien ja sijoittajien ymmärryksen puute, jota piti edistymistä rajoittavana peräti 87 % vastaajista. Samalla yli 80 % vastaajista arvioi, että myös parhaiden käytäntöjen puute hidastaa alan kehitystä. Vuoden 2021 One Click LCA -raporttiin verrattuna kansallisen sääntelyn ja politiikan puute on yhä suurin huolenaihe, mutta kunnallisen sääntelyn ja politiikan

osalta on havaittavissa myönteistä kehitystä: kun vuonna 2021 sääntelyn puutteen koettiin estävän LCA ja hiilijalanjäljen edistymistä 84 % vastaajien keskuudessa, vuonna 2023 tämä osuus laski 75 %. Markkinoiden yleisen tietoisuuden puute koettiin vuonna 2023 vähemmän merkittäväksi haasteeksi kuin vuonna 2021. (One Click LCA. (2023))

## 5.5 Käytetty työaika hiilijalanjälkilaskennan arviointiin ja optimointiin

Vastaajat arvioivat hiilijalanjäljen arviointiin käytetyn työajan olevan useimmiten alle 40 tuntia, vaikka he korostivatkin, että tämä määrä voi vaihdella merkittävästi projektikohtaisesti. Työajan pituuteen vaikuttavat muun muassa saatavilla olevan tiedon määrä ja sen laatu. Kun LCA-tutkimukseen kuluva työaika tarkasteltiin eri alojen välillä (jättäen pois "en tiedä" -vastaukset), 55 % rakennusalan hallinnossa toimivista vastaajista ilmoitti työn kestävän alle 20 tuntia. Sen sijaan tuote-teollisuuden ja toimitusalan vastaajien arviot jakautuivat tasaisesti "alle 20 tuntia" ja "yli 40 tuntia" -ryhmien välillä. Lisäoptimointia varten vaadittu työaika oli useimpien mukaan alle 20 tuntia, mutta tähän arvioon liittyi huomattavaa vaihtelua tutkimuksen syvyyden ja optimointien määrän mukaan. (One Click LCA. (2023))

Taulukko 2 Käytetty työaika laskentaa varten eri aloittain (One Click LCA. (2023))



Taulukko 3 Arvioitu käytetty työaika hiilijalanjäljen laskentaa varten. Esimerkkikohte oli pinta-alaltaan 5000 m<sup>2</sup> rakennus, josta oli yleiset tiedot saatavilla (yläosa) ja samalla projektille (alaosa) (One Click LCA. (2023))

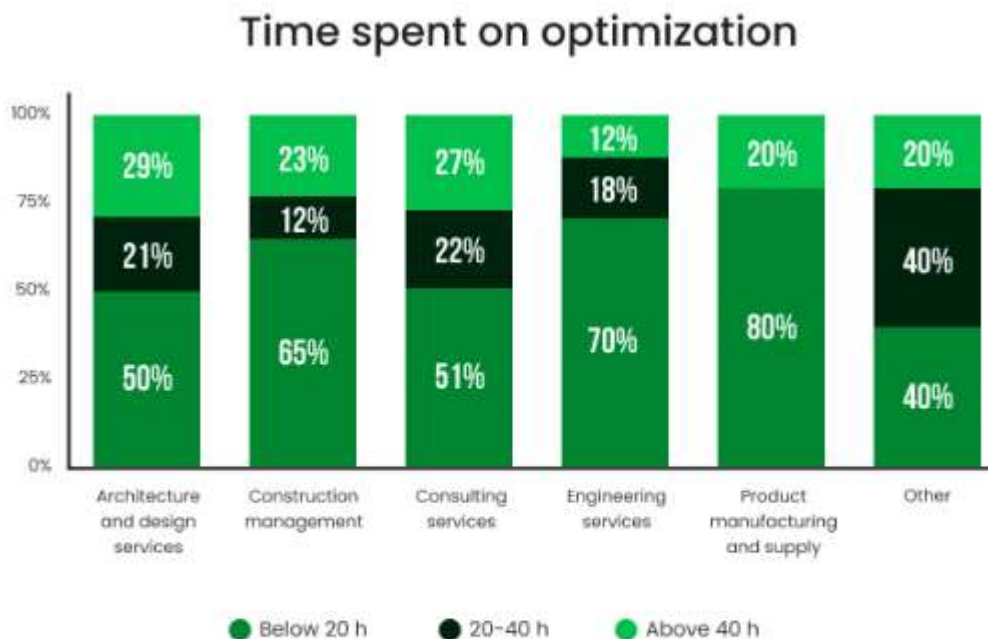


Fig 6. Estimated time (h) spent on an LCA or embodied carbon assessment for 5000 m<sup>2</sup> building with the usual level of information available (top); optimisation for the same project (bottom)

## 6 Betonin rooli perustusrakenteiden päästöistä

Ympäristöministeriö on esittävänsä, että ilmastaselvitys tulee osaksi rakennuslu-pakäsittelyä. Siihen kuuluu keskeisesti rakennusten hiilijalanjälkeä koskevia ra-joituksia, jotka riippuvat rakennuksen tyypistä, mitä ei saa ylittää. Teollisuus on reagoinut näihin tuleviin vaatimuksiin kehittämällä vähähiilisiä rakennusmateriaa-leja. Betonialalla on käynnissä monia hankkeita, joissa tutkitaan sementtiä kor-vaavia sideaineita siten, että tuotteen alkuperäiset ominaisuudet, kuten lujuus, kestävyys ja työstettävyys, säilyvät. Tämä tutkimus- ja kehitystyö tähtää vähähii-lisen betonin valmistukseen. Lisäksi Betoniyhdistys on laatinut vähähiilisyysluoki-tuksen, jota voidaan hyödyntää betonirakentamisen hiilijalanjäljen pienentämi-ssä.

(Betoni-lehti. 2022)

### 6.1 Betonin vaikutukset perustuksien hiilijalanjälkeen

Betonin merkitystä perustusten hiilijalanjäljessä on tutkittu aiemmin, ja näitä tut-kimustuloksia voidaan hyödyntää tässä työssä. Viitatus tutkimusartikkelin laskel-maan hiilijalanjäljessä arvioitiin käyttämällä One Click LCA -ohjelmaa, mitä myös tämän työn vertailulaskelmissa on käytetty. Tutkimuskohteena oli kahdeksanker-roksinen betonielementtirakennus, jonka perustukset koostuvat teräs- ja teräsbe-tonipaaluista. Sen kokonaispinta-ala on 4583 m<sup>2</sup> ja huoneistoala 3962 m<sup>2</sup>. Väli-pohjien kantavissa rakenteissa on käytetty ontelolaattoja, joiden paksuus vaihte-lee 265 mm, 320 mm ja 370 mm välillä, betoniluokassa C40/50, kun taas muissa betonirakenteissa lujuusluokka on C30/37.

(Betoni-lehti. 2022)

Perustukset	teräsbetoni		
Paalut	300×300 teräs- betonipaalut, koko- naispituus 347 m	RD 140/8 teräs- paalu, kokonaispi- tuus 235 m	

Kuva 1 Viitatus tutkimuksen perustuksien ja paalujen rakennusmateriaali ja koot

(Betoni-lehti. 2022)

Tutkimuksen kohde eroaa JM Suomi Oy:n asuntotuotannosta. JM Suomi Oy:n asuntotuotanto perustuu paikkallavaluholvein toteutettuihin kerrostaloihin, eikä siten tutkimuskohteena olevan ontelolaattojen avulla rakennetun kohteen ala- ja yläpohjista aiheutuneiden päästöjen vertailu ole soveltuvaa. Tutkimuskohteessa perusratkaisuna käytettiin paalutusta, joka on rakennusalalla yleinen perustustapa, joten sen aiheuttamista päästöistä saatua tutkimusdataa, voidaan hyödyntää tässä työssä. (Betoni-lehti. 2022)

Rakenteisiin sitoutuneen hiilijalanjäljen laskenta tehtiin erikseen jokaiselle rakennetyypille, mutta paalut ja perustukset käsiteltiin yhtenä kokonaisuutena. Laskenta kattoi elinkaaren vaiheet A1-A5 ja C1-C4, eikä rakennuksen käyttöaikaa (vaihe B elinkaarilaskennassa) sisällytetty laskelmiin, sillä tutkimuksen painopiste oli rakenteisiin sitoutuneen materiaalin hiilijalanjäljessä ja sen vähentämismahdollisuuksissa. Tarkastelu perustui 50 vuoden elinkaareen ympäristöministeriön ohjeistuksen mukaisesti. Tässä tutkimuksessa laskenta suoritettiin One Click LCA -ohjelmiston tiedoilla, ja vähähiilisen betonin osalta tietoa saatiin valmisbetonitoimittajilta sekä betonielementtivalmistajien ympäristöselosteista (EPD). Ohjeistus perustui standardeihin EN-15978 ja EN-15804. (Betoni-lehti. 2022)

## **6.2 Vähähiilinen betoni**

Nykyään on olennaista vähentää ilmaston lämpenemistä kiihdyttäviä päästöjä kaikilla aloilla. Tämä merkitsee siirtymistä vanhasta mallista, jossa materiaaleja käytetään vain kerran, uuteen toimintatapaan, jossa pyritään uudelleenkäyttöön ja materiaalien kierrättämiseen. Betoni, jota käytetään valtavia määriä eri rakennushankkeissa, on perinteisesti valmistettu tuoreista raaka-aineista. Nyt kuitenkin kehitetään ympäristöystävällisempiä betonityyppejä, joissa osa perinteisistä aineksista korvataan uusiokäytetyillä ja kierrätetyillä materiaaleilla. Erityisesti sementin vähentäminen on tärkeää, koska juuri se tuottaa betonin valmistuksessa suurimman osan päästöistä. (Betoni-lehti 2022).

Tämän uuden lähestymistavan mukaisesti kehitettyjä betonituotteita kutsutaan esimerkiksi vähähiiliseksi tai ilmastoystävälliseksi. Tässä yhteydessä käytämme termiä vähähiilinen betoni. Tämän tyyppisessä betonissa tarvitaan erityistä tarkkuutta, koska perinteisen sementin vähentäminen vaikuttaa seoksen rakenteeseen ja käyttöominaisuuksiin. Betoniseoksen osat – kuten kivimurska, vesi ja erilaiset lisäaineet – on valittava ja suhteutettava huolella, jotta se vastaa tarvittavia laatustandardeja. Käytännössä tällaiset materiaalit voivat auttaa vähentämään luonnonvarojen käyttöä, koska perinteisten luonnonvarojen sijaan voidaan hyödyntää vaihtoehtoisia raaka-aineita. (Betoni-lehti 2022)

Rakennusten suunnitteluvaiheessa materiaalivalinnoilla voi vaikuttaa suoraan rakennusprojektin ympäristövaikutuksiin. Materiaalitehokkuus on tärkeä keino vähentää rakentamisen ilmastovaikutuksia. Betonin kestävyys kannalta lujuus ja käytettävyys ovat keskeisiä ominaisuuksia, mutta myös kyky säilyttää nämä ominaisuudet ajan mittaan on olennaista. Rakenteiden käyttöikä suunnitellaan siten, että ne toimivat tietyssä ympäristössä ilman suurempia vaurioita. Esimerkiksi 50 vuoden suunnittelukäyttöikä tarkoittaa, että rakennetta on huollettava säännöllisesti, mutta sen odotetaan kestävän ilman suuria vaurioita koko tämän ajan ja usein pidempäänkin.

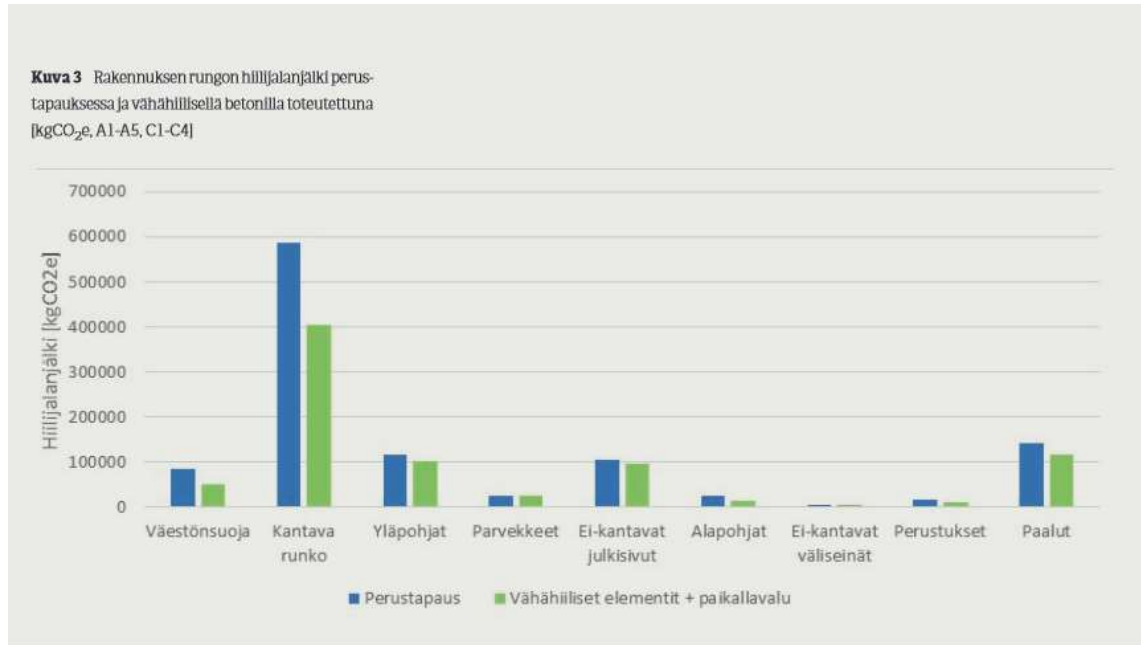
(J.Rajala 2023)

Rakennusten suunnittelussa arvioidaan myös, millaiseen ympäristöön rakenne sijoittuu ja mitkä tekijät voivat vaikuttaa sen kestävyteen. Tietyt rasitusluokat kuvaavat sitä, miten eri ympäristöolosuhteet, kuten kosteus tai saasteet, voivat vaikuttaa betonin kestävyteen pitkällä aikavälillä. Esimerkiksi jotkin betonit kestävät hyvin sateessa ja kosteudessa, kun taas toiset soveltuvat paremmin suola- tai pakkasolosuhteisiin. Rasitusluokan valinta suhteessa ympäristöön auttaa varmistamaan rakenteen pitkän käyttöiän ja myös säästää kustannuksia, kun ylimitoitusta ei tarvita. Betonin kokonaiskestävyys riippuu monista tekijöistä, kuten sen koostumuksesta, valmistustavasta ja käyttöympäristöstä. (Betoni-lehti 2022)

Rakennusvaiheessa on tärkeää arvioida kaikki keskeiset tekijät, jotka voivat ajan mittaan vaikuttaa rakenteiden toimivuuteen ja luotettavuuteen. Materiaalitehokkuus tarkoittaa tietyille materiaalitarpeelle asetettujen vaatimusten täyttämistä pienemmällä prosessoinnin ja materiaalituotannon määrällä. Suunnittelijoiden



perustuu C30/37-betonin ja ontelolaatan hiilidioksidipäästöihin, vähähiilistä betonia on käytetty kaikissa säältä suojatuissa rakenteissa. Tämä lähestymistapa voi pienentää rakennuksen hiilijalanjälkeä jopa 24 prosentilla verrattuna tavanomaisiin betonirakenteisiin, ja joissakin osissa, kuten välipohjissa ja paalutuksessa, päästöt voivat pienentyä jopa yli 40 prosenttia (Betoni-lehti 2022).



Kuva 3 Vähähiilisen betonin vaikutus hiilijalanjälkeen (Betoni-lehti. 2022)

Vähähiilisestä betonista toteutetun asuinkerrostalon hiilijalanjälki on 24 prosenttia pienempi kuin perustapauksen. Yksittäisissä rakennusosissa, kuten ontelolaattavälipohjissa, maanvaraisissa betonilattioissa sekä paikallavaletuissa seinissä ja perustuksissa, voidaan päästä yli 40 prosentin hiilijalanjäljen vähennykseen. Kantavan rungon osuus rakenteiden kokonaishiilijalanjäljestä on perustapauksessa 53 prosenttia. Myös vähähiilisellä betonilla toteutettuna kantavan rungon osuus on suurin, 45 prosenttia, mutta kokonaispäästöt ovat laskeneet rungon osalta noin kolmanneksen.

(Betoni-lehti (2022))

### 6.3 Vähähiilisen betonin käyttäminen perustusrakenteissa

Perustusten rakenteet sijaitsevat pääasiassa maan alla tai aivan pinnan tuntumassa. Maan alla olevat rakenteet, kuten anturat, ovat tasaisessa lämpötilassa, jossa pakkaselle altistuminen on vähäistä. Maanalaisessa ympäristössä vallitsee

jatkuva kosteus, minkä vuoksi perustusten rasitusluokka on usein XC2. Lähempänä maanpintaa lämpötila ja kosteus vaihtelevat enemmän, jolloin tuulettuvien alapohjien, joissa eriste on yläpuolella, rasitusluokka on yleensä XC3. Jos eriste sijoittuu maan ja alapohjan väliin, käytettävä luokitus on XC1. Sokkelin sisäpuolen rasitusluokaksi sopii XC3, kun taas ulkopuolella voi olla tarpeen käyttää esimerkiksi XC3.4- tai XF1-luokitusta. Rasitusluokitus ohjaa myös betonin valintaa: tietyissä luokissa, kuten XC2 ja XC3, voidaan hyödyntää vähähiillistä betonia, kuten Portland- tai masuunikuonasementtejä, jotka pienentävät päästöjä merkittävästi. Perustuksiin tarvitaan vähemmän betonia kuin rakennuksen muihin osiin, mutta vähähiillinen betoni on edelleen hyvä vaihtoehto perustusrakenteiden päästöjen vähentämiseksi (Rajala 2023).

BY-Vähähiilisyysluokitus® on kotimainen ja vapaaehtoinen luokitusjärjestelmä, joka pyrkii vähentämään betonin hiilidioksidipäästöjä tarjoamalla yhtenäisen ja puolueettoman tavan arvioida eri vähähiillisiä betonityyppejä. Tämän menetelmän avulla rakennuttajat ja suunnittelijat voivat tehdä ympäristöystävällisempiä materiaalivalintoja, ja silti säilyttää toimittajien välinen kilpailu. Sekä valmisbetoneille että betonielementeille on luotu omat luokitustaulukot, joiden ylläpidosta vastaa Suomen Betoniyhdistys ry (Vähähiillinen Betoni).

Rakennusalalla on suuri potentiaali hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen, ja alan sääntely sekä hiilipäästöjen hinnoittelu luovat painetta siirtyä vähäpäästöisiin ratkaisuihin. Tulevat EU:n taksonomiaan liittyvät säännöt sekä päästörajoitukset tukevat myös vähähiillisen rakentamisen yleistymistä. Rakentamislakiin on vuonna 2025 tulossa vaatimuksia ilmastaselvityksistä sekä hiilikatoista lupaprosessissa, mikä tekee rakennusmateriaalien päästövaikutusten ilmoittamisesta entistä olenaisempaa (Vähähiillinen Betoni). Rakennusmateriaalien päästöjä voidaan esittää eurooppalaisen standardin mukaisilla ympäristöselosteilla (EPD, Environmental Product Declaration), joissa esitetään hiilidioksidipäästöjen lisäksi muita ympäristövaikutuksia ja joiden luotettavuus varmistetaan ulkopuolisella arvioinnilla. Valmisbetonituotannon moninaisuuden vuoksi tuote- tai valmistajakohtaisten ympäristöselosteiden laatiminen voi olla käytännössä raskasta, jolloin BY-Vähähiilisyysluokitus® tarjoaa vaihtoehdon. Tämä järjestelmä mahdollistaa valmistajakohtaisen päästöjen ilmoittamisen yksinkertaistetussa muodossa, mikä helpottaa vähähiillisten betonien valintaa (Vähähiillinen Betoni).

Kai Järvisen diplomityössä haastatellut asiantuntijat toivat esiin, että kuonabetonin lopullisia lujuusominaisuuksia voitaisiin hyödyntää laajemmin, jos työmaan, betonin toimittajan ja suunnittelijan välinen kommunikaatio toimisi sujuvammin. Esimerkiksi anturoiden valuissa, joissa tiedetään, ettei niitä kuormiteta heti täydellä teholla, voitaisiin rakennesuunnittelijan hyväksynnällä vähentää betonin si-deaineipitoisuutta tai korvata osa sementistä kuonalla. Tämä edellyttää kuitenkin työaikataulujen yhteensovittamista ja suunnittelijan sekä urakoitsijan välistä yhteistyötä (Järvinen 2021).

Vähähiilisempien betonien käyttö, erityisesti masuunikuonapohjaisten, sisältää kuitenkin joitakin tuotantoteknisiä haasteita, kuten hitaamman lujuudenkehityksen ja kuivumisen, etenkin kylmissä olosuhteissa. Mitä vähähiisemmäksi betoni seostetaan, sitä hitaampaa on sen lujuudenkehitys, joten vähähiilisyyden taso on syytä arvioida tapauskohtaisesti. Tässä käsitellään niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat betonin lujuudenkehitykseen ja sitä kautta työmaan toimintaan. Lähdeaineistona ovat olleet haastattelut ja kirjallisuus, jotka toimivat pohjana myös tehdyille johtopäätöksille (Järvinen 2021).

#### **6.4 Betonin vähähiilisyysluokituksen selite**

BY-Vähähiilisyysluokitus on kansallinen järjestelmä, jonka avulla betonin CO<sub>2</sub>-päästöt voidaan ilmoittaa yhtenäisellä tavalla. Tämän luokituksen tavoitteena on tarjota rakennusalalle riippumaton ja yhtenäinen menetelmä vähähiilisten betoni-laatujen merkitsemiseksi niin valmisbetonin kuin betonielementtienkin osalta. Päästöluokitus mukailee betonin lujuusluokkien tapaa, mikä helpottaa vähähiilisen betonin määrittelyä rakennussuunnittelun vaiheessa. Luokituksen päätavoitteena on vähentää hiilidioksidipäästöjä betonin valmistuksessa. (Vähähiilinen Betoni)

Luokitus jakaa betonilaatuja viiteen eri luokkaan päästöjen perusteella. Valmisbetoneille on määritelty 18 eri laatua, ja betonielementtien osalta luokituksessa

on 17 eri betonilaatua. Luokitukset perustuvat sekä betonireseptiin että valmistusasemaan. Valmistaja voi liittää betonireseptinsä tähän luokitukseen edellyttäen, että päästöarvot täyttävät BY-Vähähiilisyysluokituksen vaatimukset. (Vähähiilinen Betoni)

Suomen Betoniyhdistys ry on kehittänyt ja ylläpitää BY-Vähähiilisyysluokitus®-järjestelmää. Luokitus valmisbetoneille laadittiin vuosien 2021–2022 aikana ja betonielementeille vuosien 2022–2023 aikana yhteistyössä Suomen Betoniyhdistys ry, Betoniteollisuus ry ja Aalto-yliopiston kanssa. Ohjausryhmänä toimi BY hallituksen nimeämä asiantuntijaryhmä. BY-Vähähiilisyysluokitus® on Suomen Betoniyhdistyksen omistama tavaramerkki, jota BY-Koulutus Oyä on käyttöoikeus. Luokitukseen liittyvät materiaalit ovat saatavilla internet-sivuilta, joilta löytyy maksuttomia käyttöohjeita suunnittelijoille, tilaajille ja betonin valmistajille. Näillä sivuilla on myös vuosittain päivittyvä taustaraportti, jossa kuvataan luokituksen periaatteet sekä päästölaskelmissa käytettävät raaka-aineiden, kuljetusten ja energian ominaispäästöt. Sivustolta on pääsy maksulliseen BY-Vähähiilisyyslas-kuriin, jonka avulla betonireseptin mukaiset hiilidioksidipäästöt voidaan laskea standardin SFS-EN 15804:2012 + A2:2019 mukaisesti, huomioiden vaiheet A1–A3. Luokituksessa käytetään tunnusta GWP.NN, jossa NN ilmaisee päästötason suhteessa referenssitason. GWP tulee sanoista "Global Warming Potential." Esimerkiksi merkintä GWP.85™ tarkoittaa, että betonin hiilidioksidipäästöt ovat enintään 85 % suhteessa referenssitason. Referenssitaso pohjautuu valmisbetonin osalta suomalaisten valmistajien keskimääräisiin päästötasoihin vuodelta 2021 ja betonielementtien osalta vuodelta 2023. Luokituksen päästöarvot koskevat yksinomaan betonia, eivät rakenteiden raudoitusta, kuljetuksia tai työmaatoimintoja. Näin ollen GWP-luokkaa ei voida suoraan soveltaa koko rakennukseen tai betonielementtiin. (Vähähiilinen Betoni)

Vähähiilisyysluokitus on tarkoitettu käytettäväksi vain Suomessa valmistetuille betoneille ja betonielementeille, koska luotettavat ominaispäästöarvot ovat saatavilla vain suomalaisille raaka-aineille ja energiantuotannolle sekä alan keskimääräiselle hukkamäärälle. GWP-tunnukset, kuten GWP.REF™, GWP.85™, GWP.70™, GWP.55™ ja GWP.40™, ovat Suomen Betoniyhdistys ry tavaramerkkejä. GWP-tunnuksia saa käyttää vain, kun kyseessä on betoni, joka täyttää

BY-Vähähiilisyysluokituksen mukaiset vaatimukset. Näiden luokkien mukaiset päästöarvot on laskettava Suomen Betoniyhdistyksen hyväksymällä laskurilla, ja laskelmat tulee vahvistaa Suomen Betoniyhdistyksen hyväksymän kolmannen osapuolen toimesta.

(Vähähiilinen Betoni)

## 6.5 Huomioitavaa vähähiilistä betonia käytettäessä

Vähähiilisyysluokitus ei poista betonille asetettuja muita perusvaatimuksia, kuten lujuutta ja kestävyyttä, jotka on täytettävä normaalisti myös vähähiilisen betonin käytön yhteydessä. Esimerkiksi betonin rasitusluokat tulee täyttää aivan samalla tavalla kuin perinteisen betonin kohdalla, ja tästä syystä vähähiilisyysluokan valinnassa tulee tarkoin huomioida kaikki perusominaisuudet. On myös tärkeää ymmärtää, että vähähiilisen betonin valinta voi vaikuttaa betonin muihin ominaisuuksiin, erityisesti lujuuden kehitykseen ajan myötä. Vähähiilisyysluokan valintaprosessissa on lisäksi otettava huomioon erilaisten betonilaatujen saatavuus. Betonialalla on eroja vähähiilisyysluokkien saavuttamisessa, ja esimerkiksi infrarakentamiseen käytettävissä P-lukubetoneissa Väyläviraston määräykset voivat rajoittaa joidenkin alhaisimpien vähähiilisyysluokkien käyttöä. (Vähähiilinen Betoni)

Kuvassa 4 esitetään arvio vähähiilisyysluokiteltujen valmisbetonien saatavuudesta marraskuussa 2023. Tätä arviota päivitetään säännöllisesti, ja oletuksena on, että vihreän alueen laajuus kasvaa ajan myötä saatavuuden parantuessa, laajeten oikealle ja alaspäin. On kuitenkin huomioitava, että betoniasemien ja alueiden väliset erot voivat vaikuttaa vähähiilisten betonilaatujen saatavuuteen, joten on aina suositeltavaa varmistaa ajantasainen tilanne suoraan valmistajalta. Betonielementtien saatavuusarvio julkaistaan myöhemmin, mutta on tärkeää huomata, että alimpien GWP-luokkien saavuttaminen ei ole mahdollista käytettäessä valkosementtiä. Tämän vuoksi alhaisimpien vähähiilisyysluokkien käyttömahdollisuuksia rajoittaa myös käytetty sementtityyppi, mikä voi vaikuttaa vähähiilisyysluokiteltujen tuotteiden valikoimaan.

(Vähähiilinen Betoni)

Betoni	Laadunarvosteluikä	GWP REF	GWP 85	GWP 70	GWP 55	GWP 40
C20/25 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C25/30 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C30/37 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C35/45 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C40/50 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Green	Light Green	Red
C45/55 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C50/60 – Ei huokostettu	28 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C30/37 – Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C35/45 – Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Light Green	Yellow	Red
C40/50 – Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
C45/55 – Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
C50/60 – Huokostettu	28 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red
	91 vrk	Green	Green	Yellow	Red	Red

Kuva 4 Eri päästölukujen arvioitu saatavuus vuonna 2023 (<https://vahahiilinen-betoni.fi/#table3>) (Vähähiilinen Betoni)

## 6.6 Vähähiilisen betonin lujuudenkehitys

Betonin puristuslujuus, eli kyky kestää puristusvoimia, on sen tärkein rakenteellinen ominaisuus. Betoni luokitellaan lujuusluokkiin puristuslujuuden perusteella, ja tämä luokka määrittää myös monet muut suunnittelussa käytetyt tekniset ominaisuudet, kuten vetolujuuden, taivutuslujuuden, kimmokertoimen ja säilyvyyden. Betonista saadaan yleisesti puristuslujuusarvot 28 vuorokauden iässä, mutta tarvittaessa myös 91 vuorokauden testit ovat mahdollisia. Lujuus mitataan standardiolosuhteissa (20 °C) säilytetystä betonista joko lieriö- tai kuutiokokeella eurokoodin mukaisesti (Betonitieto).

Varhaislujuutta mitataan, jotta tiedetään, milloin muotit voidaan purkaa, ja varhaislujuus vaikuttaa myös betonin halkeiluriskeihin. Sementin tyyppi, mahdolliset lisäaineet, lämpötila sekä jälkihoito vaikuttavat kaikki lujuuden kehitykseen. Lujuudenkehitystä voidaan ennakoita tietokoneohjelmilla, jotka arvioivat lujuutta tai

laskevat sen hetkisen arvon rakenteesta mitattujen lämpötilojen avulla (Betoni-tieto).

Lisäksi jäätymlujuus on tärkeä työmaan ja elementtituotannon kannalta, sillä se tarkoittaa betonin lujuustasoa, jossa betoni voi jäätymättä ilman merkittävää vaurioitumista. Talvibetonoinnin yhteydessä tämä merkitsee sitä, että lämmitys voidaan keskeyttää, mutta muotteja ei saa poistaa ennen kuin purkulujuus on saavutettu. Lämpötilasta riippumatta jäätymlujuuden tulee olla vähintään 5,0 MPa (Betoni-tieto). Muotit voidaan poistaa, kun betonin on todettu saavuttaneen riittävän lujuuden kestääkseen rakenteelle asetetut kuormitukset ja välttääkseen liian suuret muodonmuutokset. Tämä tarkoittaa usein, että betonin on oltava vähintään 60 prosenttia lopullisesta nimellislujuudesta, ellei suunnitelmassa ole toisin määriteltä. Muotipurkulujuus voidaan osoittaa laskemalla, ja jos rakenteen toiminta on muottien purkuvaiheessa samanlaista kuin valmiissa rakenteessa, samoja laskentamenetelmiä voidaan hyödyntää. Riittää, kun määritetään, kuinka suuri osa suunnittelukuormista kohdistuu rakenteeseen muottien purun aikana (Betoni-tieto).

Vähähiiliset betonit, erityisesti masuunikuonalla osittain korvatut sementtityypit, kehittävät lujuutta hitaammin. Masuunikuonalla on kuitenkin edullinen vaikutus betonin loppulujuuteen, joka on usein korkeampi kuin perinteisen CEM I-tyypin sementillä valmistetussa betonissa. Lujuudenkehitys on sidoksissa lämpötilaan ja hydrataatioprosessiin, jotka määräävät betonin lopullisen kovuuden (Orfanoudaki & ym., 2022).

Masuunikuonalla tehdyt betonit vaativat erityishuomiota kylmissä olosuhteissa, joissa hydraatioprosessi hidastuu merkittävästi. Näissä tilanteissa on suositeltavaa pidentää kovettumisaikaa 91 vuorokauteen, jos masuunikuonan osuus sideaineesta ylittää 40 prosenttia. Kylmässä tapahtuva lujuudenkehitys edellyttää nopeasti kovettuvien sementtien käyttöä, jotka tuovat riittävää lujuutta matalissa lämpötiloissa (Tompuri, 2022; Miettinen, 2021).

Kolmossementti, kuten CEM III/A 52,5 L, on noin 40–45 prosenttia masuunikuonaa, mikä auttaa vähentämään päästöjä ja tarjoaa alkulujuuskehityksessä vertailukelpoista suorituskykyä Portland-sementtiin verrattuna. Tämän tyyppisen

sementin lujuus mahdollistaa holvien muotin purkamisen kolmen vuorokauden kuluttua, mikä vastaa tavanomaista rakennusnopeutta (Heikkilä, 2022; Rytsy & Härkönen, 2022).

CEVO-betoni, jonka GWP-luokitus on GWP.40 ja lujuusluokka C30/37, tarjoaa alhaisen hiilijalanjäljen ja nopean lujuudenkehityksen, sillä sen muottipurkulujuus saavutetaan yleensä yhden vuorokauden sisällä (Lavento, 2022). Lisäksi CEM III/A- ja CEM III/B-tyyppisten sementtien lujuudenkehitystä voidaan nopeuttaa kiihdyttimillä, mikä tuo niiden suorituskyvyn lähelle CEM II/B-tyyppisiä sementtejä (J. Rajala 2023).

## 7 Rakennusratkaisuja päästöjen vähentämiseen

### 7.1 Unidome-teknologia

Unidome-teknologia on kehitetty vähentämään rakentamisessa tarvittavan betonin ja raudoituksen määrää kestävämmällä tavalla. Unidome-muottien avulla raudoitetuissa betonilaatoissa voidaan säästää jopa 35 % betonista ja 20 % raudoituksesta ilman kantavuuden heikentymistä. Tämä ei pelkästään kevennä rakenteiden kokonaispainoa vaan myös vähentää materiaalien, energian ja työvoiman tarvetta, jolloin rakennuskustannukset pienenevät merkittävästi. Koska Unidome-muottien avulla betonilaatat voidaan tehdä ohuemmiksi, rakenteet muuttuvat kevyemmiksi ja vapaiden tilojen suunnitteluun syntyy enemmän joustavuutta. Näin tiloihin voidaan suunnitella suurempia jännevälejä vähemmällä tukipilareilla, mikä mahdollistaa avoimempia ja monikäyttöisempiä rakennusratkaisuja. (Sulin Oy 2024)

Unidome-teknologian ympäristöystävällisyyttä lisää se, että käytetyt betonimuotit on valmistettu 100 % kierrätysmuovista. Tämän ansiosta Unidome-tuotteiden käyttö vähentää CO<sub>2</sub>-päästöjä ja energiankulutusta merkittävästi koko rakentamisprosessin ajan, kun materiaalin kulutus pienenee ja työmaiden kuljetustarve vähenee. Unidome-menetelmällä rakenteista saadaan ohuempia, mikä vähentää seinien, perustusten ja pilarien kuormaa. Tämä on erityisen arvokasta kestävän kehityksen kannalta, sillä resurssien säästäminen edistää rakennusalan ympäristövastuullisuutta. (Sulin Oy 2024)



Kuva 5 Unidome-menetelmän hyödyt (Sulin Oy 2024)

Unidome tarjoaa myös monipuolisia sovelluksia erilaisiin rakennuskohteisiin, sillä muotteja on saatavana eri kokoisina ja korkuisina, jolloin niitä voidaan hyödyntää sekä pienissä että suurissa rakennushankkeissa, kuten kouluissa, korkeissa asuinrakennuksissa, palkkirakenteissa ja perustuksissa. Kevyen rakenteen ansiosta Unidome soveltuu hyvin yhteen muiden rakennustapojen kanssa, kuten jälkijännittämisen, betoniydintekniikan ja yhdistelmä rakentamisen kanssa, mikä lisää sen joustavuutta eri rakennustyypeissä. Unidomen suunnittelukonsepti perustuu vuosien tutkimukseen ja kehitystyöhön, jossa on hyödynnetty alan kansainvälisesti hyväksytyjä suunnitteluperiaatteita. Näiden avulla muottien ontelo-

rakenteet lasketaan helposti ja turvallisesti. Teknologia on saavuttanut kansainvälistä suosiota, ja Unidome on palkittu innovatiivisuudestaan kestävänsä rakentamisen saralla. Sen avulla voidaan saavuttaa huomattavia kustannus-, materiaali- ja ympäristösäästöjä, ja siksi se edistää kestävänsä kehityksen tavoitteita rakennusalalla kaikkialla maailmassa. (Unidome Deutschland GmbH 2023)

UNIDOME XS-D-tuotelinja soveltuu käytettäväksi betonirakenteissa, joiden komponenttipaksuus on 50 cm ja 100 cm välillä. Se on ratkaisu erittäin suurille jänneväleille, laattaperustuksille tai korkeuserojen tasaamiseen, ja sen avulla voidaan säästää huomattavasti materiaalia. XS-D mahdollistaa kuorman, betonin ja CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentämisen kaksin- tai jopa kolminkertaisesti. Suunnittelu toteutetaan paikallisten betonirakenteiden standardien mukaisesti käyttäen ribbi- tai kuorilaattoja koskevia säädöksiä.

(Unidome Deutschland GmbH 2023)



Kuva 6 Unidome-menetelmä käytössä (Sulin Oy. 2024)

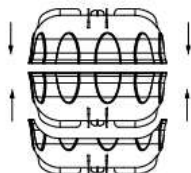
Unidomen asennuksessa ensimmäiseksi puoliosat asennetaan, ja kuhunkin asennuselementtiin kiinnitetään neljästä kuuteen laattakevennettä, mikä auttaa

keventämään rakenteita oikeissa kohdissa. Unifix-pystykoukut kiinnitetään apuvälineiden määrittämällä etäisyyksillä alarauδοitukseen, ja niiden avulla keventimet sitoutuvat tiukasti rakenteeseen. Yläraudoitus asennetaan määrättyihin uriin, ja Unifix-koukut kiinnitetään sen ympärille, mikä varmistaa elementtien pysymisen paikoillaan. (Unidome Deutschland GmbH 2023)

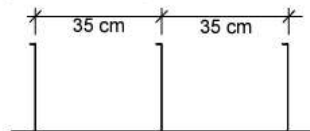
Oikea keventimien asettelu on välttämätöntä halutun 35 cm välimatkan saavuttamiseksi, minkä vuoksi elementtien vaakasuorat välikkeet tulee asettaa kosketuksiin toistensa kanssa. Keventimet asennetaan kahteen kerrokseen tarkasti alimmaisen raudoituksen suhteen, ja taivutus- ja leikkausraudoitusten väliin sijoitetaan lisäraudoitukset dokumentissa esitettyjen mallikuvien mukaisesti. Taivutuksien vähimmäismäärä on määritelty DS-kertoimella, joka perustuu raudoituksen halkaisijaan. Betonoinnissa ensimmäinen kerros suositellaan tehtäväksi noin 12 cm paksuiseksi, ja kiinteän alueen tulee kovettua riittävästi ennen seuraavia työvaiheita. Dokumentti antaa ohjeet lävistysten käsittelyyn betonoinnissa, jotta rakenteen lujuus säilyy. Mikäli suojaetäisyydet vaativat lisätilaa, voidaan käyttää tukia ja välikkeitä, jotka asetetaan laatan reunan ja alarauδοituksen väliin 45 asteen kulmaan. Tämä kattava asennusohje varmistaa, että laattakeventimet ja raudoitus saadaan asennettua oikein ja standardien mukaisesti, mikä tukee rakenteen kestävyyttä ja pitkää käyttöikää. (Unidome Deutschland GmbH 2023)

## Detail 1 XS laattakevenneiden kokoaminen

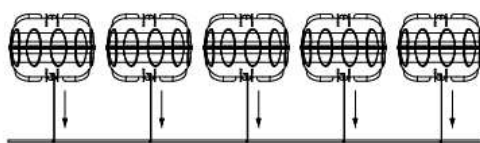
- 1) Puoliosien asentaminen  
(4-6 laattakevennettä per asennuselementti)



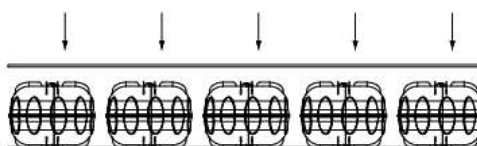
- 2) Unifix-pystykoukkujen kiinnitys (etäisyys annetaan apuvälineiden kautta) Ø6 alaraudoitukseen (4-6 laattakevennettä per elementti)



- 3) Asenna koko kevenne paikalleen alaraudoituksen päälle ja tuo Unifix-koukku läpi

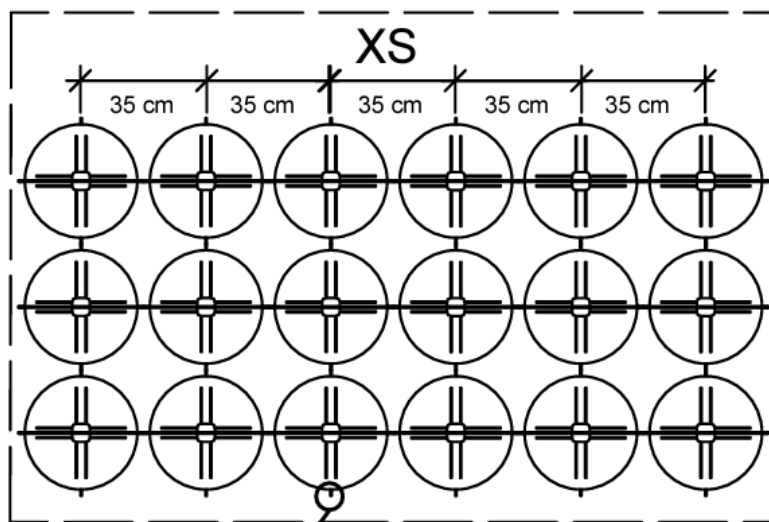


- 4) Asenna yläraudoitus määrättyihin uriin ja kiinnitä Unifix-koukut tangon ympärille, jotta ne sitovat elementit



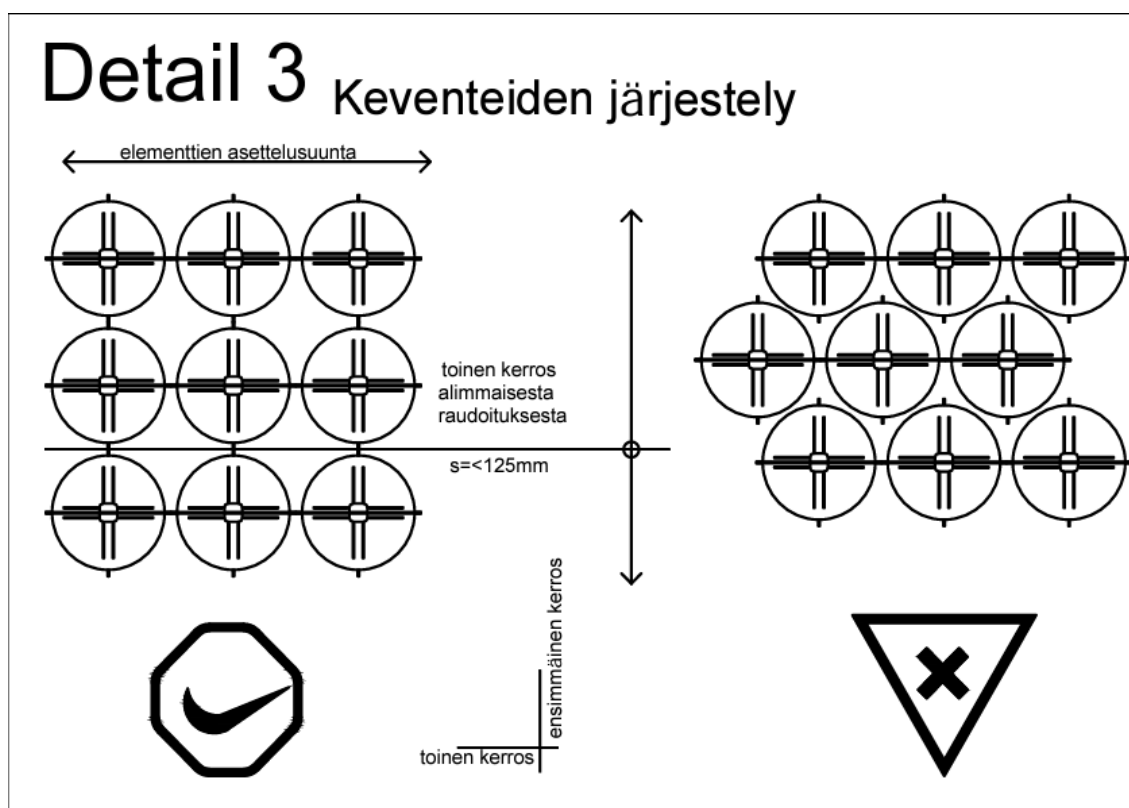
Kuva 7 Laattakevenneiden kokoaminen (Sulin Oy, asennusohje 2024)

## Detail 2 Kevenneiden välinen etäisyys



asenna elementit niin, että elementtien vaakusuuntaiset välikkeet ovat kosketuksessa toisiinsa, jotta saavutetaan suunniteltu etäisyys, mikä on 35 cm.

Kuva 8 Kevenneiden välinen etäisyys (Sulin Oy, asennusohje 2024)



Kuva 9 Keventeiden järjestely (Sulin Oy, asennusohje 2024)

## 7.2 Pecafil perustusratkaisu

Pecafil on MAX FRANKin kehittämä pysyvä muottiratkaisu, joka on suunniteltu erityisesti rakennusprojekteihin, joissa tarvitaan kestävä ja tehokas perustusmuottia. Tämä tuote on saanut laajaa suosiota rakennusalalla sen monipuolisuuden ja kustannustehokkuuden ansiosta. Pecafil-muotti on erityisesti suunniteltu käyttötarkoituksiin, kuten nauhapohjien, erillisperustusten, paalupäiden ja reuna-muottien luomiseen, mutta sen käyttömahdollisuudet ulottuvat myös muille alueille, kuten maanalaisiin rakenteisiin. (Pecafil 2024)

Järjestelmä on kevyt, pysyvä perustusmuotti, joka koostuu kahdesta pääkomponentista: erikoisvalmisteisesta teräksestä valmistetusta säilyttävästä verkko-kankaasta ja kestävästä, keltaisesta polyeteenikalvosta. Tämän yhdistelmän ansiosta Pecafil tarjoaa erinomaisen kestävyuden ja tukevuden, mutta samalla se on riittävän kevyt käsitellä ja asentaa työmaalla. Muotin perusidea on toimia "stay-in-place" (paikalleen jäävä) -ratkaisuna, mikä tarkoittaa, että muotti ei tarvitse poistamista betonin kovettuessa. Tämä säästää aikaa ja työvoimaa, koska

muotin purkaminen ja uudelleenkäyttö eivät ole tarpeen. Muotti jää paikalleen betonin kanssa, mikä tarjoaa erinomaisen suojan perustuksen rakenteelle ja lisää rakennuksen pysyvyyttä. (Pecafil 2024)



Kuva 10 Kuvassa Pecafil-perustusmuotti (Pecafil 2024)

Tämä on joustava ratkaisu moniin erilaisiin perustusmuottitarpeisiin. Se on erityisen hyödyllinen silloin, kun tarvitaan nopeaa asennusta ja helppoa käsittelyä. Tuote on valmistettu useissa eri koossa ja paksuuksissa, mikä mahdollistaa sen mukauttamisen eri rakennusprojektien tarpeisiin. Se soveltuu erinomaisesti perusratkaisuihin, kuten nauhapohjille, anturaperustuksille, paalupäille ja reuna-  
muoteille, mutta sen käyttöalue ulottuu myös muihin erikoissovelluksiin, kuten kellariseinien tai paalujen ympärille tehtäviin eristyskerroksiin. (Pecafil 2024)

Tärkeimmät edut rakentamisen hyötyjen kannalta:

- I. Nopea ja helppo asennus: Pecafil on kevyt ja helposti käsiteltävä, mikä mahdollistaa nopean asennuksen ilman raskaita nostolaitteita.
- II. Ei purkamista: koska muotti jää paikalleen, ei tarvitse käyttää aikaa tai rahaa muotin purkamiseen, puhdistamiseen tai palauttamiseen. Tämä säästää merkittävästi aikaa ja työvoimaa.
- III. Ei nostolaitteita: kevyiden materiaalien ansiosta muotin asennus onnistuu ilman erikoislaitteita.

- IV. Puhdistusaineiden tarpeettomuus: toisin kuin perinteisissä muoteissa, Pecafil-muottia ei tarvitse käsitellä erikoispuhdistusaineilla, mikä vähentää kustannuksia ja ympäristövaikutuksia.
- V. Joustavuus ja räätälöinti työmaalla: voidaan helposti mukauttaa ja leikata oikeaan kokoon työmaalla, mikä lisää sen käyttömahdollisuuksia ja joustavuutta.
- VI. Kestävyys ja turvallisuus: on suunniteltu kestäväksi betonin puristusvoimia, joten se pystyy tukemaan raskaitakin rakenteita ja varmistamaan rakennustyömaan turvallisuuden.

(Pecafil 2024)

Pecafil-pysyvä muotti tarjoaa merkittäviä etuja myös hiilidioksidipäästöjen vähentämisen näkökulmasta yllä lueteltujen etujen ansiosta. Sen käyttö voi tukea ympäristöystävällisempää rakentamista. Muotin asennus ei vaadi raskaita nostolaitteita tai suuria koneita, mikä vähentää polttoaineen kulutusta ja kuljetusten aiheuttamia päästöjä. Muotti on kevyt ja helppo käsitellä, mikä pienentää tarvittavien kuljetusten ja erikoislaitteiden määrää verrattuna perinteisiin muotteihin, jotka usein vaativat suurempia koneita ja purkamisprosesseja. (Pecafil 2024)

Koska muotti jää pysyvästi osaksi rakennusta, sen purkamista ei tarvita, eikä sitä tarvitse kuljettaa pois työmaalta. Tämä vähentää tarpeettomia kuljetuksia ja purkamisprosessien aiheuttamia päästöjä. Toisin kuin perinteiset muotit, jotka usein vaativat uudelleenkäyttöä, puhdistusta ja varastointia. Lisäksi sen valmistusprosessi käyttää vähemmän energiaa verrattuna perinteisiin betonimuotteihin, mikä pienentää materiaalin tuotannon hiilijalanjälkeä. (Pecafil 2024)

Muotin kestävyys ja pitkä käyttöikä tarkoittavat myös vähemmän materiaalihukkaa. Muotti on suunniteltu kestäväksi betonin paineet ja säilyttämään rakenteensa pitkään, jolloin ei tarvitse toistuvasti hankkia uusia muotteja. Tämä optimoi resurssien käytön ja vähentää uusien materiaalien tarpeen, mikä puolestaan pienentää päästöjä pitkällä aikavälillä. Lisäksi muotin käyttö vähentää jätteen määrää, sillä se jää osaksi rakennuksen perustuksia, eikä sitä tarvitse hävittää tai kierrättää kuten perinteisiä irrotettavia muotteja. Pecafil voi myös toimia osana energiatehokkaita rakennusratkaisuja, sillä sen avulla rakennuksen perustuksista voidaan tehdä tehokkaita eristyksiä.

(Pecafil 2024)

Pysyvien muottijärjestelmien asennusprosessi vaatii tarkkuutta ja huolellisuutta, jotta saavutetaan kestävä ja pitkäikäinen rakenne. Ensimmäinen vaihe asennuksessa on työalueen valmistelu sekä maaperän kunnan tarkistaminen. Maaperän tulee olla tasainen, puhdas ja vapaa kaikista ylimääräisistä materiaaleista, kuten roskista ja vedestä, jotta muottijärjestelmä voidaan asentaa ilman häiriötekijöitä. Tämä vaihe on ratkaisevan tärkeä, sillä hyvin valmisteltu alusta varmistaa, että muotit asettuvat paikoilleen tarkasti ja tasaisesti. Jos maaperässä on epätasaisuuksia tai ylimääräisiä materiaalikertymiä, ne tulee poistaa huolellisesti ennen muottipaneelien asennusta. (Pecafil 2024)

Seuraava vaihe on muottipaneelien asentaminen suunnitelluille paikoilleen. Pecafil-muottipaneelit asetetaan siten, että ne ovat linjassa ja oikeassa asennossa kaadon kestämiseksi. Muotit tulee tukea riittävän hyvin, jotta ne kestävät betonin kaadon aikana syntyvän paineen ilman taipumista tai liikkumista. Käytännössä tämä tarkoittaa, että tarvittaessa voidaan käyttää lisätukia, jotka estävät paneelien liikkumisen tai vääristymisen valun aikana. Lisäksi muottipaneelit on kiinnitettävä vahvistettuun raudoitukseen, jolloin ne pysyvät paikallaan myös täytömaan paineen alla. Muottien kiinnitys tulee tehdä ruostumattomilla teräslangoilla tai nailonsiteillä, sillä nämä materiaalit kestävät hyvin ympäristön mahdolliset muutokset eivätkä heikennä muottien kiinnitystä. (Pecafil 2024)

Muottipaneelien asennuksessa on tärkeää kiinnittää huomiota välikkeiden oikeaan käyttöön. Välikkeillä varmistetaan, että betoniraudoituksella on riittävä suojakerros, joka on tärkeä pitkäaikaisen kestävyuden ja korroosiosuojan kannalta. Välikkeet tulee sijoittaa BS7973-standardin mukaisesti vähintään 300 mm välein. Välikkeiden oikea sijoittelu ja porrastus vähentävät betonin valuvioilta, kuten aukkojen tai epätasaisen betonipeitteen syntymisen riskiä. Välikkeiden kantavuuden tulee olla riittävä tukemaan muottijärjestelmää ja kestämään siihen kohdistuva maapaine. Välikkeiden käyttö on ratkaisevaa koko muottijärjestelmän vaikkauksen kannalta, ja on tärkeää varmistaa, ettei välikkeitä aseteta liian tiiviisti tai että niiden sijoittelu ei estä betonin tasaista virtausta. (Pecafil 2024)

Ennen betonin kaatoa tulee suorittaa perusteellinen tarkastus muottien ja raudoituksen asennuksen kunnan varmistamiseksi. Tässä vaiheessa tarkistetaan, että muotit ovat oikeassa linjassa, kaikki välikkeet ovat paikoillaan ja että muottien ja

raudoituksen ympärillä ei ole ylimääräisiä materiaaleja tai kiinnitysvälineitä, jotka voisivat haitata betonin kaatamista tai lopullisen rakenteen kestävyyttä. Kaikki puutteet tai epätarkkuudet tulee korjata ennen kaatoa. Jos muotteja tai raudoitusta täytyy irrottaa ja säätää, tämä on tehtävä tässä vaiheessa, jotta vältetään korjaustyöt valun jälkeen, mikä voisi johtaa merkittäviin ongelmiin. (Pecafil 2024)

Betonin kaato tulee tehdä tasaisesti ja hallitusti. Liian nopea kaato voi aiheuttaa liiallista painetta muottipaneeleille, mikä voi aiheuttaa paneelien taipumista tai vääristymistä. Myös liiallinen täyttö voi kuormittaa muottia, joten valutyön hallinta on erityisen tärkeää. On myös tärkeää rajoittaa ajoneuvojen ja raskaan kaluston liikennettä kaivannon läheisyydessä betonin kovettumisen aikana, sillä liiallinen liikenne voi vaikuttaa muottien vakauteen ja betonin lopulliseen rakenteeseen. Kun betoni on kovettunut, siirrytään kaivannon täyttämiseen, joka tulee tehdä kevyesti ja hallitusti. (Pecafil 2024)

Täyttömaa tulee levittää tasaisesti ja kerroksittain, jotta muottiin kohdistuva paine ei kasva liialliseksi ja betonin suojaetäisyys raudoitukseen säilyy suunniteltuna. Täyttö tulee tehdä asteittain siten, että muotti on riittävästi tuettu koko täytön ajan, ja varmistetaan, ettei muotti painu tai liiku täytön aikana. Täyttöä tehdessä tulee myös varoa painamasta muottia tai raudoitusta liian voimakkaasti, sillä tämä voi vaikuttaa suojabetonikerroksen laatuun ja kestävyYTEEN.

(Pecafil 2024)

Alla suomeksi käännetty tarkastuslista Pecafil-muotista, lomakkeeseen vastaan joko ”kyllä tai ”ei” ruutuvalintakohtiin:

### **1.0 Raudoitusvälikkeet**

- Onko urakoitsija käyttänyt BS7973-standardin mukaisia välikkeitä raudoituksen sivu- ja alapinnoille?
- Onko valmistajan BS7973-1 mukainen suoritustason ilmoitus toimitettu?
- Vastaavatko toimitetut sivu- ja alapinnan välikkeet määritellyjä suojabetonin mittoja?
- Onko kuitusementtitankojen pituus rajoitettu enintään 350 mm?
- Onko sivuvälikkeet asennettu vähintään 300 mm
- välein sekä vaaka- että pystysuunnassa (max. 11 kpl/m<sup>2</sup>)?
- Onko välikkeet aseteltu porrastettuun järjestykseen?
- Varmistettu, ettei välikkeitä ole kasattu tai pinottu suojabetonin lisäämiseksi?

- Varmistettu, että välkkeet eivät litisty täyttömaan painon alla? (Jos välkkeet litistyvät ja suojakerros menetetään, katso kohta 3.3)

(Pecafil 2024)

## **2.0 BS7973-standardia rikkomattomat välkkeet, riskien vähentäminen**

- Onko projektipäällikkö tai valvoja tietoinen, jos ei-standardin mukaisia välkkeitä on käytetty?
- Onko suunniteltu laadunvarmistustarkastus betonivalun jälkeen suojakerroksen puutteiden tarkistamiseksi, esim. satunnaisten muottipaneelien poistaminen betonipinnan esiin saamiseksi?
- Jos muovisia linjavälkkeitä on käytetty, onko niiden pituus rajoitettu enintään 350 mm?
- Jos yksittäisiä muovisia välkkeitä on käytetty, onko niiden sivuaukon pienin mitta vähintään 1,5 kertaa karkean kiviaineksen halkaisija, jotta tiivistys onnistuu?
- Onko pehmeästä teräksestä valmistettujen tukien käyttö sivusuojan välkkeinä vältetty?
- Onko puun (edes väliaikaisesti) käyttö sivusuojan välkkeinä vältetty?


(Pecafil 2024)

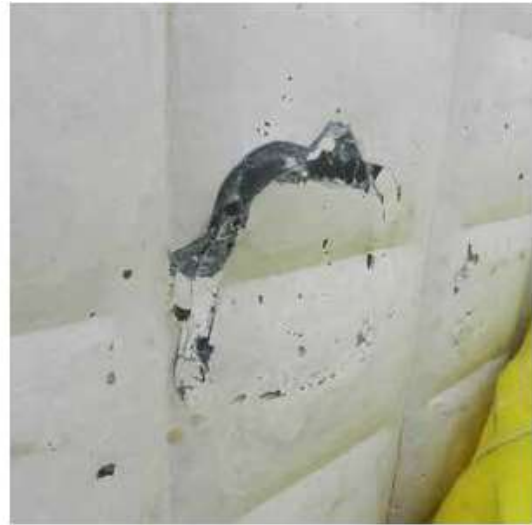
## **3.0 Muottijärjestelmä: Ennen betonin valua**


- Onko urakoitsija tehnyt väliaikaisen rakenteen suunnittelun varmistaakseen, että vaatimukset täyttävä muottijärjestelmä on valittu?
- Onko urakoitsija noudattanut valmistajan suosituksia materiaalin luokasta ja välketyypistä kaivannon syvyyden ja maaperän ominaisuuksien mukaan?
- Onko käytetty "raskaan käytön" kuitusementtisiä sivuvälkkeitä tarpeen mukaan?
- Täytön jälkeen, onko muottien taipuma välkkeiden välillä rajoitettu enintään 5 mm  
(Jos ei, tulee valita jäykempi materiaali suojakerroksen menetyksen estämiseksi)
- Muotit eivät painu kaivannon pohjassa
- Ulottuvatko muotit vähintään T.o.C-tasolle?
- Muotin liitokset päästä täyttömaata muottiin
- Onko muotti vapaa seisovasta vedestä ja epäpuhtauksista?
- Estääkö muotti laastin vuotamisen puristuvien tyhjiömuottisolujen läpi?
- Onko kaikki suojakerrosta ylittävät sitomalangat ja pehmeästä teräksestä valmistetut klipsit poistettu?

(Pecafil 2024)




 Spacers with small apertures are likely to cause "aggregate lock", preventing adequate compaction and leaving voids around reinforcement bars




 Suitable plastic spacers, like those supplied as part of the Pecafil system, have large apertures to enable coarse aggregate to penetrate and achieve good grout flow



 Spacer failure: Compressive strength exceeded by soil pressure, resulting in loss of cover



 Heavy duty cementitious spacer bars have increased compressive strength and resist crushing

Kuva 11 Tyypillisiä virheitä ja hyviä asennustapoja Pecafil-muottia käytettäessä (Pecafil 2024)

## 8 Perusratkaisujen päästövertailu

Tässä työssä vertailen kahden eri 16-kerroksisen betonikerrostalon perusrakenteiden hiilijalanjälkeä. Laskelmiin käytettiin JM Suomi Oy:n tilaamia laskelmia Vesitaito Oy:ltä, joista johdettiin taulukot koskemaan pelkkiä perusrakenteita. Näissä laskelmissa on huomioitu eri suunnitteluvaihtoehdot: toisessa kohteessa perustukset on toteutettu kallionvaraisena anturana, kun taas toisessa on kallionvarainen perustus, johon on lisäksi yhdistetty osittainen paalutus. Vertailu keskittyy pääasiassa näiden eri perustustapojen kasvihuonekaasupäästöihin, jotka on laskettu One Click LCA -ohjelmalla. Tavoitteena on löytää hiilijalanjäljen kannalta optimaalisin perustustapa (Rakentamisen päästötietokanta).

### 8.1 Päästötietokanta yleisesti

Opinnäytetyössä käytetyt laskelmat pohjautuvat rakentamisen päästötietokantaan. Tämä tietokanta tarjoaa kattavaa tietoa rakennusten hiilijalanjäljestä, materiaalikoostumuksesta, materiaalien tehokkuudesta ja kierrätettävyydestä. Sen avulla on mahdollista tarkastella rakennustuotteiden ympäristövaikutuksia, kuten materiaalien haitallisia ja hyödyllisiä ilmastovaikutuksia, niiden kierrätys- ja hyödyntämismahdollisuuksia elinkaarensa päättyessä, työmaalla syntyvää jätettä sekä teknistä käyttöikää usein vaihdettaville tuotteille. Lisäksi tietokanta sisältää päästötiedot rakentamisen eri prosesseista ja palveluista, kuten kuljetuksista, rakentamisesta ja jätteenkäsittelystä (Rakentamisen päästötietokanta).

Tietokanta kokoaa yhteen keskeisten rakennustuotteiden keskimääräisiä päästötietoja. Tiedot perustuvat julkisiin lähteisiin, erityisesti rakennustuotteiden ympäristöselosteisiin, ja niitä on täydennetty asiantuntijatyönä rakennustuoteteollisuudesta saaduilla tiedoilla. Päämääränä on tarjota tietoa Suomessa yleisesti käytettävistä rakennusmateriaaleista sekä rakentamisprosessien ja palveluiden päästöistä. Tämä yhdenmukaistaa laskentatapaa, jolla arvioidaan rakennusten elinkaaren aikaisia ilmastovaikutuksia, ja näin edistetään vähähiilistä rakentamista (Rakentamisen päästötietokanta).

Rakennusmateriaalien elinkaarivaiheita (A1-A3, A5, C2, C3, C4, D1+D2, D4) käytetään arvioimaan niiden ympäristövaikutuksia eri vaiheissa tuotannosta purkamiseen ja kierrätykseen. Nämä elinkaarianalyysin (LCA) vaiheet antavat kattavan kuvan päästöjen muodostumisesta (Rakentamisen päästötietokanta):

A1-A3 (Tuotantovaiheet): Käsittää raaka-aineiden hankinnan (A1), kuljetuksen tuotantopaikalle (A2) ja valmistusprosessit (A3). Näin katetaan materiaalin tuotantoon liittyvät ympäristövaikutukset, kuten energiankulutus ja syntyvät päästöt. (Ympäristöministeriö, 2021).

A5 (Asennusvaihe): Kattaa rakennusmateriaalien asennuksesta aiheutuvat ympäristövaikutukset, mukaan lukien syntyvän jätteen käsittely. (Ympäristöministeriö, 2021).

C2, C3, C4 (Käytön jälkeiset vaiheet): Näihin kuuluvat materiaalien kuljetus purkupaikalle (C2), purkaminen ja materiaalien lajittelu (C3) sekä loppusijoitus, kuten kaatopaikka tai poltto (C4). (Ympäristöministeriö, 2021).

D1+D2 (Kierrätys ja uudelleenkäyttö): Mahdollistaa materiaalien jatkokäytön ja kierrätyksen seuraavia käyttötarkoituksia varten. (Ympäristöministeriö, 2021).

D4 (Jälkikäyttö): Sisältää purkamisen jälkeiset jätehuolto- ja kierrätysprosessit, joiden kautta materiaalit voivat päätyä uusiokäyttöön tai energiakäyttöön (Ympäristöministeriö, 2021).

Ympäristöministeriön menetelmä perustuu Euroopan komission kehittämään Level(s)-järjestelmään, joka pohjautuu eurooppalaisiin kestävän rakentamisen standardeihin (kuten EN 15643 -sarja, EN 15978 ja EN 15804) sekä alan tutkimukseen (Rakentamisen päästötietokanta).

Laskelmissa käytetyt päästökertoimet:

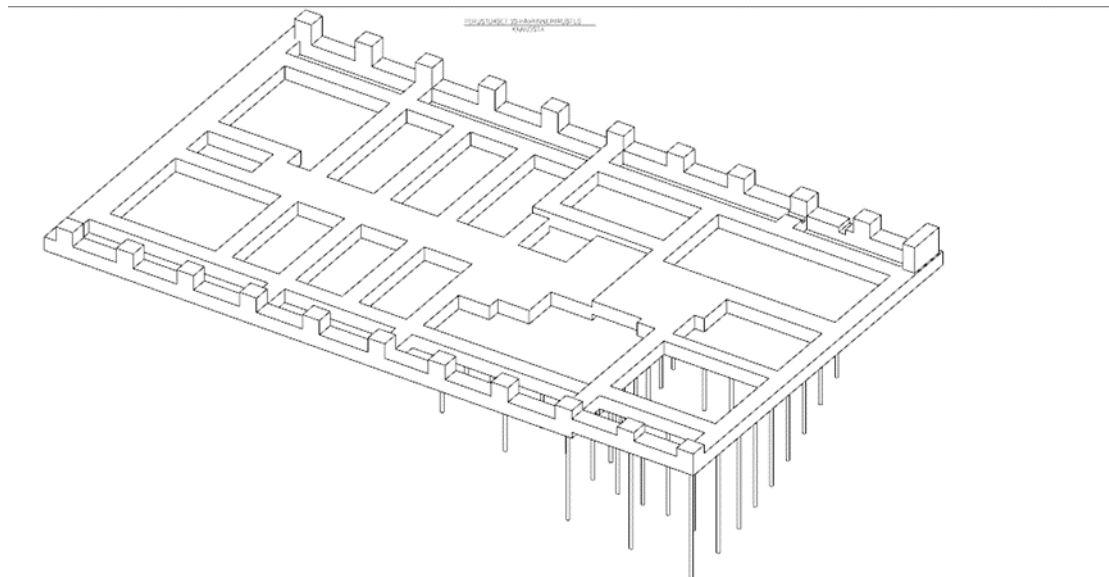
SYKE, CO2data.fi, conservative values, version 1.00.003, 2021-08-23

SYKE, CO2data.fi, conservative values, version 1.00.008, 2022-12-06

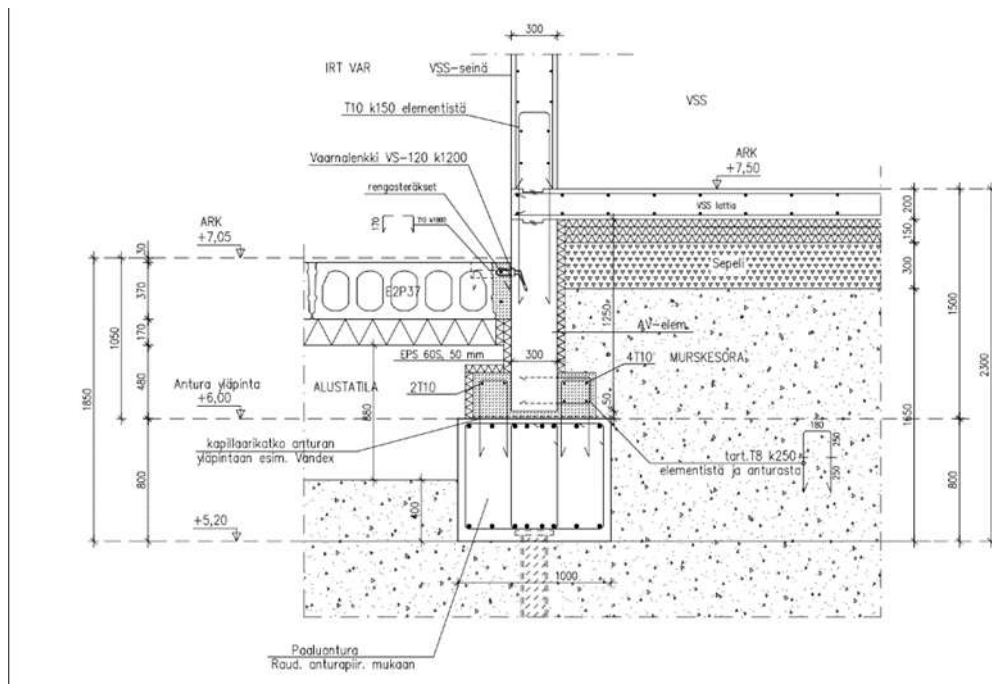
Icopal Primo fuktmembran, NEPD 00207N

## 8.2 Kallionvarainen antura + paaluperusratkaisu

Kohteen perusratkaisussa käytetään kallioanturaa, joka yhdistyy osittain paaluanturaan. Tämä tarkoittaa, että rakennuksen paino jakautuu osittain kalliolle ja paalujen kautta syvemmälle maaperään tai kallioon. Paalut antavat tukea erityisesti niillä alueilla, missä kallion kantavuus ei ole riittävä. Tämä ratkaisu on teknisesti haastavampi ja vaatii enemmän rakennusmateriaaleja, kuten betonia ja terästä, mikä lisää päästöjä.



Kuva 12 Kuvassa kalliooperustus + paaluantura 3D mallina (A-insinöörit)



Kuva 13 Kuvassa perustusleikkaus paaluanturasta (A-insinöörit)

Taulukko 4 Perusrakenteiden materiaalit ja niiden aiheuttamat päästöt

Kallionvarainen antura + paaluperustus materiaalien päästöt			
Materiaalit	Määrä	Päästöt (CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> /a)	Kuvaus
Bitumikermikate, pintakermi TL2, TL2	1062,6 m <sup>2</sup>	0,078 kg	Bitumikermikate toimii vedeneristeenä ja suojaa perustuksia kosteudelta.
EPS-eriste, L = 0,031 W/mK, R = 1 Km <sup>2</sup> /W, 31 mm	160,6 m <sup>2</sup>	0,054175 kg	EPS-eristettä käytetään perustusten lämpöeristyksessä ja parantaa rakenteen energiatehokkuutta.
Kivimurske, 1500 kg/m <sup>3</sup>	3019,9 m <sup>3</sup>	0,5428 kg	Kivimurske estää veden nousun perustuksiin ja jakaa kuormitusta tasaisemmin kallion päällä.
Sokkelilevy, PP-muovi	265,6 m <sup>2</sup>	0,005886 kg	Sokkelilevy varmistaa sokkelin hengittävyuden ja ehkäisee kosteusvaurioita.
Paalut, kantava rakenne, pinnoitettu tai COR-TEN	5692,8 kg	0,32071 kg	Paalut siirtävät kuorman maaperään ja varmistavat rakenteen vakauden.
Teräsrudoite betonirakenteisiin	19 730,7 kg	0,256696 kg	Teräsrudoitus takaa perustuksen kestävyuden ja pitkäaikaisen toiminnan.
Valmisbetoni, C30/37, tiivis (nonporous)	472,63 m <sup>3</sup>	2,48619 kg	Tiivis valmisbetoni
Valmisbetoni, C30/37, huokoinen (porous)	19,4 m <sup>3</sup>	0,1208 kg	Huokoinen valmisbetoni
Paalujatkos, kalliokärki	651 kg	0,045254 kg	Paalujatkoksia ja kalliokärkiä käytetään kuormien siirtämiseen kallioon.

Materiaalin osuus kokonaispäästöistä prosentteina suuruusjärjestyksessä:

1. Valmisbetoni, tiivis (non-porous): 63,57 %
2. Kivimurske: 13,88 %
3. Paalut, kantava rakenne, COR-TEN pinta: 8,2 %
4. Teräsraudoite betonirakenteisiin: 6,56 %
5. Valmisbetoni, huokoinen (porous): 3,09 %
6. Bitumikermikate, pintakermi TL2, TL2: 1,99 %
7. Paalujatkos, kalliokärki: 1,16 %
8. EPS-eriste: 1,38 %
9. Sokkelilevy, PP-muovi: 0,15 %

Valmisbetoni on selkeästi suurin yksittäinen päästöjen lähde, ja sitä seuraavat kivimurske ja paalut.

Kokonaispäästöt kaikista tuotteista ovat 3,910511 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a. Laskennan tulokset ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttien painona jaettuna rakennuksen lämmitetyllä nettoalalla ja arviointijakson pituudella kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a.

(Virkkunen 2020)

Päästöluku 3,910511 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a tarkoittaa, että jokainen neliometri rakennuksen perustuksista aiheuttaa vuosittain noin 3,91 kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia (CO<sub>2</sub>e) kasvihuonekaasupäästöjä. Tämä luku kattaa perustuksiin käytettyjen materiaalien, kuten betonin, teräksen ja eristeiden, valmistuksen, kuljetuksen, asennuksen ja elinkaaren loppuvaiheiden, kuten purkamisen ja kierrätyksen, aikaiset päästöt. Hiilidioksidiekvivalentti (CO<sub>2</sub>e) on mittari, joka ilmaisee, kuinka paljon tietty määrä kasvihuonekaasua (esim. metaani, dityppioksidi) vaikuttaa ilmaston lämpenemiseen verrattuna samaan määrään hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Se mahdollistaa erilaisten kasvihuonekaasujen vertailun yhdellä yhteisellä mittarilla, jolloin kaikki päästöt voidaan esittää ikään kuin ne olisivat hiilidioksidia. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Kun otetaan huomioon, että rakennuksen bruttopinta-ala on 10 515 m<sup>2</sup>, voidaan laskea rakennuksen perustusten aiheuttamat kokonaispäästöt. Laskemalla bruttopinta-ala kerrottuna päästölukemalla saadaan seuraava tulos:

$$3,910511 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2\text{/a} \times 10\,515 \text{ m}^2 = 41\,117,69 \text{ kg CO}_2\text{e/a}$$

(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Tämä tarkoittaa, että koko rakennuksen perustuksista syntyy vuosittain noin 41 118 kg eli 41,1 tonnia hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä. Tämä on huomattava määrä päästöjä ja muodostaa merkittävän osan rakennuksen elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä.

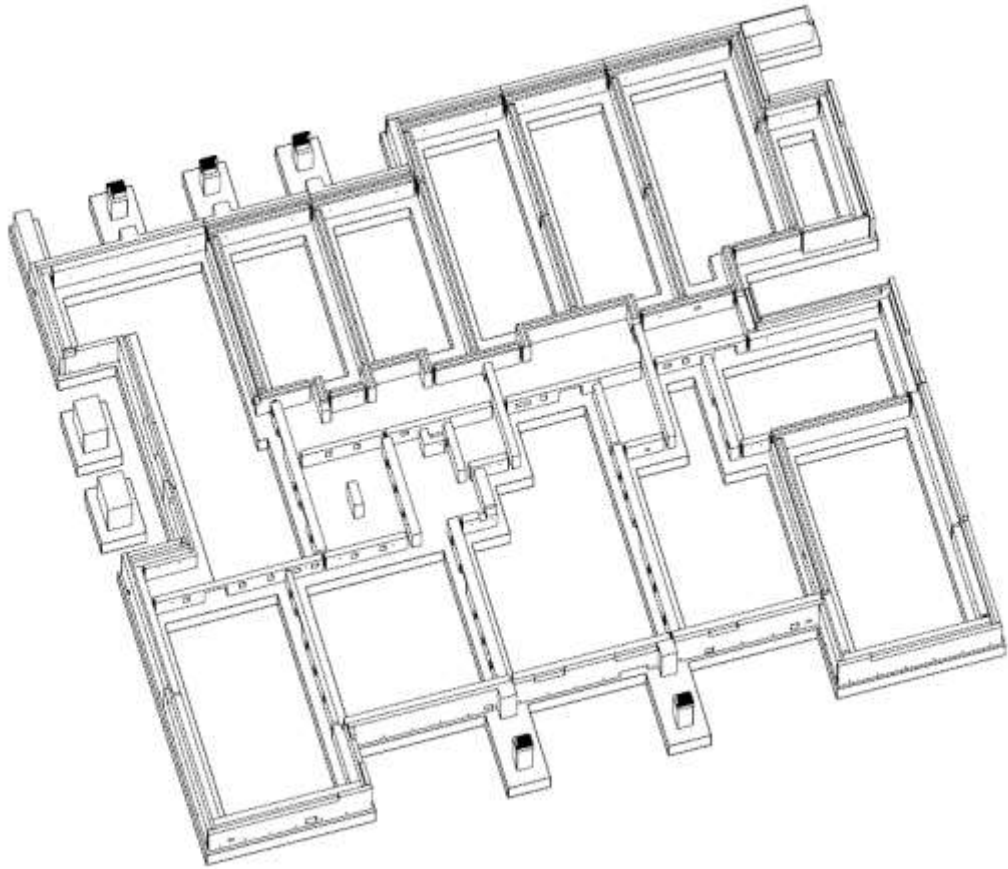
(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

### **8.3 Kallionvaraisen anturan + paaluperustuksen hiilijalanjäljen optimointi**

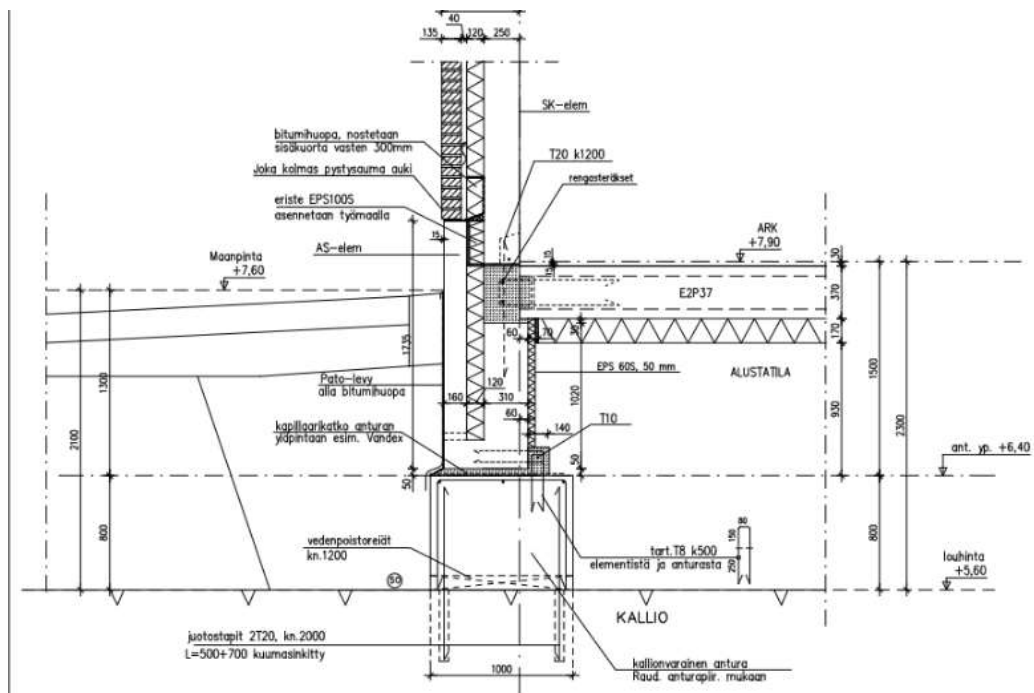
Hiilijalanjäljen optimointi kallioantura + paaluperustus -ratkaisussa voidaan saavuttaa useilla eri keinoilla. Betonin vähähiilisyys on avainasemassa, sillä betonin osuus kokonaispäästöistä on merkittävä. Vähähiilisiä betonilaatuja valitsemalla, joissa käytetään vaihtoehtoisia sideaineita, kuten masuunikuonaa tai lentotuhkaa, voidaan vähentää betonin valmistuksesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Kierätettyjen terästen käyttö voi pienentää teräksen valmistuksen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä. Terästä voidaan kierrättää ja käyttää raudoituksissa ja paaluissa, jolloin syntyvät päästöt vähenevät huomattavasti verrattuna uuden teräksen valmistukseen. Paalutuksen optimointi on myös tehokas tapa vähentää perustuksen hiilijalanjälkeä. Paalutuksen tarkempi suunnittelu ja optimointi, kuten paalujen määrän ja pituuden vähentäminen silloin, kun maaperän kantavuus sen sallii, voisi pienentää tarvittavan teräksen ja betonin määrää, mikä vähentää myös hiilidioksidipäästöjä.

### **8.4 Kallionvarainen antura**

Kohteen perustusratkaisussa käytetään kallionvaraista anturaa. Antura on suoraan yhteydessä louhittuun kallioon, mikä takaa rakenteen vakauden ja kestävyuden. Kallion kantavuus varmistaa, että rakennuksen paino jakautuu tasaisesti.



Kuva 14 Kuvassa kallionvaraisen anturan 3D-mallinnus (A-insinöörit)



Kuva 15 Kuvassa kallionvaraisen perustuksen leikkauskuva (A-insinöörit)

Taulukko 5 Perustusrakenteiden materiaalit ja niiden aiheuttamat päästöt

Kallionvaraisen anturan materiaalien päästöt			
Materiaalit	Määrä	Päästöt (CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> /a)	Kuvaus
Bitumikermikate, pintakermi TL2, TL2	178,1 m <sup>2</sup>	0,01683 kg	Bitumikermikate toimii vedeneristeenä ja suojaa perustuksia kosteudelta.
EPS-eriste, L = 0.031 W/mK, R = 1 Km <sup>2</sup> /W, 31 mm	23,5 m <sup>3</sup>	0,045816 kg	EPS-eristettä käytetään perustusten lämpöeristyksessä ja parantaa rakenteen energiatehokkuutta.
Sokkelilevy, PP-muovi	187,7 m <sup>2</sup>	0,005434 kg	Sokkelilevy varmistaa sokkelin hengittävyys ja ehkäisee kosteusvaurioita.
Teräsraudoite betonirakenteisiin	18 673,6 kg	0,321595 kg	Teräsraudoitus takaa perustuksen kestävyys ja pitkäaikaisen toiminnan.
Valmisbetoni, C30/37, tiivis (nonporous)	318,9 m <sup>3</sup>	2,301 kg	Tiivis valmisbetoni varmistaa kestävyys suurissa kuormitusolosuhteissa.
Valmisbetoni, C30/37, huokoinen (porous)	23,5 m <sup>3</sup>	0,1913 kg	Huokoinen valmisbetoni käytetään vähemmän kuormitetuissa osissa, joissa tarvitaan hengittävyttä.

Materiaalin osuus kokonaispäästöistä prosentteina (suuruusjärjestyksessä)

1. Valmisbetoni, tiivis (non-porous): 79,82 %
2. Teräsraudoite betonirakenteisiin: 11,16 %
3. Valmisbetoni, huokoinen (porous): 6,64 %
4. EPS-eriste: 1,59 %
5. Bitumikermikate, pintakermi TL2, TL2: 0,58 %
6. Sokkelilevy, PP-muovi: 0,19 %

Valmisbetoni on merkittävin päästöjen lähde, jota seuraavat teräsraudoite ja huokoinen betoni. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Kokonaispäästöt kaikista tuotteista ovat 2,883 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a. Laskennan tulokset ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalentin painona, joka on jaettu rakennuksen lämmityksellä nettoalalla ja arviointijaksolla (kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a). (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Päästöluku 2,883 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a tarkoittaa, että jokainen neliometri rakennuksen perustuksista aiheuttaa vuosittain noin 2,88 kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia

(CO<sub>2</sub>e) kasvihuonekaasupäästöjä. Tämä luku kattaa perustuksiin käytettyjen materiaalien, kuten betonin, teräksen ja eristeiden valmistuksen, kuljetuksen, asennuksen sekä elinkaaren loppuvaiheen, kuten purkamisen ja kierrätyksen aikaiset päästöt. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Rakennuksen bruttopinta-ala on 9 410 m<sup>2</sup>, ja kun tämä kerrotaan päästölukemalla, saadaan seuraava tulos: 27,129. 03 kg CO<sub>2</sub>e/a (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Tämä tarkoittaa, että koko rakennuksen perustuksista syntyy vuosittain noin 27 129 kg eli 27,1 tonnia hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä. Tämä on huomattava määrä päästöjä ja muodostaa merkittävän osan rakennuksen elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä.

(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

### **8.5 Kallionvaraisen anturan hiilijalanjäljen optimointi**

Hiilijalanjäljen optimointi kallionvarainen antura -ratkaisussa voidaan saavuttaa vähähiilinen betonin käytöllä ja se on keskeinen tekijä, sillä betonin osuus kokonaispäästöistä on merkittävä. Käyttämällä vähähiilistä betonia, jossa käytetään vaihtoehtoisia sideaineita, kuten masuunikuonaa tai lentotuhkaa, voidaan pienentää betonin valmistuksen hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi kierrätetyn teräksen käyttö raudoituksissa voi merkittävästi pienentää teräksen valmistuksen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä.

Betonin ja teräksen määrän tarkempi suunnittelu, voi vähentää tarvittavan materiaalin määrää, mikä vähentää myös hiilidioksidipäästöjä. Koska tässä ratkaisussa antura on perustettu kallion varaan ilman paaluja, voidaan optimoida kallion käyttö mahdollisimman tehokkaasti ja vähentää materiaalikulutusta alueilla, missä kallion kantavuus on hyvä.

### **8.6 Päästövertailu perustusratkaisujen kesken**

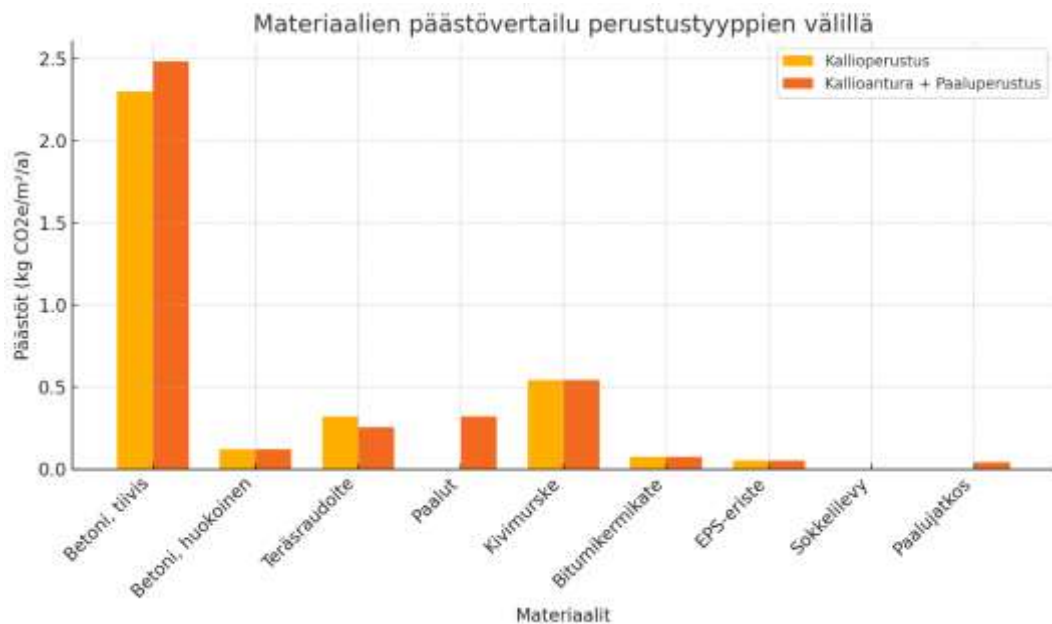
Tässä vertailussa tarkastellaan Kallioperustus ja Kallioantura + Paaluperustus -kohteiden hiilijalanjälkeä sekä käytettyjä rakennusmateriaaleja määrinä ja päästöinä. Molemmat kohteet ovat 16-kerroksisia betoniasuintaloja, mutta niiden perustusrakenteet poikkeavat toisistaan. Kallioperustus käyttää kallionvaraista anturaa, kun taas Kallioantura + Paaluperustus hyödyntää myös lisäksi paaluperustusta, jossa osa painosta jakautuu kallioon ja osa paalujen kautta maaperään.

Näiden perustusten välillä on eroja sekä käytettyjen materiaalien määrissä että niiden aiheuttamissa hiilidioksidiekvivalenttipäästöissä (CO<sub>2</sub>e).

### 8.7 Päästövertailu: Määrät ja prosenttiosuudet

Kallioperustus -kokonaispäästöt ovat 2,883 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a, kun taas Kallioantura + Paaluperustus -projektissa kokonaispäästöt ovat 3,910511 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a. Kallioantura + Paaluperustus aiheuttaa siis noin 35,6 % enemmän päästöjä neliometriä kohden kuin Kallioperustus. Päästöero johtuu pääosin suuremmasta betonin ja teräksen kulutuksesta Kallioantura + Paaluperustus-kohteessa, jossa tarvitaan enemmän materiaaleja kuorman siirtämiseksi syvemmälle maaperään ja paalujen valmistukseen ja asentamiseen.

Taulukko 6 Materiaalien päästövertailu



#### 1. Valmisbetoni, tiivis (non-porous)

- Kallioperustus: 318,9 m<sup>3</sup>
- Kallioantura + Paaluperustus: 472,63 m<sup>3</sup>
- Kallioantura + Paaluperustus -kohteessa valmisbetonin määrä on noin 48,2 % suurempi kuin Kallioperustus -kohteessa. Tämä ero johtuu siitä, että paaluperustus vaatii enemmän betonia paalujen ja perustuksen yhteensovittamiseen.

## 2. Teräsraudoite

- Kallioperustus: 18 673,6 kg
- Kallioantura + Paaluperustus: 19 730,7 kg
- Kallioantura + Paaluperustus -kohteessa teräsraudoitteen määrä on noin 5,7 % suurempi. Tämä ero johtuu paaluperustuksen lisäraudoitustarpeesta paalujen ja anturan yhteensovittamisessa.

## 3. EPS-eriste

- Kallioperustus: 23,5 m<sup>3</sup>
- Kallioantura + Paaluperustus: 160,6 m<sup>2</sup>
- Kallioantura + Paaluperustus -kohteessa käytetty EPS-eriste on huomattavasti suurempi, mikä johtuu perustuksen erilaisesta rakenteesta ja eristysratkaisuista.

## 8.8 Päästöerot materiaaliikohtaisesti

### 1. Valmisbetoni, tiivis (non-porous):

- Kallioperustus: 2,301 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a
- Kallioantura + Paaluperustus: 2,48619 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a
- Kallioantura + Paaluperustus -kohteessa valmisbetonin päästöt ovat noin 8 % suuremmat, mikä johtuu suuremmasta betonimäärästä ja siitä, että kuormitus siirretään paalujen kautta syvemmälle maaperään.

### 2. Teräsraudoite betonirakenteisiin:

- Kallioperustus: 0,321595 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a
- Kallioantura + Paaluperustus: 0,256696 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a
- Kallioperustus -kohteessa teräsraudoitteiden päästöt ovat noin 25,3 % suuremmat, vaikka teräksen määrä on pienempi. Tämä voi johtua siitä, että Kallioantura + Paaluperustus -kohteessa käytetty teräs voi olla valmistettu eri päästökerrointen perusteella tai raudointus on optimoitu eri tavalla.

## 8.9 Päästöerojen syyt

Päästöerot kohteiden välillä johtuvat ensisijaisesti erilaisista perusrakenteista ja käytetyistä materiaaleista. Kallioantura + Paaluperustus -kohteessa paaluperustus vaatii enemmän betonia ja terästä, mikä nostaa kokonaispäästöjä verrattuna Kallioperustus -kohteeseen, jossa perustukset tehdään suoraan kallion vaaraan ilman paalutusta. Kallioantura + Paaluperustus -kohteessa paalujen ja niiden vaatimat lisäraudoitukset lisäävät päästöjä merkittävästi.

Kallioperustus -kohteessa teräsraudoitteen osuus on suhteellisesti suurempi päästölähde, vaikka materiaalmäärä on pienempi. Tämä voi viitata teräksen erilaisiin valmistustapoihin ja päästökertoimiin. Lisäksi perustusten optimointi ja kallion tehokas hyödyntäminen vähentävät materiaalin tarvetta, mikä osaltaan pienentää Kallioperustus -kohteen päästöjä.

## 9 Johtopäätökset ja pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia hiilijalanjäljen pienentämistä rakennusten perustusrakenteiden suunnittelussa vertaamalla kahta eri perustustapaa: kallioantura sekä kallioantura yhdistettynä paalutukseen. Tutkimuksessa käytetty One Click LCA -ohjelmisto mahdollisti päästölaskelmien tekemisen, ja tulosten perusteella pystyttiin tunnistamaan merkittävät erot näiden kahden ratkaisun välillä. Opinnäytetyön tulokset ja vertailut nojautuvat siihen, että saadut laskelmat ovat paikkaansa pitäviä ja oikeita.

Jatkossa olisi hyödyllistä tutkia myös muita perustustyyppisiä ja niiden mahdollisuuksia hiilijalanjäljen pienentämiseen, erityisesti maaperän kantavuudesta riippuvia ratkaisuja. Samalla voitaisiin kehittää entistä tarkempia optimointimalleja, jotka huomioisivat elinkaaren aikana syntyvät päästöt entistä kokonaisvaltaisemmin. Opinnäytetyössä verrattiin myös pelkästään kallionvaraista anturaa toiseen kohteeseen, jossa käytetty perustusratkaisu oli kallionvarainen antura, joka oli myös osittain paalutettu. Tarkemmat vertailut olisi saatu aikaan, jos kallionvaraista anturaa olisi pystytty vertaamaan täysin paalutettuun perustusratkaisuun, mutta sellaisen kohteen aloitus olisi ollut vasta ensi vuoden puolella.

Opinnäytetyössä esiin noussut materiaalien käytön tehokkuus ja suunnitteluprosessien optimointi ovat avainasemassa kohti vähähiilisempää rakennuskantaa. Työn tulokset ovat linjassa valtakunnallisten ja kansainvälisten ilmastotavoitteiden kanssa, ja ne tukevat rakennusalan kestävästä kehityksestä edistäviä pyrkimyksiä. Kestävän rakentamisen periaatteiden noudattaminen tulee olemaan tulevaisuudessa yhä tärkeämpää, kun hiilineutraaliustavoitteet lähestyvät.

Kokonaisuudessaan Kallioantura + Paaluperustus -ratkaisu on päästöintensiivisempi kuin Kallioperustus johtuen paalutuksen ja suuremman materiaalmäärän tarpeesta. Kallioperustus tarjoaa vähemmän päästöjä aiheuttavan ratkaisun, jossa kallion kantavuus hyödynnetään tehokkaasti ilman paalutusta. Kun optimoidaan rakennuksen perustuksen hiilijalanjälkeä, betonin vähentämiseen keskittyminen on tärkeämpää, koska betonin osuus perustuksen kokonaispäästöistä voi olla jopa 80 %. Sementin valmistus tuottaa jopa yhden tonnin hiilidioksidia jo-

kaista tuotettua tonnia kohden. Yhteensä sementin osuus globaalista hiilidioksidipäästöistä on noin 5–8 % ja esim. vuonna 2018 sementin valmistus tuotti 1,6 % Suomen kaikista kasvihuonekaasupäästöistä betoni.com sivuston mukaan.

Yhden tonnin betonin tuotanto aiheuttaa noin 0,6–0,9 tonnia CO<sub>2</sub>-päästöjä, kun taas yhden tonnin teräksen valmistus tuottaa noin 1,8–2,0 tonnia CO<sub>2</sub>-päästöjä betoni.com sivuston mukaan. Vaikka teräksen päästöt per tonni ovat siis suuremmat, betonia käytetään perustuksissa niin paljon enemmän, että sen kokonaispäästöt ovat yleensä huomattavasti suuremmat. Kun betonin määrää vähennetään, voidaan käyttää ohuempia perustuksia, mutta tämä luultavasti vaatii sitten enemmän raudoitusta. Raudoituksen lisääminen taas on kalliimpaa kuin betonin, varsinkin jos lasketaan materiaalin ja työn hinta, työaikakin kasvaa, kun raudoitusta lisätään. Vähentämällä betonin määrää, esimerkiksi käyttämällä vähähiilisiä sementtivalintoja tai kevyempiä rakenteita, voidaan saada aikaan merkittäviä päästövähennyksiä. Sementin korvaaminen ei ole vielä mahdollista luultavasti pitkään aikaan. Nykyiset vaihtoehtoiset materiaalit eivät ole vielä riittävän kehittyneitä tai laajasti hyväksytyjä täyttämään sementin roolia kaikissa sovelluksissa. Sementin korvaaminen muilla materiaaleilla voi olla taloudellisesti kannattamattomaa tai kallista, mikä hidastaa uusien ratkaisujen laajaa käyttöönottoa. Rakennusstandardit ja sääntely ovat pitkälti mukautuneet sementin käyttöön, ja niiden muuttaminen vie aikaa ja vaatii laajaa hyväksyntää.

Vähähiilisen betonin käyttö suunnittelussa vaatii huomion kiinnittämistä sen hitaampaan lujuudenkehitykseen, jotta voidaan saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä alhaisen hiilijalanjäljen betonin avulla. Suunnittelijan on määriteltävä tarkasti, kuinka paljon rakenteisiin voidaan kohdistaa kuormitusta ennen betonin täyttämistä laadunvarmistusikä. Tämä edellyttää betonin lujuudenkehityksen ymmärtämistä tietyissä olosuhteissa, sillä betonin lujuuden kasvu vaihtelee ympäristön lämpötilan mukaan. Olisi hyödyllistä, jos valmistajat tarjoaisivat tarkempaa tietoa siitä, miten heidän vähähiilisten betonituotteidensa lujuus kehittyy eri ympäristöissä, koska valmistajien reseptit voivat vaihdella merkittävästi. Tämän hitaamman lujuudenkehityksen huomioon ottaminen lisää myös suunnittelutyötä ja voi kasvattaa suunnittelukustannuksia.

Vähähiillisen betonin tuotannossa käytettyjen seosaineiden, kuten masuunikuonan, saatavuus saattaa tulevaisuudessa olla rajallista, sillä ne ovat usein muiden teollisten prosessien sivutuotteita. Tämän vuoksi on tärkeää kehittää edelleen sementin valmistusprosesseja vähäpäästöisemmiksi, erityisesti panostamalla hiilidioksidin talteenottoon. Kerättyä hiilidioksidia voidaan hyödyntää muussa teollisuudessa tai varastoida, esimerkiksi maaperään. Tällöin betonista voidaan saada jopa hiilinegatiivista, kun otetaan huomioon karbonatisoitumisen myötä tapahtuva hiilensidonta.

Vähähiillisten betonien kehitystyö etenee jatkuvasti, joten työssä käytettävien materiaalien ja saatavuuden tiedot voivat muuttua ajan myötä. Esimerkiksi kiihdytinaineita kehitetään lyhentämään vähähiillisten betonien laadunvarmistusaikaa, jotta ne täyttäisivät vaatimukset jo 28 päivässä. Lisäksi vähähiillisten betonilaatujen saatavuus vaihtelee sijainnin mukaan, sillä kaikilla tehtailla ei ole käytettävissä tarvittavia raaka-aineita. Päivitettyä tietoa siitä, mistä eri vähähiillisyyssluokan betoneita on saatavilla, olisi erittäin hyödyllistä erityisesti pääkaupunkiseudun kaltaisilla alueilla, joissa useat tehtaot voivat tarjota hyvän saatavuuden.

## LÄHTEET

Allwood, J. M. et al. 2010. Options for Achieving a 50% Cut in Industrial Carbon Emissions by 2050. Viitattu 5.1.2024. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/41396625\\_Options\\_for\\_Achieving\\_a\\_50\\_Cut\\_in\\_Industrial\\_Carbon\\_Emissions\\_by\\_2050](https://www.researchgate.net/publication/41396625_Options_for_Achieving_a_50_Cut_in_Industrial_Carbon_Emissions_by_2050)

A-Insinöörit. 2023. Ilmastonmuutokseen sopeutuminen rakentamisen suunnittelussa. PDF-dokumentti. Viitattu 7.11.2024. Saatavilla: [https://www.ains.fi/hubfs/Oppaat/A-Insinoorit\\_Ilmastonmuutokseen-sopeutuminen-rakentamisen-suunnittelussa-opas.pdf?hsCtaTracking=3d7f53eb-2f0a-496c-9522-68a515d5b9e5%7C4e99c2e2-b172-4d93-ab5d-81d680089e88](https://www.ains.fi/hubfs/Oppaat/A-Insinoorit_Ilmastonmuutokseen-sopeutuminen-rakentamisen-suunnittelussa-opas.pdf?hsCtaTracking=3d7f53eb-2f0a-496c-9522-68a515d5b9e5%7C4e99c2e2-b172-4d93-ab5d-81d680089e88)

Betoni-lehti. 2022. BET2203\_84-89.pdf. Viitattu 10.2.2024. Saatavilla: [https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/10/BET2203\\_84-89.pdf](https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/10/BET2203_84-89.pdf)  
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Verkkodokumentti. Viitattu 23.9.2024. Saatavilla: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

Betonitieto. *Betonitieto – Kaikki betoniin liittyvä tieto yhdessä paikassa*. Haettu 13. marraskuuta 2024 osoitteesta <https://www.betonitieto.fi/>

JM Suomi Oy. 2023. Matka lähelle nollaa. Ilmastosuunnitelma 2023-2030. PDF-dokumentti. Viitattu 5.1.2024.

Järvinen, K. 2021. Analyysimenetelmien kehittäminen muoviputkien valmistusprosessin ohjaukseen ja laadunhallintaan (Diplomityö, LUT-yliopisto). Saatavilla: [https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164436/Diplomityö\\_Kai\\_Järvinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/164436/Diplomityö_Kai_Järvinen.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Komonen, H., Lehtinen, H., Passinmäki, P., Säynäjoki, A., Säynäjoki, E., Laine, L. & Rehunen, A. 2019. Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriö. Viitattu 23.9.2024. Saatavilla: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM\\_2019\\_22\\_Rakennuksen\\_vahahiilisyden\\_arviointimenetelma.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyden_arviointimenetelma.pdf)

Lahdensivu, J. 2022. Vähähiilisen betonin mahdollisuudet asuinkerrostalon hiilijalanjäljen pienentämisessä. Betonilehden PDF-dokumentti.

Novakova, R., Nemes, R., Eid, K. & Mann, S. 2023. Low Carbon Concrete. Vähähiilinen Betoni -hanke, Matbud 2023. Saatavilla: [https://vahahiilinenbetoni.fi/wp-content/uploads/2024/02/Matbud2023\\_Novakova-et.al\\_-\\_Low-carbon-concrete\\_v1.pdf](https://vahahiilinenbetoni.fi/wp-content/uploads/2024/02/Matbud2023_Novakova-et.al_-_Low-carbon-concrete_v1.pdf) [Viitattu 11.11.2024].

One Click LCA. 2023. Carbon Reduction in Construction: 2024 Outlook. Viitattu 14.2.2024. Saatavilla: <https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2023/12/231211-2-OneClickLCA-Final-2-1.pdf>

One Click LCA. Viitattu 21.4.2024. Saatavilla: <https://www.symetri.fi/tuotteet/one-click-lca/>

Pecafil. 2024. Pecafil® Permanent Formwork. Viitattu 7.11.2024. Saatavilla: <https://www.pecafil.com>

Rakentamisen päästötietokanta. CO2 Data. Viitattu 23.9.2024. Saatavilla: <https://co2data.fi/rakentaminen/>

Rajala, J. 2023. Vähähiilisen betonin ominaisuuksien huomioiminen uudisrakentamisen suunnittelussa. Aalto-yliopisto. Saatavilla: <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/1996f7cc-72c3-49c8-8f9c-4b9fcb4d3b03/content>

Suomen ympäristökeskus. 2020. Kohti vähäpäästöistä rakennuskantaa. Paula Sankelo ja Katriina Alhola. Viitattu 14.2.2024.

Unidome Deutschland GmbH. 2023. Shaping the Future of Sustainable Construction. PDF-dokumentti. Viitattu 7.11.2024. Saatavilla: Home - Unidome  
Virkkunen, A. 2020. Vesitaito. Saatavilla: Vesitaito Antti Virkkunen Esitys.pdf (hirsikoti.fi)

Vähähiilinen Betoni. Viitattu 11.2.2024. Saatavilla: <https://vahahiilinenbetoni.fi/>

YM. 2023. Saatavilla: <https://ym.fi/-/eduskunta-hyvakysi-rakentamisen-paastoja-pienentavat-ja-digitalisaatiota-edistavat-lait>

Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. Saatavilla: [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM\\_2019\\_22\\_Rakennuksen\\_vahahiilisyyden\\_arviointimenetelma.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf) [Viitattu 11.11.2024].

Ympäristöministeriö. 2021. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. Viitattu 26.9.2024. Saatavilla: <https://ym.fi/documents/1410903/38439968/V%C3%A4h%C3%A4hiilisen-rakentamisen-tiekartta>

Sulin Oy.asennusohje.pdf. (2024). *Laattakevenneiden ja raudoituksen asennusohjeet.*

